

Исправленная часть 2. Локальная радиосеть (физический уровень).



Volkov, 23 декабря 2015г.

1.4. Обоснование и подробное описание задач, выполняемых на физическом уровне. Проработка вопросов, связанных с обеспечением синхронизации сетевых устройств на физическом уровне. Обоснование структуры полей пакета физического уровня

Физический уровень - нижний уровень модели, назначение которого – достоверная передача потока битов поступающего с верхнего (канального уровня). На физическом уровне могут быть реализованы любые технические решения, направленные на повышение достоверности приема битов. В данной системе физический уровень предназначен для передачи данных в направлении терминал-точка и точка-терминал по средствам радиоканала. Основные задачи, выполняемые физическим уровнем:

- *модуляция и демодуляция* – заключается в переносе сигнала на несущую радиочастоту для передачи по радиоканалу;
- *помехоустойчивое кодирование и декодирование* – необходимо для обнаружения и исправления ошибок, соответственно для повышения помехоустойчивости системы. В разрабатываемой сети будет использоваться метод сверточного кодирования;
- *перемежение и деперемежение* – применяется с целью преобразования групповых ошибок в одиночные ошибки, которые проще исправляются с помощью сверточного кодирования;
- *OFDM-модуляция* – предназначена для борьбы с воздействием многолучевого распространения (подробнее будет рассмотрено ниже);
- *синхронизация* – обеспечение временной и частотной синхронизации всех узлов сети;
- *проведение радиоизмерений* – на основании оценки качества радиоканала будет выбираться определенный профиль передачи данных.

Для оптимальной передачи данных, система связи должна поддерживать несколько профилей и выбирать оптимальный на основе проводимых радиоизмерений. В разрабатываемой сети предполагается использование двух профилей передачи данных:

- профиль QAM-16 (базовая скорость передачи данных);
- профиль QAM-64 (увеличенная скорость передачи данных).

1.4.1. Анализ и обоснованный выбор мер по защите физического уровня от многолучевости

Многолучевость [7] возникает в том случае, если радиоволны приходят в точку приема, отразившись от различных препятствий на пути распространения. Из-за различия в длине пути эти радиоволны приходят с различным запаздыванием. В результате, если сигналы, пришедшие по разным путям, перекрываются, то между ними возникает интерференция, которая может привести к замираниям результирующего сигнала. В конечном счете, многолучевое распространение сильно увеличивает вероятность битовой ошибки, что ведет к потерям передаваемых данных.

Существуют различные методы борьбы с последствиями многолучевого распространения сигнала. В нашей работе для этих целей будет использоваться технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов OFDM [7] и перемежения потока битов.

В технологии OFDM (рис. 1) частотный диапазон разбивается равномерно между поднесущими (дополнительные несущие), количество которых может достигать до нескольких тысяч. Каждому передаваемому потоку назначается несколько таких поднесущих, т.е. каждый поток разбивается на N поднесущих, которые ортогональны между собой.

