

*Терешин М.А.,*

*студент магистратуры*

*2 курс, факультет «Отдел магистратуры»*

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и*

*информатики*

*Россия, г. Самара*

*Кириянов И.А.,*

*студент магистратуры*

*2 курс, факультет «Отдел магистратуры»*

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и*

*информатики*

*Россия, г. Самара*

*Тюркин И.А.,*

*студент магистратуры*

*2 курс, факультет «Отдел магистратуры»*

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и*

*информатики*

*Россия, г. Самара*

*Научный руководитель: Чингаева Анна Михайловна*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В МНОГОЛУЧЕВОМ КАНАЛЕ**

*Аннотация:* в статье рассматриваются системы с многопозиционной модуляцией в многолучевом канале, перечисляются достоинства и недостатки КАМ и АПСК.

*Ключевые слова:* сигнал, многолучевой канал, модуляция, многопозиционная модуляция, созвездия, КАМ, АПСК.

***Annotation:** the article discusses systems with multi-position modulation in a multipath channel, lists the advantages and disadvantages of QAM and APSK.*

***Key words:** signal, multipath channel, modulation, multiposition modulation, constellations, QAM, APSK.*

Сигнал - физический процесс, представляющий преобразование передаваемой информации, которая в свою очередь представляется в виде сообщения. Сигнал, представляющий сообщение, называют первичным сигналом. Если первичный сигнал способен распространяться в физической среде между передатчиком и приемником, то без дальнейших преобразований он может служить переносчиком передаваемой информации.

Однако, часто непосредственная передача первичного сигнала по каналу оказывается невозможна. Например, Сигналы, поступающие из источника сообщений, как правило, не могут быть переданы по радиоканалу на большие расстояния. Это связано с тем, что эти сигналы являются низкочастотными и маломощными. При передаче по радиоканалу необходимо спектры этих сигналов перенести из низкочастотной области в область более высоких частот. Данная процедура в радиотехнике носит название модуляции. При помощи модуляции согласовываются параметры сигнала и канала. На приемной стороне из модулированного сигнала необходимо получить первичный, т.е. осуществить обратное преобразование – демодуляцию.

Зависимость параметров несущей от первичного сигнала называют модуляционной характеристикой. Для неискажённой модуляции эта характеристика должна быть линейной, т.е. соответствующие параметры при модуляции должны получать приращение, пропорциональное модулирующему сигналу.

Рассмотрим цифровую модуляцию. Её особенностью является то, что первичный сигнал является двоичным, т.е. он принимает всего два возможных значения: 0 или 1. Источник сообщения (ИС) выдаёт цифровое (двоичное) сообщение, состоящее из «0» и «1», которое представляется сигналом с тактовым

интервалом. Модулятор (МОД) формирует НЧ эквивалент сигнала, соответствующий заданному виду модуляции с тактовым интервалом. Цифровой преобразователь частоты (ЦПЧ) переносит низкочастотный модулированный сигнал на несущую частоту.

Различают три основных вида цифровой модуляции: амплитудная (АМ), фазовая (ФМ) и частотная (ЧМ). В случае цифровой модуляции изменяемый параметр имеет фиксированный набор значений, количество которых называется позиционностью модуляции. Число позиций, как правило, выбирается равным степени двойки. В этом случае каждая позиция модулированного сигнала соответствует целому числу бит исходной двоичной последовательности. Чем больше число уровней, тем большее число бит отображает каждый уровень, тем выше битовая скорость передачи при одном и том же значении тактового интервала.

При амплитудной модуляции по закону первичного сигнала изменяется амплитуда несущей.

При фазовой модуляции по закону первичного сигнала изменяется начальная фаза несущей. Для уменьшения вероятности ошибки на бит при демодуляции сигнальное созвездие строится таким образом, чтобы соседние сигнальные точки различались только в одном бите. Объясняется это тем, что ошибки чаще всего будут происходить именно в сторону ближайших символов. Добиться такого эффекта позволяет применение кода Грея. Преимуществом ФМ является постоянство амплитуды модулированного сигнала и, как следствие, низкий пик-фактор. Недостатком – скачки фазы на границах тактовых интервалов, приводящие к расширению спектра. АМ и ФМ относятся к линейным видам модуляции без памяти.

