

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ИКТ, д.т.н.
_____ С.Н. Даровских
« ____ » _____ 2020 г.

Обзор современных методов модуляции

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ –Д.11.03.02.2020.308.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы
доцент кафедры ИКТ
_____ В.В. Новиков
« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы
студент группы КЭ-411
_____ А.А. Бурундуков
« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер
_____ В.Д. Спицына
« ____ » _____ 2020 г.

Челябинск 2020

РЕФЕРАТ

Бурундуков А.А. Анализ современных методов модуляции – Челябинск: ЮУрГУ, ВШ ЭКН; 2020, 45с., 3 табл., 20 рис., библиогр. список – 29наим.

Модуляция сигнала, частотная модуляция, фазовая манипуляция, квадратурная амплитудная модуляция, отношение сигнал/шум, сигнальное созвездие.

Объектом исследования является цифровая методика передачи информации.

Предметом исследования являются современные методы модуляции цифрового сигнала.

Цель исследования – выполнить анализ современных методов модуляции цифрового сигнала.

В рамках исследования были рассмотрены современные методы модуляции сигнала, особенности их функционирования и практического применения.

					ЮУрГУ –Д.11.03.02.2020.308.00 ПЗ		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>						3	
<i>Реценз.</i>					ЮУрГУ Кафедра ИКТ		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Утверд.</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Фазовая манипуляция	8
1.1 Квадратурная фазовая модуляция (QPSK).....	8
1.1.1 Общие принципы	8
1.1.2 Технические характеристики и схемы реализации	14
1.1.3 Достоинства и недостатки.....	17
1.1.4 Области практического применения.....	18
2 Квадратурная амплитудная модуляция	19
2.1 Квадратурная амплитудная модуляция 16-КАМ(16-QAM)	19
2.1.1 Общие принципы	19
2.1.2 Технические характеристики и схемы реализации	24
2.1.3 Достоинства и недостатки.....	27
2.1.4 Области практического применения.....	31
2.2 Квадратурная фазовая модуляция 32-КАМ(32-QAM).....	32
2.2.1 Общие принципы	32
2.2.2 Технические характеристики и схемы реализации	32
2.2.3 Достоинства и недостатки.....	33
2.2.4 Области практического применения.....	34
2.3 Квадратурная фазовая модуляция 64-КАМ(64-QAM).....	34
2.3.1 Общие принципы	34
2.3.2 Технические характеристики и схемы реализации	34
2.3.3 Достоинства и недостатки.....	38

2.3.4 Области практического применения.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	43
Приложение 1 – Таблица скоростей стандарта 802.11n при различных методах модуляции	47

ВВЕДЕНИЕ

На настоящий момент времени передача информации может быть осуществлена в самых различных объемах и на любое расстояние. Причем не важно, что это будет – радио, телевидение или поток данных из какой-то базы данных. Одной из современных основ данной передачи является использование цифровой формы передачи информации, которая имеет ряд особенностей в плане реализации и функционирования.

Текущий этап развития техники и информационных технологий можно охарактеризовать как становление и активное использование техники и методов цифровой обработки сигналов, которая не только активно используется, но и не менее активно развивается.

При осуществлении цифровой передачи информации существует возможность выполнить обход аппаратных ошибок элементов, а также создавать цифровые устройства для обработки сигналов, обладающие одинаковыми параметрами. Возникает возможность восстановления передаваемой информации, которая была искажена помехами при прохождении по каналу связи. Как правило, типовая цель цифровой системы связи заключается в выполнении передачи данных между двумя или более объектами. В радиоканале это обычно достигается посредством выполнения корректировки физической характеристики синусоидальной несущей, либо частоты, фазы, амплитуды. Для этого чаще всего используется модуляция различных типов.

Объектом исследования является цифровая методика передачи информации.

Предметом исследования являются современные методы модуляции цифрового сигнала.

Цель исследования – выполнить анализ современных методов модуляции цифрового сигнала.

Для достижения поставленной цели были обозначены следующие задачи.

1. Выполнить анализ фазовой модуляции и метода QPSK.

2. Выполнить анализ квадратурной амплитудной модуляции 16-КАМ(16-QAM).
3. Выполнить анализ квадратурной амплитудной модуляции 16-КАМ(16-QAM).
4. Выполнить анализ квадратурной амплитудной модуляции 16-КАМ(16-QAM).
5. Описать преимущества и недостатки каждого метода модуляции.
6. Выполнить анализ основных сфер использования указанных методов модуляции.

1 Фазовая манипуляция

1.1 Квадратурная фазовая модуляция (QPSK)

1.1.1 Общепринципы

Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) – это метод модуляции, который фактически передает два бита в одном символе. Другими словами, QPSK символ не представляет собой 0 или 1, он представляет собой 00, 01, 10 или 11.

Эта производительность с двумя битами на символ возможна, поскольку изменения несущей не ограничены двумя состояниями. Например, в ASK амплитуда несущей равна либо варианту амплитуды А (представляющему 1), либо варианту амплитуды В (представляющему 0). В QPSK несущая изменяется по фазе, а не по частоте, и существует четыре возможных фазовых сдвига.

В основе квадратурной фазовой модуляции находится кодирование двух бит передаваемой информации с использованием одного символа. Также скорость передачи одного символа ниже скорости передачи информации в два раза. На рисунке 1.1 представлена схема реализации кодирования одного символа сразу двумя битами.

Для квадратурной фазовой модуляции характерно выполнение кодирования двух бит передаваемых данных с использованием одного символа. Это снижает скорость передачи символов относительно скорости передачи информации. Для демонстрации процесса кодирования одним символом двух битов следует рассмотреть рисунок 1.1.

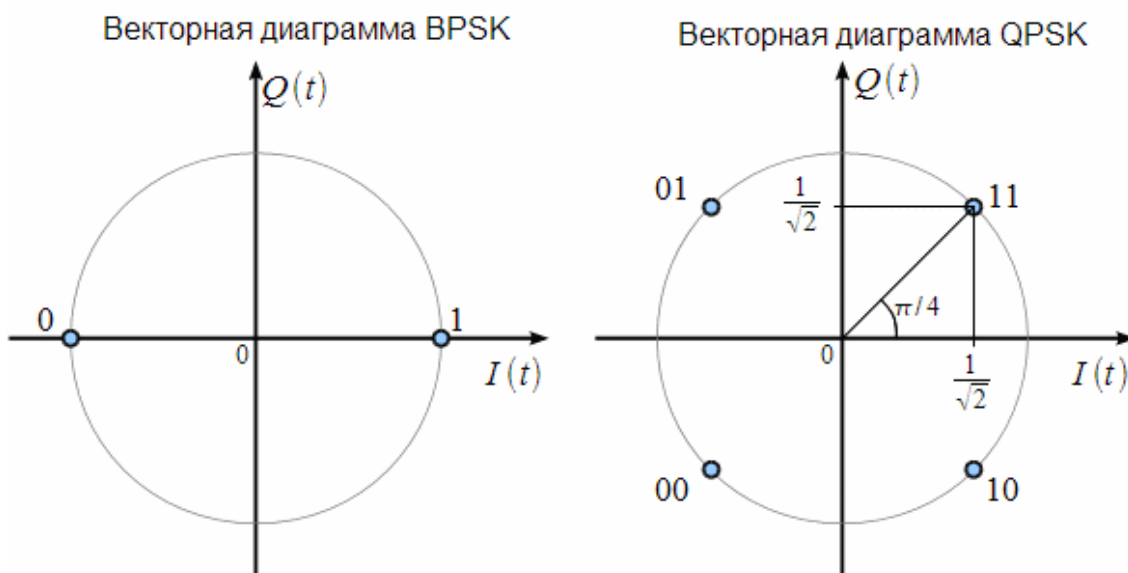


Рисунок 1.1 – Векторная диаграмма BPSK и QPSK сигналов

С целью сравнения процедуры кодирования информации на рисунке 1.1 отображены две векторные диаграммы. Слева представлена векторная диаграмма для BPSK сигнала, а справа – векторная диаграмма для QPSK сигнала. На диаграмме BPSK сигнала представлено использование одного бита информации для кодирования одного символа. Это представлено в виде двух точек на синфазной оси $I(t)$. Первая точка – это ноль передаваемой информации, а вторая точка – это единица передаваемой информации. Для квадратурного сигнала $Q(t)$ диаграмма BPSK характерно постоянное нулевое значение. Данные точки образуют созвездие фазовой манипуляции для кодирования BPSK.

При кодировании одного символа двумя битами данных осуществляется составление созвездия, образуемого четырьмя точками. Данное кодирование соответствует векторной диаграмме QPSK, представленной на рисунке 1.1 справа. В результате будут получены значения для синфазной оси $I(t)$ и квадратурного канала $Q(t)$, отличные от нуля. Размещение точек передаваемых бит информации будет осуществлено на единичной окружности. Кодирование информации будет выполняться посредством выполнения разбиения битового потока на четные и нечетные биты. Для кодирования четных битов информации будет использоваться синфазная ось $I(t)$, а для кодирования нечетных битов

информации будет использоваться квадратурный канал $Q(t)$. А два последовательно идущих друг за другом бита информации будут иметь одновременное кодирование на основании синфазного $I(t)$ и квадратурного $Q(t)$ сигналов. На рисунке 1.2 представлен пример осциллограммы кодирования на основании QPSK информационного сообщения «110010110010001»

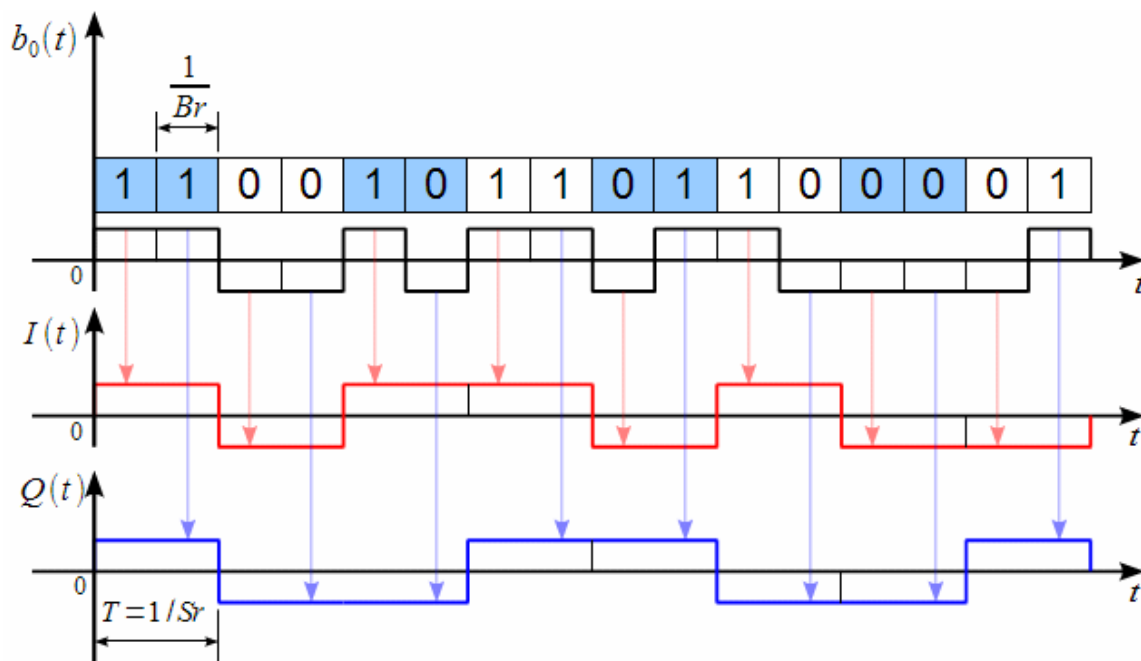


Рисунок 1.2 – Синфазная и квадратурная составляющие QPSK сигнала

Верхний график демонстрирует разделение входного потока на отдельные пары бит, что соответствует одной точке в созвездии QPSK. Второй график демонстрирует осциллограмму $I(t)$, снятую при выполнении операции по передаче информации. Важно учитывать тот факт, что биты в сообщении нумеруются с нуля, соответственно первый в очереди бит будет иметь нулевой номер и являться четным на основании порядка. При этом $I(t) > 0$, если четный бит единица, и $I(t) < 0$, если четный бит соответствует нулю. По аналогии выполняется построение квадратурного канала $Q(t)$, с той разницей, что он основывается на нечетных битах. Длительность одного символа $T = 1/Sr$ будет в два раза более, чем длительность одного бита исходной информации. Условное изображение

устройства, осуществляющего кодирование $I(t)$ и $Q(t)$ на основании созвездия QPSK, представлено на рисунке 1.3.

