

# Анализ современных видов манипуляции сигнала беспроводных систем связи

Э. В. Прощенок, А. Ю. Родионов

В данной работе представлен обзор современных видов манипуляции сигнала, таких как иерархическая квадратурная амплитудная модуляция (HQAM), круговая квадратурная амплитудная модуляция (CQAM) и параметрическая квадратурная амплитудная модуляция ( $\theta$ -QAM). Проведено моделирование вышеупомянутых видов модуляции и квадратурной амплитудной модуляции (QAM) с помощью языка программирования MATLAB. Для сравнения четырех выбранных видов модуляции используются два вида порядка модуляции: 16 и 64. Для оценки эффективности использования того или иного вида модуляции был смоделирован канал связи, в который были добавлены аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ), доплеровские частотные искажения и неточная кадровая синхронизация.

*Ключевые слова:* модуляция, квадратурная амплитудная модуляция, иерархическая квадратурная амплитудная модуляция, круговая квадратурная амплитудная модуляция, параметрическая квадратурная амплитудная модуляция.

## 1. Введение

В наше время нельзя представить современный мир без систем связи, так как они стали неотъемлемой частью человеческого взаимодействия. Системы связи позволяют эффективно передавать информацию в аналоговой и цифровой формах, создавая подходящий тип модуляции или манипуляции, который необходим для того или иного случая в зависимости от требований к характеристикам сигнала.

В последнее время все большее распространение находят сигналы в цифровой форме, потому как они обладают рядом преимуществ в сравнении с аналоговыми сигналами: неограниченные возможности обработки сигнала; большая помехоустойчивость; лучшее распределение спектра; большая дальность связи; экономичность энергии при передаче; возможность кодирования информации; надежное и долгое хранение. Так как цифровая информация может разбиваться на кадры, пакеты, сегменты, то каждый из пакетов может наделяться своим собственным адресом, представленным в виде цифрового кода, и при этом все эти пакеты могут по-разному маршрутизироваться в зависимости от текущей загруженности каналов (благодаря этому возможна сеть Интернет, IP-телефония, создание виртуальных каналов между двумя и более пользователями).

Беспроводные технологии нашли свое широкое применение с конца 19 века и по сей день. В то время как проводные системы требуют развертки нередко дорогостоящих кабелей и планирования помещений с учетом их размещения внутри последних, а также проектирования передачи сигнала на дальнее расстояние с использованием не только кабелей, но и подвесов к ним, беспроводные технологии намного легче справляются с проблемой внедрения в окружающее пространство за счет передачи информации с помощью радиоволн, которые используют окружающее пространство как канал связи, что и является их основным преимуществом.

Однако стоит помнить и о том, какие сложности могут возникнуть с беспроводными технологиями. Необходимо учитывать электромагнитную совместимость таких систем, а также уровень излучения в окружающее пространство. Кроме этого, нужно очень тщательно планировать размещение беспроводных систем, так как на их работу оказывают существенное влияние различные препятствия в виде деревьев, зданий и стен, которые могут сделать распространение радиоволн затруднительным на высоких частотах.

Современные методы модуляции используются в различных системах сотовой связи, спутниковых системах, беспроводных локальных сетях, в телевизионных стандартах. Высокоуровневые методы модуляции широко используются в развивающихся стандартах Wi-Fi. Основное применение в современных системах связи находят такие виды модулирования сигналов, как: двоичная фазовая манипуляция (BPSK), квадратурная фазовая манипуляция (QPSK), квадратурная амплитудная модуляция (M-QAM) и другие. На основе этих типов модуляции были созданы передовые способы передачи сигнала, такие как HQAM (hierarchical QAM), CQAM (circular QAM),  $\theta$ -QAM (параметрическая квадратурная амплитудная модуляция).

В данной работе будут рассмотрены современные методы манипуляции, наиболее часто используемые в системах связи, а также с помощью языка программирования MATLAB будет проведено моделирование некоторых видов манипуляций для сравнения их характеристик.

## 2. Теоретический раздел

### 2.1. Иерархическая модуляция

Иерархическая модуляция – это технический прием, позволяющий отдельно обрабатывать в одной полосе частот модуляции часть битов как QPSK при фактически используемой модуляции 16 QAM, 64 QAM и других. Назначение такой обработки состоит в том, чтобы получить более высокую помехоустойчивость при извлечении наиболее значимой части информации. Сущность иерархической модуляции заключается в таком выборе параметров сигнальных векторов, который приводит к образованию в цифровом потоке двух или более виртуальных каналов с разной скоростью передачи, помехозащищенностью и, соответственно, зоной обслуживания. Характеристики виртуальных каналов определяются различными комбинациями точек в сигнальном пространстве и различными скоростями кодирования.

При воздействии помех изменяются амплитуда и фаза сигналов. В результате изменяется значение сигнала – принятый сигнал отличается от переданного. Чем ниже отношение сигнал/шум, тем выше вероятность ошибок и выше вероятность перехода сигнала в другой квадрант.

В созвездии 64 QAM в пределах одного квадранта под действием помех меняются только младшие биты информации, а старшие остаются одинаковыми (рис. 1). Выделив два старших бита информации, получается созвездие, ничем не отличающееся от QPSK (рис. 2).

Иерархическая модуляция может быть однородной и неоднородной. В созвездии однородной иерархической модуляции расстояния между символами и от крайних символов до осей равны, в неоднородной их отношение  $\alpha$  равно величине, которая может принимать значения 2 или 4 (рис. 3). Для однородной модуляции значение  $\alpha$  всегда равно 1.

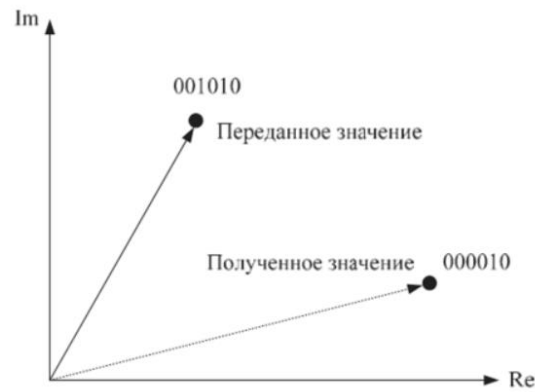


Рис. 1. Изменение значения сигнала под действием помех (64 QAM)