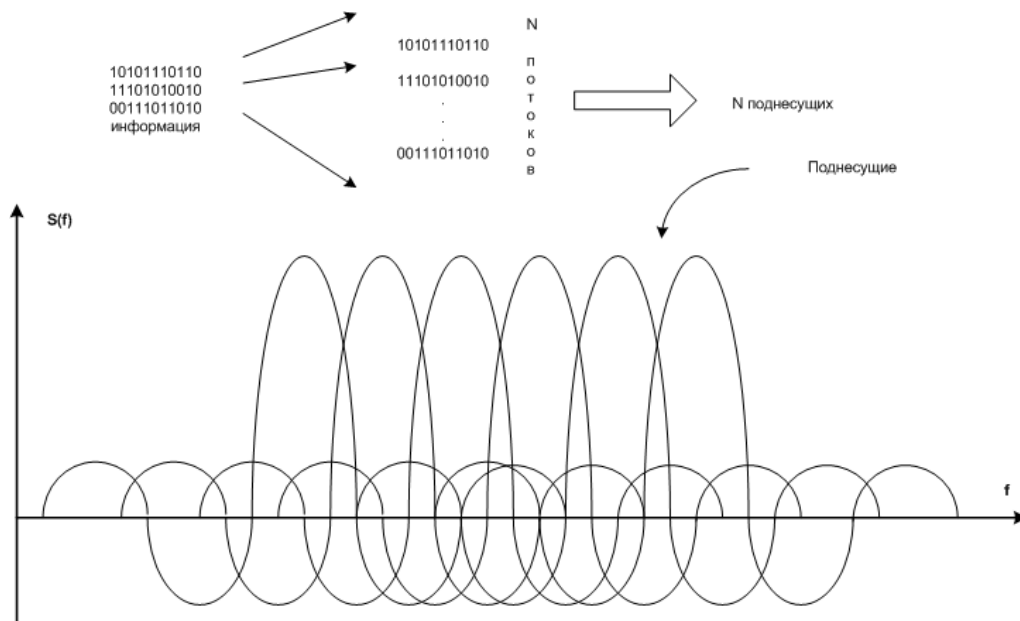


Рис 1 – Принцип OFDM-модуляции

Для борьбы с помехами в OFDM включён защитный интервал. Это возможно сделать, т.к. быстрый поток данных делится между поднесущими, на каждой из которых скорость подтока меньше первоначальной. За счёт этого можно выделить отрезок времени, который будет защищать основной сигнал от помех. Обычно в качестве защитного интервала используют так называемый циклический префикс, являющийся копией окончания сигнала размещённой впереди. Это позволяет сохранить ортогональность. Чем дольше защитный интервал, тем в более сложных условиях может передаваться OFDM сигнал.



Рис. 2 – Суть перемежения

Перемежение [8] является эффективным методом борьбы с группирующимися ошибками в каналах, подверженных глубоким замираниям. Суть метода в том, что символы кодового слова должны быть переставлены так, чтобы поражение группы символов происходило каждый раз в разных кодовых словах, т. е. поражение необходимо "рассеять" по многим кодовым словам.

1.4.2. Пояснение способа реализации проведения радиоизмерений на физическом уровне

Радиоизмерения проводятся при помощи специальной последовательности, включенной в кадр физического уровня, а именно, в его преамбулу. В качестве такой последовательности выбран 11-и позиционный код Баркера [9], так как коды Баркера обладают наилучшими свойствами шумоподобности, среди известных псевдослучайных последовательностей.

Код Баркера [10], представляет собой последовательность значений $a_i = \pm 1$ длиной $l \geq 2$, удовлетворяющую условию:

- для всех $1 \leq k < l$

Для случая $l = 11$, код Баркера представляет собой следующую последовательность: $\{+1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, -1, +1\}$.

Суть радиоизмерений состоит в измерении уровня центрального пика и боковых лепестков АКФ на приемной стороне. В случае, если измеренные параметры обеспечивают необходимое качество передачи, точка

доступа переключается на профиль передачи с повышенной скоростью (QAM-64).

1.4.3. Проработка структуры радиointерфейса L1-уровня, обеспечивающего двусторонний обмен пакетами физического уровня. Проработка профилей физического уровня и сценария их выбора. Определение типов пакетов физического уровня, обоснование структуры полей пакетов каждого типа, оценка размеров полей

Исходя из пункта 1.4 и 1.4.1, предлагается следующая структурная схема радиointерфейса (рис. 3). Обеспечение двустороннего обмена пакетами физического уровня достигается использованием двух трактов: приема и передачи. Назначение блоков структурной схемы совпадает с описанием аналогичных задач физического уровня (п. 1.4).