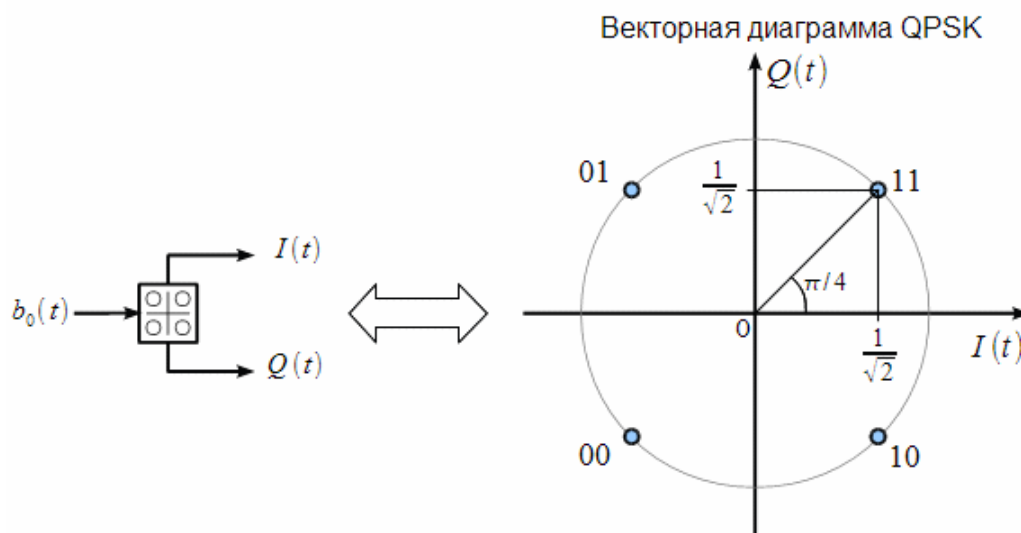


Рисунок 1.3 – Устройство кодирования синфазной и квадратурной составляющих на основе созвездия QPSK

В зависимости от того, какая пара бит $b_0(t)$ будет находиться на входе, на выходе будет получены сигналы $I(t)$ и $Q(t)$, являющиеся постоянными для данной пары бит и значение которых зависит от передаваемых данных.

Какими должны быть четыре возможных фазовых сдвига для QPSK можно определить интуитивно. Сначала следует учесть тот факт, что модуляция – это только начало процесса связи; приемник должен иметь возможность извлекать из модулированного сигнала исходную информацию. Далее, имеет смысл найти максимальное разделение между четырьмя вариантами фазы, чтобы приемнику было проще отличить одно состояние от другого. У нас есть 360° фазы для работы с четырьмя фазовыми состояниями, и, следовательно, разделение должно составлять $360^\circ/4=90^\circ$.

Таким образом, наши четыре фазовых сдвига QPSK составляют 45° , 135° , 225° и 315° .

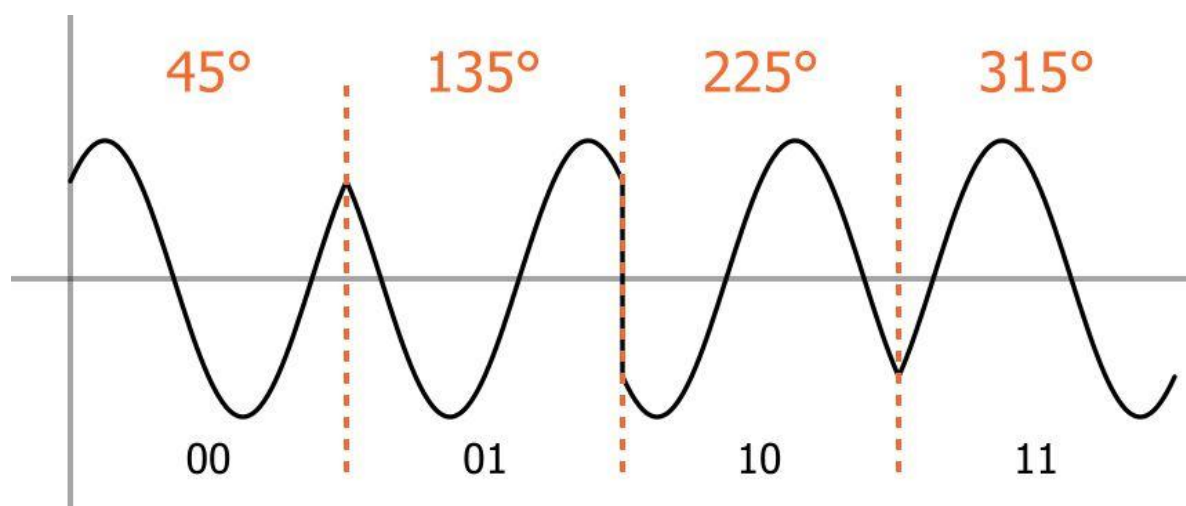


Рисунок 1.4 – Четыре возможных состояния фазы QPSK сигнала

Приведенное выше соответствие фазового сдвига и цифровых данных является логичным, но произвольным выбором, поскольку передатчик и приемник соглашаются интерпретировать сдвиги фазы одинаковым способом, и могут использоваться различные схемы соответствия.

Есть еще одна причина, почему имеет смысл выбрать 45°, 135°, 225° и 315°: они легко генерируются с помощью методом I/Q модуляции, потому что суммирование сигналов I и Q, которые либо инвертированы, либо не инвертированы, приводит к этим четырем фазовым сдвигам. Следующая таблица должна прояснить это:

Таблица 1.1 – Зависимость фазы конечного сигнала от состояния I/Q сигналов

I	Q	Фазовый сдвиг I+Q
не инвертирован	не инвертирован	45°
инвертирован	не инвертирован	135°
инвертирован	инвертирован	225°
не инвертирован	инвертирован	315°

По сравнению со схемами модуляции, которые передают один бит на символ, QPSK обладает преимуществом с точки зрения эффективности занимаемой ширины полосы частот. Например, представьте аналоговый сигнал основной полосы частоты в системе BPSK (двоичная фазовая манипуляция).

BPSK использует два возможных фазовых сдвига вместо четырех, и поэтому она может передавать только один бит на символ. Сигнал основной полосы частот имеет определенную частоту, и в течение продолжительности каждого символа может передаваться один бит. QPSK система может использовать сигнал основной полосы с той же частотой, но при этом передает два бита в течение продолжительности каждого символа. Таким образом, эффективность полосы частот у QPSK (в идеале) в два раза выше.

При осуществлении модуляции на основании QPSK используется специальное устройства, называемое модулятором QPSK. Данное устройство в своем составе содержит такие элементы, как разделитель битов, два умножителя с локальным генератором, 2-разрядный преобразователь из последовательного в параллельный, а также летнюю схему. На рисунке 1.5 представлена блок–схема организации модулятора QPSK.

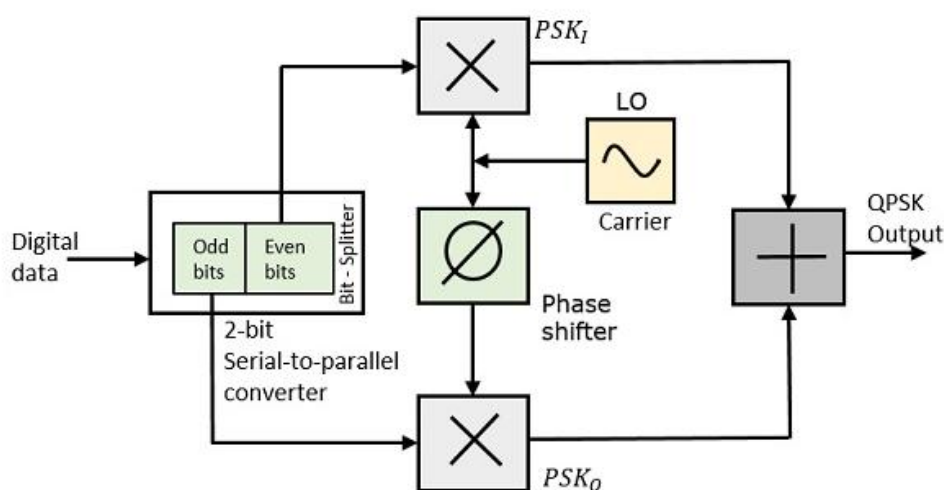


Рисунок 1.5 – Блок-схема модулятора QPSK

На вход модулятора поступают биты сообщения, которые разделяются им на четные и нечетные. Далее они умножаются на необходимую несущую, после чего модулируется сигнал.

Демодулятор QPSK содержит две схемы демодулятора сигнала с локальным генератором, два полосовых фильтра, две схемы интегратора, а также 2-х

разрядный параллельный преобразователь. На рисунке 1.6 представлена блок-схема демодулятора QPSK.

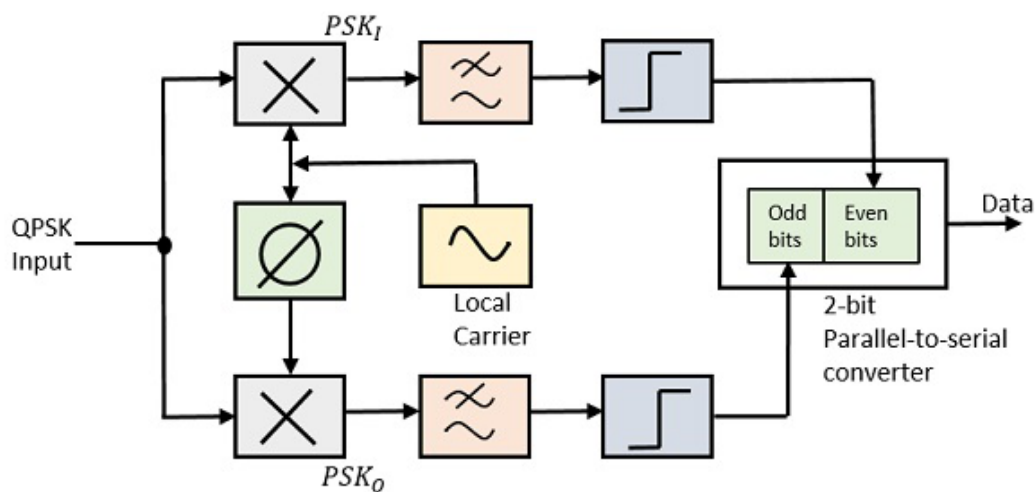


Рисунок 1.6 – Блок-схема демодулятора QPSK.

