

## МЕТОД ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВА УРОВНЕЙ СИГНАЛЬНОГО СОЗВЕЗДИЯ СИГНАЛОВ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Власов С.В.

*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», Пенза,  
e-mail: vlasov\_s.v@mail.ru*

Для проведения исследования взаимного влияния сигналов в телекоммуникационных системах с использованием многомерных метрических пространств, предлагается использовать как аналитические, так и графические модели. В данной статье разработан метод выбора количества уровней сигнального созвездия квадратурной многоуровневой многофазовой модуляции с учетом взаимного влияния сигналов по соседним каналам многоканальной телекоммуникационной системы с использованием многомерных метрических пространств. Взаимное влияние оценивается как расстояние между сферами в многопараметрическом пространстве. Результат исследования заключается в том, что при использовании полученных моделей обнаруживается эффект, когда различные передатчики, работающие на различных частотах с использованием квадратурной модуляции, способны создавать помехи (влиять друг на друга) при определенном значении амплитуд и начальных фаз как несущих частот, так и значениях частот, и амплитуд модулирующих колебаний. Научный вывод проведенных исследований: передача информации на различных несущих частотах не исключает взаимного негативного влияния сигналов друг на друга при использовании сигналов с квадратурной модуляцией, и необходимо при выборе количества уровней сигнального созвездия квадратурной модуляции учитывать взаимное влияние соседних каналов, создающее в используемом канале энергетические и фазовые шумы. Как следствие, определяя влияние друг на друга сигналов различных информационных систем, можно вырабатывать комплекс мероприятий по повышению надежности и помехоустойчивости телекоммуникационных систем.

**Ключевые слова:** сигналы, метрическое пространство, телекоммуникационная система, сигнальное созвездие

## METHOD FOR SELECTING THE NUMBER OF LEVELS OF A SIGNAL CONSTELLATION OF SIGNALS WITH QUADRATIVE AMPLITUDE MODULATION TAKING INTO ACCOUNT THE MUTUAL INFLUENCE OF SIGNALS IN A MULTI-CHANNEL TELECOMMUNICATION SYSTEM

Vlasov S.V.

*Penza State Technological University, Penza, e-mail: vlasov\_s.v@mail.ru*

To conduct a study of the mutual influence of signals (VVS) in telecommunication systems using multidimensional metric spaces, it is proposed to use both analytical and graphical models. In this article, a method has been developed for choosing the number of levels of a quadrature multilevel multiphase modulation (QAM) signal constellation, taking into account the mutual influence of signals on adjacent channels of a multichannel TCS using multidimensional metric spaces. Mutual influence is estimated as the distance between the spheres in a multi-parameter space. The result of the study is that when using the obtained models, an effect is detected when various transmitters operating at different frequencies using QAM are able to interfere (influence each other) at a certain value of the amplitudes and initial phases of both carrier frequencies and frequency values, and amplitudes of modulating oscillations. The scientific conclusion of the conducted research is: the transmission of information at different carrier frequencies does not exclude the mutual negative influence of signals on each other when using QAM signals, and when choosing the number of levels of the QAM signal constellation, it is necessary to take into account the mutual influence of adjacent channels, which creates energy and phase noise in the channel used. As a result, by determining the influence of the signals of various information systems on each other, it is possible to develop a set of measures to improve the reliability and noise immunity of telecommunication systems.

**Keywords:** signals, metric space, telecommunication system, signal constellation

Для современных исследований процессов, происходящих в различных сферах человеческой жизнедеятельности, использование чисто эмпирического подхода выбора оптимального количества уровней сигнального созвездия квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) неприемлемо в связи со сложностью и параметрической емкостью используемых телекоммуникационных систем.

Современные технологии контроля и диагностирования каналов передачи данных телекоммуникационных систем предусматривают использовать комплексные показатели качества при многопараметрическом анализе, однако они не обладают наглядностью, требуют значительных затрат в практической реализации. Результат корреляционного анализа и анализа коэффициентов взаимного различия сигналов не пред-

усматривает оценку их взаимного влияния в среде распространения [1]. Необходимо сформировать научный базис выбора оптимального количества уровней сигнального созвездия КАМ не только с учетом дестабилизирующих факторов работы телекоммуникационных систем (мультипликативных и аддитивных помех, дефектов передающих систем), но и взаимного влияния КАМ сигналов друг на друга.