При частотной модуляции по закону первичного сигнала изменяется частота несущей. При цифровой ЧМ позиции частоты фиксированы, а их число равняется  $m$ . При ЧМ, так же, как и при ФМ, амплитуда модулированного сигнала постоянна, т.е. ЧМ также имеет малый пик-фактор.

Широкое распространение в области передачи цифровой информации

получила комбинационная модуляция, в дальнейшем получившая название квадратурной амплитудной модуляции. Квадратурная амплитудная модуляция является разновидностью многопозиционной амплитудно-фазовой модуляции, помимо фазы изменяется и амплитуда сигнала, что позволяет увеличить количество кодируемых бит. Это приводит к тому, что при заданной полосе частот возрастает количество передаваемой информации.

Наиболее удобным методом анализа помехоустойчивости принятого сигнала является изучение и использование созвездия сигнала на фазоамплитудной плоскости. Сигнальное созвездие КАМ всегда симметрично относительно начала координат. В современных цифровых модуляторах, особенно при большом числе позиций  $m$ , сигнал КАМ получают как действительную часть от произведения комплексной амплитуды на комплексную несущую. Каждый сигнал КАМ можно изобразить вектором в сигнальном пространстве. Отмечая только концы векторов, для сигналов КАМ получаем изображение в виде сигнальной точки, координаты которой определяются значением  $x(t)$  и  $y(t)$ . Совокупность сигнальных точек образуют так называемое сигнальное созвездие.

Помехоустойчивость алгоритма КАМ обратно пропорциональна его спектральной эффективности. Воздействие помех приводит к возникновению неконтролируемых изменений амплитуды и фазы передаваемого по линии сигнала. При увеличении числа кодовых точек на фазовой плоскости расстояние между ними уменьшается и, следовательно, возрастает вероятность ошибочного распознавания искаженного принятого вектора  $S_m^*$  на приемной стороне. Предельный уровень допустимых амплитудных и фазовых искажений модулированного QAM сигнала представляет собой круг. Центр этого круга совпадает с узлом квадратурной сетки на фазовой плоскости.

Для увеличения помехоустойчивости при многопозиционной модуляции применяется предварительное кодирование информации. Без кодирования появление в сигнале каждой очередной позиции модуляции равновероятно, и при большом количестве позиций сильно возрастает вероятность ошибки

демодулятора. Кодирование изменяет статистические свойства потока информации так, что вероятность появления каждой позиции зависит от предыстории, позволяя демодулятору принимать более надежные решения.

Недостатками КАМ являются:

- скачки фазы и/или амплитуды на границах тактовых интервалов, приводящие к расширению спектра;
- непостоянство амплитуды модулированного сигнала (кроме КАМ-4), приводящее к увеличению пик-фактора  $P^2 = \frac{P_{max}}{P_{cp}}$ .

Достоинства:

- является относительно простая для реализации;
- в КАМ по сравнению с обычной АМ вдвое больше количество сигналов, которые можно независимо передать в одной и той же полосе частот.

Так же стоит рассмотреть амплитудно- фазовую манипуляцию. Амплитудно-фазовая манипуляция (APSK) — это вид цифровой модуляции, при которой данные передаются путем изменения амплитуды и фазы несущего сигнала. Можно сказать, она комбинирует как амплитудную манипуляцию (ASK), так и фазовую манипуляцию (PSK) для увеличения набора символов.

С целью сохранения высокой помехоустойчивости при повышенной спектральной эффективности применяются методы амплитудно-фазовой модуляции M-APSK (amplitude and phase-shift keying).

В модуляции M-APSK информацию несёт не только фаза сигнала, но и его амплитуда. Так, при модуляции 16-APSK используются две окружности с сигнальными точками, в которой на внутренней находятся 4 сигнальные точки, а на внешней – 12 сигнальных точек. За счёт этого достигается равномерное распределение сигнальных точек на амплитудно-фазовой плоскости, т.е. уменьшается среднее расстояние ошибки между различными соседними сигнальными точками. Сигнал M-APSK может быть представлен как:

$$S_{M-APSK}(t) = I(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + Q(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Сигнальное созвездие модуляции M-APSK состоит из нескольких концентрических окружностей. Число этих окружностей зависит от позиционности модуляции и выбирается из расчёта максимизации среднего расстояния ошибки при фиксированной максимальной амплитуде сигнала.

