

Применение квадратурной амплитудной манипуляции для повышения скорости передачи цифровой информации

П. Н. Топчий, В. В. Елишев, Д. В. Румянцев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

pawel-topchy@yandex.ru, elishev_v_v@mail.ru, danila.rumka@mail.ru

Аннотация. В статье приведены принципы амплитудно-фазовой манипуляции в системах передачи информации по радиоканалу. Рассмотрены основные преимущества и недостатки данного вида модуляции радиосигнала.

Ключевые слова: квадратурно-амплитудная манипуляция, QAM, фазовая манипуляция, PSK

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире используется множество коммуникационных протоколов, использующих квадратурную амплитудную модуляцию или QAM. Среди них, например, 802.11b беспроводной Ethernet (Wi-Fi) и цифровое видео-вещание (Digital Video Broadcast (DVB)), в которых применяется модуляция 64-QAM, а также новые беспроводные технологии, такие как WiMAX, 802.11n и HSDPA/HSUPA (новый стандарт передачи данных в сотовой связи) [2].

II. АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Квадратурная амплитудная манипуляция предназначена для передачи цифровой информации путём периодического изменения фазы и амплитуды несущей частоты. Каждая комбинация фазы и амплитуды называется символом и кодирует цифровой поток битов.

Одним из самых простых способов изменять фазу и амплитуду несущего синусоидального колебания является генерация и смешивание двух синусоидальных сигналов, фазы которых сдвинуты на 90° относительно друг друга. Регулируя амплитуды каждого из сигналов, мы можем влиять на фазу и амплитуду полученного смешанного сигнала.

Эти два несущих колебания называются I и Q компонентами нашего сигнала. По отдельности каждый из этих сигналов может быть записан в виде:

$$I = A \cos(\varphi)$$

$$Q = A \sin(\varphi)$$

Сигнал I называется «синфазной» или «косинусной» составляющей, а Q – «квадратурной» или «синусной». Так как компоненты сигнала представлены в виде синуса и косинуса, то их фазы смещены относительно друг друга на 90° . В результате, генерируемый высокочастотный сигнал можно представить в виде суммы квадратур [3]:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t)$$

Как видно из этого уравнения, цифровая модуляция сигнала по амплитуде и фазе может регулироваться изменением амплитуды двух смешиваемых сигналов I и Q.

На рис. 1 показана блок-схема технических средств, необходимых для генерации сигнала. Блок квадратурного модулятора предназначен для смешивания квадратурных компонент (I и Q) исходного низкочастотного сигнала с сигналами гетеродина, и дальнейшего сложения друг с другом. Отметим, что фазы сигналов гетеродина также смещены на 90° относительно друг друга.

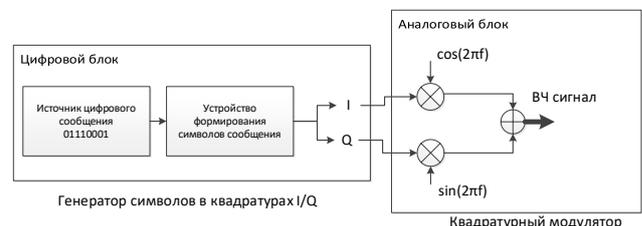


Рис. 1. Блок-схема генератора сигнала

III. ОСОБЕННОСТИ КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

Квадратурная амплитудная модуляция является логическим развитием систем с амплитудной (amplitude shift keying – ASK) и фазовой (phase shift keying – PSK) манипуляцией.