Современные методы оценки помеховой обстановки в линиях связи каналов передачи данных позволяют измерять уровень помех псофометрами, но приборы и существующие методы не позволяют определять значения помех, обусловленных взаимным влиянием сигналов.

Цель исследования – разработать метод оперативного выбора сигнального созвездия сигналов с КАМ для обеспечения заданной скорости передачи цифровой информации с учетом взаимного влияния сигналов в телекоммуникационных системах.

**Материалы и методы исследования**

Сигнальное созвездие – это квадратная матрица, в которой уровни амплитуды I и Q компонент КАМ сигнала отображены в виде значащих точек в квадратной системе координат I x Q [2].

Целочисленное значение каждой полученной точки определяется ячейкой матрицы, в которую она попадает. Ошибка определяется как выпадение измеренной точки из ячейки.

16-QAM (КАМ) диаграмма – это 4x4 матрица, в которой каждая из 16 ячеек представляет одну из 16 возможных бинарных комбинаций (рис. 1). Вертикальное и горизонтальное положение каждой точки соответствует I и Q уровням амплитуды сигнала переданного в течение одного цикла (рис. 2).

На рис. 3 представлена осциллограмма сигнала с КАМ модуляцией, где прослеживается изменение амплитуды и фазы сигнала

ла в зависимости от кодовой комбинации, поступающей на вход модулятора.

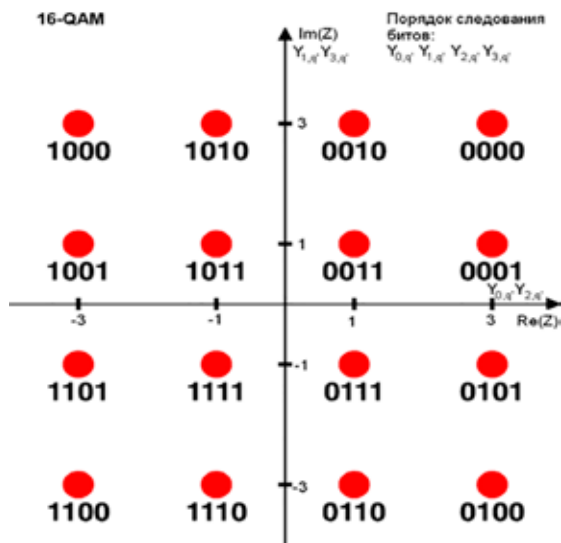


Рис. 1. Сигнальное созвездие 16-QAM (КАМ)

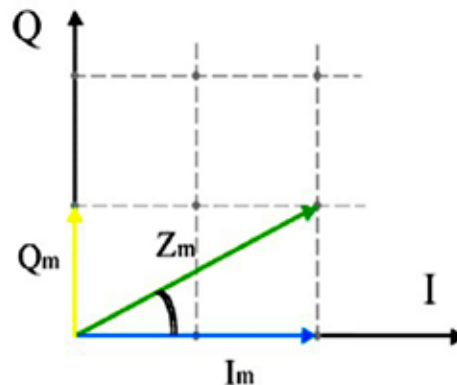


Рис. 2. Сигнальное созвездие 16-QAM (КАМ)

Для оптимизации сигнального созвездия необходимо провести анализ причин искажения сигнального созвездия КАМ.

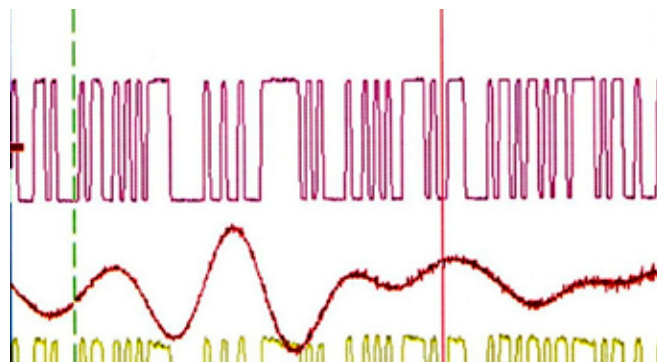


Рис. 3. Осциллограмма сигнала с КАМ модуляцией

Внешний вид значащих точек в ячейках сигнального созвездия может дать ключевую информацию о том, что происходит при передаче сигнала.

