

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КВАДРАТУРНЫХ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИИ ПРИ ПОВОРОТЕ СИГНАЛЬНЫХ СОЗВЕЗДИЙ

Андрей МИХАЙЛОВ

Технический Университет Молдовы

Abstract: The paper considers the effect of the rotation of the signal constellation on the noise immunity of quadrature multi-point modulation methods. Based on the error vector in the Matlab+Simulink simulation environment, models of M-QAM modulators and demodulators with rotation of the signal constellations at an arbitrary angle are proposed. Considered the most commonly used in digital data transmission systems modulation: 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM and 256-QAM. The simulation results of the proposed models confirmed the coincidence of the values of the rotation angles of the signal constellations recommended by the DVB-T2 standard, and also revealed the values of other angles that can be used to improve the noise immunity of multipositional quadrature modulation methods.

Keywords: error vector; noise immunity; signal constellation; quadrature reception; rotation of the signal constellation.

ВВЕДЕНИЕ

Для эффективного использования отведенной полосы канала связи в цифровых системах передачи информации используются многопозиционные сигналы – сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (M-PSK (Phase Shift Keying)) и многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляцией (M – QAM (Quadrature Amplitude Modulation)), так как модуляторы цифровых линий связи чаще всего строятся по квадратурным схемам [1,3].

При наличии нелинейных и фазовых искажений, помех и шумов канала возникают переходные помехи между квадратурными каналами. Сигнальные созвездия при этом размываются, то есть в каждом такте точка созвездия имеет случайные координаты.

Коэффициент битовых ошибок BER (Bit Error Ratio) является самым лучшим показателем, позволяющим оценить качество приемопередатчика, но BER тестирование не всегда возможно при разработках РЧ блока, ведь для измерения BER наряду с РЧ блоком необходимо наличие информационного тракта для полной цифровой обработки принятого сигнала. Кроме того, оценка BER может показать, что проблема качества устройства существует, но она не дает возможности выявить источник проблемы. Альтернативным измерению BER видом тестирования является исследование качества демодулируемого сигнала с помощью векторного анализа [3..7].

Одним из наиболее широко используемых количественных показателей качества модуляции в цифровых системах связи служит величина вектора ошибки EVM (*Error Vector Magnitude*) (рис. 1.1).

Значение вектора EVM дает возможность определить источники ошибок и их вклад в процесс формирования и обработки сигналов в цифровых системах. Он чувствителен к любому ухудшению качества сигнала, влияющему на величину и фазовую траекторию демодулируемого сигнала.

Наиболее трудным с точки зрения соотнесения измеренного вектора сигнала к идеальному является случай, когда реальный измеряемый сигнал попадает точно по середине между точками сигнального созвездия, как это показано на рис. 1.2 а. В этом случае вычисление минимума метрики (Δr) дает неоднозначный результат.

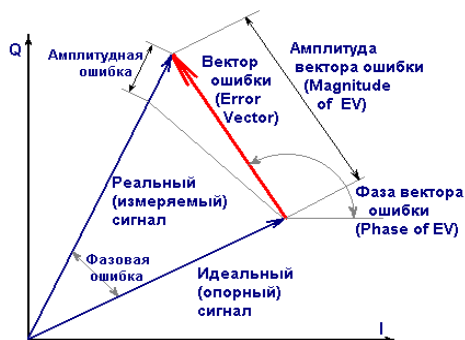


Рис.1.1. Графическое представление вектора ошибки EVM

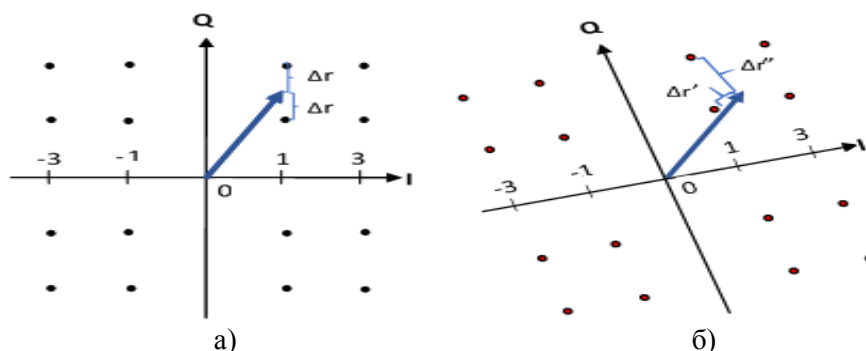


Рис.1.2. Неоднозначность в определении минимума метрики (Δr)