В данном случае на входе демодулятора двумя детекторами происходит демодуляция сигнала, после чего происходит восстановлению пары бит в исходные данные. Далее указанные сигналы передаются в параллельно-последовательный преобразователь.

1.1.2 Технические характеристики и схемы реализации

На рисунке 1.7 показано разбиение типичного потока импульсов при модуляции QPSK. На рис. 1.7 (а) представлен исходный поток данных $dk(t)=d_0, d_1, d_2, \dots$, состоящий из биполярных импульсов, т.е. d_k принимают значения +1 или -1, представляющие двоичную единицу и двоичный нуль. Этот поток импульсов разделяется на синфазный поток, $dI(t)$, и квадратурный, $dQ(t)$, как показано на рис. 1.2, б.

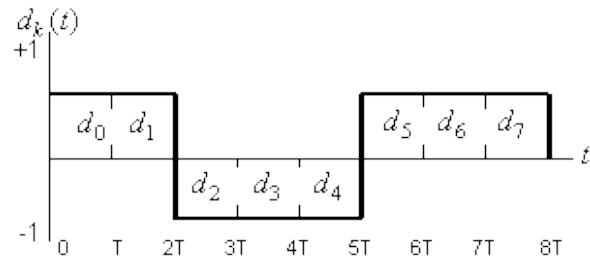
$$dI(t) = d_0, d_2, d_4, \dots \text{ (четные биты)}$$

$$dQ(t) = d_1, d_3, d_5, \dots \text{ (нечетные биты)}$$

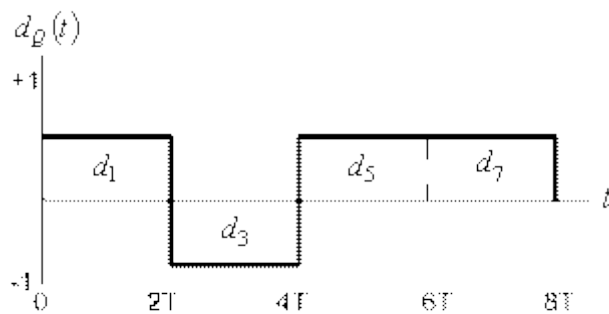
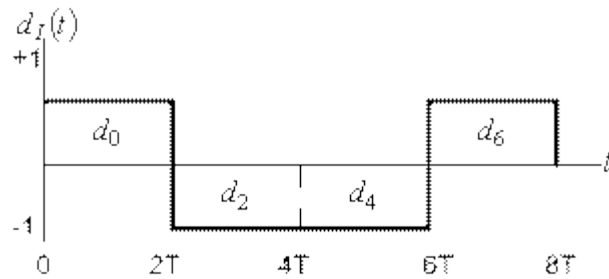
Отметим, что скорости потоков $dI(t)$ и $dQ(t)$ равны половине скорости передачи потока $dk(t)$. Удобную ортогональную реализацию сигнала QPSK, $s(t)$,

можно получить, используя амплитудную модуляцию синфазного и квадратурного потоков на синусной и косинусной функциях от несущей.

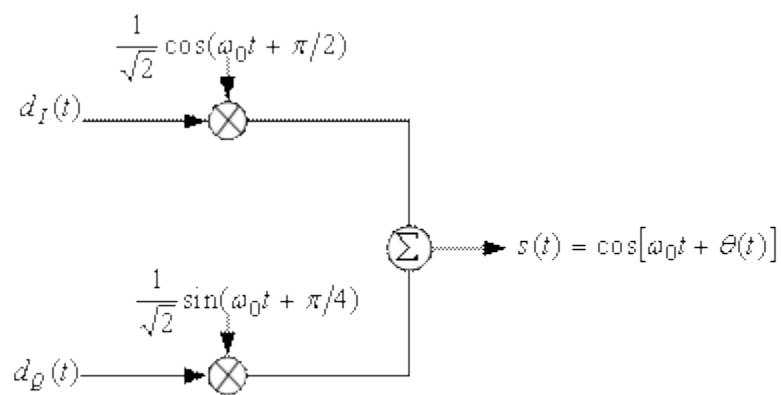
$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} d_I(t) \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{4}\right) + \frac{1}{\sqrt{2}} d_Q(t) \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1.1)$$



А)



Б)



В)

Рисунок 1.7 – Модуляция QPSK

С помощью тригонометрических тождеств уравнение (1.1) можно представить в следующем виде.

$$s(t) = \cos[2\pi f_0 t + \theta(t)] \quad (1.2)$$

Модулятор QPSK, показанный на рис. 1.7, в, использует сумму синусоидального и косинусоидального слагаемых, тогда как аналогичное устройство применяет разность таких слагаемых. Поскольку когерентный приемник должен разрешать любую неопределенность фазы, использование в передатчике иного формата фазы можно рассматривать как часть подобной неопределенности. Поток импульсов $dI(t)$ используется для амплитудной модуляции (с амплитудой +1 или -1) косинусоиды. Это равноценно сдвигу фазы косинусоиды на 0 или π ; следовательно, в результате получаем сигнал BPSK. Аналогично поток импульсов $dQ(t)$ модулирует синусоиду, что дает сигнал BPSK, ортогональный предыдущему. При суммировании этих двух ортогональных компонентов несущей получается сигнал QPSK. Величина $\theta(t)$ будет соответствовать одному из четырех возможных сочетаний $dI(t)$ и $dQ(t)$ в уравнении (9.44): $\theta(t) = 0^\circ, \pm 90^\circ$ или 180° ; результирующие векторы сигналов показаны в сигнальном пространстве на рис. 9.11. Так как $\cos(2\pi f_0 t + \pi/4)$ и $\sin(2\pi f_0 t + \pi/4)$ ортогональны, два сигнала BPSK можно обнаруживать отдельно.

При стандартной QPSK из-за синхронизации $dI(t)$ и $dQ(t)$ за промежуток $2T$ фаза несущей может изменяться только раз. В зависимости от значений $dI(t)$ и $dQ(t)$ в любом промежутке $2T$, фаза несущей на этом промежутке может принимать одно из четырех значений, показанных на рис. 9.11. В течение следующего интервала $2T$ фаза несущей остается такой же, если ни один из потоков не меняет знака. Если только один из потоков импульсов изменит знак, происходит сдвиг фазы на $\pm 90^\circ$. Изменение знака у обоих потоков приводит к сдвигу фазы на 180° . На рисунке 1.8, а изображен типичный сигнал QPSK для последовательности $dI(t)$ и $dQ(t)$, показанной на рисунке 1.7.

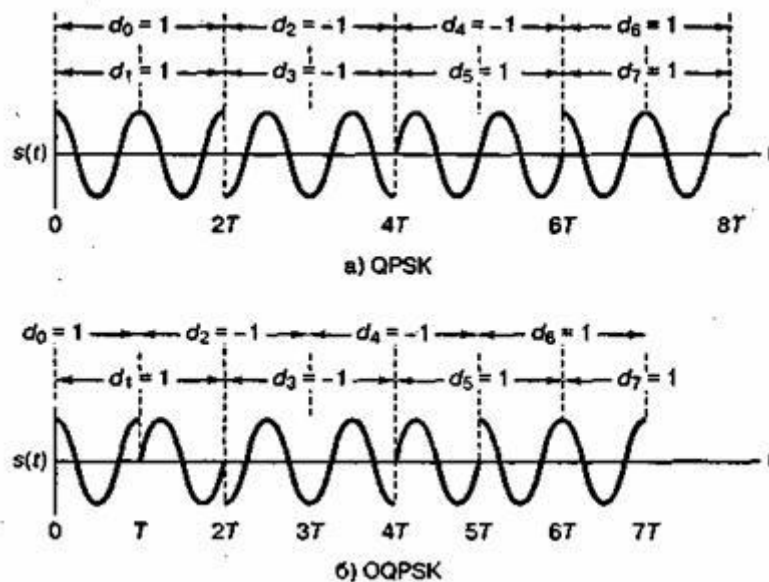


Рисунок 1.8 – Сигналы: а) QPSK; б) OQPSK.

1.1.3 Достоинства и недостатки

Простая двоичная фазовая модуляция осуществляет передачу одного бита на символ. Для более сложной квадратурной модуляции характерно достижение скорости передачи выше в два раза, при этом используя вдвое меньшую ширину полосы частот. Также QPSK реализует плотность передаваемой информации в расчете на частотную ширину канала выше одной единицы.

Однако у QPSK имеются и недостатки. Так, в случае использования QPSK в многоканальной системе связи на смежных несущих боковая часть спектра, отстающая от несущей частоты f_c на $\frac{3}{4} R_b$ в одном из двух направлений, может стать причиной возникновения сильных межканальных помех. Также большие амплитудные колебания в сигнале снижают уровень качества сигнала. Для символьной ошибки в QPSK значение является более высоким, что обусловлено наличием в одном символе двух бит.

1.1.4 Области практического применения

QPSK модуляция преимущественно используется при реализации беспроводных компьютерных сетей, таких как WLAN, WiMAX, LTE и т.д. А высокая эффективность данного типа модуляции достигается посредством применения её совместно с модуляцией BPSK на различных каналах, а также с различными сигналами синхронизации. При осуществлении работы на основании данного взаимодействия на основании BPSK-модуляции реализуется преамбула, пилотные последовательности, а также кадровые маяки, применяемые для каналов и иных целей синхронизации, а QPSK модуляции применяется непосредственно для передачи данных. При модуляции BPSK скорость передачи данных достигает 6 и 9 Мбит/с, а при модуляции QPSK – 12 и 18 Мбит/с соответственно.

2 Квадратурная амплитудная модуляция

2.1 Квадратурная амплитудная модуляция 16-QAM(16-QAM)

2.1.1 Общие принципы

С целью получения более высокой скорости передачи данных чаще всего применяется квадратурная амплитудная модуляция QAM, относящаяся к амплитудно-фазовым видам модуляции сигнала. Данный вид модуляции очень часто используется в кабельных модемах, используется в рамках стандарта телевидения DVB-C, а также при осуществлении цифрового радиовещания СВЧ диапазона.

Сравнивая QAM с фазовой модуляцией, следует отметить тот факт, что по скорости передачи он существенно выигрывает и является более эффективным.

Фактически алгоритм реализации квадратурной амплитудной модуляции представляет собой разновидность многопозиционной амплитудно-фазовой модуляции и имеет широкое распространение при реализации современных модемов ГЧ.

