




Технология OFDM и новые концепции «последней мили»: малые соты (LTE/Femto)

Лохвицкий Михаил Сергеевич
(ИПК МТУСИ)



Современные системы связи характеризуются высокими скоростями передачи данных. При этом основной проблемой при передаче по радиоканалу является межсимвольная интерференция, возникающая при многолучёвом распространении сигналов.

Пример.

Пусть используется одна несущая, а скорость передачи

$V = 100 \text{ Мбит/с},$

Длительность 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 $S = 3000 \text{ м}.$

Увеличение длительности импульса значительно снижает межсимвольную интерференцию переотражённых сигналов, но приводит к снижению скорости передачи.

Идея метода **OFDM** (Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) в распараллеливании передаваемого сигнала на N отдельных низкоскоростных подпотоков с большой длительностью передаваемых символов. Каждый подпоток модулируется и передаётся на своей ортогональной поднесущей.

Спектр OFDM сигнала

Метод **OFDM** используется в Wi-Fi, WiMax, LTE, цифровом телевизионном вещании DVB и в звуковом вещании DRM.

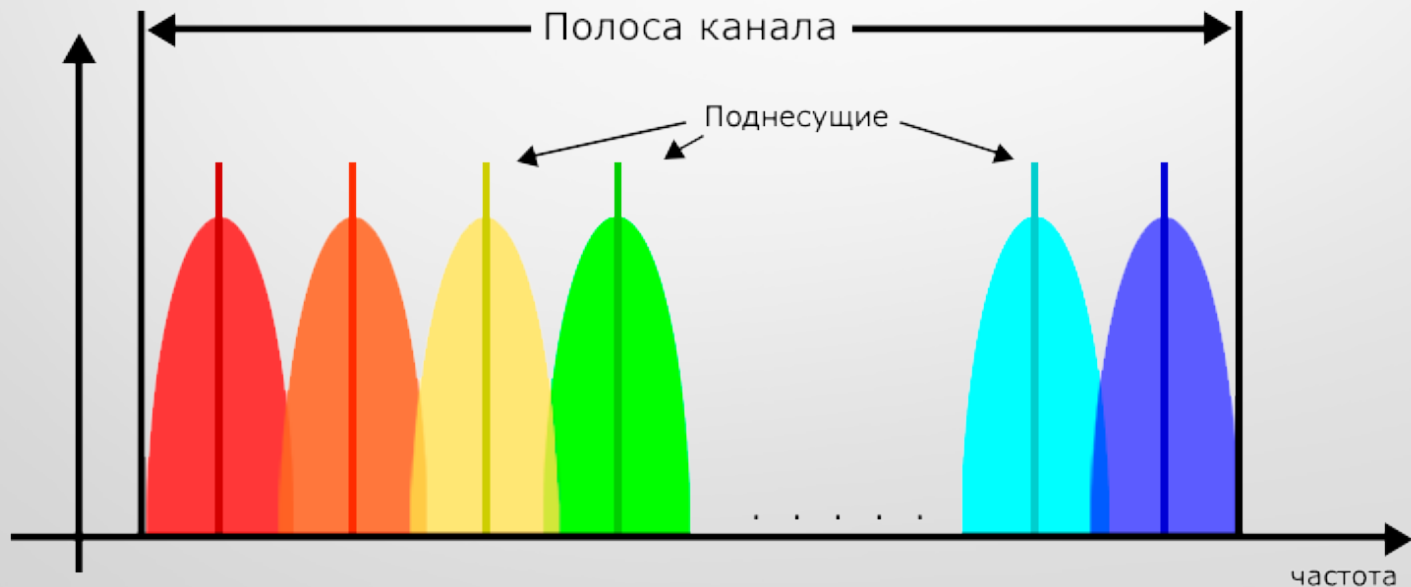


Рис. 1.

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):

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

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

**OFDM: Амплитуда одной из несущих имеет максимум, в то время как амплитуды остальных несущих равны нулю.
(учебный пример для 4 поднесущих).**