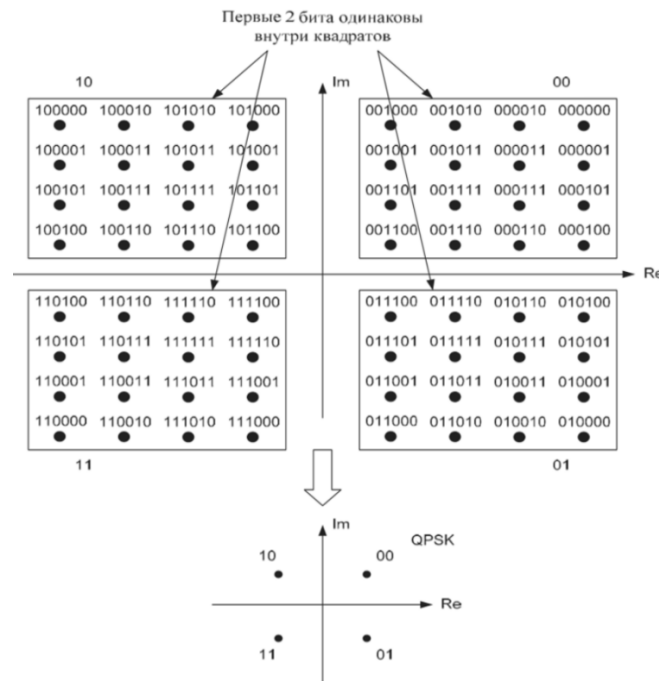
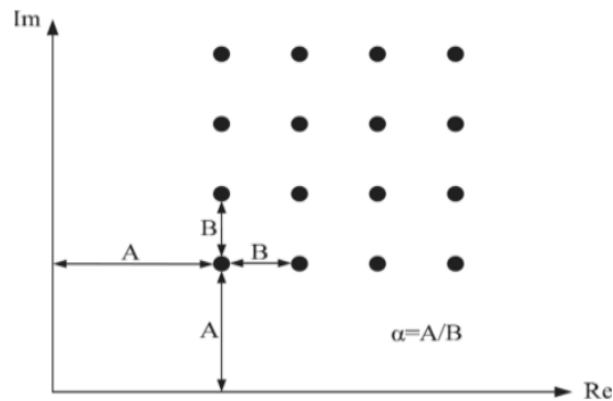


Рис. 2. Сочетание QPSK (снизу) и 64 QAM (сверху) в иерархической модуляции

Изменение  $\alpha$  позволяет перераспределить надежность доставки (подверженность помехам) между потоками высокого и низкого приоритетов. Дело в том, что при увеличении  $\alpha$  возрастает расстояние между точками созвездия разных квадрантов и уменьшается расстояние между точками созвездия одинаковых квадрантов. Поэтому при увеличении  $\alpha$  увеличивается надежность доставки потока высокого приоритета и уменьшается низкого [1].

Рис. 3. Параметр  $\alpha$  в иерархической модуляции

## 2.2. Круговая квадратурная амплитудная модуляция

Обычным квадратным группам QAM присущи характеристики, которые подразумевают значительные сложности при реализации CPE (Carrier Phase Estimation – оценка фазы несущей) в когерентных системах. Созвездия кругового QAM (CQAM) обеспечивают более высокую гибкость, поскольку они могут быть построены с произвольным распределением фазы сигнальных точек, количеством кругов амплитуды и количеством сигнальных точек в круге [3]. Характеристики CQAM могут быть оптимизированы и разработаны для повышения устойчивости как к фазовому, так и к аддитивному шуму [4, 6]. Такая гибкость позволяет исследовать оптимальные комбинации для различных сценариев, которые могут даже превзойти квадратную QAM. Кроме того, характеристики C-mQAM могут использоваться для реализации CPE в простом приемнике с прямой связью, который не требует дополнительных этапов для адаптации совокупности или сложной аппаратной реализации [4].

Построение созвездий C-mQAM можно проиллюстрировать на примере созвездия C-16QAM, которое имеет 16 (4/4/4/4) сигнальных точек, распределенных по 4 кругам амплитуды (в отличие от квадрата 16QAM, который имеет 4/8/4 сигнальных точек, распределенных в 3 круга амплитуды). Внутри каждого круга существует постоянное разделение фаз  $\pi/2$  между символами, и каждый последующий круг вращается на  $\pi/2$ . Таким образом, C-16QAM имеет 16 сигнальных точек, распределенных по 8 возможным фазовым положениям и 4 уровням амплитуды, как показано на рис. 4 (а). Радиусы кругов амплитуды неоднородны, чтобы гарантировать, что расстояние между соседними сигнальными точками близко к минимальному расстоянию между сигнальными точками в самом маленьком круге. Поскольку для C-16QAM количество соседних сигнальных точек для данной сигнальной точки не равно или меньше количества битов на символ ( $m = 4$ ), схема отображения Грея не может быть реализована, как для квадратного QAM [5]. Вместо этого для C-mQAM сигнальное созвездие формируется с точки в первом круге амплитуды с наименьшей фазой, равной 0. Последующее отображение назначается путем увеличения номера символа против часовой стрелки, а затем от круга наименьшей амплитуды до наибольшего, как показано на рис. 4а. Расположение точек на сигнальном созвездии для C-64QAM показано на рис. 4б.

В общем, круговые созвездия высокого порядка C-mQAM строятся с помощью простого набора правил [8, с. 22]:

1) Количество кругов в виде  $N_k = 2^{(b/2)}$ , где  $b$  – количество бит в символе, а  $(b/2)$  – это переход к следующему целому числу.

2) Количество сигнальных точек созвездия на круг определяется как  $N_p = 2^m / N_k$ , где  $m$  – количество бит на символ.

3) Дополнительный фазовый сдвиг для четных кругов созвездий определяется как  $\varphi_{\text{shift}} = \pi / N_p$ .

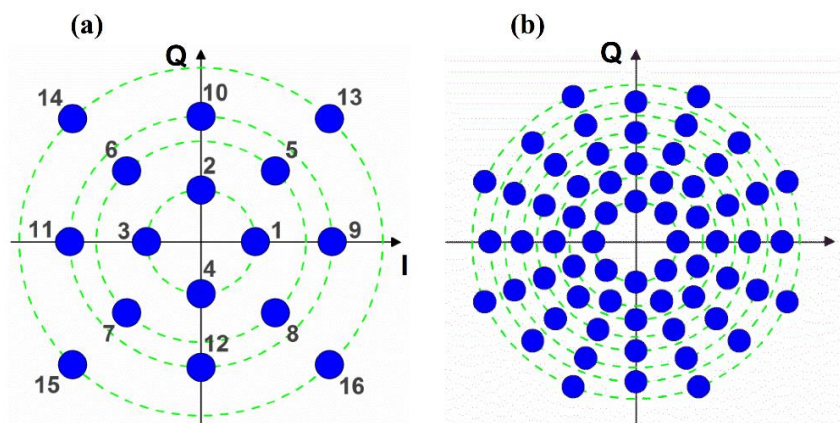


Рис. 4. Созвездия CQAM: (а) C-16QAM, (б) C-64QAM

### 2.3. Параметрическая квадратурная амплитудная модуляция

Семейство параметрической квадратурной амплитудной модуляции (QAM), называемое  $\theta$ -QAM, которое включает в себя другие известные созвездия, такие как квадратный QAM (SQAM) и треугольный QAM (TQAM), как частные случаи. Универсальная структура  $\theta$ -группировки сигналов QAM, возникающая из-за изменения угла между сигнальными точками, приводит к достижению минимума частоты ошибок битов (BER) при ограничении средней мощности.