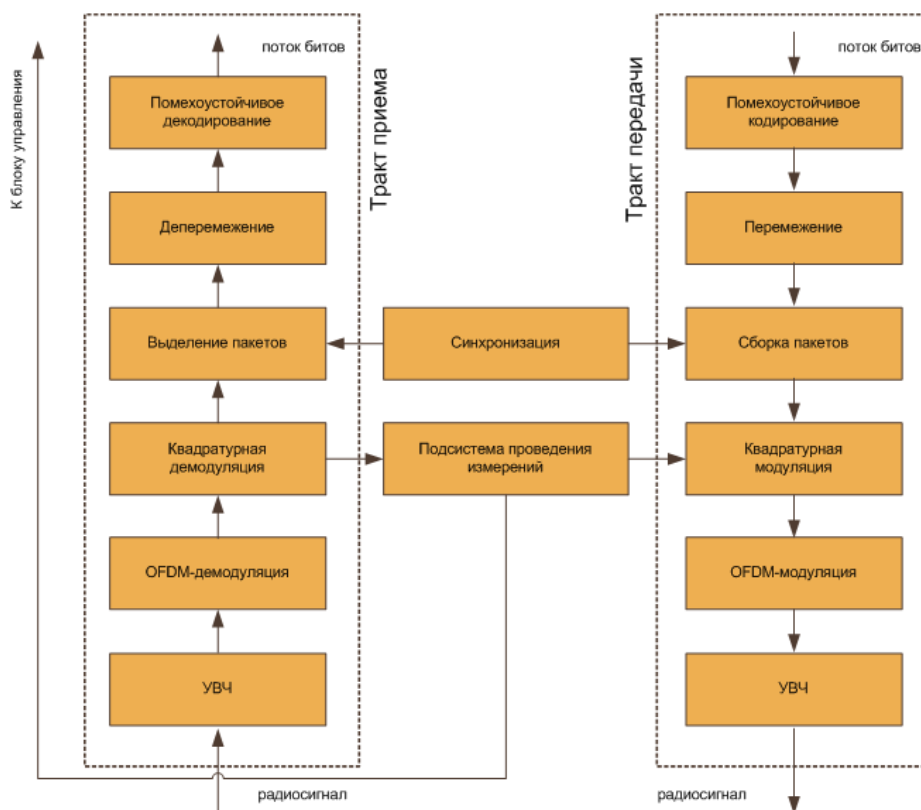


Рис. 3 – Структурная схема радиointерфейса

А так же, исходя из задач физического уровня, можно представить структурную схему кадра L1 (рис. 4), представляющую собой последовательность символов OFDM. Сообщение физического уровня состоит из нескольких полей: преамбулы, служебного поля и поля данных.



Рис. 4 – Кадр физического уровня

Преамбула предназначена для временной и частотной синхронизации, а также для работы подсистемы радиоизмерений. В преамбуле использованы 10 «укороченных» во времени и 2 полных OFDM символов.

Служебное поле содержит номер используемого профиля передачи (1 бит), поле указывающее на длину передаваемого сообщения, в ед. пакетов L2 (6 бит), поле адреса (5 бит). Всего поле содержит 12 бит и передается посредством одного OFDM символа.

Поле данных необходимо для непосредственной передачи данных и исправления ошибок в процессе передачи. Поле данных содержит закодированный и перемеженный пакет L2 объемом 600 бит. В целях упрощения, на рисунке 4 отображена лишь одна информационная часть. Однако для уменьшения времени передачи в один кадр могут быть включены несколько информационных частей (несколько пакетов L2). Количество передаваемых пакетов, как уже было сказано, указывается в составе служебного поля (рис. 4).

Количество бит на символ различно в зависимости от выбранного профиля:

- для QAM-16: 4 бита на символ;
- для QAM-64: 6 бит на символ.

Поле служебной информации и преамбула модулируются QAM-16 с целью повышения помехоустойчивости. Модуляция последующих символов зависит от содержания служебного поля.

Соответственно, для QAM-16 информационная часть будет состоять из $600/4 = 150$ символов, а для QAM-64 из $600/6 = 100$ символов. Служебное поле всегда состоит из $12/4 = 3$ символов.