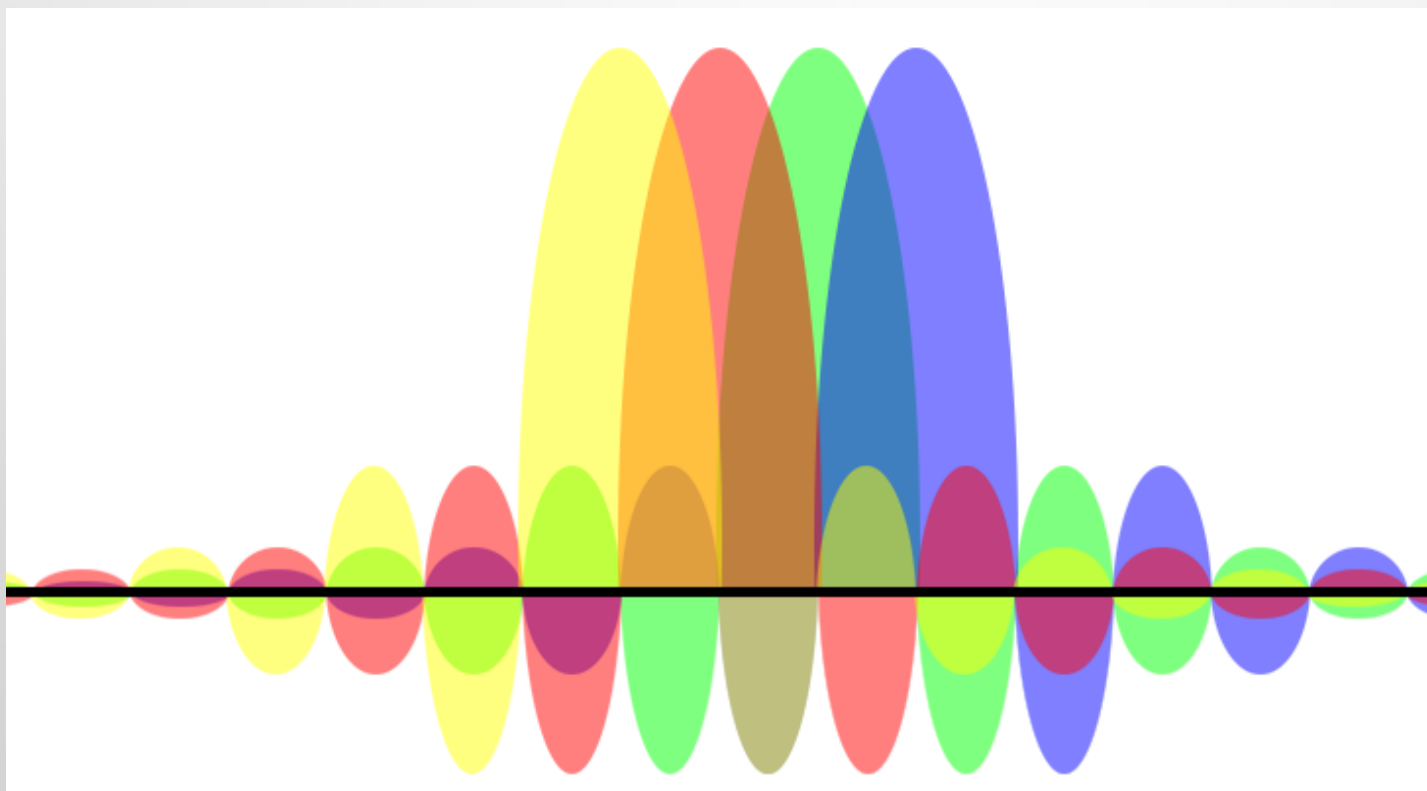


Рис. 2.

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
- В LTE используется тактирование с длительностью временной единицы, равной

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

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

Схема формирования сигнала OFDM (теория)