При осуществлении модуляции сигнала на основании алгоритма квадратурной амплитудной модуляции характерно выполнение данного процесса одновременно на основании изменения амплитуды синфазной (I) и квадратурной (Q) компонент для несущего гармонического колебания (F_c), которые при этом еще являются сдвинутыми по фазе друг относительно друга на $\pi/2$ радиана. Результирующий сигнал Z формируется на основании выполнения сложения указанных колебаний. В итоге получается, что для QAM-модулированного дискретного сигнала может быть использовано его описание на основании формулы (2.1)

$$Z_m(t) = I_m * \cos(2 \pi f_c t) + Q_m * \sin(2 \pi f_c t) \quad (2.1)$$

где: t – изменяется в диапазоне $\{(m - 1) * Dt \dots m * Dt \}$;

m – порядковый номер дискрета времени;

Dt – шаг квантования входного сигнала по времени;

p – шаг квантования входного сигнала по амплитуде;

a_m и b_m – модуляционные коэффициенты.

$$I_m = a_m * p, Q_m = b_m * p \quad (2.2)$$

Этот же сигнал также может быть представлен в комплексном виде:

$$Z = I + j * Q \quad (2.3)$$

$$Z_m = A_m * \exp(2 p f_c t + j m) \quad (2.4)$$

где: $A_m = (Q_m^2 + I_m^2)^{1/2}$ – алгоритм изменения амплитуды модулированного сигнала

$j_m = \arctg(Q_m / I_m)$ – алгоритм изменения фазы модулированного сигнала.

На рисунке 2.1 представлен принцип формирования сигнала QAM.

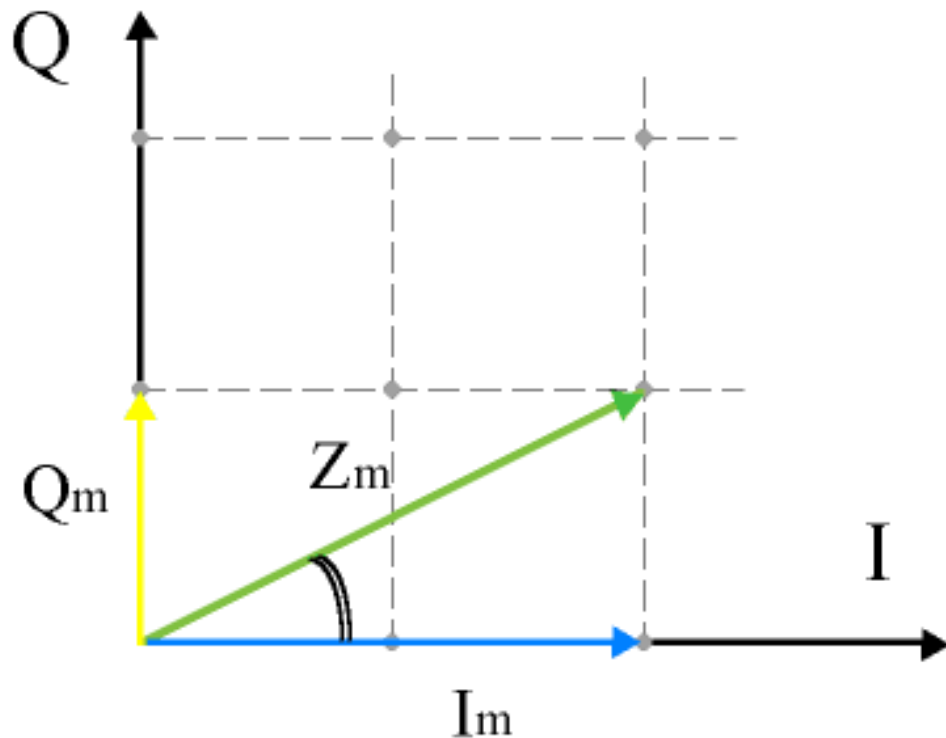


Рисунок 2.1 – Принцип формирования сигнала QAM

На основании квадратурной амплитудной модуляции все передаваемые данные могут быть закодированы на основании одновременных изменений амплитуды и фазы колебания. На рисунке 2.1 представлена диаграмма, отображающая принцип формирования результирующего колебания Z , представленного в виде вектора зеленого цвета с суммированием его с вектором

квадратурной составляющей Q , представленной желтым цветом и с вектором синфазной составляющей I , представленной синим цветом. Для определения амплитуды вектора Z используется соотношение A_m , а для определения угла между вектором и осью абсцисс вычисляется соотношение j_m .

Данный алгоритм очень сильно зависит от того факта, что при осуществлении модулирования синфазной и квадратурной составляющей несущего колебания применяется одно и то же значение дискрета изменения амплитуды. В связи с этим все окончания векторов модулированного колебания выстраиваются в виде прямоугольной сетки на фазовой плоскости действительной – $\text{Re}\{Z\}$, а также мнимой составляющей вектора модулированного сигнала – $\text{Im}\{Z\}$. Количество узлов в рамках данной сетки зависит от типа используемого алгоритма QAM. А схему расположения данных узлов называют созвездием.

При указании типа используемого алгоритма QAM используется типовая схема обозначений вида QAM – $\langle \text{число} \rangle$, где число формируется на основании значения вида 2^N , отображая количество узлов, расположенных на фазовой сетке, а также максимальное число различных значений вектора модулированного сигнала. Значение N отображает показатель уровня спектральной эффективности используемого алгоритма.

На рисунке 2.2 приведена упрощенная структурная схема формирователя сигнала на основании алгоритма модуляции QAM. При поступлении данных от источника сигнала выполняется преобразование последовательности бит D . Данные преобразуются в последовательность двумерных модуляционных символов M . Число бит в рамках данного символа соответствует значению N . В случае алгоритма QAM-16 $N = \log_2 16 = 4$.



Рисунок 2.2 – Структурная схема формирователя QAM модулированного сигнала

Формирователь кодовых символов выполняет преобразование двумерного кодового символа m_j в пару кодовых символов a_j и b_j . В алгоритме QAM-16 для данных символов все допустимые значения принадлежат множеству $\{1, 3, -1, -3\}$, и демонстрируют соответствующие значения для реальной и мнимой координаты вектора модулированного колебания. Все полученные значения $A \{a_j\}$ и $B \{b_j\}$ в дальнейшем применяются для амплитудной модуляции синфазной I и квадратурной Q составляющих несущего колебания. Последний этап преобразования характеризуется выполнением сложения всех колебаний, на основании чего формируется результирующий сигнал Z .

На рисунке 2.3 представлено расположение векторов модулированного колебания – созвездие для алгоритма QAM-16.

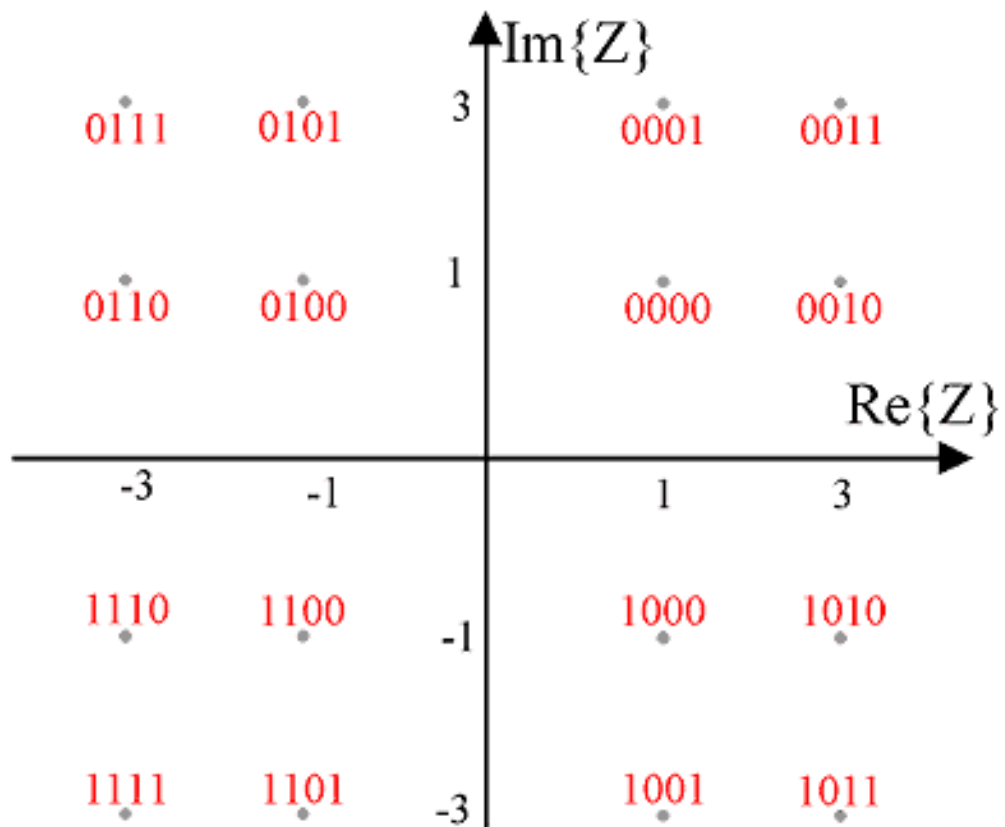


Рисунок 2.3 – Созвездие QAM-16

На рисунке 2.3 в виде выделения красным цветом представлены значения модуляционных символов, для которых имеет соответствие указанные точки на фазовой плоскости модулированного колебания $\{m_3, m_2, m_1, m_0\}$. В алгоритме QAM-16 пара $\{m_3, m_2\}$ указывает на номер квадранта фазовой плоскости, либо на знаки реальной, а также мнимой координаты вектора модулированного колебания:

$$00 \text{ Sign}(\text{Re}\{Z\})=1, \text{ Sign}(\text{Im}\{Z\})=1$$

$$10 \text{ Sign}(\text{Re}\{Z\})=1, \text{ Sign}(\text{Im}\{Z\})=-1$$

$$01 \text{ Sign}(\text{Re}\{Z\})=-1, \text{ Sign}(\text{Im}\{Z\})=1$$

$$11 \text{ Sign}(\text{Re}\{Z\})=-1, \text{ Sign}(\text{Im}\{Z\})=-1$$

В рамках данного алгоритма парой $\{m_1, m_0\}$ определяются значения амплитуды для реальной, а также мнимой координаты вектора модулированного колебания. В таблице 2.1 представлено описание значений кодовых символов a_i и b_i , соответствующих значениям младших разрядов в пределах модуляционного символа.

Таблица 2.1 – Описание значений кодовых символов a_i и b_j

m_1	m_0	a_j	b_j
0	0	1	1
0	1	1	3
1	0	3	1
1	1	3	3

Процедура преобразования модуляционных символов в кодовые символы осуществляется на основании алгоритмов Грея для помехоустойчивого кодирования данных. На основании данной процедуры каждого вектора в рамках модулированного колебания, находящихся на незначительном удалении друг от друга на фазовой плоскости, в соответствие приводятся значения кодовых символов, отличающихся значениями только одного бита. В качестве примера можно привести векторы $Z = 1 + j$ и $Z = 1 + 3j$, которым соответствуют кодовые символы $\{0, 0\}$ и $\{0, 1\}$.

16-ти позиционная квадратурная амплитудная модуляция (16-QAM) имеет сразу четыре сигнальных значения для каждой из квадратурных компонент I и Q. За счет данного факта и достигается наличие шестнадцати значений для суммарного сигнала.