По итогам работы [2] было установлено, что оптимальные созвездия образуют решетку почти равносторонних треугольников, которые обеспечивают улучшение SNR на 0,5 дБ по сравнению с обычными форматами созвездий QAM, учитывая каналы аддитивного белого гауссовского шума (далее – АБГШ).

Теоретическое исследование направлено на обеспечение понимания компромисса между сложностью и производительностью по каналам АБГШ и замираниями этой схемы параметрической модуляции, которая включает практические случаи TQAM и SQAM как особые случаи.

Для начала рассматривается констелляция M-SQAM, где двоичные данные отображаются при помощи двух координат  $(x_m, y_n)$ , каждая из которых образует переданный символ  $s_{m,n}$  и полностью  $M$  векторов символов  $s_p$ , где  $p = 1, \dots, M$ ;  $M = 4 \cdot k$ ;  $k \in \mathbb{Z} + u \{m, n\} \in [1, \dots, \sqrt{M}]$ .

Структура созвездия проиллюстрирована на рис. 5, на котором  $M = 16$ . Символы SQAM размещаются по углам квадратов со стороной  $2d$ . Таким образом, евклидово расстояние между любыми двумя соседними символами равно  $2d$ , где  $d$  зависит от порядка модуляции  $M$  и изменяется соответствующим образом, так что общая средняя энергия созвездия остается равной  $E_{av}$ .

В созвездиях семейства  $\theta$ -QAM расстояния между символами следующие:

$$D(s_{m,n}, s_{m,n+1}) = 2d, n = 1, \dots, \sqrt{M} - 1, \quad (1)$$

$$D(s_{m,n}, s_{m+1,n}) = 2d, m = 1, \dots, \sqrt{M} - 1. \quad (2)$$

Однако символы лежат не по краям квадрата, а по углам равнобедренных треугольников; симметрия созвездия относительно точки  $(0, 0)$  сохраняется (рис. 5). Неравномерный угол  $\theta$  этих равнобедренных треугольников влияет на евклидово расстояние несмежных символов, как показано на рис. 9, где символы  $\theta$ -QAM изображены для различных значений угла  $\theta$  (символы созвездия TQAM показаны как треугольники).

Практически этот угол влияет на значение полной средней энергии на символ  $E_{av}$ .

Координаты символов  $s_{m,n}$  созвездия  $\theta$ -QAM, в котором  $M = 16$ , могут быть получены после некоторых простых тригонометрических вычислений, как показано на рис. 8.

Наконец, координаты  $x_m, y_n$  символа  $s_{m,n}$   $M$ -ого созвездия  $\theta$ -QAM задаются следующим образом:

$$(x_m, y_n) = \left( \left[ 2 \cdot (n-1) + 1 - \sqrt{M} \right] \cdot d + \left[ 2 \bmod(m, 2) - 1 \right] \cdot \frac{a}{2} - \left[ 2 \cdot (m-1) + 1 - \sqrt{M} \right] \cdot \frac{b}{2} \right), \quad (3)$$

где  $n = 1, \dots, \sqrt{M}$ ;  $m = 1, \dots, \sqrt{M}$ ;  $\bmod(\cdot)$  обозначает модуль после деления;  $2d$  – евклидово расстояние между соседними сигнальными точками;  $a = 2d \cos \theta$ ;  $b = 2d \sin \theta$ .

Также стоит отметить, что с теоретической точки зрения угол  $\theta$  может принимать значения внутри интервала  $(0, \pi)$ , но из-за симметрии учитываются только углы, меньшие, чем  $\pi/2$ .

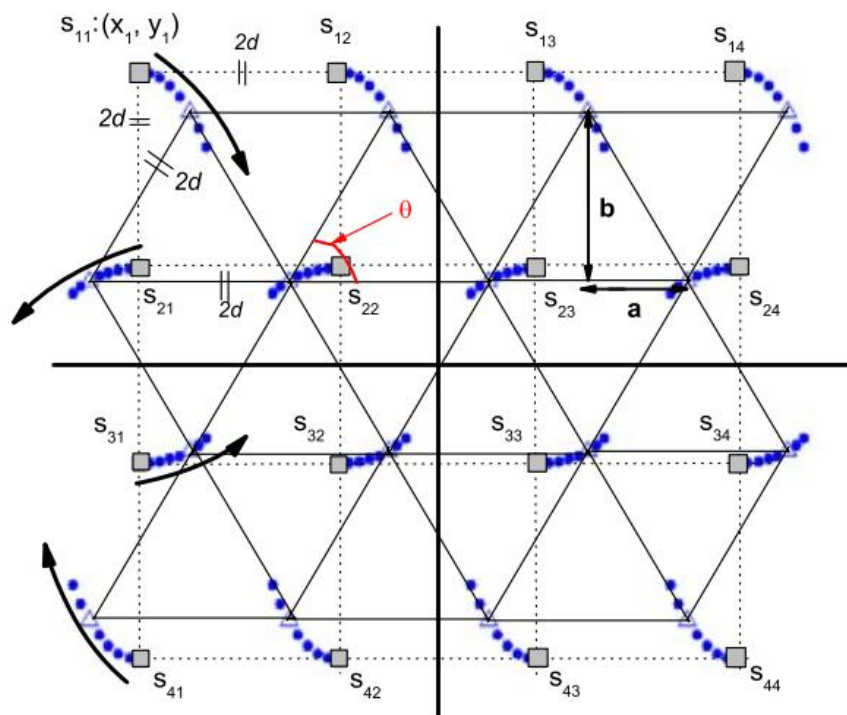


Рис. 5. Структура созвездия  $\theta$ -QAM. Сигнальные точки SQAM изображаются в виде квадратов, а символы TQAM – в виде треугольников, вершины одного из треугольников  $s_{21}$ ,  $s_{22}$  и  $s_{31}$ .