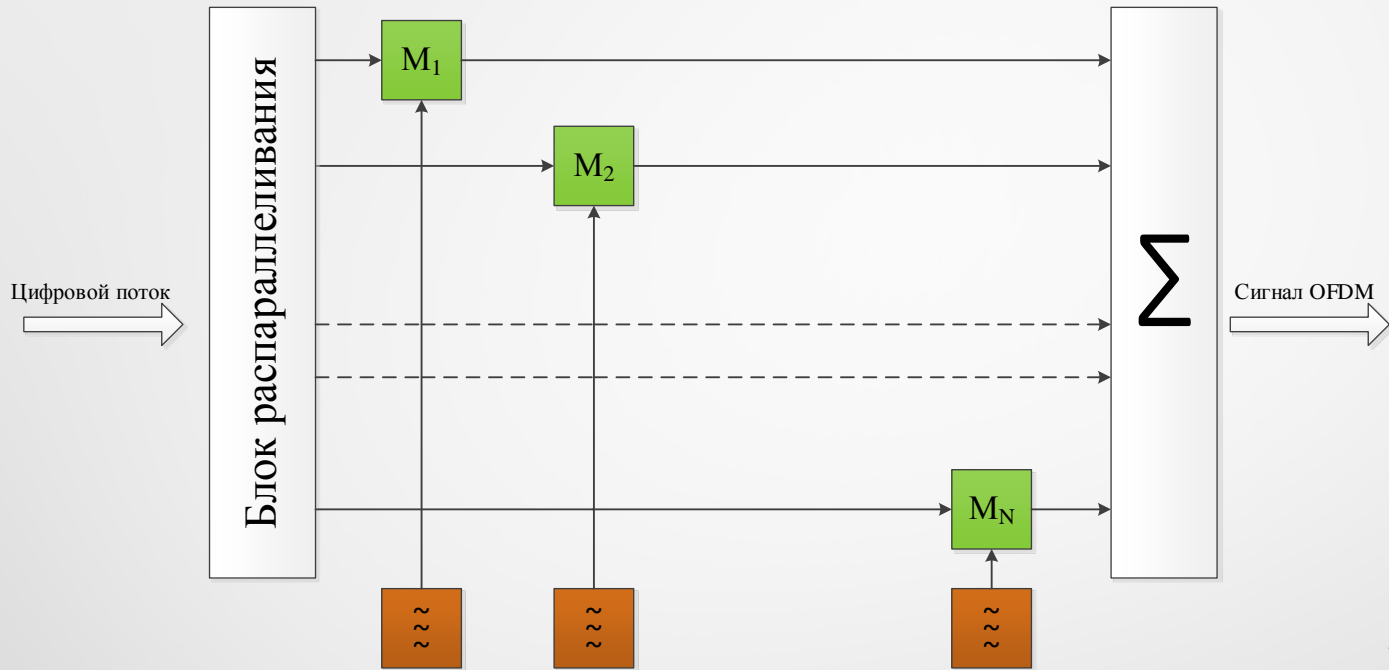


Рис. 3.

Формулы для обратного (2) и прямого преобразований Фурье (3).

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

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i k n}{N}} \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3)$$

Непосредственная практическая реализация схемы, изображенной на рис. 3, с количеством несущих от 200 до 2048, а в телевидении с 6817 несущих затруднительна. На практике эта схема заменяется эквивалентной схемой – левая часть на рис. 4. Дело в том, что модуляция с дальнейшим суммированием ортогональных составляющих по форме совпадает с дискретным преобразованием Фурье. Применение к этому сигналу обратного быстрого преобразования Фурье (в дискретной форме + цифро-аналоговый преобразователь) возвращает полученный «частотный» сигнал во временную область.