При выполнении модуляции сигнала на основании 16-QAM выполняется формирование модуляционных символов в виде четырехразрядных двоичных слов, на основании которых осуществляется определение фазы и амплитуды модулированного колебания. При этом весь входной поток демультиплексируется через четыре субпотока. В отличие от 16-QAM, модуляция 64-QAM для модуляционных символов использует 6-разрядные слова, что приводит к необходимости демультиплексирования входного потока сразу на 6 потоков.

Входной поток данных демультиплексируется на v субпоток, $v = 4$ для 16-QAM. Поток битов ($x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$) преобразуется в последовательность слов из v разрядов. При модуляции 16-QAM выполняется следующая структура отображения последовательного потока входных битов в 4-разрядные слова в параллельной форме: $x_0 - b_{00}, x_1 - b_{20}, x_2 - b_{10}, x_3 - b_{10}$ и т. д.

2.1.2 Технические характеристики и схемы реализации

Зная, что $16 = 2^4$, получаем, что в 16-QAM одним символом могут быть переданы четыре бита. Это означает, что символьная скорость в таком виде модуляции получается в четыре раза меньше битовой, т. е. равна $1/4$ от битовой скорости. Таким образом, данный тип модуляции позволяет организовать спектрально более эффективную передачу данных. Векторная диаграмма сигнала 16-QAM приведена на рисунке 2.4.

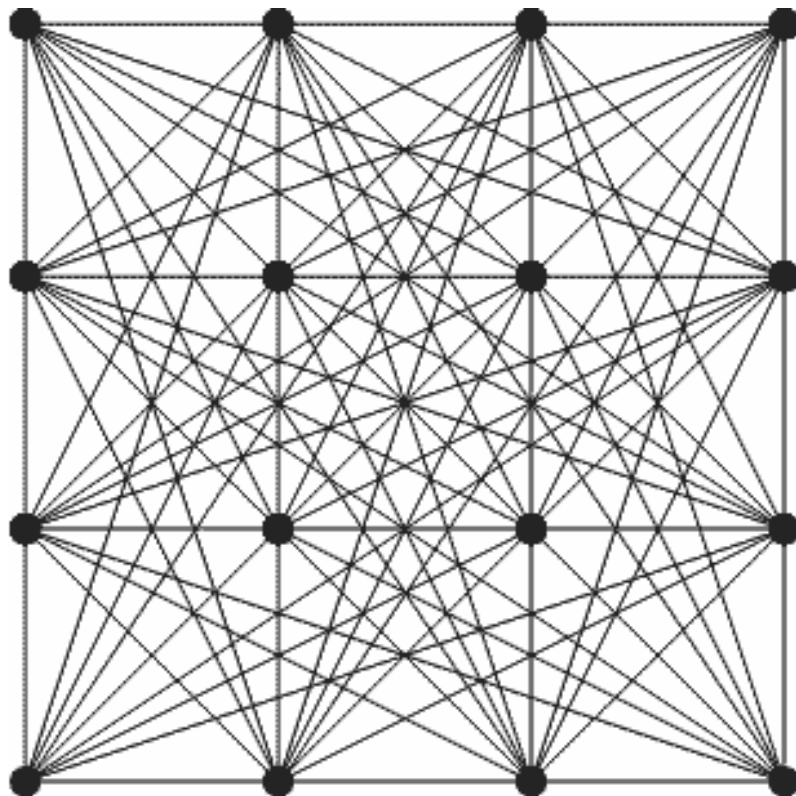


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма сигнала 16-QAM

Точно так же, как и в других системах модуляции в 16-QAM применяется кодирование Грея. Соответствие сигнальных созвездий, кода Грея и цифровых значений сигналов I и Q для 16-QAM, приведено на рисунке 2.5.

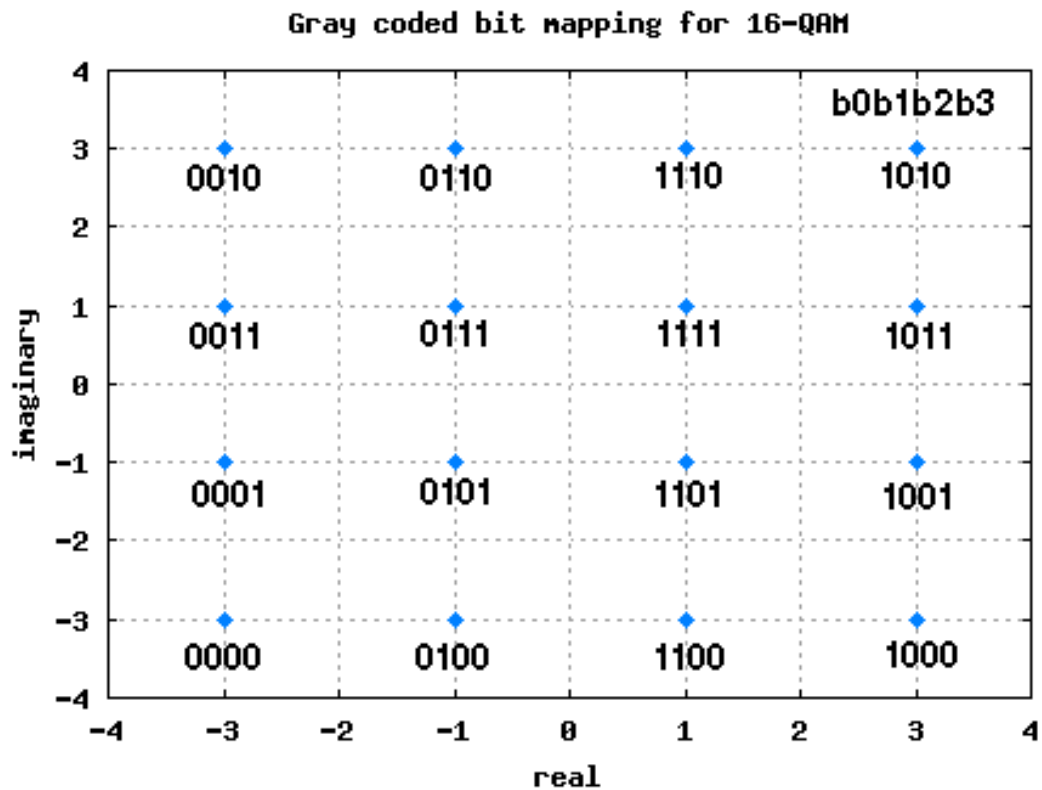


Рисунок 2.5 – Соответствие сигнальных созвездий, кода Грея и цифровых значений сигналов I и Q для 16-QAM

Глазковая диаграмма сигналов I и Q для 16-позиционной квадратурной модуляции 16 QAM приведена на рисунке 2.6.

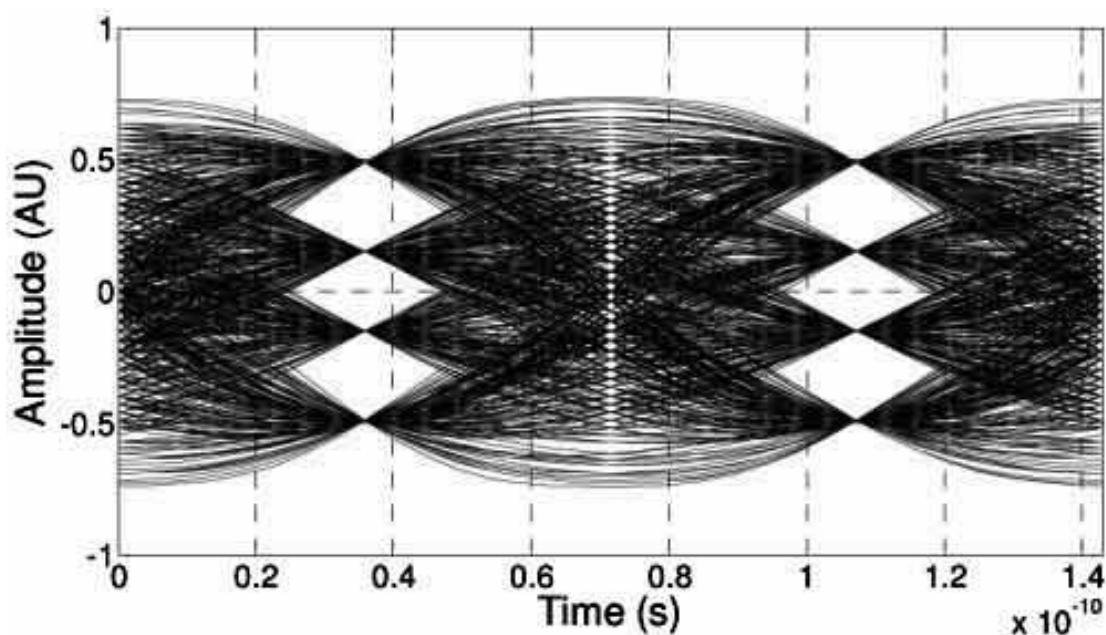


Рисунок 2.6. Глазковая диаграмма сигналов I и Q 16-позиционной квадратурной модуляции 16 QAM

В 16-ти позиционной QAM (16-QAM) существует по четыре сигнальных значения для каждой из квадратурных компонент I и Q. Этим достигаются 16 значений суммарного сигнала.

2.1.3 Достоинства и недостатки

Одним из распространенных достоинств значений номера QAM является наличие повышенной скорости передачи данных, так как большая часть информационных битов передается в течении одного цикла передачи. Однако данное преимущество приводит к тому, что по мере роста числа уровней амплитуды сигнала располагаются все ближе друг к другу, что приводит к увеличению чувствительности системы к уровню шумов. Таким образом, по мере увеличения номера QAM возрастает его требования касемо значения параметра CNR (Carrier Noise Ratio), демонстрирующим соотношение сигнал/шум. На рисунке 2.7 представлено отношение параметра CNR к другому параметру – BER (Bit Error Rate – Отношение Бит/Ошибка).

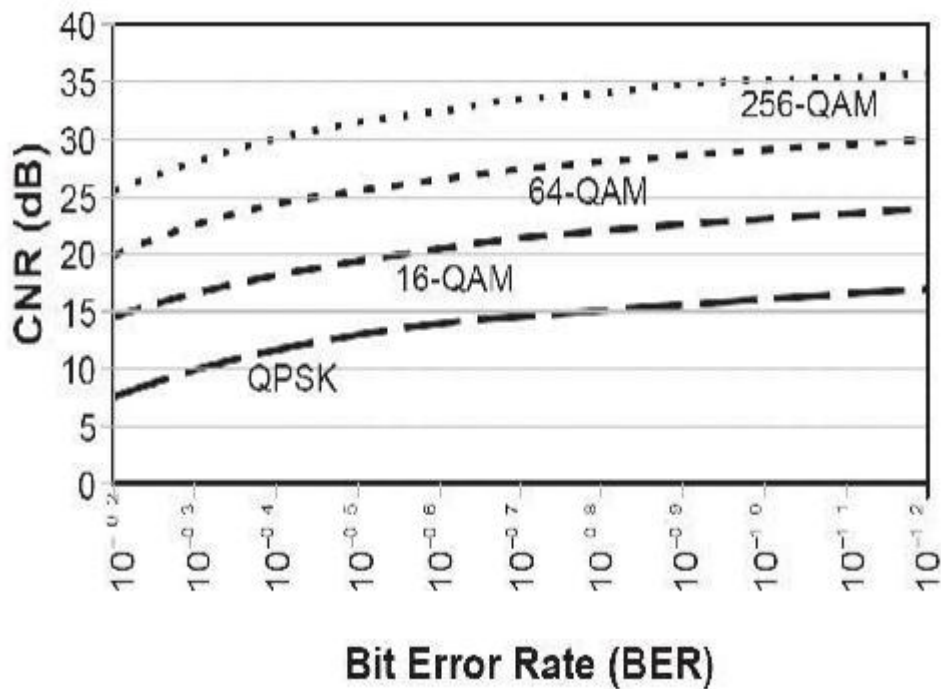


Рисунок 2.7 – Отношение CNR к BER.

