

КВАДРАТУРНАЯ АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ (QAM) КАК ОСНОВА СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ: АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТИ К ОШИБКАМ СИНХРОНИЗАЦИИ

Егоров В.А., студент гр.461401

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь

Фильченкова – старший преподаватель каф. ЗИ

Аннотация. В данной работе проводится сравнительный анализ квадратурной амплитудной модуляции (QAM) как основы современных систем высокоскоростной передачи данных, таких как Wi-Fi и 5G. Рассматриваются принципы формирования сигнала и использование кода Грея для минимизации битовых ошибок. Основное внимание уделено исследованию устойчивости QAM различного порядка (16, 64, 256) к ошибкам синхронизации фазы и амплитуды в сравнении с QPSK. На основе полученных зависимостей BER определены границы применимости QAM в условиях зашумленного канала и рассинхронизации

Ключевые слова. Квадратурная амплитудная модуляция (QAM), сигнальное созвездие, битовая ошибка (BER), синхронизация фазы, амплитудная ошибка.

Квадратурная амплитудная модуляция (QAM) представляет собой метод передачи информации, сочетающий в себе элементы амплитудной (ASK) и фазовой (PSK) манипуляций. Основным принципом заключается в модуляции двух ортогональных несущих – обычно синусоидальной и косинусоидальной составляющих, называемых синфазной (I) и квадратурной (Q) компонентами. Результирующий сигнал $s(t)$ математически описывается уравнением [1]:

$$s(t) = I_n \cos(2\pi f_c t) - Q_n \sin(2\pi f_c t). \quad (1)$$

Ключевым преимуществом QAM является высокая спектральная эффективность. За счет формирования сигнального созвездия, где каждая точка соответствует уникальной кодовой комбинации, QAM позволяет передавать n бит за один символ, где $M = 2^n$ (M – порядок модуляции). Это обеспечивает кратное увеличение пропускной способности канала в фиксированной полосе частот без расширения занимаемого спектра.

При распределении важно, чтобы небольшой всплеск шума на стороне приемника не привел к большому количеству ошибок в битах. Такое может случиться, если присвоить последовательные значения битов смежным символам. Поэтому для минимизации ошибок важно использовать код Грея при распределении бит. Распределение бит для 16-QAM [2] показано на рисунке 1.

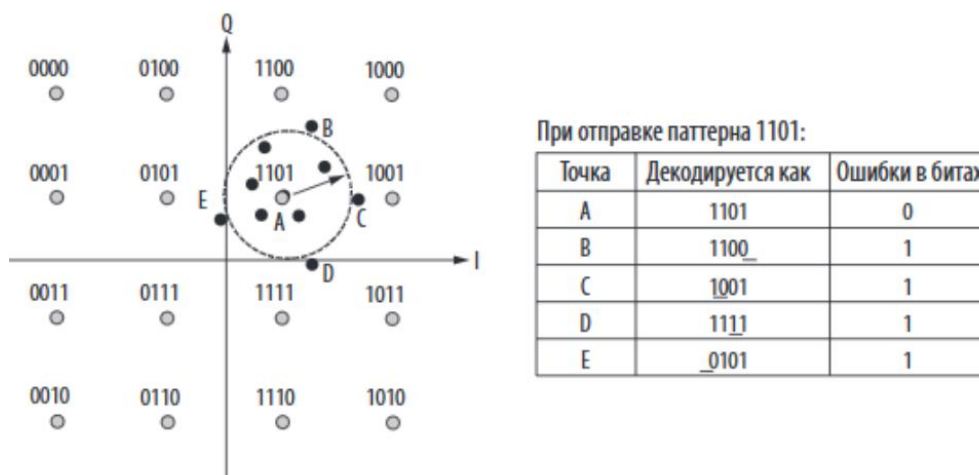


Рисунок 1 – Созвездие 16-QAM модуляции

Добавим аддитивный белый шум в канал связи. Для наглядности добавим шум так, чтобы отношение сигнал/шум (SNR) было равно 30. При этом показатель BER стремится к 0. Кроме шума в каналах связи также возникают ошибки синхронизации фазы и амплитуды, что также негативно сказывается при демодуляции сигнала. Визуализации переданных данных с ошибками синхронизации по фазе на 10 градусов (рисунок 2а) и по амплитуде в 0.7 (рисунок 2б) с учетом воздействия аддитивного белого шума.