Схема формирования сигнала OFDM

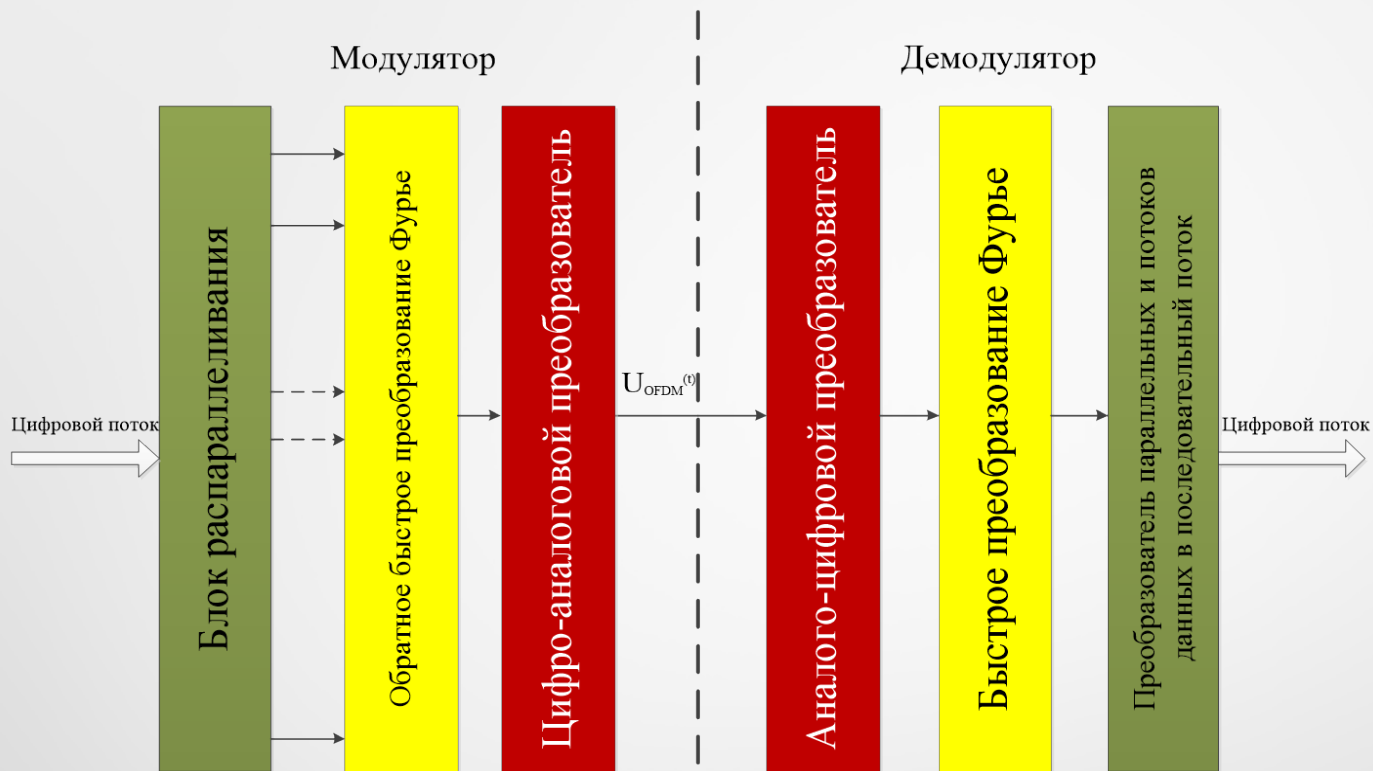


Рис. 4.

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 $N = 2^k$.