Параметр BER (Bit Error Rate) демонстрирует отношение Бит/Ошибка, отображающий количество некорректно полученных битов данных. Более точное его значение получается путем деления числа некорректно или ошибочно принятых битов на общее число переданных битов. Значение данного параметра чаще всего выражается в формате 10^{-x} , где x – это число корректно принятых бит. Например, если значение данного параметра равно 10^{-9} , то говорят, что один ошибочный бит был принят после получения потока информации объемом в 1 миллиард битов.

Параметр NPR (Noise Power Ratio) – демонстрирует соотношение шум/мощность, чаще всего используется для аналоговых устройств, которые выполняют кодирование сигнала с применением квадратурной фазовой модуляции и квадратурной амплитудной модуляции. Так как для данных видов модуляции характерно использование частотного спектра в виде Гауссовского шума, то выполнение NRT теста осуществляется посредством подмены сигнала на эквивалентную полосу белого шума. А при приближении к середине данной полосы выполняется опускание шумовой «зарубки». При осуществлении

пропускания данной полосы шума через устройство, происходит определение глубины данной «зарубки» на основании нескольких факторов, таких как термический шум, шумоподобные продукты сигнала и т.д. (рисунок 2.8).

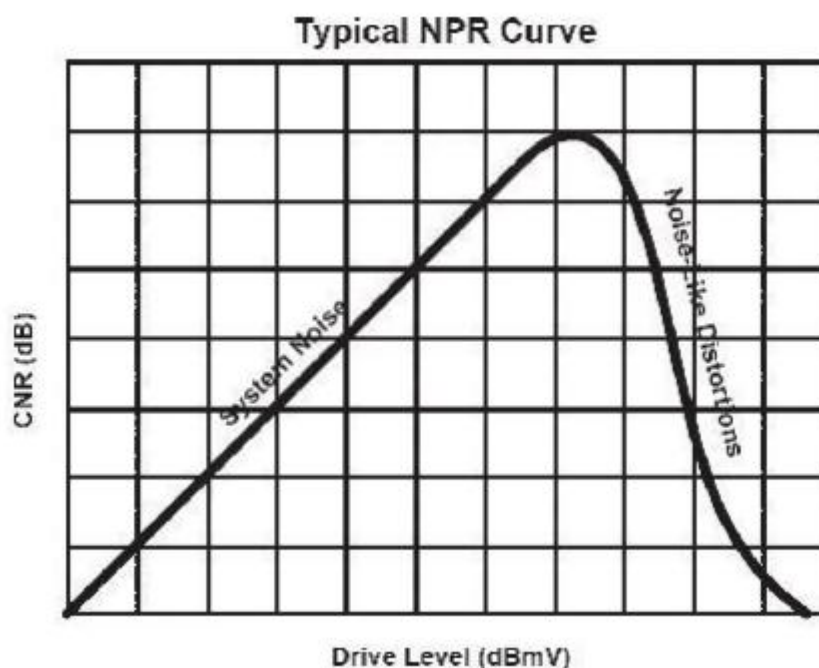


Рисунок 2.8 – Типичный вид кривой NPR

Показатель FEC (Forward Error Correction) – Упреждающая Коррекция Ошибок определяется на основании использования специальной программной технологии, осуществляющей операции по выявлению и устранению ошибок при выполнении цифровой передачи данных. Данная задача является довольно сложной и затратоемкой, однако является попросту необходимой, так как позволяет упреждать возможные потери битов данных, что в целом только положительно влияет на качество передаваемого сигнала.

Показатель MER (Modulation Error Ratio) демонстрирует отношение «модуляция/ошибка» в виде величины отклонения модуляции между переданным и принятым значением в разрезе амплитуды, либо фазы, либо обоих параметров одновременно (рисунок 2.9).

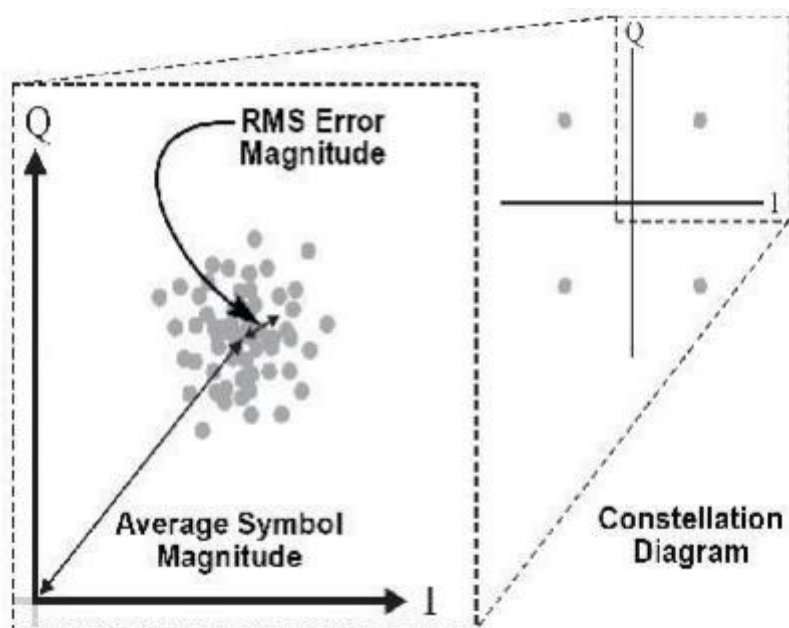


Рисунок 2.9 – Определение MER

По мере увеличения показателя MER до величины, при которой происходит исчезновение точек на границах ячеек, либо за ними, то происходит резкое возрастание показателя BER. По мере роста показателя BER возникает ситуация, когда технология FEC не может выполнить корректировку всех возникающих ошибок, в результате чего возникнет сбой передачи данных. При этом до возникновения данного момента, но, когда значение всех данных параметров является максимально критичным, качество передаваемого сигнала будет отличным. Это явление носит название «эффект срыва», до достижения которого качество сигналов является хорошим, а после – очень плохим. Данный эффект является характерной сложностью для некоторого момента, при котором фактически всё является довольно плохим для организации передачи сигнала, однако невозможно предугадать момент возникновения срыва.

Для алгоритма квадратурной амплитудной модуляции характерна простота реализации, а также наличие довольно эффективного алгоритма линейного кодирования xDSL сигналов. Современные реализации данного алгоритма позволяют обеспечить достаточно высокий уровень показателей спектральной эффективности. Наличие ограниченности спектра, а также отличительно высокий

уровень помехоустойчивости у QAM модулированного сигнала позволяют осуществить построение на основании данного алгоритма модуляции высокоскоростных систем передачи данных на основании двухпроводной линии с применением частотного разделения для передаваемого и принимаемого сигнала.

Недостатками данного алгоритма называют довольно невысокий уровень полезного сигнала в спектре используемого модулированного колебания. Данный недостаток является общим для семейства алгоритмов, основанных на амплитудной модуляции, и выражается в том факте, что максимальная амплитуда в спектре модулированного колебания принадлежит гармонике с частотой несущего колебания. основании чего

2.1.4 Области практического применения

QAM (quadrature amplitude modulation) широко используется в качестве схемы модуляции для цифровых телекоммуникационных систем таких, как стандарты 802.11 Wi-Fi. Произвольная высокая спектральная эффективность может быть достигнута с помощью QAM путем установки подходящего размера созвездия, ограниченного только уровнем шума и линейностью канала связи. Модуляция QAM используется в системах с оптическим волокном по мере увеличения скорости передачи битов. QAM16 и QAM64 могут быть оптически эмулированы с 3-канальным интерферометром.

16-QAM модуляция используется в телевизионных стандартах PAL и NTSC для передачи сигналов цветности. Также используется в стереофоническом радиовещании, в системах программно-определяемого радио (ПОР).

Единственный известный спутниковый тракт с модуляцией 16-QAM организован на спутнике Sirius.

2.2 Квадратурная фазовая модуляция 32-QAM (32-QAM)

2.2.1 Общие принципы

Базовые принципы данной разновидности частотной модуляции соответствуют основным принципам алгоритма модуляции QAM – технологии передачи цифрового информационного потока в виде аналогового сигнала. Это достигается путем разделения несущей волны на две несущие одинаковой частоты сдвинутые относительно друг-друга на 90° , каждая из которых промодулирована по одному из двух или более дискретных уровней амплитуды. Комбинация всех уровней амплитуды на этих двух несущих представляет собой бинарную битовую картину.

I и Q компоненты – это две половины битовой картины цифрового потока передаваемые одновременно, как уровни напряжения двух идентичных частотных несущих сдвинутых на 90 градусов. Компонента I (incident) модулирует несущую без сдвига фазы. Компонента Q (quadrature) модулирует несущую со сдвигом 90 градусов.

2.2.2 Технические характеристики и схемы реализации

Еще одна разновидность QAM – это 32-QAM. Ее характеристики таковы: по шесть сигнальных значений для I и для Q, что в итоге дает $6 \times 6 = 36$ точек созвездия для суммарного сигнала. Сигнальное созвездие сигнала 32-QAM приведено на рисунке 2.4.

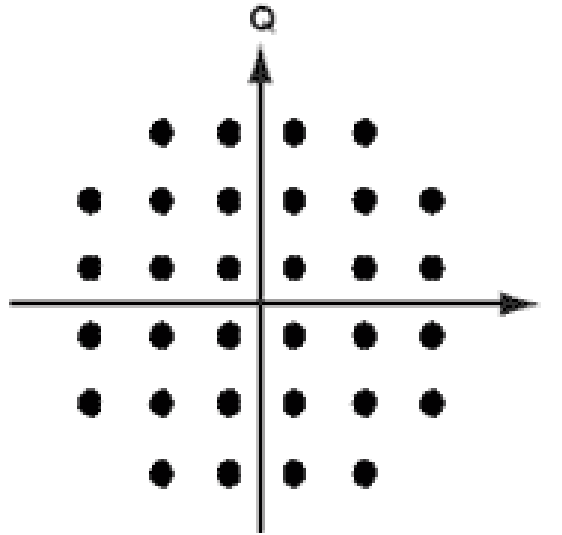


Рисунок 2.10 – Сигнальное созвездие сигнала 32-QAM

Этот тип модуляции наделен особенностью. В итоге, количество значений 36 не соответствует исходным данным, т.к. слишком велико, ($36 > 32$). Поэтому, четыре «угловых» сигнальных значения, (на которые приходится большинство мощности передатчика), опущены. Этим уменьшается значение выходной мощности, которую должен генерировать передатчик. Исходя из того, что $32 = 2^5$, получаем битовую скорость, равную 5 бит/с и символьную скорость, равную 1/5.