Амплитудно-фазовая манипуляция – это комбинация схем ASK и PSK. Сигнал в модуляции амплитудно-фазовой манипуляции выражается как:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi_i(t))$$
$$0 \leq t \leq T$$
$$i = 1, \dots, M$$

Если в двумерном пространстве сигналов между M сигналами набора угол прямой, схема называется квадратурной амплитудной модуляцией (quadrature amplitude modulation – QAM)

Основная идея повышения скорости передачи информации состоит в том, что передавать за одно и то же время не один бит, а несколько. Для решения этой задачи используется механизм M -арной модуляции. При M -арной модуляции информация разбивается на

k -битовые группы, после чего использовать для передачи $M = 2^k$ символов. При такой многоуровневой передаче сигналов, или M -арной модуляции, каждый сигнал может теперь представлять M -битовый символ в потоке символов, перемещающемся со скоростью R/k символов в секунду (в k раз медленнее, чем поток битов). Следовательно, при данной скорости передачи данных для уменьшения числа символов, передаваемых в секунду, может использоваться многоуровневая ($M > 2$) передача сигналов; другими словами, при уменьшении требований к ширине полосы передачи может применяться не двоичная, а M -уровневая кодировка сигнала.

Рассмотрим удобное отображение сигналов в виде двумерного пространства сигналов (отображение сигнала в виде «созвездия»). На графиках 2 и 3 точками отображаются реализации передаваемых символов, а красными линиями – фазовые переходы.

Для каждого символа формируется комплексное число с определенной амплитудой и фазой (рис. 2). При этом для фазовой модуляции модуль комплексного числа для любого символа равен 1, что приводит к отсутствию изменения уровня мощности в процессе передачи информации. Для квадратурной амплитудной модуляции модуль комплексного числа для разных символов различен, но не превышает 1.

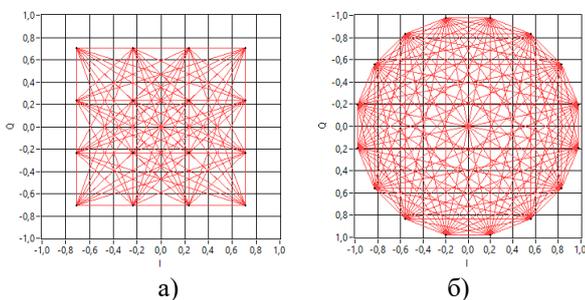


Рис. 2. Отображение сигналов в виде «созвездия» для а) 16-QAM и б) 16-PSK

Для манипуляции, где каждому символу соответствует один бит (2-QAM, BPSK) и 2 бита (4-QAM, QPSK) сигнално-кодировка конструкция не отличается. Если символу соответствует 3 и более бита (8-QAM, 8-PSK, 16-QAM, 16-PSK) (рис. 2) сигнално-кодировка конструкция различается.

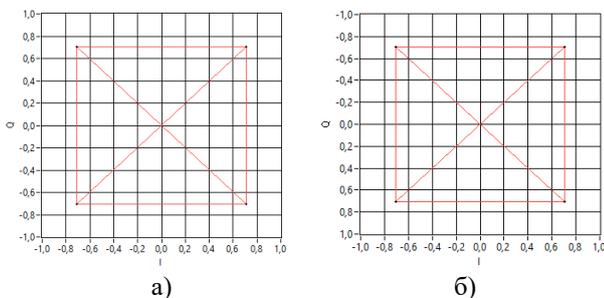


Рис. 3. Отображение сигналов в виде «созвездия» для а) 4-QAM и б) 4-PSK (QPSK)

В современных системах передачи требуется обеспечивать высокую скорость передачи данных при фиксируемой полосе пропускания сигнала. При выборе вида модуляции решается проблема функционирования

системы в условиях воздействия естественного шума и различного вида помех.

Вероятность ошибки в системах передачи цифровых сообщений определяется отношением квадрата кодового расстояния между «ближайшими» символами и мощности помехи на единицу спектра.

Для коррелятора и согласованного фильтра вероятность ошибки [1]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_d}{2N_0}}\right),$$

где E_d – энергия разностного сигнала на входе фильтра; N_0 – спектральная плотность мощности шума; $Q(\cdot)$ – гауссов интеграл ошибок.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (1)$$

Сравнивая а) и б) на рис. 2 видно, что при равных условиях расстояние между символами при M-QAM больше, чем при M-PSK для $M > 2$, то есть вероятность ошибки на бит информации в QAM лучше, чем в PSK.