### 3. Разработка математической модели

Цель моделирования заключается в экспериментальной оценке исследуемых видов манипуляции. Также необходимо изучить, какие характеристики сигналов, использующих разные виды манипуляций, будут получены в канале, приближенном к реальному, и сравнить их с теоретическими сведениями.

Задачи моделирования:

1. Создать созвездия исследуемых типов модуляции.

На данном этапе необходимо создать созвездия, соответствующие рассматриваемым видам модуляции для дальнейшего изучения их характеристик. В качестве программной среды разработки модели служит MATLAB, а именно код, который моделирует сигнал в канале.

2. Разработать модель канала связи с АБГШ и различными искажениями сигнала.

Для исследования трёх выбранных видов манипуляции необходимо создать такие условия передачи сигнала, которые будут отличаться от идеальных. Например, будут использованы такие мешающие факторы успешной передачи сигнала, как АБГШ, доплеровское смещение и неточная кадровая синхронизация.

3. Провести моделирование.
4. Выполнить анализ результатов.

Для начала моделирования необходимо создать исследуемые типы модуляции.

Для сравнения строится созвездие QAM. В эксперименте будут использованы два уровня модуляции: 16 и 64.

### 3.1. Квадратурная амплитудная модуляция

При моделировании в качестве опорной точки будет использовано стандартное созвездие QAM. Сигнальное созвездие 16 и 64 QAM было приведено в разделе 2. Код для формирования созвездий 16 QAM и 64 QAM доступен по ссылке [6].

### 3.2. Иерархическая квадратурная амплитудная модуляция

Иерархическая квадратурная амплитудная модуляция создается на основе обычной QAM. Особенность заключается в расположении точек на созвездии рядом с условными осями фазы и квадратуры. Сигнальное созвездие 16 HQAM было приведено в разделе 2. Код для формирования созвездий 16 HQAM и 64 HQAM доступен по ссылке [7].

### 3.3. Круговая квадратурная амплитудная модуляция

Круговая квадратурная амплитудная модуляция имеет особенности при построении. Для начала строится базовое созвездие QPSK, которое располагается на первой окружности, радиус которой равен 1. Оно имеет расположение на осях, а не между ними в квадрантах. Следующие четыре точки второй окружности сдвинуты относительно точек первой на 45 градусов. В первой окружности минимальное расстояние между точками (между точками 2 и 3) равняется 1.41 (рис. 6). Эта же величина задается как минимальное расстояние между точками первой и второй окружности (расстояние между точками 1 и 4). Для того, чтобы найти расстояние между началом координат и точкой 4, необходимо воспользоваться теоремой косинусов.

*Теорема 1. Квадрат стороны треугольника равен сумме квадратов двух других сторон минус удвоенное произведение этих сторон на косинус угла между ними:*

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \alpha,$$

где  $a$  – расстояние от точки 1 до точки 4;  $b$  – расстояние от начала координат до точки 1;  $c$  – искомое расстояние;  $\alpha = 45^\circ$ .

По теореме 1 расстояние между точкой 0 и 4:

$$c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \alpha + (b^2 - a^2) = 0.$$

Данное выражение имеет вид квадратного уравнения. Тогда значение  $c$  будет определяться как:

$$c = \frac{2 \cdot b \cdot \cos \alpha + \sqrt{(-2 \cdot b \cdot \cos \alpha)^2 - 4 \cdot (b^2 - a^2)}}{2}.$$

$$c = \frac{2 \cdot 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \sqrt{\left(-2 \cdot 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 - 4 \cdot (1^2 - 1.41^2)}}{2} = 1.93.$$

Для нахождения точек третьей окружности необходимо воспользоваться двумя вспомогательными окружностями, центрами которых являются любые две точки первой окружности. Точки третьей окружности располагаются также на координатных осях фазы и квадратуры, что и точки первой окружности. На пересечении вспомогательных окружностей и осей координат будут располагаться точки третьей окружности. В итоге получается, что расстояние между второй окружностью и третьей меньше, чем между первой и второй, и минимальное расстояние между точками второй окружности и третьей равно 1.72. Четвертая окружность удалена от третьей на такое же расстояние, что и вторая от первой. Следующие окружности

при более высоком уровне модуляции будут иметь равные расстояния между собой: расстояние между первой окружностью и второй равно расстоянию между второй и третьей и равно расстоянию между третьей и четвертой и т.д.

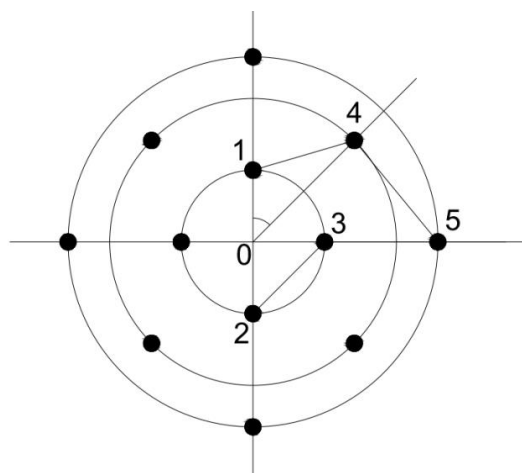


Рис. 6. Определение расположения точек на сигнальном созвездии для CQAM

Код для формирования созвездий 16 CQAM и 64 CQAM доступен по ссылке [8].

### 3.4. Параметрическая квадратурная амплитудная модуляция

Параметрическая квадратурная амплитудная модуляция так же, как и иерархическая, строится на основе созвездия QAM. Однако её особенность состоит в том, что расстояние между любыми точками одинаково и задаётся равным 1.15. Такое значение выбирается с той целью, чтобы площади сигнальных созвездий определенных уровней модуляции были примерно равны. В эксперименте за основу расположения точек на сигнальном созвездии берется не квадрат, как в QAM, а равносторонний треугольник. Код для формирования созвездий 16 PQAM и 64 PQAM доступен по ссылке [9].

## 4. Структура модели и обработка результатов

### 4.1. Принципы работы модели

С помощью программного языка MATLAB формируется модель, структурная схема которой приведена на рис. 7 и 8. Код для получения модели доступен по ссылке [10].