Защитный интервал

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

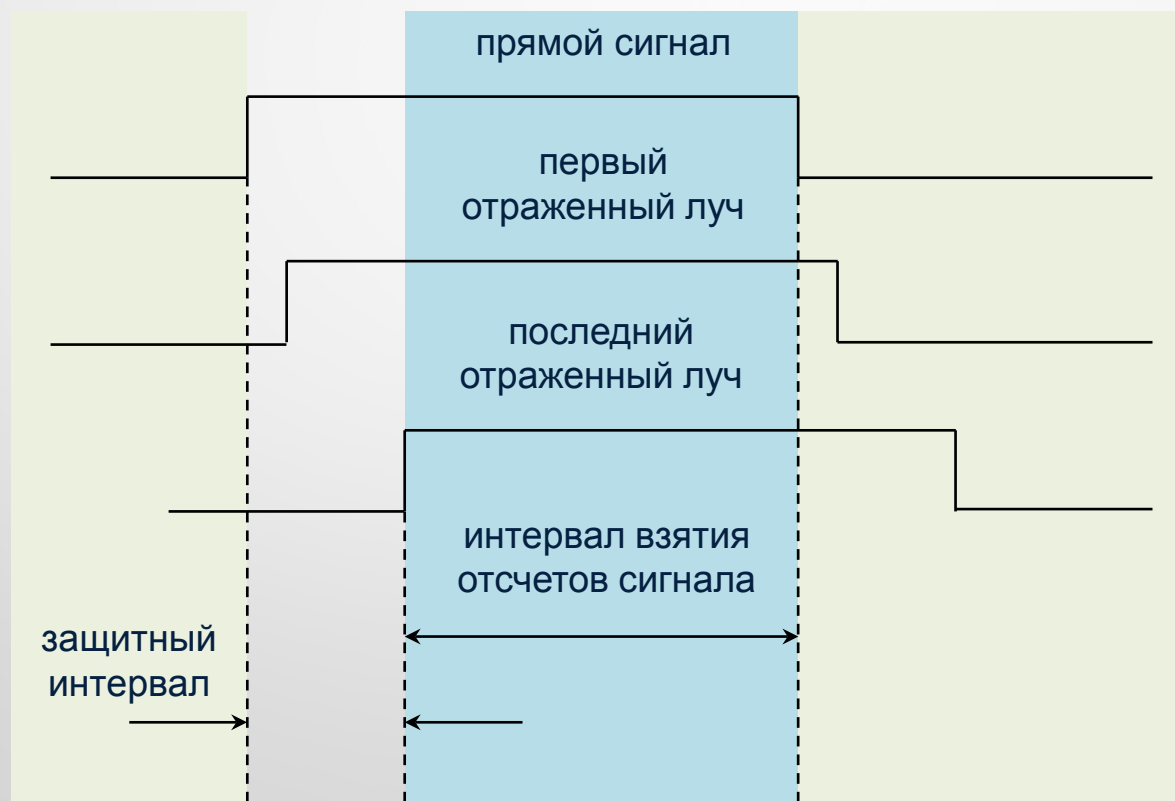
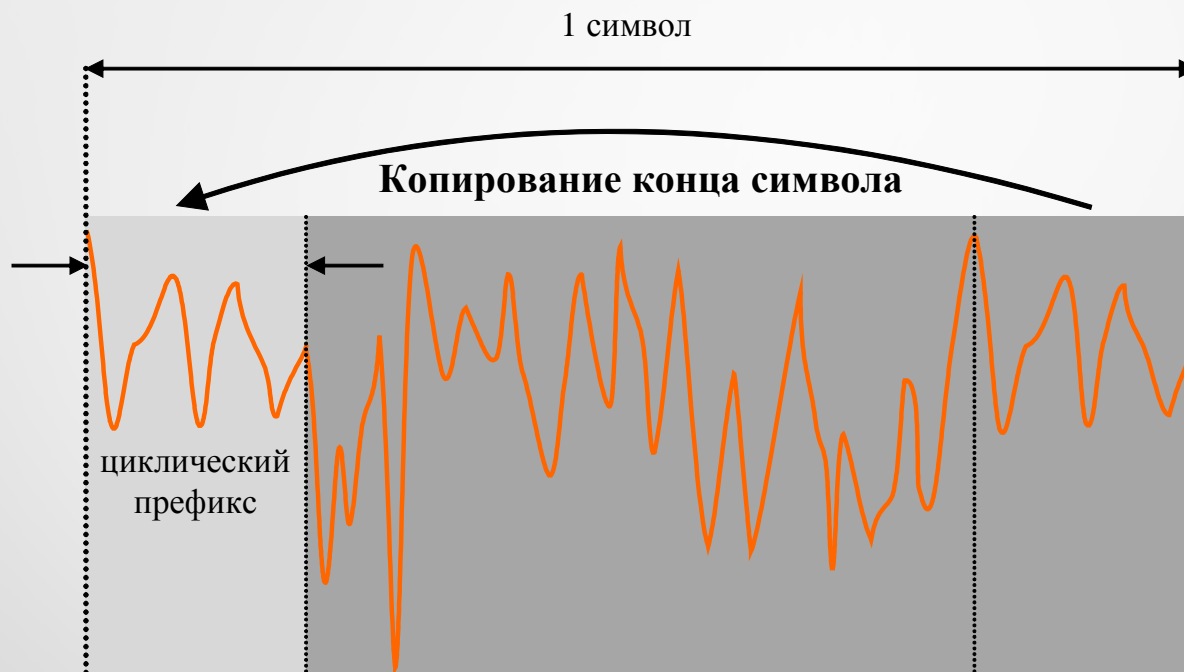


Рис. 5.

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 | $160/2048=7,8\%$ | $144/2048=7,0\%$ | $512/2048=25\%$ |