В отечественной и зарубежной литературе достаточно широко рассмотрен вопрос анализа помехоустойчивости сигналов M-APSK с точки зрения влияния аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). АБГШ (англ. AWGN) – вид мешающего воздействия в канале передачи информации. Характеризуется равномерной, то есть одинаковой на всех частотах спектральной плотностью мощности, нормально распределёнными временными значениями и аддитивным способом воздействия на сигнал. Данный вид шума суммируется с полезным сигналом и статистически не зависит от сигнала.

При рассмотрении влияния АБГШ на сигналы с квадратурной модуляцией рационально использовать двумерное нормальное распределение. Вероятность ошибочного приёма сигнала может быть определена как вероятность выхода сигнальной точки на приёме за пределы своей области принятия решения. То есть значения синфазной и квадратурной составляющих должны быть изменены так, чтобы определяемая данными значениями сигнальная точка на плоскости лежала за пределами области принятия решения исходной передаваемой сигнальной точки. Учитывая природу АБГШ, можно представить распределение вероятности попадания сигнальной точки в ту или иную область как поверхность двумерного нормального распределения над амплитудно-фазовой плоскостью.

Одной из основных причин применения модуляции M-APSK в спутниковых системах связи является высокая устойчивость данной модуляции к нелинейным искажениям, возникающим в усилителе мощности спутникового ретранслятора. Усилители мощности на основе ламп бегущей волны и полупроводниковых транзисторов обладают свойствами нелинейности, такими как нелинейные характеристики преобразования амплитуды на входе в амплитуду на выходе и амплитуды на входе в паразитный сдвиг фазы на выходе.

Основным критерием, позволяющим оценить устойчивость сигнала с той или иной модуляцией к нелинейным искажениям, является величина отношения пиковой мощности к средней – PAPR (peak-to-average power ratio). При большом значении *PAPR* наблюдается большое количество пиков амплитуды. Такие пики при работе близко к зоне насыщения амплитудной характеристики усилителя мощности подвержены наибольшему нелинейному искажению. Для того, чтобы скомпенсировать нелинейные искажения, рабочая точка на амплитудной характеристике смещается в линейную область, таким образом применяется метод back-off. При больших значениях *PAPR* такое смещение также должно быть большим, чтобы снизить искажения пиковых значений сигнала.

Амплитуда сигналов с модуляцией M-APSK не имеет выраженных пиков благодаря тому, что точки сигнального созвездия равномерно распределены по окружностям. На окружности с максимальной амплитудой находится существенное количество сигнальных точек, равноудалённых от центра амплитудно- фазовой плоскости. На окружности созвездия 16-QAM с максимальной амплитудой расположены всего 4 сигнальные точки, в то время как на окружности с максимальной амплитудой созвездия 16-APSK расположены 12 сигнальных точек. Очевидно, что значение *PAPR* во втором случае (созвездие 16APSK) значительно ниже. Это позволяет обеспечивать работу системы при меньшем значении back-off, увеличивая тем самым энергетическую эффективность. Таким образом, модуляция M-APSK более применима при работе в нелинейном канале, чем M-QAM. Следует отметить, что при увеличении позиционности разница в *PAPR* между модуляцией M-APSK и M-QAM только увеличивается.

#### **Использованные источники:**

1. Николаев Б.И., Чингаева А.М., Харитонов А.А. Основы цифровой связи: учебное пособие. – Самара, 2013. – 200 с.
2. Кловский Д.Д. Теория электрической связи. – М.: Радиотехника, 2009. – 648с.
3. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ. Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио

и связь, 2000. – 800 с.

4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, исп. / Пер. с англ. под ред. А.В. Назаренко. – М.: Вильямс, 2003. -1104 с.