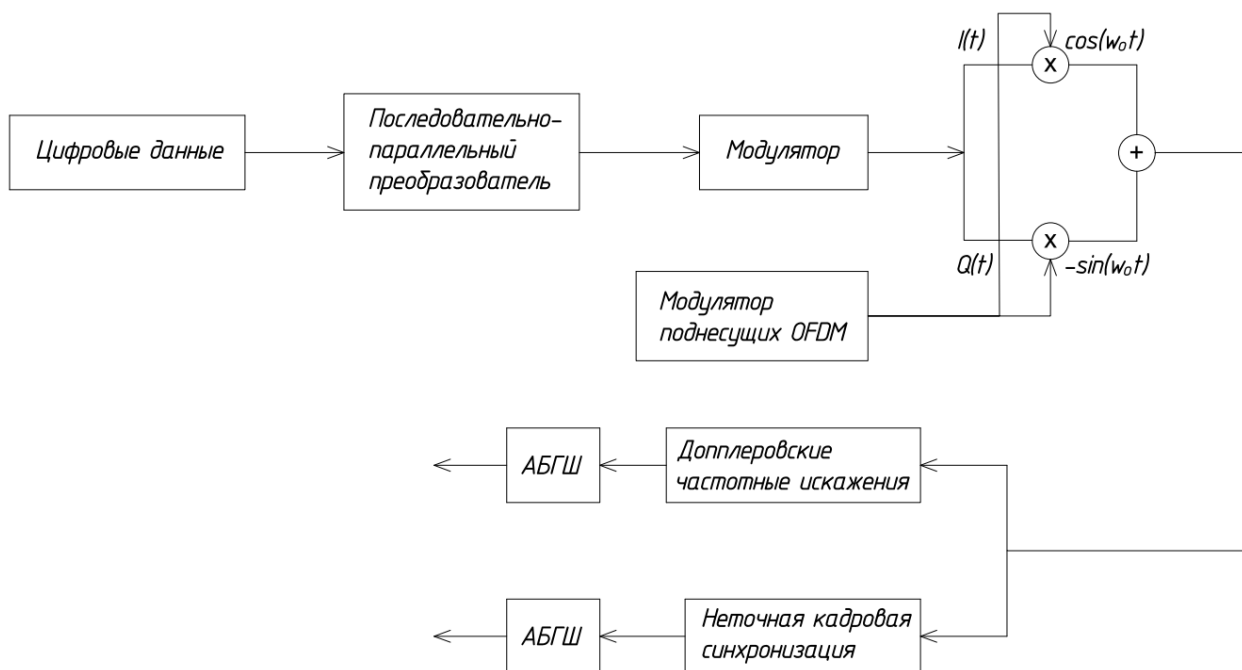


Рис. 7. Структура модели для модуляции сигнала

Ниже представлено описание схемы на рис. 7.

*Формирование двоичной последовательности для передачи.*

На данном этапе формируется случайная двоичная последовательность длиной 153 600 символов.

*Преобразование двоичной последовательности в вид, пригодный для использования поднесущих OFDM.*

Исходный сигнал необходимо распределить между поднесущими OFDM с помощью последовательно-параллельного преобразователя. Кроме этого, двоичный сигнал преобразуется в десятичный для простоты работы в MATLAB.

*Формирование поднесущих OFDM.*

В рамках моделирования вышеперечисленные виды манипуляции будут использоваться для модуляции поднесущих OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) в количестве 800 штук со следующими параметрами:

- центральная частота: 14 кГц;
- полоса частот для всех поднесущих: 8 кГц;
- защитный частотный интервал: 10 Гц, причем  $T_s = 0.1$  с;
- частота дискретизации сигнала: 192 кГц;
- спектр сигнала: 10–18 кГц.

*Квадратурная модуляция поднесущих.*

Каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции (квадратурная амплитудная модуляция) на низкой символьной скорости, сохраняя общую скорость передачи данных, как и у обычных схем модуляции одной несущей в той же полосе пропускания. На практике сигналы OFDM получаются применением обратного БПФ (быстрое преобразование Фурье).

*Формирование сигнала OFDM.*

OFDM-сигнал формируется  $N$  гармоническими поднесущими, которые разнесены по частоте на равные интервалы  $\Delta f$  (эквидистантное размещение поднесущих). При таком размещении частот занимаемая OFDM-сигналом полная полоса частот  $\Delta F$  делится на  $N$  подканалов, ширина которых  $\Delta f = 1/T_s$ , где  $T_s$  – длительность сигнальной выборки, над которой выполняется операция БПФ (символьный интервал).

а) Создание доплеровских частотных искажений.

В реальном канале возможен случай, когда приемник и/или передатчик находится в движении, поэтому необходимо рассмотреть влияние эффекта Доплера.

Частота, регистрируемая приёмником, в общем случае (для подвижного и неподвижного приёмника и неподвижного источника) определяется по формуле:

$$\omega = \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{u}{c}\right), \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – угловая частота, с которой источник испускает волны, рад/с;  $u$  – скорость приёмника относительно среды (положительная, если он движется по направлению к источнику), м/с;  $c$  – скорость распространения волн в среде, м/с.

По формуле (4) определяется частота, регистрируемая приёмником:

$$2 \cdot \pi \cdot f_d = 2 \cdot \pi \cdot 14 \cdot 10^3 \cdot \left(1 + \frac{1.5}{335}\right);$$

$$f_d = 14060 \text{ Гц.}$$

Код для добавления доплеровских частотных искажений доступен по ссылке [11].

б) Моделирование неточной кадровой синхронизации.

Кадровая (групповая) синхронизация необходима в системах передачи информации с частотным уплотнением каналов, она отвечает за корректное определение начала принятого OFDM-символа. При её отсутствии происходит потеря части информации, передаваемой в канале, в начале или в конце сигнала. Код для добавления неточной кадровой синхронизации доступен по ссылке [12].

*Моделирование АБГШ.*

Последним этапом формирования итогового промодулированного сигнала является добавление к нему АБГШ, причем происходит это отдельно для сигнала, подверженного доплеровскому искажению, и для сигнала, подверженного неточной кадровой синхронизации.

*Квадратурная демодуляция.*

Данный этап подразумевает произведение демодуляции промодулированного ранее сигнала.

