

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Колесник Н.В., студент гр.461401

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

Фильченкова Т. М. – старший преподаватель каф. ЗИ

Аннотация. В работе исследуется применение совместной амплитудно-фазовой модуляции для повышения скрытности передачи информации в системах электрической связи. Рассмотрены принципы формирования комбинированных сигналов, построены математические модели амплитудно-фазовой модуляции, проведён анализ спектральной и энергетической эффективности. Выполнено моделирование в среде Python с построением осциллограмм, спектров и диаграмм созвездий. Проведена оценка сложности перехвата и демодуляции сигналов. Разработаны рекомендации по применению комбинированной модуляции в системах защищенной связи.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая модуляция, QAM, спектральная эффективность, BER, скрытность передачи.

В современных системах электрической связи наряду с обеспечением пропускной способности и помехоустойчивости важное значение имеет повышение скрытности передачи информации. Одним из базовых методов модуляции является амплитудная модуляция, отличающаяся простотой реализации, однако обладающая рядом ограничений, связанных с низкой спектральной эффективностью и относительной лёгкостью обнаружения сигнала. Более сложным и эффективным методом является совместная амплитудно-фазовая модуляция, позволяющая увеличить информационную ёмкость сигнала и усложнить его структуру, что потенциально повышает уровень защищённости передачи.

Цель данной научно-исследовательской работы: изучить амплитудно-фазовую модуляцию с точки зрения их эффективности и возможности повышения скрытности передачи данных.

Совместная амплитудно-фазовая модуляция (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) позволяет повысить спектральную эффективность и усложнить структуру сигнала, что затрудняет его перехват и анализ без знания параметров модуляции. При этом методе передачи информации изменяются сразу два параметра несущего сигнала: его амплитуда и фаза. В общем виде сигнал с амплитудно-фазовой модуляцией может быть представлен как

$$s(t) = A(t)\cos(\omega_c t + \varphi(t)),$$

где $A(t)$ – изменяющаяся во времени амплитуда (амплитудная модуляция); $\varphi(t)$ – изменяющаяся во времени фаза (фазовая модуляция); ω_c – несущая частота.

То есть состоит из двух квадратурных несущих, модулированных по амплитуде многоуровневыми последовательностями импульсов (рисунок 1).

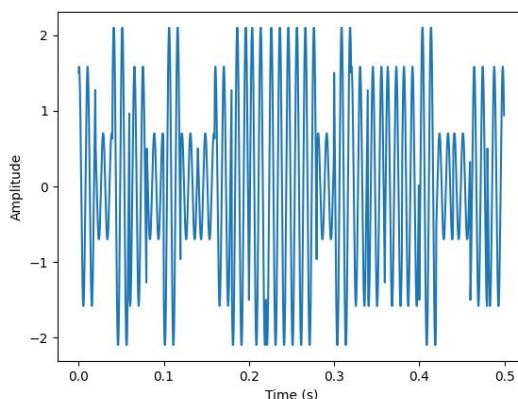


Рисунок 1 – Осциллограмма 16-QAM во временной области

Геометрически сигналы при квадратурной амплитудной модуляции могут быть представлены в виде точек в двумерном сигнальном пространстве, образующих так называемое сигнальное созвездие. Количество точек в созвездии определяется порядком модуляции M и соответствует числу возможных символов сигнала. С увеличением порядка модуляции возрастает плотность расположения точек. На рисунке 2 представлены сигнальные созвездия различных вариантов КАМ [1].

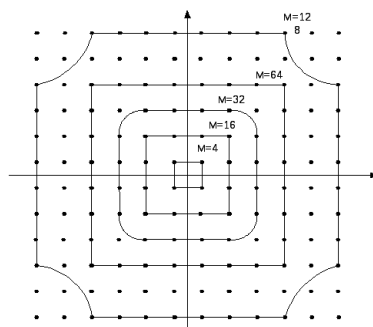


Рисунок 2 – Сигнальное созвездие

Преимущества QAM заключаются в высокой спектральной эффективности, усложненной структуре сигнала и отсутствии выраженной несущей линии в спектре (рисунок 3).