Одним из основных параметров OFDM-модуляции является количество поднесущих. Строгой формулы для расчета их количества не существует. Увеличение количества поднесущих положительно сказывается на помехоустойчивости передачи, однако увеличивает и сложность реализации такой системы. Так же, из-за того что для формирования OFDM-сигнала используется ДПФ желательно чтобы число поднесущих было кратно степени двойки, тогда вместо ДПФ можно использовать его более эффективный аналог – БПФ.

Зададим количество поднесущих равное $2^6 = 64$. Распределим их следующим образом (рис. 5):

- 51 поднесущих содержат информацию;
- по 4 поднесущим передается пилот-сигнал для проведения радиоизмерений;
- 8 поднесущих являются защитными интервалами, по краям OFDM-символа;
- одна поднесущая – центральная;



Рис. 5 – Структура поднесущих

Сводная таблица проработки профилей передачи будет представлена ниже, после расчета обоих профилей в п. 1.4.8, таблица 3.

Выбор того или иного профиля осуществляется точкой доступа на основании результатов работы подсистемы радиоизмерений (п. 1.4.2). По умолчанию устанавливается профиль с низкой скоростью и высокой помехозащищенностью передачи данных – QAM-16. Подсистема радиоизмерений осуществляет измерение мощности на входе приемника в каждом подканале, в котором осуществляется передача сообщений. Результаты измерения направляются в блок управления, где происходит сравнение мощности сигнала в подканале со стандартным уровнем мощности. При выявлении улучшения или ухудшения качества КС уровень принятия решений формирует команду на смену профиля функционирования.

1.4.4. Пояснение способа обеспечения частотной и временной синхронизации

Для формирования и выделения ортогональных поднесущих в OFDM-системах используется пара преобразований Фурье [11]. Для минимизации влияния эффектов межсимвольной интерференции между отдельными символами вводятся паузы - защитные интервалы. На приемной стороне изначально не известен момент прихода очередного символа. Кроме того, во избежание потери ортогональности поднесущих при демодуляции, требуется точное фазовое и частотное согласование приемника и передатчика во всей полосе принимаемых сигналов. Фазовое и частотное рассогласование обусловлено разбросом и нестабильностью частот опорных генераторов передатчика и приемника при переносе спектра и доплеровским сдвигом (в подвижной связи). Влияние ошибок синхронизации возрастает с ростом числа поднесущих. Поэтому для минимизации фазовых искажений сигнала на приемной стороне, а, следовательно, вероятности ошибки при демодуляции, в OFDM-системах необходима как временная, так и частотная синхронизация. Во временной и частотной областях OFDM-символы представлены дискретными отсчетами; благодаря технической сложности выполнения быстрого преобразования Фурье больших размерностей, количество отсчетов на символ совпадает с количеством поднесущих.

Процесс синхронизации разбивается на следующие этапы [11]:

1. Временная синхронизация (из сигнала во временной области);
2. Корректировка смещения по времени (схемотехнически);
3. Синхронизация по частоте (из сигнала во временной области);
4. Корректировка смещения по частоте (схемотехнически).

Специальных каналов для частотной подстройки и временной синхронизации, необходимые для

синхронизации ТД и терминалов не требуется. Это объясняется тем, что в разрабатываемой радиосети будет использоваться технология OFDM, в этой технологии предусмотрены специальные поля, выполняющие функцию синхронизации.

1.4.5. Оценка пропускной способности физического канала связи с учетом избыточности, вносимой на L1-уровне. Оценка требуемых частотных ресурсов

С учетом избыточностью вносимой на физическом уровне оценим минимально необходимую пропускную способность канала:

$$(612/262) * 8 \approx 18,7 \text{ Мбит/с}$$

где 612 – общее количество битов на сообщение физического уровня, а 262 – число информационных бит.