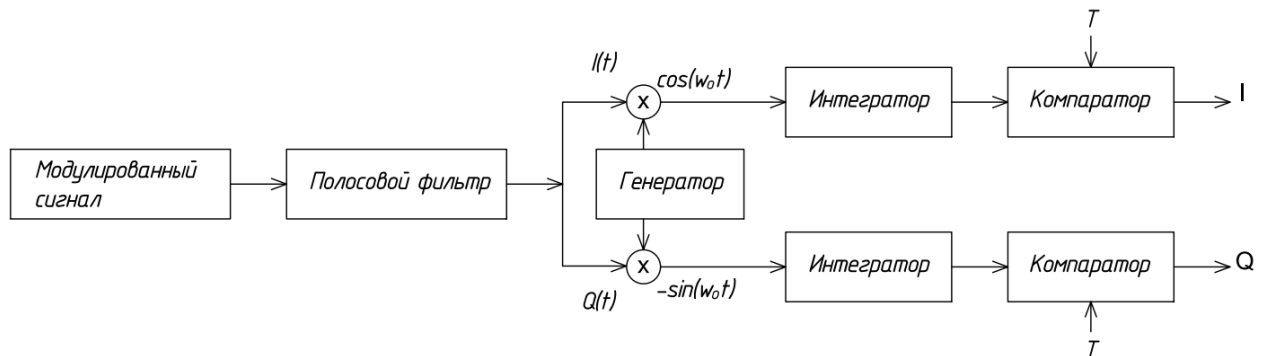


Рис. 8. Структура модели для демодуляции сигнала

*Расчет BER и SNR.*

Важными показателями качества передаваемого сигнала являются такие параметры, как BER и SNR.

Величина SNR определяется по формуле:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log \left( \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{A_c}{A_{\text{ш}}} \right), \quad (5)$$

где  $P_c$  – мощность сигнала, Вт;  $P_{ш}$  – мощность шума, Вт;  $A_c$  – амплитуда сигнала, В;  $A_{ш}$  – амплитуда шума, В.

В коде модели из пункта 4.1 в цикле  $z$  выбирается множитель для амплитуды шума из векторов NoiseMagnitude.

Величина BER определяется по формуле (6):

$$BER = \frac{\Sigma xor(x, y)}{N_x}, \quad (6)$$

где  $x$  – исходные данные;  $y$  – принятые данные;  $N_x$  – количество бит исходных данных.

## 4.2. Моделирование и обработка результатов

Для трёх рассматриваемых видов манипуляции строятся зависимости BER от SNR (рис. 9, 10), причём сравниваться будут между собой манипуляции одного уровня.

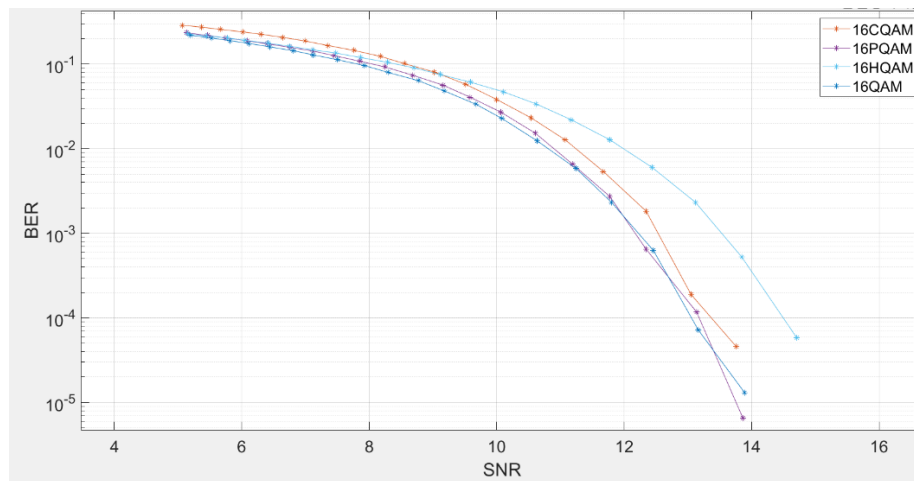


Рис. 9. Зависимость BER от SNR для манипуляций 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM и 16 QAM

Из рис. 9 видно, что при одинаковом значении SNR, например, 12 дБ, иерархическая модуляция показывает худший показатель BER ( $10^{-2}$ ), в то время как 16 CQAM имеет  $10^{-2.5}$ . Причем для 16 QAM и 16 PQAM показатели практически одинаковы и равны почти  $10^{-3}$ .

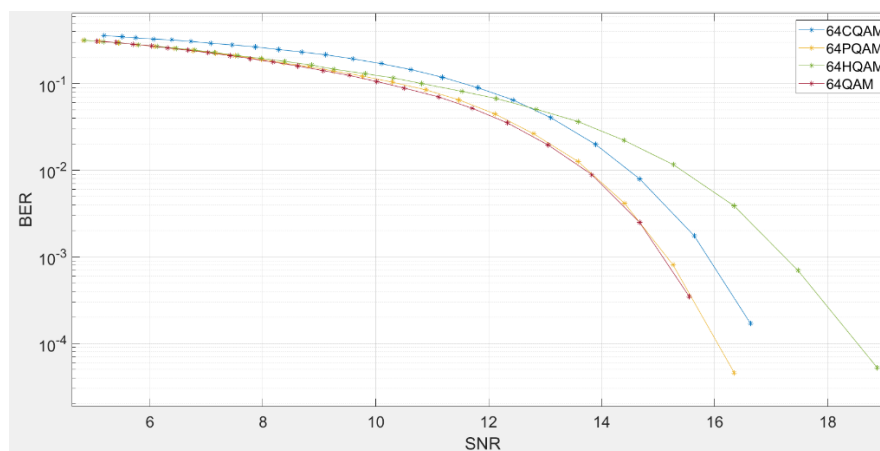


Рис. 10. Зависимость BER от SNR для манипуляций 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM и 64 QAM

Анализируя рис. 10, можно сказать, что тенденция расположения кривых на графике зависимости BER от SNR сохраняется. При SNR, равном 14 дБ, значения BER для 64 QAM и 64

PQAM похожи и равны примерно  $10^{-2}$ . При SNR, равном 12.7 дБ, манипуляция 64 CQAM начинает давать лучший показатель BER по сравнению с 64 HQAM. Также после значения SNR, равного 12.7 дБ, иерархическая модуляция даёт худший из всех показатель BER.

Также строятся графики зависимости BER от SNR для CQAM, PQAM, HQAM и QAM при доплеровских искажениях, где рассматриваются 16-уровневые и 64-уровневые манипуляции (рис. 11, 12).