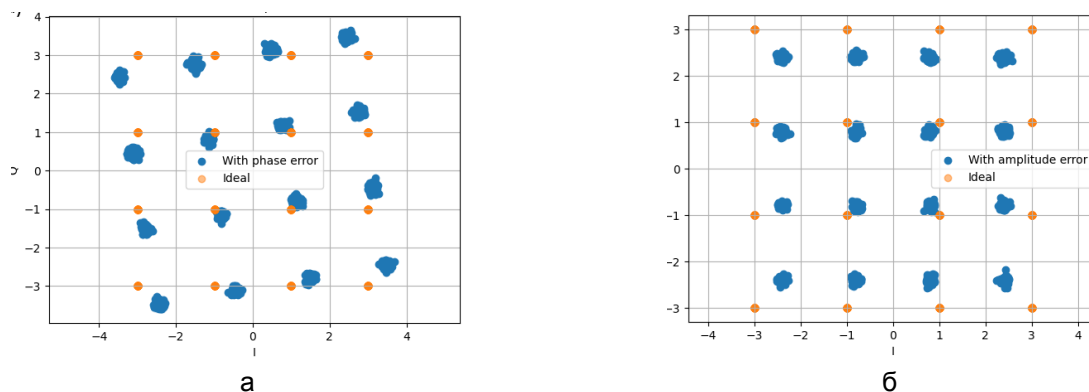


Рисунок 2 – Визуализация полученных точек при демодуляции с ошибкой синхронизации фазы на 10 градусов (а); и амплитуды в 0,8 раза (б)

Построим графики зависимости ошибки приема BER в зависимости от коэффициентов рассинхронизации фазы и амплитуды. Из графика зависимости ошибки BER от ошибки синхронизации амплитуды (рисунок 3, а) видно, что оптимальное отклонение амплитуды фазы составляет от 0,75 до 1.7 раз (при SNR=30).

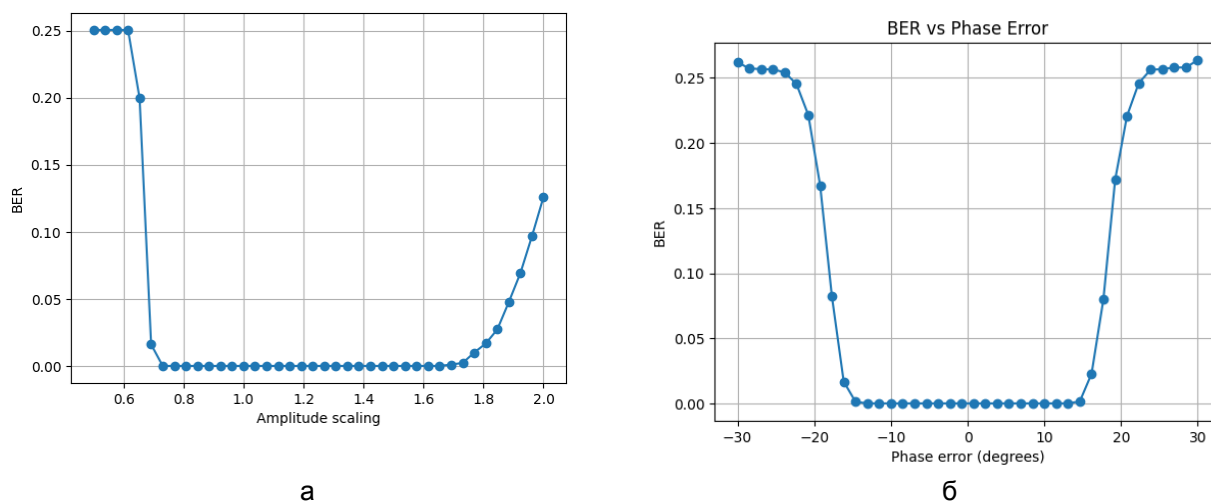


Рисунок 3 – Зависимость ошибки приема (BER) от отклонения амплитуды (а) и отклонения фазы (б)

Из графика зависимости ошибки BER от ошибки синхронизации фазы, изображенного на рисунке 3, б, видно, что допустимое отклонение фазы, при SNR=30, не превышает 15 градусов.

Но в настоящих системах связи редко встречаются случаи ошибки синхронизации только фазы или только амплитуды, поэтому стоит рассмотреть систему, на которую действует одновременно отклонение и фазы, и амплитуды. Значение ошибки приема BER в зависимости от ошибки синхронизации фазы и амплитуды изображены на рисунке 5.

