

ОСНОВЫ КВАДРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИИ

СТАНИСЛАВ ТКАЧЕНКО, инженер

В статье описывается принцип квадратурной модуляции, рассматривается связь между разными типами модуляции, показано векторное разложение сигнала на составляющие.

Модуляция является основополагающей процедурой в электронных системах связи. Модулирующий сигнал может быть аналоговым (голос или музыка) или цифровым (поток битов). Большинство современных систем связи цифровые – в них используются разные уровни амплитуды или фазы для представления передаваемых данных. Чем в большей мере модулирован сигнал, тем больше данных доставляется за определенный промежуток времени. Квадратурная модуляция широко применяется в цифровых системах связи вплоть до самых современных 5G.

Основной задачей модуляции является управление одним или несколькими параметрами несущего радиосигнала. Математически она выражается следующим образом:

$$x(t) = a(t) \cos[2\pi f_c t - \theta(t)],$$

где $a(t)$ – амплитудная модуляция; $\theta(t)$ – фазовая модуляция; f_c – несущая частота.

В амплитудной модуляции используется модулирующий сигнал, а фазовая составляющая отсутствует ($\theta(t) = 0$). Аналогично, при фазовой модуляции функция $a(t)$ равна константе, прилагается только $\theta(t)$. Далее для простоты мы не будем рассматривать частотную модуляцию, однако не сложно показать, что частотная модуляция может осуществляться с помощью фазовой модуляции.

ВЕКТОРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Векторная диаграмма является наглядным способом представления модулированного сигнала путем разложения на синфазную (I) и квадратурную компоненты (Q).

Используя тригонометрическое представление, получаем:

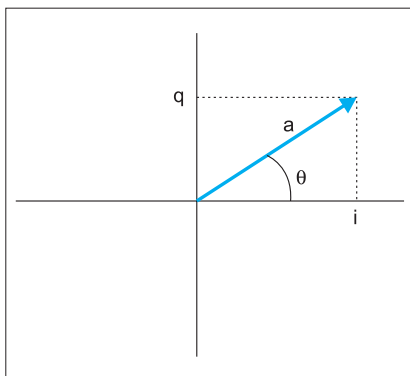


Рис. 1. Векторная диаграмма, представляющая амплитуду и фазу модулированного сигнала

$$\cos(X + Y) = \cos X \cos Y - \sin X \sin Y.$$

Тогда модулированный сигнал имеет вид:

$$x(t) = a(t) \cos(\theta(t)) \cos(2\pi f_c t) + a(t) \sin(\theta(t)) \sin(2\pi f_c t).$$

Преобразуем его, вводя синфазную и квадратурную составляющие:

$$x(t) = i(t) \cos(2\pi f_c t) + q(t) \sin(2\pi f_c t),$$

где: $i(t) = a(t) \cos(\theta(t))$, $q(t) = a(t) \sin(\theta(t))$.

На рисунке 1 показана векторная диаграмма. Синфазная составляющая I откладывается по горизонтали, квадратурная Q – по вертикали. Связь между амплитудой и фазой модулированного сигнала и I и Q выражается следующим образом:

$$a(t) = \sqrt{i^2(t) + q^2(t)},$$

$$\theta(t) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{q(t)}{i(t)}.$$

Синфазная и квадратурная составляющие меняются в соответствии с приложенной модуляцией. При классической амплитудной модуляции варьируется длина вектора, а его фазовый угол остается постоянным. При фазовой модуляции происходит обратное: амплитуда постоянна, фазовый угол меняется (т.е. вектор «вращается»).