Значительный уровень внешних шумов, обусловленных в том числе взаимным влиянием сигналов соседних каналов (отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума) – может привести к полной потере информации, так как расплывчатый образ точки занимает практически все пространство ячейки (рис. 4).

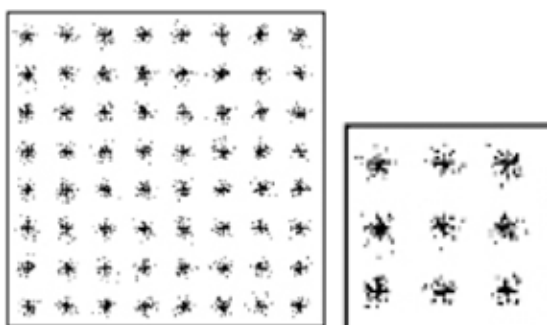


Рис. 4. Внешний вид сигнального созвездия с большим соотношением сигнал/шум в канале

Для проведения исследования взаимного влияния сигналов (ВВС) в телекоммуникационных системах (ТКС), предлагается использовать как геометрические объемные фигуры, так и их геометрическое взаимодействие в многомерных метрических пространствах [3]. Близость сфер, размеры и положение которых в виртуальном пространстве определяется параметрами модулированных сигналов [3–5], можно использовать как комплексный показатель оценки взаимного влияния сигналов друг на друга.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Особенностью сигналов с КАМ является количество уровней сигнального созвездия, которое используется при передаче информации [2, 6]. Безусловно, чем больше уровней сигнального созвездия с КАМ, тем больше скорость передачи информации, в соответствии с теоремой Найквиста [7].

$$V_{max} = 2H \log_2 2M, \quad (1)$$

где  $V_{max}$  – максимальная скорость передачи;  $H$  – ширина полосы пропускания канала, выраженная в Гц;  $M$  – количество уровней сигнала, которые используются при передаче.

Однако при этом наблюдается снижение достоверности демодулированного цифрового сигнала, обусловленной как шумами в линии связи канала передачи данных, так

и взаимным влиянием сигналов как в многоканальной ТКС с частотным разделением каналов (OFDM) и влиянием энергий сигналов, расположенных на соседних частотах, но излучаемых другими станциями. Взаимное влияние сигналов наблюдается как в проводных, так и в радиоканалах. ВВС в проводных каналах обусловлено влиянием электрических и магнитных полей в проводах магистральных кабелей [8], а в радиоканалах взаимным влиянием электромагнитных волн. Неидеальность реализации модулятора, радиотракта, нелинейность амплитудно-частотных характеристик входных селективных фильтров является причиной возникновения помехи по соседнему каналу [9]. В OFDM-системе связи передача данных осуществляется блоками из  $N$  отсчетов, образующих один OFDM-символ. Набор из  $N$  комплексных отсчетов  $X = [X_0, \dots, X_{N-1}]$  используется для параллельной модуляции  $N$  ортогональных поднесущих в частотной области. Вектор  $X$  включает в себя поднесущие, используемые для передачи данных, пилотные поднесущие, позволяющие осуществлять подстройку частот и фаз генераторов несущей и тактирующей частот во время приема пакета данных, а также нулевые поднесущие, где сигнал не передается и которые используются для формирования требуемого спектра сигнала, путем организации защитных частотных интервалов на краях используемой частотной полосы [10]. Для передачи данных на соответствующих поднесущих, как правило, используется квадратурная амплитудная модуляция (КАМ).

Изменение фаз модулированных сигналов с КАМ влечет возникновение фазовых шумов по соседнему каналу, что в совокупности с энергетическим влиянием приведет к искажению и потере полезной информации при демодуляции.