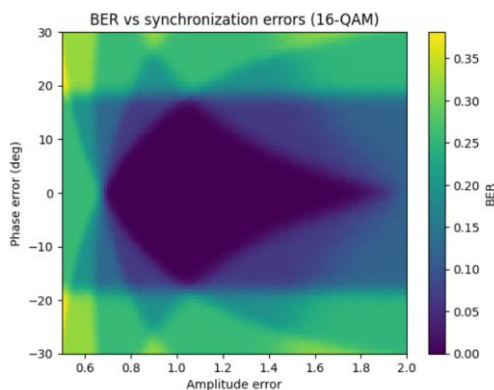


Рисунок 5 – Зависимость ошибки приема (BER) от отклонения фазы и амплитуды для 16-QAM

Сравним полученный график с аналогичным, построенным для QPSK (квадратурной фазовой модуляции). Тепловая карта зависимости ошибки приема BER от ошибки синхронизации амплитуды и фазы представлен на рисунке 6.

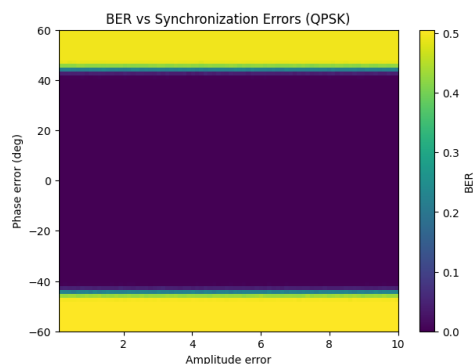


Рисунок 6 – Зависимость ошибки приема (BER) от отклонения фазы и амплитуды для QPSK

При анализе и сравнении рисунков 5 и 6 видно, что QPSK устойчива к ошибкам синхронизации амплитуды и допускает отклонение ошибки и устойчив к ошибке синхронизации фазы вплоть до отклонения в 40 градусов. 16-QAM в свою очередь предоставляет возможность передать за промежуток времени в два раза больше информации, но и устойчивость к ошибкам синхронизации у квадратурной амплитудной модуляции ниже.

Нарастивая разрядность QAM модуляции (64-QAM, 1024-QAM), устойчивость к ошибкам синхронизации становится значительно ниже, что видно из рисунка 7.

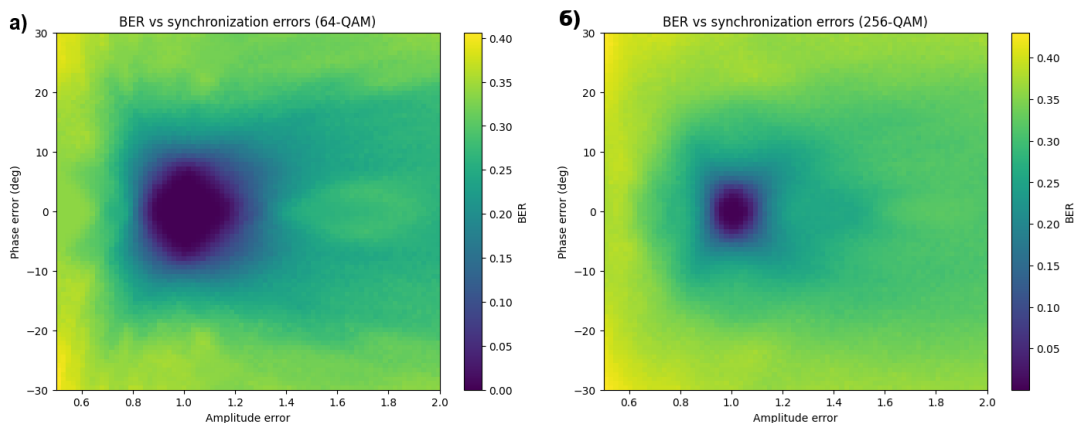


Рисунок 7 – Зависимость ошибки приема (BER) от отклонения фазы и амплитуды для а) 64-QAM; б) 256-QAM

Современные технологии и стандарты всё чаще применяют квадратурную амплитудную модуляцию. На её основе работают такие технологии как Wi-Fi (EIII 802.11ac/ax), 4G-LTE, 5G, которые способны обеспечить высокую пропускную способность. Но такие системы уязвимы к ошибкам синхронизации и зашумления канала связи [3].

Таким образом, если канал связи защищен от сильного воздействия помех, а модулятор и демодулятор синхронизированы, тогда QAM модуляция – хорошее решение. Когда стоит вопрос о передаче сигнала в условиях сильного шума и возможных ошибках синхронизации, стоит воздержаться от использования квадратурной амплитудной модуляции в пользу более простых, но помехоустойчивых видов модуляции.

Список использованных источников:

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов : учебник для вузов. – СПб. : Питер, 2002.. – 608 с.
2. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Н. Фимстер, Д. Уэзеролл. – 6-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2024. - 992 с.
3. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Бернард Скляр. - 2-е изд.. – Москва [и др.] : Вильямс, 2017. - 1099 с.