На основании полученного значения оценим минимально необходимую полосу частот. Для QAM-16, минимально необходимая (эффективная) полоса сигнала:

$$\Delta f = R / \log_2 n = 18,7 \times 10^6 / 4 = 4,675 \text{ МГц},$$

где: R – скорость передачи бит/с, n – кратность модуляции.

Из условия одинаковой скорости кодирования и занимаемой полосы частот найдем скорость передачи для QAM-64:

$$R = \Delta f \cdot \log_2 n = 4,675 \times 6 \times 10^6 = 28,05 \text{ Мбит/с},$$

где: Δf – эффективная полоса сигнала для QAM-16, n – кратность модуляции.

1.4.6. Обоснованный выбор частотного диапазона (на основании документов ГКРЧ); аргументированный выбор модели оценки потерь при распространении радиоволн выбранного диапазона, расчет уровня потерь

На основании Постановления Правительства Российской Федерации от 25 июля 2007 г. № 476 ("О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2004 г. № 539 "О порядке регистрации радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств") [6], предусмотрено свободное использование частотного диапазона 2,4 ГГц с мощностью излучения до 100 мВт. Согласно п. 1.4.5 и [6] выберем рабочую полосу частот: 2400 – 2408,32 МГц.

Предполагается, что ТД и терминалы находятся внутри одного офисного здания, в пределах 3 этажей (точка доступа находится на центральном этаже). В качестве модели потерь выбирается ITU – R 1238-8 [12], поскольку она учитывает:

- потери при многократном прохождении сигнала через пол;
- поправку на потери при прохождении сигнала через стены и над или через препятствия;
- другие механизмы возникновения потерь, которые могут возникнуть в пределах одного этажа здания (мебель, различная электроника и т.д.).

Базовая математическая модель [12] потерь имеет вид:

$$L_{\text{total}} = L(d_0) + N \log_{10}(d/d_0) + L_f(n) \text{ [дБ]}$$

где: $L(d_0)$ – потери на заданном расстоянии при идеальных условиях распространения (нормальные условия и абсолютно плоская поверхность), N – дистанционный коэффициент потерь мощности, d – дальность связи, $L_f(n)$ – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через пол, n – максимальное количество этажей между точкой доступа и терминалами.

Согласно [12], возможно использование упрощенной модели, при которой $d_0 = 1 \text{ м.}$, а $L(d_0) = 20 \log_{10} f - 28 \text{ [дБ]}$. Тогда модель потерь примет вид:

$$L_{\text{total}} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \text{ [дБ]}$$

где: f – частота (МГц), N – дистанционный коэффициент потерь мощности, d – дальность связи (м), $L_f(n)$ – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через пол (дБ), n – максимальное количество этажей между точкой доступа и терминалами.

Таблица 1. Коэффициенты потери мощности, N , используемые при расчете потерь передачи внутри помещения для 2,4 ГГц [12]

| Частота | Жилые дома | Офисы |
|---------|------------|-------|
| 2,4 ГГц | 28 | 30 |

Таблица 2. Коэффициенты потери мощности L_f , при прохождении сигнала через пол для 2,4 ГГц ($n = 1$) [12]

| Частота | Жилые дома | Офисы |
|---------|--------------------------------|-------|
| 2,4 ГГц | 10 (квартира), 5 (частный дом) | 14 |

Разрабатываемая система передачи, предполагает использование в офисном помещении в пределах 3 этажей ($n = 1$), соответственно из таблиц 1 и 2 имеем: $L_f(n) = 14$ дБ, $N = 30$.