Несмотря на зависимость скорости передачи цифровой информации от количества уровней сигнала с КАМ, их количество ограничивается теоремой Шеннона, в соответствии с которой максимальная скорость передачи данных по каналу с шумом равна

$$V_{max} = H \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2)$$

где  $V_{max}$  – максимальная скорость передачи;  $H$  – ширина полосы пропускания канала, выраженная в Гц;  $S/N$  – соотношение энергии сигнала к спектральной плотности шума в канале.

Следует отметить зависимость влияния размерности сигнального созвездия и погрешности амплитуд на чувствительность

системы связи к самим погрешностям амплитуд. То есть чем обширней само сигнальное созвездие, тем ближе располагаются амплитуды аналогового сигнала, которые определяют различный цифровой код, следствием этого является повышенная чувствительность системы связи к погрешностям и снижение достоверности цифрового сигнала на выходе компьютера.

Если приравнять выражения (1) и (2), путем несложных математических преобразований получается выражение

$$M = \sqrt{1 + \frac{S}{N}}. \quad (3)$$

Из выражения следует, что количество уровней многоуровневой многофазовой квадратурной модуляции зависит от отношения энергии сигнала к спектральной плотности шума.

В современных ТКС спектральная плотность шума определяется эмпирически, путем измерения значения соответствующими контрольно-измерительными приборами (псфометрами). Комплексная оценка качества передаваемых сигналов не позволяет учитывать взаимное влияние сигналов по соседним каналам [1]. Перед передачей сигнала можно измерить значения искусственных и естественных шумов на данной несущей частоте. Но данные методы не позволяют определить значения энергетических и фазовых шумов по соседним

каналам, пока не осуществлена попытка передачи сигнала с вариантом сигнального созвездия. Для обеспечения требуемой достоверности передачи цифрового информационного сигнала осуществляется передача сигнала в линию связи канала передачи данных, а затем, в зависимости от помеховой обстановки и информационной загруженности соседних каналов, необходимо увеличивать или уменьшать количество уровней сигнального созвездия. Это влечет за собой значительные временные и аппаратурные затраты.

Предлагается для выбора сигнального созвездия предварительно использовать коэффициент взаимного влияния (КВВ) в многомерном метрическом пространстве.

В общем случае мощность помехи Р<sub>п</sub> (АСП), проникающей в соседний канал, определяется выражением [8]:

$$ACI = A(W) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f) |H(f - \omega)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} G(f) |H(f)|^2 df}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – нормированный частотный разнос каналов,  $G(f)$  – спектральная плотность мощности модулированного или линейно усиленного сигнала;  $H(f)$  – частотная характеристика селективного входного фильтра приемника.

Тогда спектральная плотность шума выражения (3) будет иметь вид

$$N = ASI + J = k(A_{m1}, A_{m2}, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2) G(f), \quad (5)$$

где

$$k(A_{m1}, A_{m2}, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{1}{d(A_{m1}, A_{m2}, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2)} - \text{коэффициент взаимного влияния сигналов в многоканальной телекоммуникационной системе};$$

$$J_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\varphi_n) \exp\left(\frac{-j2\pi ni}{N}\right) - \text{фазовый шум по соседнему каналу};$$

$d(A_{m1}, A_{m2}, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2)$  – расстояние между сферами в виртуальном многомерном метрическом пространстве.

Из выражения (5) следует, что, зная значения амплитуд  $A_{m1}, A_{m2}$ , несущих частот  $\omega_1, \omega_2$ , мгновенных фаз сегментов сигналов  $\varphi_1, \varphi_2$  сигнальных созвездий КАМ соседних каналов, можно предварительно произвести расчет расстояния между точками сфер в виртуальном многомерном метрическом пространстве для оценки взаимного энергетического и фазового влияния соседних каналов для выбора

соответствующего количества уровней сигнального созвездия для обеспечения требуемой скорости передачи дискретных сообщений в соответствии с выражением (3).

На рис. 5 представлен вариант значения расстояния между точками сфер, определяемыми параметрами сигналов, представленных в таблице в частотно-фазовом метрическом пространстве.