Алгоритмы оптимального приёма сигнала в каналах с многолучёвостью

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

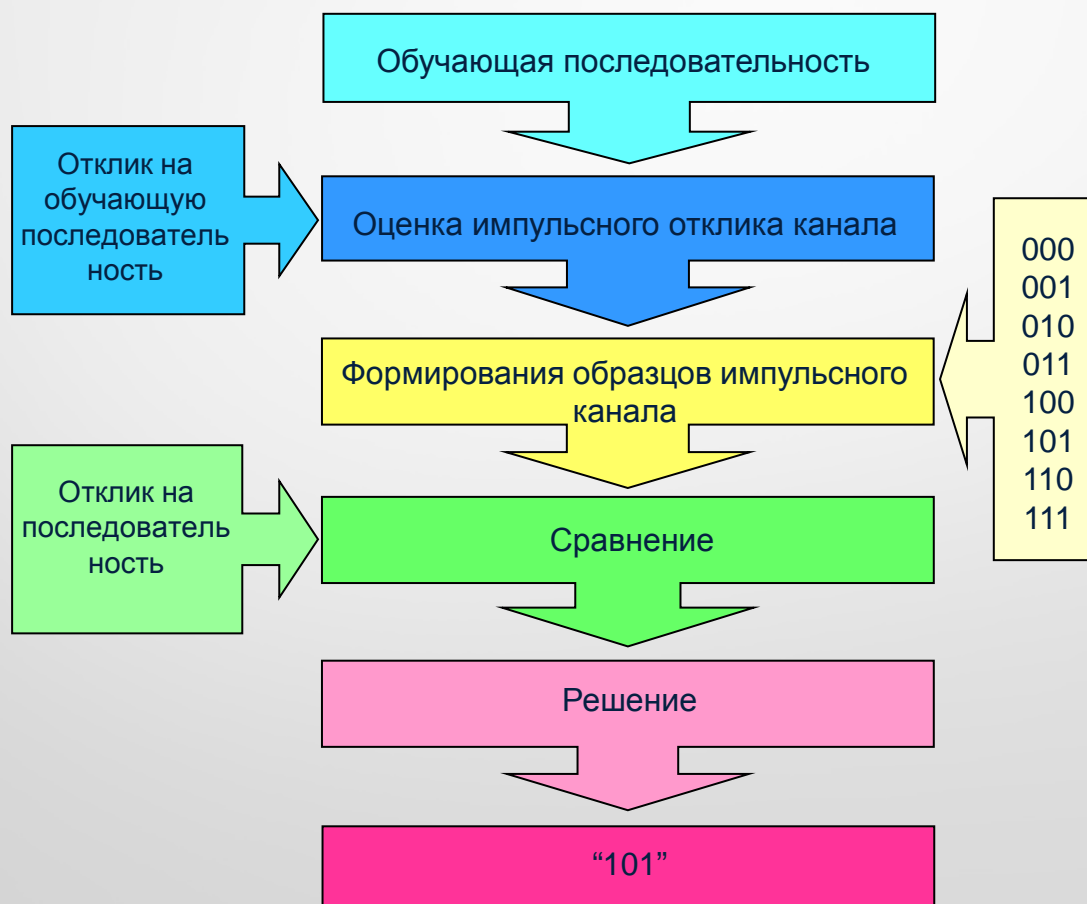
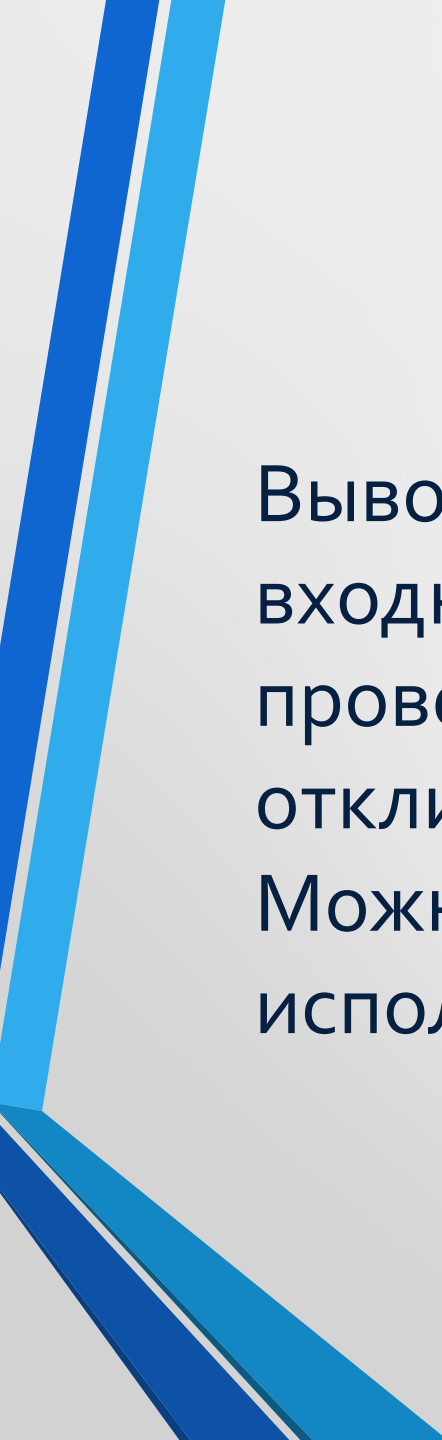


Рис. 7.



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

Можно сократить количество сравнений, используя алгоритм Витерби.