Тогда потери в канале связи:

$$L_{total} = 20 \log_{10}(2400) + 30 \log_{10}(80) + 14 - 28 \text{ дБ} = 110,697 \text{ дБ}$$

1.4.7. Расчет отношения сигнал/шум, требуемого для обеспечения заданной вероятности битовой ошибки для выбранного вида и типа модуляции/демодуляции. Обоснование выбора метода помехоустойчивого кодирования, перемежения/деперемежения, расчет эффективности кодирования. Коррекция данных расчета отношения сигнал/шум с учетом метода помехоустойчивого кодирования. Окончательная оценка требуемых частотных ресурсов

Расчет необходимого отношения сигнал/шум производился в утилите BER Analysis Tool из пакета программ Matlab. Согласно ТЗ необходимо обеспечить вероятность битовой ошибки менее 2×10^{-7} . В ходе анализа были получены следующие зависимости, для двух видов модуляции:

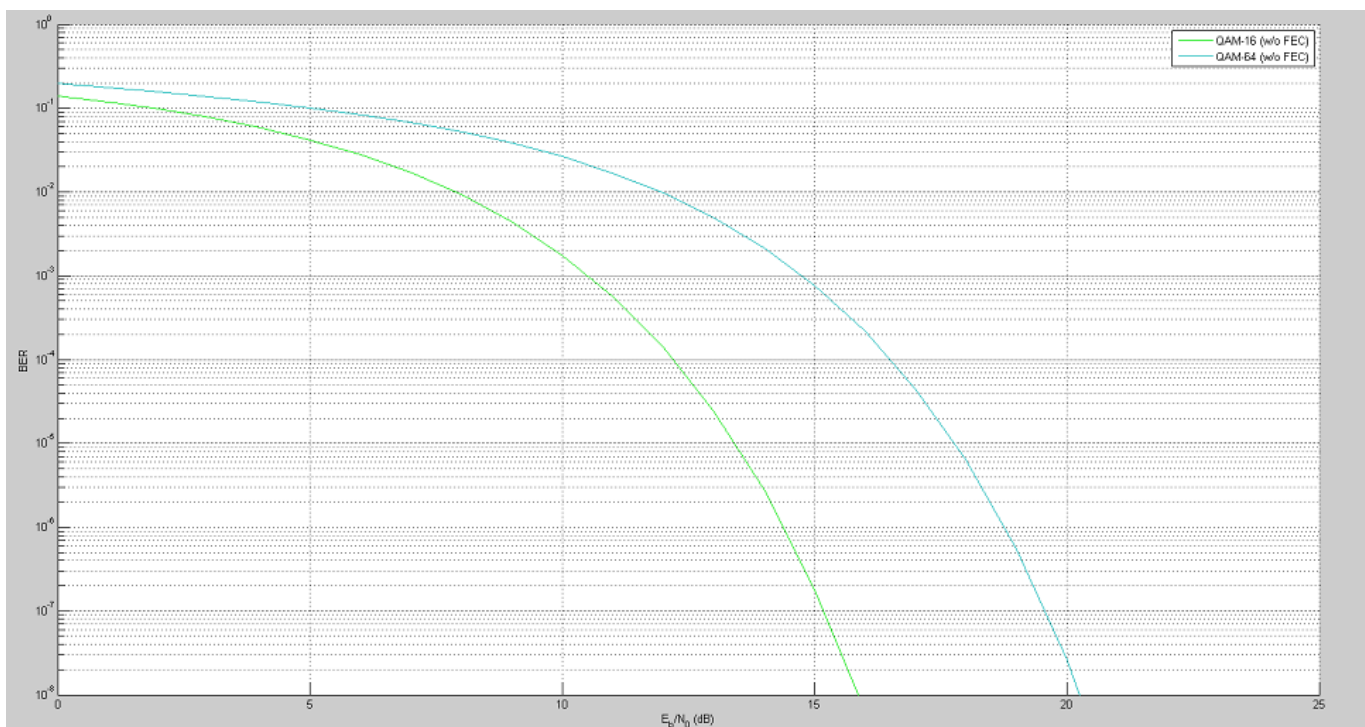


Рис. 6 – Зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ (без кодирования)

Исходя из изображенных графиков (рис. 6), можно сделать вывод, что для обеспечения заданной вероятности битовой ошибки требуется ОСШ равное:

- 15,1 дБ для профиля QAM-16;
- 19,25 дБ для профиля QAM-64.