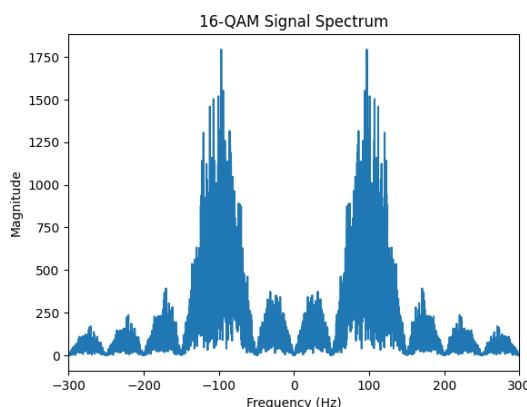


Рисунок 3 – Спектр 16-QAM

Оценка эффективности методов модуляции проводится по двум основным критериям: спектральной и энергетической эффективностям. Эти параметры позволяют определить рациональность использования полосы частот и требуемый уровень мощности для обеспечения заданного качества передачи.

В случае амплитудно-фазовой модуляции полоса сигнала определяется скоростью символов, а не битовой скоростью напрямую. Поэтому при одинаковой полосе частот QAM позволяет передавать значительно больший объем информации. Следовательно спектральная эффективность QAM значительно выше, увеличивается информационная плотность сигнала и полоса используется более рационально [3].

Энергетическая эффективность характеризуется требуемым отношением сигнал/шум (SNR) для обеспечения заданной вероятности битовой ошибки (BER).

Для QAM требуется когерентная демодуляция, необходима синхронизация по фазе и при увеличении порядка модуляции требуется более высокий SNR (рисунок 4).

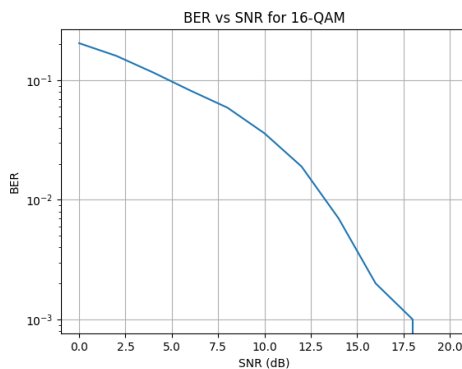


Рисунок 4 – График BER для АФМ

В программной реализации все этапы были реализованы с использованием библиотеки NumPy и пакета matplotlib.

Для исследования сложности перехвата и дешифрования АФМ-сигнала была создана таблица 1, в которой приведено описание по различным критериям.

Таблица 1 – Анализ сложности перехвата и дешифрования сигналов АФМ.

Критерий анализа	Амплитудно-фазовая модуляция
Обнаружение сигнала	Требует спектрального анализа. Несущая подавлена или неясна
Структура сигнала	Отсутствует выраженная структура огибающей
Метод демодуляции	Требуется когерентный приемник
Требования к синхронизации	Необходима фазовая и частотная синхронизация
Оценка фазы	Требуется точная оценка фазы
Требования к знаниям о сигнале	Требуется знание схемы кодирования и карты созвездия
Устойчивость к анализу	Более высокая
Общая сложность перехвата и дешифрования	Средняя или высокая

QAM-сигналы характеризуются большей сложностью анализа вследствие необходимости когерентного приема, точной фазовой синхронизации и знания параметров модуляции.

На основе проведенного теоретического анализа, математического моделирования и исследования сложности перехвата сигналов можно сформулировать следующие практические рекомендации по применению амплитудно-фазовой модуляции в системах защищенной связи:

1. Использование АФМ предпочтительно в цифровых системах передачи данных, где требуется высокая спектральная эффективность и увеличение информационной плотности сигнала при ограниченной полосе частот.

2. Для повышения скрытности передачи рекомендуется применять модуляции с подавленной несущей (DSB-SC, QAM), поскольку отсутствие выраженной несущей линии в спектре затрудняет обнаружение сигнала средствами спектрального анализа [2].

3. Целесообразно использовать модуляции более высокого порядка (16-QAM, 64-QAM и выше) в сочетании с контролем SNR канала. Это позволяет увеличить объем передаваемой информации и усложнить структуру сигнала для потенциального перехватчика

Таким образом, были рассмотрены принципы амплитудно-фазовой модуляции, построены их математические модели и выполнено моделирование сигналов; установлено, что QAM обладает значительно более высокой спектральной эффективностью по сравнению с АМ, однако требует более высокого отношения сигнал/шум и сложной синхронизации; показано, что АФМ требует когерентного приема и знания параметров модуляции, что усложняет его перехват и анализ.

Список использованных источников:

1. Амплитудно-фазовая модуляция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3SMrsd>– Дата доступа: 05.03.2026.
2. Типы амплитудной модуляции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3SBdUK>. – Дата доступа: 01.03.2026
3. Шерстюков, С. Я. Способ повышения спектральной эффективности радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией / С. Я. Шерстюков, С. С. Печников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2019. - №2. – С. 155 – 165.