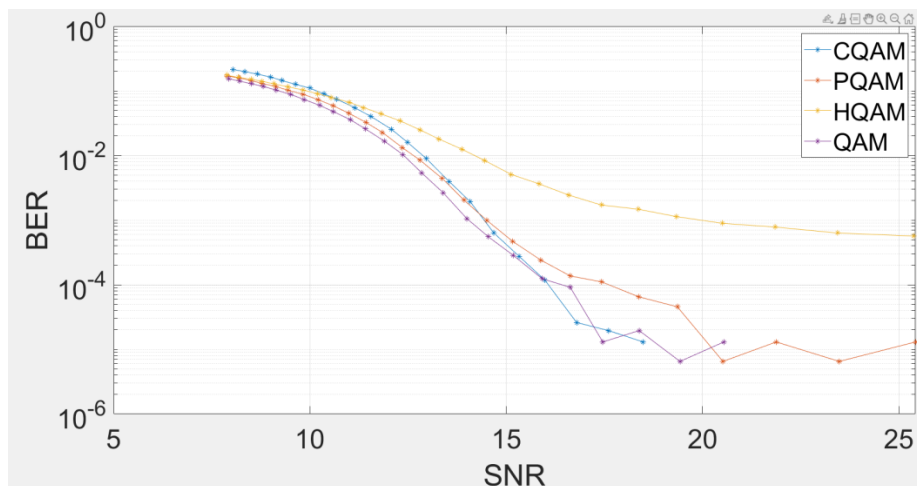


Рис. 11. Зависимость BER от SNR для манипуляций 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM и 16 QAM при доплеровских искажениях

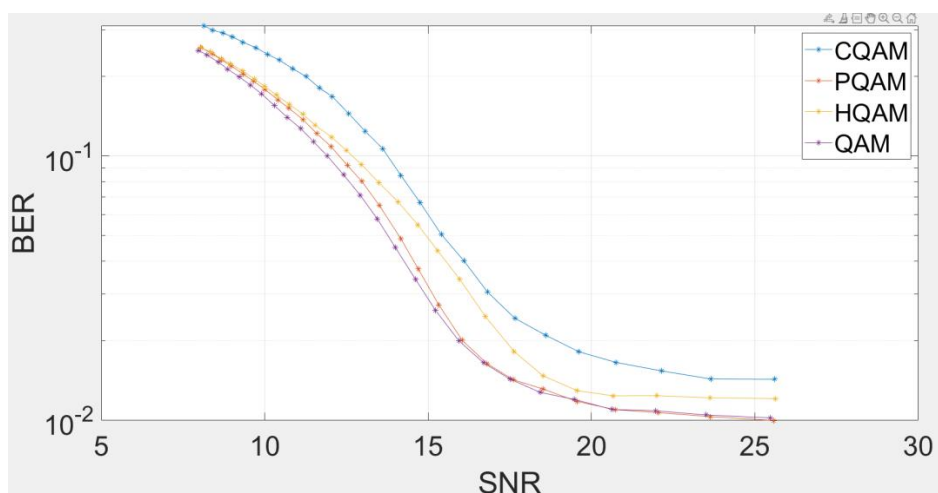


Рис. 12. Зависимость BER от SNR для манипуляций 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM и 64 QAM при доплеровских искажениях

Из рис. 11 видно, что при значении SNR, равном 15 дБ, кривые зависимости для 16 CQAM, 16 PQAM и 16 QAM перестают носить линейный характер и имеют BER, равный примерно  $10^{-3}$ . Кроме этого, после значения SNR, равного 15 дБ, эти три вида манипуляции дают лучшие показатели BER среди всех результатов. Также по графику видно, что 16 HQAM плохо справляется с доплеровскими искажениями и для этого случая потребуются методы фазо-частотной коррекции.

Кривые, представленные на рис. 12, показывают, что 64-позиционные виды манипуляций дают большие результаты по значениям BER ( $10^{-2}$ ) вплоть до SNR, равного 25 дБ, при доплеровских искажениях. В этом случае также понадобятся методы фазо-частотной коррекции.

Наличие таких результатов говорит об уязвимости промодулированного OFDM-сигнала к эффекту Доплера.

Помимо этого, строятся графики зависимости BER от SNR для CQAM, PQAM, HQAM и QAM при неточной кадровой синхронизации, где рассматриваются 16-уровневые и 64-уровневые манипуляции (рис. 13, 14).

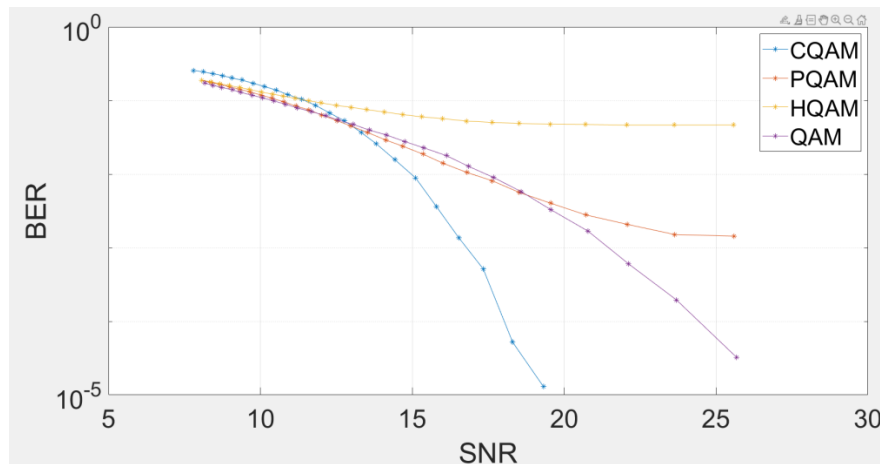


Рис. 13. Зависимость BER от SNR для манипуляций 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM и 16 QAM при неточной кадровой синхронизации

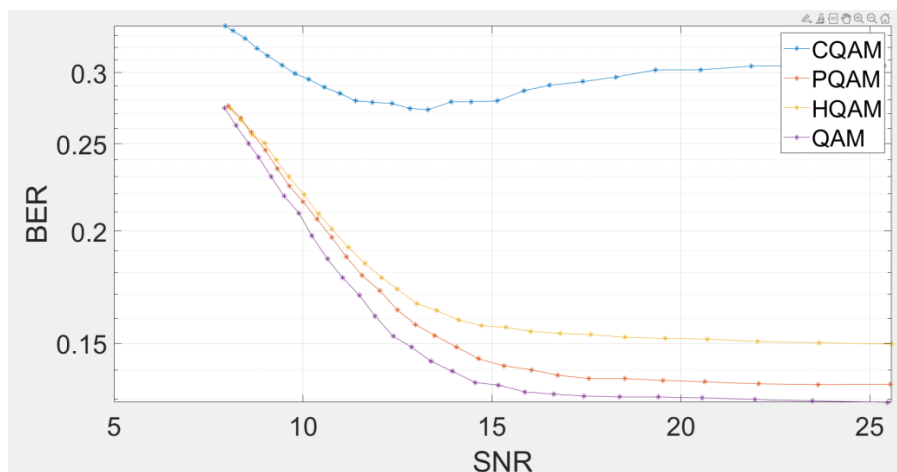


Рис. 14. Зависимость BER от SNR для манипуляций 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM и 64 QAM при неточной кадровой синхронизации

График зависимости на рис. 13 говорит о том, что 16 CQAM очень устойчива к ошибкам при кадровой синхронизации и даёт лучший показатель BER среди четырёх построенных зависимостей, в то время как 16 PQAM не даёт значение BER меньше, чем  $10^{-3}$ , а 16 HQAM – меньше, чем  $10^{-2}$ . Манипуляция 16 QAM справляется лучше с такой проблемой, чем 16 PQAM и 16 HQAM и даёт результат по BER меньше, чем  $10^{-4}$ .