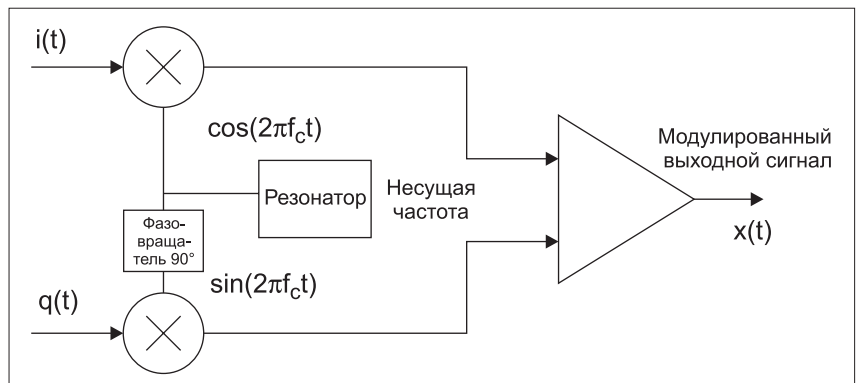


Рис. 2. Функциональная схема квадратурного модулятора

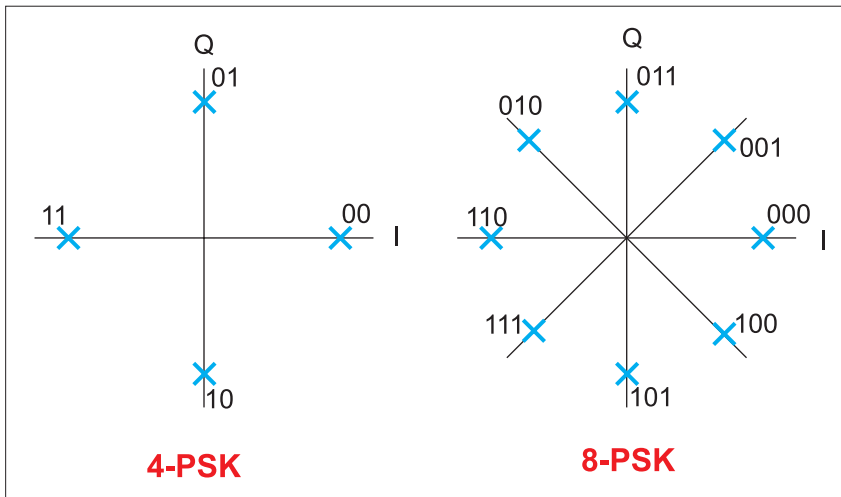


Рис. 3. Диаграмма состояний для модуляции с фазовым сдвигом

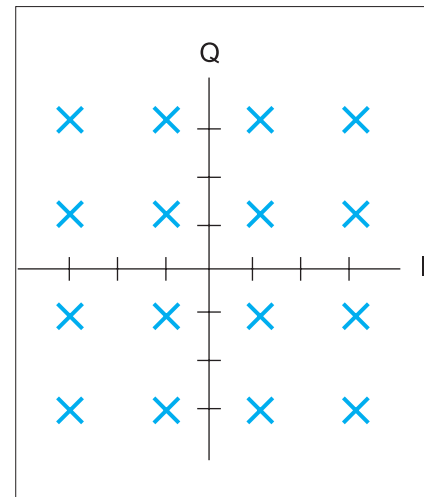


Рис. 4. Диаграмма состояний в случае 16-QAM

Функциональная схема квадратурного модулятора показана на рисунке 2.

Как упоминалось, составляющая $i(t)$ управляет синфазной (косинусоидальной) компонентой, а $q(t)$ отвечает за квадратурную компоненту (синус). После суммирования получаем требуемый выходной сигнал. Эту схему можно реализовать и программно, и аппаратно либо комбинированным методом. Тем не менее, чаще всего применяются блоки цифровой обработки сигнала.

На рисунке 2 показана передающая часть. На приемном конце квадратурный детектор выделяет квадратурную и синфазную составляющие из модулированного сигнала.

ЦИФРОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Квадратурную модуляцию можно использовать для реализации бесконечного количества схем модуляции, однако наиболее важна она именно в схемах цифровой модуляции.

В качестве примера рассмотрим модуляцию с фазовым сдвигом (Phase Shift Keying, PSK). На рисунке 3 показаны два наиболее простых варианта PSK: с четырьмя (4-PSK) и восемью состояниями (8-PSK). Амплитуда вектора остается постоянной. На рисунке крестиками отмечены точки – концы вектора. На диаграмме состояний указаны все возможные комбинации двоичных значений (00, 01, 10, 11) для модуляции с четырьмя состояниями, а также восемь состояний для 8-PSK. При увеличении количества состояний за отведенный промежуток времени можно передать больше информации; при этом вероятность появления ошибочных битов также увеличивается.

При квадратурной амплитудной модуляции (Quadrature amplitude modulation, QAM) для добавления состояний используется и амплитуда, и фаза. На рисунке 4 показана модуляция с 16 состояниями (16-QAM). Вектор поочередно проходит все эти состояния. В каждый момент времени передается четыре бита информации.

ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Итак, модуляция амплитуды и фазы несущей является удобным и гибким способом получения модулированной несущей. Тем не менее, частотная модуляция не уходит на второй план, продолжая активно использоваться в системах широкополосного радио и систем наземной мобильной связи. Рассмотрим, как выполнить частотную модуляцию с помощью квадратурного модулятора.

В общем случае, мгновенная частота $f(t)$ является производной мгновенной фазы $\theta(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \theta}{\partial t}.$$

Мгновенная частота меняется:

$$f(t) = k_d m(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \theta}{\partial t},$$

где k_d – постоянная девиации; $m(t)$ – модулирующий сигнал. Разрешая это уравнение относительно фазы, получаем:

$$\theta(t) = 2\pi k_d \int_0^t m(x) dx.$$

Таким образом, частотно модулированный сигнал можно получить с помощью фазовой модуляции – для этого требуется аналоговый интегратор или эквивалентный программный алгоритм.

ВЫВОДЫ

Квадратурная модуляция и квадратурные сигналы широко используются в системах связи. В частности, в цифровых модуляторах. Для модуляции несущей выбираются даже устаревшие типы модуляции, например амплитудная или частотная.

Принцип разделения сигнала на цифровые потоки I и Q применяется в большом количестве систем связи. Благодаря своей гибкости он де-факто стал стандартным методом модуляции. \square