2.2.3 Достоинства и недостатки

Особенность сигналов QAM – это возможность увеличивать количество сигнальных точек в обмен на помехоустойчивость. В результате в одной и той же полосе сигналов есть возможность увеличивать скорость передачи цифровой информации. Ограничение на увеличение пропускной способности канала накладывает только сложность реализации аппаратуры телекоммуникационных устройств

2.2.4 Области практического применения

32-QAM модуляция используется во многих системах радиосвязи и приложений доставки данных.

Для ретрансляции спутниковых потоков актуальным является использование и 32 QAM. В этом случае в кабельном канале обеспечивается скорость передачи данных 34.367 Мбит/с, совместимая со скоростью передачи в спутниковых каналах связи. Полезная скорость передачи составляет при этом 31,367 Мбит/с.

2.3 Квадратурная фазовая модуляция 64-QAM (64-QAM)

2.3.1 Общие принципы

Квадратурная фазовая модуляция 64-QAM(64-QAM) соответствует принципам алгоритма квадратурной фазовой модуляции. С той разницей что здесь происходит кодирование 64 возможных значений.

2.3.2 Технические характеристики и схемы реализации

Вектор сигнала 64QAM имеет 64 позиции, что кодирует 64 значения символа. Модуляция 64QAM является самой скоростной, поскольку позволяет передавать 64 возможных значения в одном символе данных, что обеспечивает более высокую символьную скорость и, в результате, более высокую скорость передачи данных по сравнению с более низкими модуляциями. На рисунке 2.11 представлено сигнальное созвездие для 64-QAM.

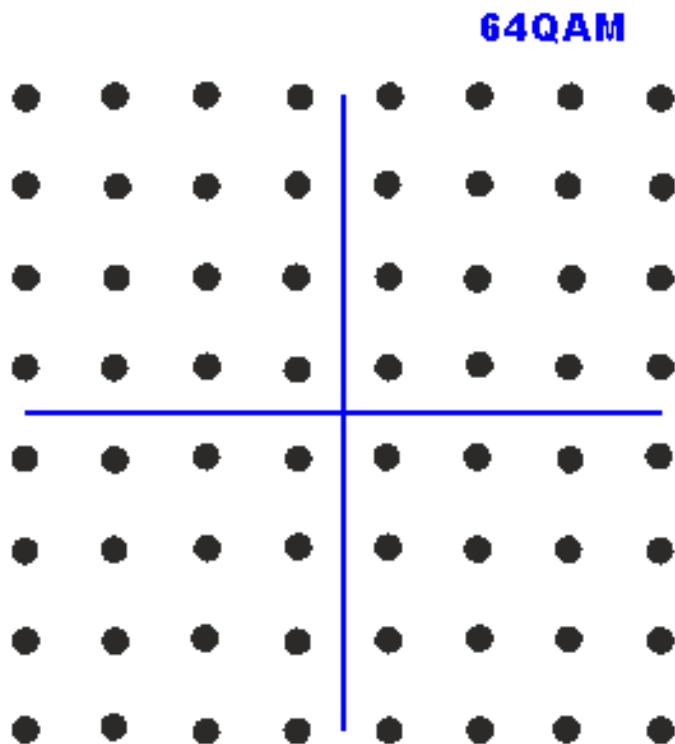


Рисунок 2.11 – Сигнальное созвездие сигнала 64-QAM

Для получения QAM-сигнала можно использовать квадратурную схему модулятора КАМ, показанную на рисунке 2.12. Последовательность двоичных символов x_0, x_1, x_2, \dots подается на последовательно-параллельный преобразователь (ППП). Здесь двоичные символы группируются в модуляционные символы по N бит. Старшие разряды x_0, x_1 выделяются отдельно и служат для управления фазовращателями УФІ и УФQ в каналах I и Q. Фазовращатели изменяют фазу несущего колебания на 180° , если $x_0 = 1$ и $x_1 = 1$.

Таким образом, определяется квадрант сигнального созвездия, в котором будут находиться позиции суммарного вектора несущей УΣ. Сочетание 00 соответствует первому квадранту, 10 – второму, 11 – третьему, 01 – четвертому (табл. 2.1). Младшие разряды модуляционного символа разделяются на четные x_2, x_4, \dots и нечетные x_3, x_5, \dots , которые затем поступают в кодер Грея. В этом коде репродуцируется перекодировка полученных символов в код Грея для того, чтобы коды соседних символов отличались не более чем на один бит.

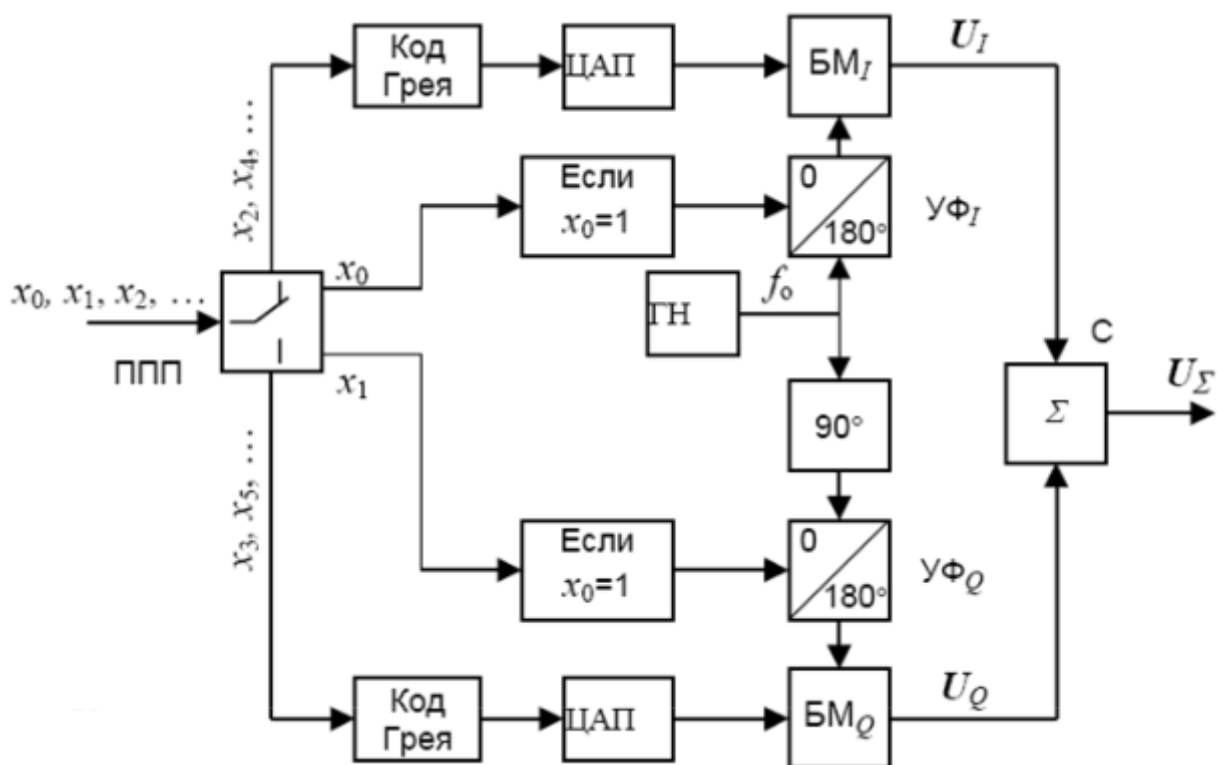


Рисунок 2.12–Квадратурная схема модулятора КАМ

Таблица 2.2 – Натуральные двоичные числа и соответствующие им коды Грея

Десятичное число	0	1	2	3	4	5	6	7
Натуральный двоичный код	000	001	010	011	100	101	110	111
Код Грея	000	001	011	010	по	111	101	100

Кодированные по коду Грея модуляционные символы в каналах I и Q поступают в цифро-аналоговые преобразователи ЦАП. Уровни, которые получаются на их выходах ЦАП, определяют напряжения на выходах балансных модуляторов (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Соответствие между уровнями ЦАП и входными кодами

Код 64-QAM	11	10	01	00
Уровень на выходе ЦАП	1	3	5	7

Для 64-QAM требуются шестиразрядные модуляционные символы. Пусть один такой символ имеет код 011101. Два старших разряда 01 задают четвертый квадрант сигнального созвездия. Оставшиеся четыре двоичных символа распределяются между каналами I и Q. В канал I поступает код 10, а в канал Q - 11. Это соответствует кодам Грея 11 и 10. На выходе ЦАП канала I будет уровень 1, а канала Q - 3. С учетом фазировки несущего колебания можно получить $U_I = 1$, $U_Q = -3$, что соответствует рис. 2.2.

Расположение сигнальных точек в фазово-амплитудном пространстве при различных типах QAM определяют сигнальные созвездия модулированных сигналов. Используются как равномерные, так и неравномерные, сигнальные созвездия с различными расстояниями между двумя ближайшими точками созвездия в смежных квадрантах, что количественно оценивается коэффициентом неравномерности сигнального созвездия a .

Данный параметр равен отношению расстояния между соседними точками в двух разных квадрантах к расстоянию между точками в одном квадранте. Для модуляции типа QAM-16 и QAM-64 рекомендуются следующие значения коэффициента a :

- $a = 1$ соответствует QAM с равномерным сигнальным созвездием;
- $a = 2$ характеризует QAM с неравномерным сигнальным созвездием, когда расстояние между двумя ближайшими точками созвездия в смежных квадрантах в два раза больше расстояния в пределах одного квадранта;
- $a = 4$ оценивает QAM с неравномерным сигнальным созвездием, когда расстояние между точками внутри и между квадрантами является четырехкратным.

Применение неравномерной структуры сигнальных созвездий с коэффициентами, $a = 2$, $a = 4$ обеспечивает улучшение декодирования потока данных, модулированных методами QAM-16 и QAM-64. Однако при этом требуется увеличение отношения сигнал - шум для потока данных, так как шумы и помехи трансформируют сигнальные точки созвездия в «облака».

Центром «облака» остается сигнальная точка, а его «размытость» характеризует остаточный уровень несущей, нарушение баланса уровней сигналов I и Q. При очень сильном шуме различить сигнальные точки внутри квадрантов становится практически невозможным. Однако благодаря введенной в сигнальные созвездия неравномерности декодирование может осуществляться с приемлемой вероятностью ошибок.

2.3.3 Достоинства и недостатки

Как видно из диаграммы созвездия модуляции QAM, чем выше тип модуляции, тем меньше по амплитуде и фазе отличаются векторы соседних значений передаваемого символа. Тем самым, для безошибочного приема символа (приема с некоторым допустимым уровнем ошибок) требуется более мощный сигнал, а точнее, более высокое отношение мощности сигнала к шуму.