Параметры исследуемых сигналов

Номер сигнала	Частота (кГц)	Фаза	Амплитуда (В)
1 сигнал	62,5	$\pi/8$	0,2
2 сигнал	166	$\pi/3$	0,4

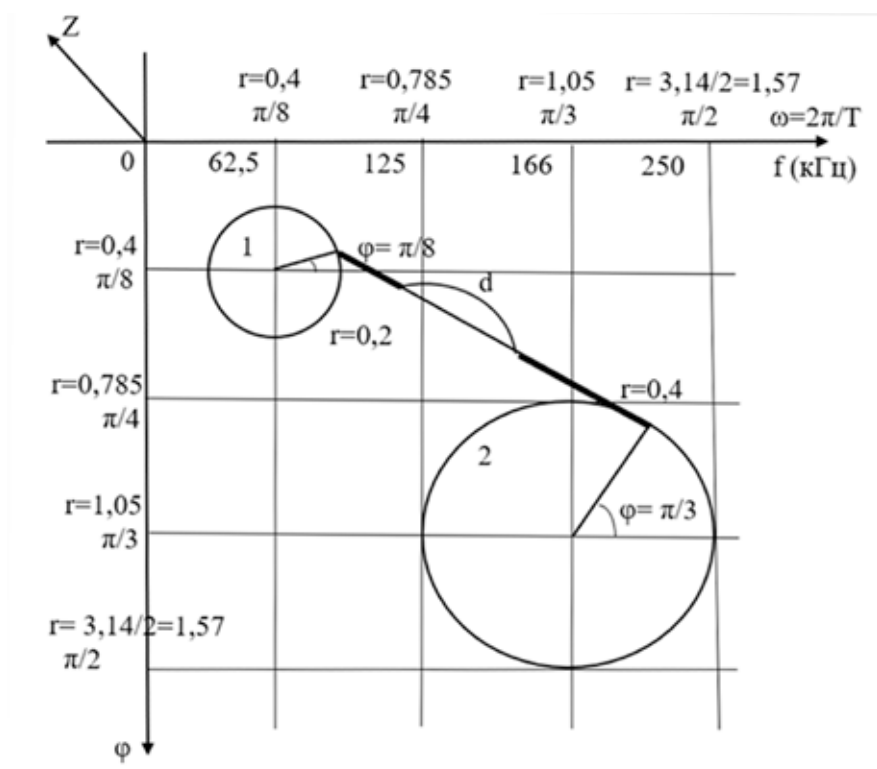


Рис. 5. Вариант значения расстояния между точками сфер в частотно-фазовом пространстве

### Заключение

Таким образом, использование коэффициента взаимного влияния, полученного в результате расчета расстояния между точками сфер в многомерном метрическом пространстве, позволит значительно сократить временные и аппаратные затраты при выборе сигнального созвездия, должного обеспечить заданную скорость передачи информации сигналов с КАМ в телекоммуникационной системе с частотным разделением каналов.

### Список литературы

1. Будко П.А., Федоренко В.В. Управление в сетях связи. Математические модели и методы оптимизации: монография. М.: Издательство физико-математической литературы, 2007. 228 с.
2. Муравьев В.В., Корневский С.А., Печень Т.М. Полосовая модуляция в системах телекоммуникаций: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУИР, 2019. 79 с.
3. Власов С.В., Власов В.И. Использование геометрических сфер для контроля качества информационных си-

стем // Universum: Технические науки. № 3 (36). М.: Изд-во «МЦНО», 2017. С. 9–12.

4. Власов С.В., Власов В.И. Модель контроля безопасности информационных систем // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6. С. 31–37.

5. Власов С.В., Власов В.И. Использование тел вращения для контроля качества информационных сигналов каналов передачи данных // Colloquium journal, Physics and Mathematics. 2020. № 6 (58). С. 12–14.

6. Пушкарев В.П. Аналоговые и цифровые радиоприемные устройства: учебное пособие. Томск: РТФ, ТУСУР, 2018. 237 с.

7. Коберниченко В.Г. Основы цифровой обработки сигналов: учебное пособие. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 150 с.

8. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы. 5-е изд. М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2019. 640 с.

9. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / Пер. с англ.; Под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.

10. Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В. Влияние фазового шума на OFDM-системы передачи данных // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Т. LIII. № 8. С. 528–542.