Данные на рис. 14 свидетельствуют о том, что применение 64-позиционных схем манипуляции в составе OFDM без использования более современных методов синхронизации сигнала невозможно. Особенно плохие результаты даёт 64 CQAM, так как значение BER для неё не меньше, чем 0.25.

## Литература

1. Лузин В. И., Никитин Н. П., Гадзиковский В. И. Основы формирования, передачи и приема цифровой информации: учебное пособие. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2014. 316 с.
2. Фоскини Г., Гитлин Р., Вайнштейн С. Оптимизация двумерных сигнальных созвездий в присутствии гауссового шума [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1092061> (дата обращения: 06.06.2021).
3. Вонтергем Дж.В., Бутрос Дж.Дж., Моенеклей М. Построение круговых квадратурных амплитудных модуляций (CQAM) [Электронный ресурс]. URL: <https://biblio.ugent.be/publication/8604053/file/8604054.pdf> (дата обращения: 01.06.2021)
4. Чжэн Б., Дэн Л., Савахаши М., Камия Н. Циркулярная группировка QAM высокого порядка с высокой скоростью кодирования LDPC для каналов фазового шума [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8301807> (дата обращения: 23.05.2021).
5. Чжэн Б., Дэн Л., Савахаши М., Камия Н. Характеристики оценки и компенсации фазового шума с помощью пилот-символов и ФАПЧ для циклической QAM высокого порядка [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8303987> (дата обращения: 29.05.2021).
6. Код для формирования созвездий 16 QAM и 64 QAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/QAM-constellation.m>
7. Код для формирования созвездий 16 HQAM и 64 HQAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/HQAM-constellation.m>
8. Код для формирования созвездий 16 CQAM и 64 CQAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/CQAM-constellation.m>
9. Код для формирования созвездий 16 PQAM и 64 PQAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/PQAM-constellation.m>
10. Код для получения модели [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/main.m>
11. Код для добавления доплеровских частотных искажений [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Doppler.m>
12. Код для добавления неточной кадровой синхронизации [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Frame.m>

Статья поступила в редакцию 10.03.2022;  
переработанный вариант – 20.10.2022.

**Прощенок Элла Витальевна**

студентка департамента электроники, телекоммуникаций и приборостроения ДВФУ,  
e-mail: proshchenok.ev@students.dvfu.ru.

**Родионов Александр Юрьевич**

к.ф.-м.н., доцент департамента электроники, телекоммуникаций и приборостроения ДВФУ (690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10) тел. 8 (423) 265-24-29, e-mail: rodionov.ayur@dvfu.ru.

**Modern types of signal manipulation analysis of wireless communication systems****Ella V. Proshchenok**

student of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrument Engineering, Far Eastern Federal University (FEFU, Vladivostok, Russia), proshchenok.ev@students.dvfu.ru.

**Alexander Yu. Rodionov**

candidate of Physical and Mathematical Sciences of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrument Engineering, Far Eastern Federal University (FEFU, Vladivostok, Russia), rodionov.ayur@dvfu.ru.

This paper presents an overview of modern types of signal manipulation such as hierarchical quadrature amplitude modulation (HQAM), circular quadrature amplitude modulation (CQAM) and parametric quadrature amplitude modulation ( $\theta$ -QAM). Then follows the modeling of the above-mentioned types of modulations and quadrature amplitude modulation (QAM) using the MATLAB programming language. To compare the four selected types of modulation two types of modulation order are used: 16 and 64. To evaluate the effectiveness of using one or another type of modulation a communication channel was modeled to which additive white Gaussian noise (AWGN), Doppler frequency distortion and inaccurate frame synchronization were added.

**Keywords:** modulation, quadrature amplitude modulation, hierarchical quadrature amplitude modulation, circular quadrature amplitude modulation, parametric quadrature amplitude modulation.

**References**

1. Luzin, V.I., Nikitin N.P., Gadzikovsky V.I. *Osnovy formirovaniya, peredachi i priyema tsifrovoy informatsii* [Fundamentals of the formation, transmission, and reception of digital information]. Moscow: SOLON-PRESS, 2014. 316 p.
2. Foschini G., Gitlin R., Weinstein S. Optimization of twodimensional signal constellations in the presence of gaussian noise. *IEEE Trans. Commun.*, vol. 22, Jan. 1974, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1092061> (accessed: 06.06.2021).
3. Wonterghem J.V., Boutros J. J., Moeneclaey M. Construction of Circular Quadrature Amplitude Modulations (CQAM). *IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering in Israel (ICSEE)*, 2018, available at: <https://biblio.ugent.be/publication/8604053/file/8604054.pdf> (accessed: 01.06.2021).
4. Zheng B., Deng L., Sawahashi M., Kamiya N. High-order circular QAM constellation with high LDPC coding rate for phase noise channels. *20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2017, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8301807> (accessed: 23.05.2021).
5. Zheng B., Deng L., Sawahashi M., Kamiya N. Performance of pilot symbol assisted and PLL phase noise estimation and compensation for high-order circular QAM. *23rd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2017, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8303987> (accessed: 29.05.2021).

6. Code for the formation of constellations 16 QAM and 64 QAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/QAM-constellation.m>
7. Code for constellation formation 16 HQAM and 64 HQAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/HQAM-constellation.m>
8. Code for constellation formation 16 CQAM and 64 CQAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/CQAM-constellation.m>
9. Code for constellation formation 16 PQAM and 64 PQAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/PQAM-constellation.m>
10. Code to get the model, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/main.m>
11. Code for adding Doppler frequency distortion, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Doppler.m>
12. Code for adding inaccurate frame synchronization available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Frame.m>