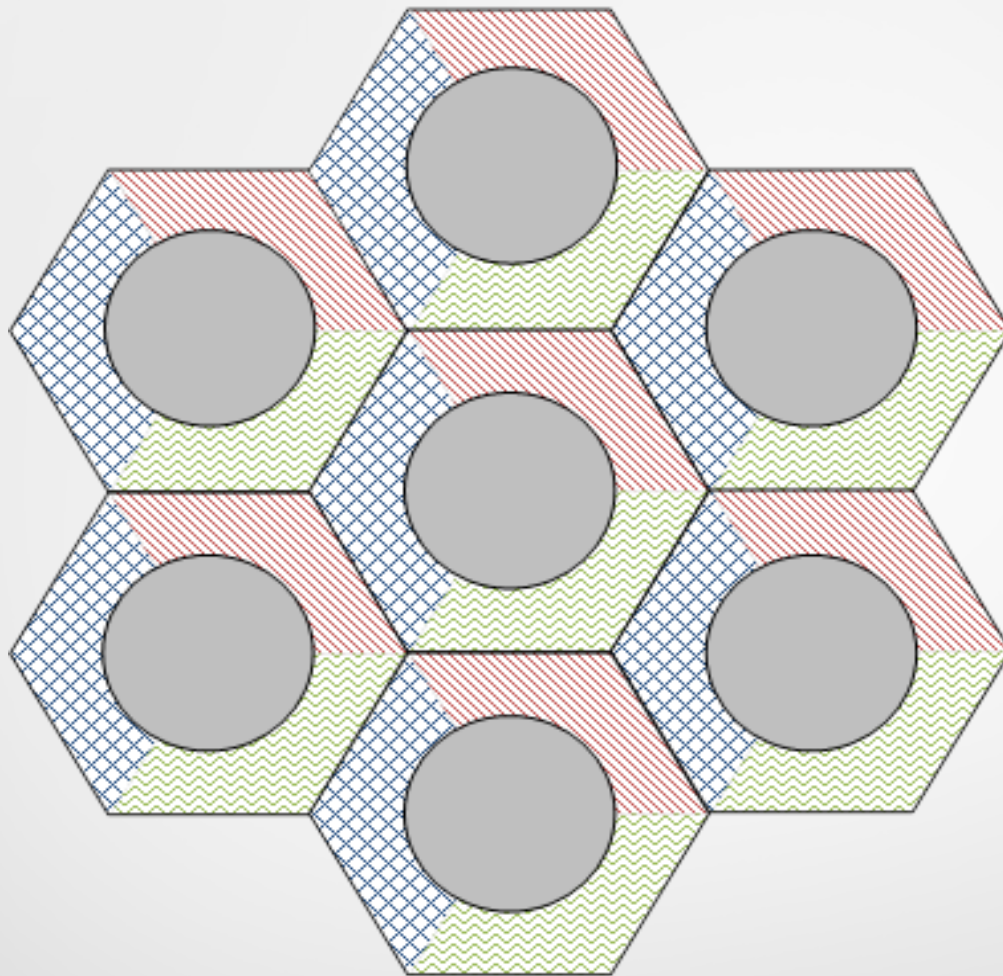


Рис. 6. Частотно-территориальный план LTE: внутри окружностей используется весь каналный ресурс, вне окружностей трёхсекторное частотно-территориальное планирование.

Фемтосоты (Femto Access Points)

Фемтосота – это небольшая сота, которая подключается к сети оператора через Интернет. Как правило для создания соты используется базовая маломощная станция 10 – 250 мВт в сети UMTS/LTE.