Очевидно, что в условиях низкого отношения сигнал-шум данная система будет работать неэффективно. Для увеличения порога ОСШ в системе используется добавление определенной избыточной информации к исходной последовательности [8].

Оценим необходимое для выполнения ТЗ ОСШ, с учетом сверточного кодирования, по умолчанию выставлен порождающий многочлен (171, 133), для двух профилей передачи:

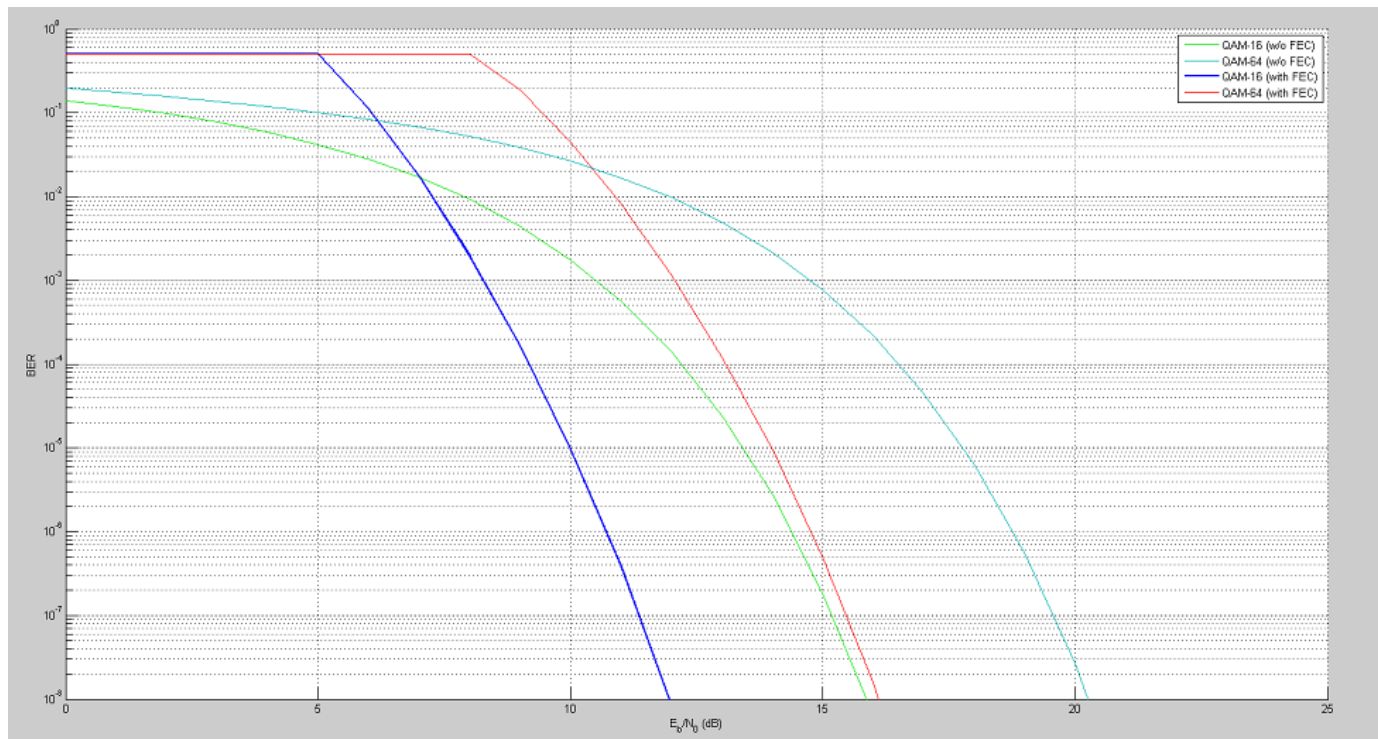


Рис. 7 – Зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ (без кодирования и с применением кодирования)

Исходя из изображенных графиков (рис. 7), можно сделать вывод, что для обеспечения заданной вероятности битовой ошибки требуется ОСШ равное:

- 11,3 дБ для модуляции QAM-16, что на $15,1 - 11,3 = 3,8$ дБ эффективнее по сравнению с передачей без кодирования;
- 15,2 дБ для модуляции QAM-64, что на $19,25 - 15,2 = 4,05$ дБ эффективнее по сравнению с передачей без кодирования.