2.3.4 Области практического применения

64-QAM, совместно с 256-QAM, часто используются в цифровых кабельном телевидении и кабельный модем приложениях. В Соединенных Штатах, 64-QAM и 256-QAM являются санкционированными схемами модуляции для цифрового кабеля, как стандартизированная SCTE в стандарте ANSI / SCTE 07 2013

Системы 802.11a и g используют 64-канальное мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM). В системе модуляции OFDM доступная полоса радиосвязи делится на несколько подканалов, и некоторые биты отправляются по каждому из них. Передатчик кодирует битовые потоки на 64 поднесущих, используя двоичную фазовую манипуляцию (BPSK), квадратурную фазовую манипуляцию (QPSK) или один из двух уровней квадратурной амплитудной модуляции (16 или 64-QAM). Часть передаваемой информации

является избыточной, поэтому получателю не требуется принимать все поднесущие для восстановления информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Говоря об организации цифровых каналов связи, необходимо в первую очередь ответить высокую роль используемых методов модуляции. Ведь они, помимо выполнения основных функций по преобразованию символов в сигнал, также являются одной из составных частей сложного процесса по выполнению согласования сигнала и характеристик канала передачи данных.

Говоря о современных методах модуляции сигнала следует отметить их соответствие теореме Шеннона, что позволяет их рассматривать как методику осуществления кодирования данных, представленных в виде сообщений, в итоговые символы канала передачи данных.

Особенность использования конкретного типа модуляции при реализации среды передачи данных зависит от заданной сетки каналов передачи и предоставленных частотных планах. В различных государствах доступными для передачи сделаны полосы частот 6, 7 и 8 МГц. При этом цифровой поток у различных служб, которые осуществляют передачу в рамках данных частот, может иметь скорость передачи порядка 20 Мбит/с и выше. На основании данного факта следует, что для полосы 6 МГц удельная скорость передачи должна быть не ниже 4 бит/с., а в полосе 7 или 8 МГц удельная скорость передачи должна быть не ниже 3 бит/с. Однако наличие в передающем тракте фильтров, обеспечивающих скругление спектра в 25-35%, а также появление необходимости увеличения скорости осуществления передачи данных, обусловленное добавлением в передаваемые данные символы обеспечения кодовой защиты от ошибок влияют на требования к удельной скорости передачи данных, в частности увеличивая её выше описанных расчетных значений.

На основании различных вариантов расположения сигнальных точек в фазово-амплитудном пространстве на основании различных типов квадратурной модуляции позволяет определить различные созвездия для модулированного сигнала. При этом могут применяться как равномерные, так и неравномерные

сигнальные созвездия, обладающие различными расстояниями между двумя ближайшими точками в созвездии в смежных квадратах, что на основании количественных характеристик может быть оценено на основании коэффициента неравномерности сигнального созвездия α . Вычисления данного параметра осуществляется на основании вычисления отношения расстояния между соседними точками в двух различных квадратных к расстоянию между точками в одном квадранте. В качестве примера следует привести рекомендуемые значения данного параметра для модуляций QAM-16 и QAM-64:

- при значении параметра α равном единице говорят, что это амплитудная модуляция с равномерным сигнальным созвездием;

- при значении параметра α равном двум говорят о том, что это амплитудная модуляция с неравномерным сигнальным созвездием, при котором расстояние между двумя ближайшими точками созвездия в рамках смежных квадрантов является в два раза большим, чем расстояние в рамках одного квадранта;

- при значении параметра α равном четырем отмечают факт квадратурной амплитудной модуляции с неравномерным сигнальным созвездием, при котором расстоянием между всеми точками является четырехкратным.

В случае неравномерной структуры сигнальных созвездий, когда коэффициент α равняется двум или четырем, достигается улучшение декодирования потока данных, которые были модулированы на основании методов QAM-16 и QAM-64. Но при этом возникает необходимость увеличения отношения «сигнал-шум» для потока данных, так как что шумы, что помехи будут трансформироваться в сигнальные точки на созвездии в «облаке». В центре облака будет размещаться сигнальная точка, а степень его «размытости» будет характеризовать наличие остаточного уровня несущей, а также нарушение баланса уровней сигналов I и Q. При этом по мере роста уровня шума снижается возможность различия сигнальных точек внутри квадрантов, что может быть устранено только за счет применения неравномерности декодирования сигнала.

Это помогает снизить вероятность возникновения ошибок до приемлемого уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аминев, А. В. Основы радиоэлектроники: измерения в телекоммуникационных системах: учебное пособие для среднего профессионального образования / А. В. Аминев, А. В. Блохин ; под общей редакцией А. В. Блохина. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 223 с.
2. Берикашвили, В. Ш. Основы радиоэлектроники: системы передачи информации: учебное пособие для среднего профессионального образования / В. Ш. Берикашвили. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 105 с.
3. Берикашвили, В. Ш. Радиотехнические системы: основы теории: учебное пособие для вузов / В. Ш. Берикашвили. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 105 с.
4. Букатов, А.А. Компьютерные сети: расширенный начальный курс / А. А. Букатов, С. А. Гуда. – Санкт-Петербург: Питер, 2019. – 497 с.
5. Василевский, В.В. Сети и телекоммуникации / В.В. Василевский, А.В. Королькова, Д.С. Кулябов, И.А. Шалимов. – Москва: Юрайт, 2016. – 364 с.
6. Гончаренко, А.Н. Вычислительные машины, сети и системы. Функционально-структурная организация вычислительных систем / А. Н. Гончаренко, И. В. Баранникова. – Москва: МИСиС, 2017. – 105 с.
7. Дибров М.В. Компьютерные сети и телекоммуникации. Маршрутизация в ip-сетях / М.В. Дибров. – Москва: Юрайт, 2017. – 334 с.
8. Замятина, О. М. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. Моделирование сетей / О. М. Замятина. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 159 с.
9. Зимин, В. П. Информатика. Лабораторный практикум в 2 ч. Часть 1: учебное пособие для среднего профессионального образования / В. П. Зимин. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 110 с. – (Профессиональное образование). –

ISBN 978-5-534-08362-0. – Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. – URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/438753>. – Загл.с экрана.

10. Ибе, О. Компьютерные сети и службы удаленного доступа / О. Ибе. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 337 с.

11. Новожилов, О. П. Архитектура компьютерных систем в 2 ч. Часть 1: учебное пособие для среднего профессионального образования / О. П. Новожилов. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 276 с.

12. Новожилов, О. П. Архитектура компьютерных систем в 2 ч. Часть 2: учебное пособие для среднего профессионального образования / О. П. Новожилов. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 246 с.

13. Новожилов, О. П. Информатика в 2 ч. Часть 1: учебник для среднего профессионального образования / О. П. Новожилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 320 с.

14. Новожилов, О. П. Схемотехника радиоприемных устройств: учебное пособие для среднего профессионального образования / О. П. Новожилов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 256 с.

15. Проскуряков, А.В. Компьютерные сети. Основы построения компьютерных сетей и телекоммуникаций / А. В. Проскуряков. – Москва: ЮФУ, 2018. – 203 с.

16. Радиотехнические системы: учебное пособие для вузов / М. Ю. Застела [и др.] ; под общей редакцией М. Ю. Застела. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 495 с.

17. Романюк, В. А. Основы радиосвязи: учебник для вузов / В. А. Романюк. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 288 с.

18. Романюк, В. А. Основы радиоэлектроники: учебник для среднего профессионального образования / В. А. Романюк. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 288 с.

19. Рыбальченко, М. В. Архитектура информационных систем: учебное пособие для среднего профессионального образования / М. В. Рыбальченко. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 91 с.
20. Сажнев, А. М. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств: учебное пособие для вузов / А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 204 с.
21. Сажнев, А. М. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств: учебное пособие для вузов / А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 204 с.
22. Самуйлов, К.Е. Сети и телекоммуникации: учебник и практикум для вузов / К. Е. Самуйлов, И. А. Шалимов, Д. С. Кулябов. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 363 с.
23. Семенов, А.Б. Структурированные кабельные системы / А. Б. Семенов, И.Е. Сунчелей, С. К. Стрижаков. – Москва: ДМК-Пресс, 2017. – 642 с.
24. Советов, Б. Я. Информационные технологии: учебник для вузов / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский. – Москва: Юрайт, 2020. – 327 с.
25. Топорков, С.С. Компьютерные сети для продвинутых пользователей / С. С. Топорков. – Москва: ДМК-Пресс, 2017. – 197 с.
26. Трофимов, В. В. Информатика в 2 т. Том 1: учебник для среднего профессионального образования / В. В. Трофимов; под редакцией В. В. Трофимова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 553 с.
27. Черпаков, И. В. Теоретические основы информатики: учебник и практикум для академического бакалавриата / И. В. Черпаков. – Москва: Издательство Юрайт, 2019.
28. Штыков, В. В. Введение в радиоэлектронику: учебник и практикум для вузов / В. В. Штыков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 228 с.

29. Штыков, В. В. Введение в радиоэлектронику: учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. В. Штыков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 228 с.

Приложение А

Таблица скоростей стандарта 802.11n при различных методах модуляции

Таблица А 1

Индекс MCS	Потоки	Модуляция	Кодирование	Канальная скорость, Мбит/сек) 1			
				Канал 20 МГц 800 ns 400 ns		Канал 40 МГц 800 ns 400 ns	
0	1	BPSK	1/2	6,5	7,2	13,5	15
1	1	QPSK	1/2	13	14,4	27	30
2	1	QPSK	3/4	19,5	21,7	40,5	45
3	1	16-QAM	1/2	26	28,9	54	60
4	1	16-QAM	3/4	39	43,3	81	90
5	1	64-QAM	2/3	52	57,8	108	120
6	1	64-QAM	3/4	58,5	65	121,5	135
7	1	64-QAM	5/6	65	72,2	135	150
8	2	BPSK	1/2	13	14,4	27	30
9	2	QPSK	1/2	26	28,9	54	60
10	2	QPSK	3/4	39	43,3	81	90
11	2	16-QAM	1/2	52	57,8	108	120
12	2	16-QAM	3/4	78	86,7	162	180
13	2	64-QAM	2/3	104	115,6	216	240
14	2	64-QAM	3/4	117	130	243	270
15	2	64-QAM	5/6	130	144,4	270	300
14	2	64-QAM	3/4	117	130	243	270
15	2	64-QAM	5/6	130	144,4	270	300

Продолжение таблицы А 1

Индекс MCS	Пото ки	Модуляц ия	Кодирова ние	Канальная корость, Мбит/сек) 1			
				Канал 20 МГц 800 ns 400 ns		Канал 40 МГц 800 ns 400 ns	
16	3	BPSK	1/2	19,5	21,7	40,5	45
17	3	QPSK	1/2	39	43,3	81	90
18	3	QPSK	3/4	58,5	65	121,5	135
19	3	16-QAM	1/2	78	86,7	162	180
20	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270
21	3	64-QAM	2/3	156	173,3	324	360
22	3	64-QAM	3/4	175,5	195	364,5	405
23	3	64-QAM	5/6	195	216,7	405	450
24	4	BPSK	1/2	26	28,8	54	60
25	4	QPSK	1/2	52	57,6	108	120
26	4	QPSK	3/4	78	86,8	162	180
27	4	16-QAM	1/2	104	115,6	216	240
28	4	16-QAM	3/4	156	173,2	324	360
29	4	64-QAM	2/3	208	231,2	432	480
30	4	64-QAM	3/4	234	260	486	540
31	4	64-QAM	5/6	260	288,8	540	600