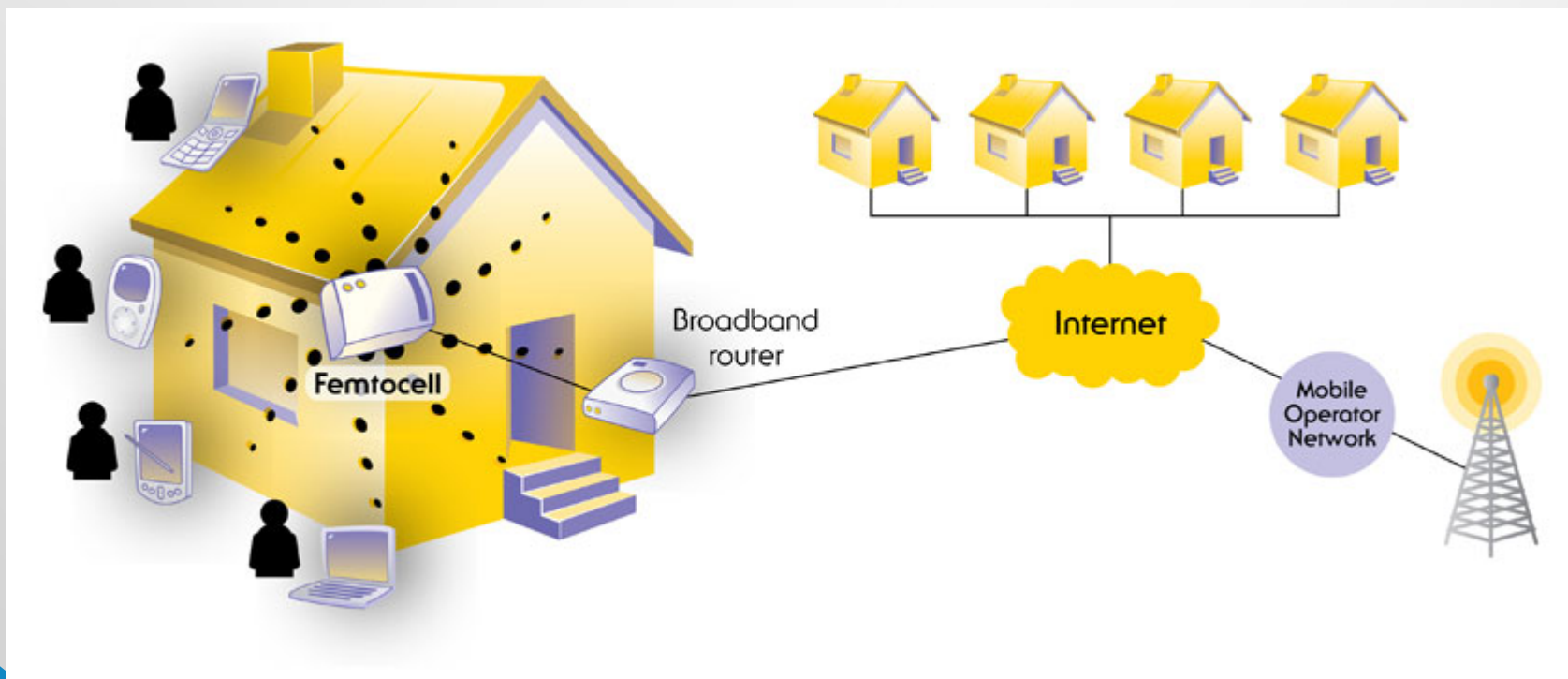


Рис.7. Схема фемтосети

Фемтосоту целесообразно использовать в следующих случаях:

- для улучшения качества обслуживания в труднодоступных местах (например, в подвальных помещениях) (Home Femto);
- в «умных домах» и для контроля доступа (Home Femto);
- в удаленных посёлках, в которых нет сотовой связи, но есть Интернет; при проведении различных мероприятий (Outdoor Femto);
- для организации дополнительных услуг (мобильный, практически бесплатный, интернет; внутренняя мини АТС с мобильными телефонами; регистрация сотрудников и т.д.) (Enterprise Femto).

Можно ограничить доступ к услугам фемтосети, используя список SIM карт. При регистрации в фемтосети возможно организовать синхронизацию со стационарным компьютером, т.е. заданная информация перекачивается со смартфона на компьютер.

Стоимость звонков в фемтосотах дешевле, так как оператору не нужно тратить деньги на развёртывание сети.

Вместо Интернета можно использовать обычные телефонные линии и технологию xDSL.

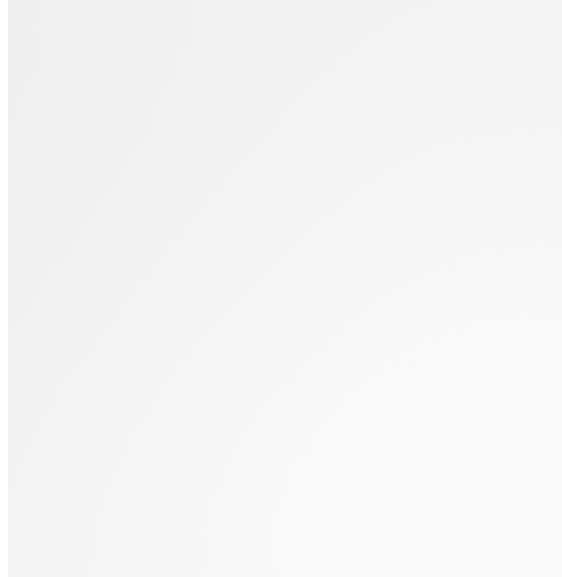


Рис. 8. Образцы оборудования для фемтосот со встроенными антеннами

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

Спасибо за внимание!