Пережатие в данной сети используется для обеспечения борьбы с пакетными ошибками.

Оценка минимально необходимой полосы производилась в пункте 1.4.5 и коррекции не требует.

1.4.8. Оценка уровня мощности передачи с учетом необходимого запаса мощности сигнала для его уверенного приема с вероятностью PR % на границе радиопокрытия, оценка размера зоны радиопокрытия

Перед началом расчетов зададимся некоторыми параметрами среды и системы:

- Кол-во поднесущих OFDM: 64;
- Коэффициент усиления передающей антенны: $G_T = 10$ дБ;
- Коэффициент усиления приемной антенны: $G_R = 6$ дБ;
- Цифровое отношение сигнал/шум исходя из п. 1.4.7:

- для QAM-16 $E_b/N_0 = 11,3$ дБ;
- для QAM-64 $E_b/N_0 = 15,2$ дБ;
- Затухания в канале связи из п. 1.4.6: $L = 110,697$ дБ;
- Скорость передачи данных после кодирования из п. 1.3.8:
 - для QAM-16 $R_C = 18,7$ Мб/с;
 - для QAM-64 $R_C = 28,05$ Мб/с;
- Шумы каскадов: $N_k = 3$ дБ;
- Резерв мощности из-за замираний в канале связи: $P_3 = 3$ дБ;
- Постоянная Больцмана: $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К;
- Шумовая температура (нормальные условия): $T = 296$ К.

Расчет уровня мощности передачи для профиля *QAM-16*. Сначала расчет ведется для одной информационной поднесущей:

Скорость передачи данных по каждому из параллельных каналов OFDM:

$$R_N = R_C / 51 = 18,7 \times 10^6 / 51 = 366,666 \times 10^3 \text{ бит/с} = 366,666 \text{ кбит/с.}$$

Минимально необходимая полоса пропускания одного OFDM канала:

$$\Delta f = R_N / \log_2 16 = (366,666 \times 10^3) / \log_2 16 = 91,666 \times 10^3 \text{ Гц} = 91,666 \text{ кГц.}$$

Шумовая полоса одного OFDM канала:

$$P_{\text{ш}} = \Delta f \times 1,1 = 91,666 \times 10^3 \times 1,1 = 100,833 \times 10^3 \text{ Гц} = 100,833 \text{ кГц.}$$

Мощность шума:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T \cdot P_{\text{ш}} = 1,38 \times 10^{-23} \cdot 296 \cdot 100,833 \times 10^3 = 411,884 \times 10^{-18} \text{ Вт} = -123,85 \text{ дБ.}$$

Аналоговое отношение сигнал/шум:

$$C/N = (E_b / N_0) + 10 \log(R_N / P_{\text{ш}}) = 11,3 + 10 \log(366,666 / 100,833) = 16,907 \text{ дБ.}$$

Чувствительность приемника:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ш}} + N_k + C/N = -123,85 + 3 + 16,907 = -103,943 \text{ дБ.}$$

Мощность передатчика (на один канал OFDM):

$$P_{\text{изл}} = P_{\text{прм}} + P_3 + L - G_T - G_R = -103,943 + 3 + 110,697 - 10 - 6 = -6,246 \text{ дБ} = 0,24 \text{ мВт.}$$

Суммарная мощность передатчика (с учетом 51-ой информационной и 4-ех пилотных поднесущих):

$$P_{\text{излСУМ}} = (51 + 4) \times 0,24 = 13,2 \approx 14 \text{ мВт.}$$

ТЭГИ (ЧЕРЕЗ ЗАПЯТУЮ)