IV. Виды квадратурной амплитудной модуляции

При рассмотрении квадратурной амплитудной модуляции обычно рассматривают прямоугольное множество M -арных символов. При желании и необходимости возможно использовать и другую систему квадратурной амплитудной модуляции: треугольную, многоуровневую круговую, гексагональную и другие виды, ограниченные только фантазией разработчика (рис. 4).

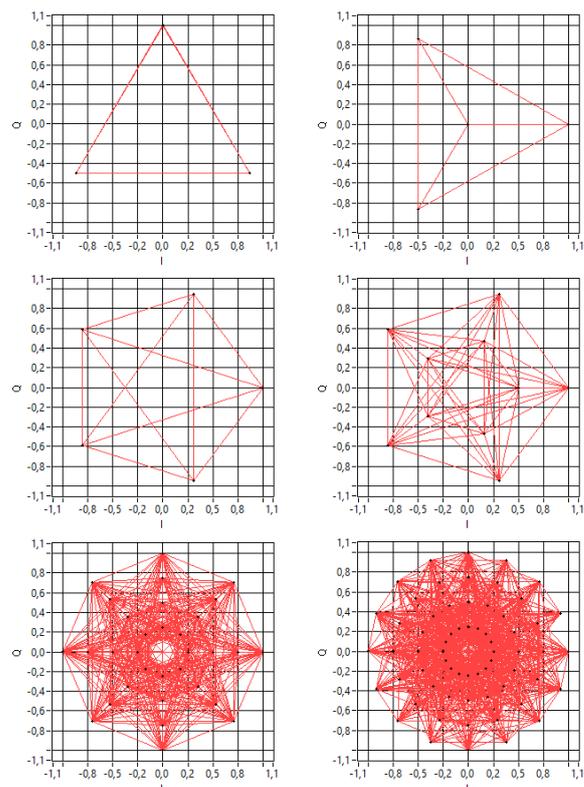


Рис. 4. Различные варианты квадратурной амплитудной модуляции

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение квадратурной амплитудной модуляции обосновано в случае необходимости достижения высоких скоростей передачи информации, при ограничениях на полосу пропускания канала. Системы с QAM при большом количестве бит на символ для достижения требуемых значений помехоустойчивости требуют канала передачи информации с низким уровнем шумов и помех. Для прямоугольного множества символов, канала с «белым» шумом и корреляционным приемом для модуляции M -QAM вероятность битовой ошибки определяется по формуле [1, 3]:

$$P_b = \frac{2(1 - L^{-1})}{\log_2 L} Q \left(\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1} \right) \frac{2E_b}{N_0}} \right),$$

$Q(x)$ – определяется по формуле (1); $L = \sqrt{M}$ – количество уровней амплитуды в одном измерении; E_b – энергия одного бита; N_0 – спектральная плотность мощности «белого» шума.

Несмотря на преимущества, связанные с высокой скоростью передачи информации, системы с QAM обладают и рядом недостатков:

- с ростом числа бит на символ система обладает меньшей способностью противостоять шумам и помехам;
- из-за изменения амплитуды для кодировки символа повышены требования к линейности тракта усиления и обработки информации, что снижает эффективность системы и увеличивает потребление энергии.

Вывод: QAM является важным способом модуляции благодаря широкому использованию в современных технологиях. Применение квадратурной амплитудной модуляции позволяет, изменяя M -арность сигнала, адаптировать систему передачи информации под текущую помеховую обстановку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. 1104 с.
- [2] www.ni.com/RF Курс «Теоретические основы передачи ВЧ сигналов».
- [3] Проксис Джон. Цифровая связь / Пер. с англ. Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.