В стандарте *DVB-T2* используется поворот сигнального созвездия на определенный круговой угол [2], позволяющий улучшить помехоустойчивость системы. В таблице 1.1 приведены значения угла поворота созвездия в зависимости от типа модуляции.

Таблица 1.1. Значения угла поворота созвездия для различных типов модуляции

Тип модуляции	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
Угол поворота созвездия	29°	16,8°	8,6°	$\arctg(1/16)$

Такой поворот может существенно повысить устойчивость сигнала при типичных проблемах эфира. Каждый вектор такого созвездия приобретает свои индивидуальные координаты I и Q (рис.1.2б). В этом случае значения вектора ошибки $\Delta r'$ и $\Delta r''$ имеют разные значения и неоднозначности в вычислении минимума метрики нет.

С другой стороны, в случае потери информации об одной из координат ее можно будет восстановить. Как правило, для уменьшения вероятности появления пакетных ошибок исходные цифровые данные подвергают перемежению. В результате перемежения компоненты I и Q передаются раздельно, что уменьшает вероятность их одновременной потери. Таким образом, если одна несущая или символ будут потеряны в результате интерференции, сохранится информация о другой координате, это позволит восстановить символ, хотя и с более низким уровнем сигнал/шум.

К настоящему времени выполнен ряд работ по изучению влияния поворота сигнального созвездия [3...7], однако и по сей день влияние поворота сигнального созвездия изучено не до конца. В частности, не исследовалось взаимное влияние сигналов, несущих одну и ту же информацию на разных углах поворота сигнального созвездия.

Возможность поворота сигнального созвездия на углы, отличные от рекомендованных стандартом, и изучение взаимного влияния одного и того же сигнала, повернутого на разные углы, представляет особый для практического применения интерес.

1. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для анализа влияния поворота сигнального созвездия на помехоустойчивость квадратурных видов модуляции, была разработана усовершенствованная модель подсистемы "QAM-модулятор" → "AWGN" → "QAM-демодулятор", учитывающая поворот сигнального созвездия на заданный угол.

Разработка модели осуществлена с помощью системы компьютерной математики MATLAB/SIMULINK 9.0 (R2017b). Обработка и анализ результатов моделирования проводились с помощью программы Origin Pro 2017 [8].

Стандартный блок Simulink "Rectangular QAM-Modulator" на выход выдаёт квадратурный амплитудно-модулированный сигнал, который можно рассматривать как вектор комплексных чисел, действительная часть которых представляет собой синфазную составляющую квадратурного сигнала, а мнимая часть – квадратурную составляющую:

$$QAM = R^{QAM} + I^{QAM} = I + jQ. \quad (1.1)$$

Из математической теории комплексных чисел известно линейное преобразование на комплексной плоскости, приводящее к повороту точки на заданный угол φ :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x \cdot \cos\varphi - y \cdot \sin\varphi, \\ \dot{y} &= x \cdot \sin\varphi + y \cdot \cos\varphi. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Так как абсцисса комплексной плоскости – это действительная часть комплексного числа, а ордината – его мнимая часть, формулы (1.2) можно переписать:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= R \cdot \cos\varphi - I \cdot \sin\varphi, \\ \dot{I} &= R \cdot \sin\varphi + I \cdot \cos\varphi. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Таким образом, в терминах квадратурной модуляции с учётом (1.1, ..., 1.3) можно записать так:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= I \cdot \cos\varphi - Q \cdot \sin\varphi, \\ \dot{Q} &= I \cdot \sin\varphi + Q \cdot \cos\varphi. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Для разделения квадратурного сигнала на реальную (Re) и мнимую (Im) составляющие применим стандартный блок библиотеки Simulink "Complex to Real-Imag", а в качестве источника квадратурного сигнала используем блок "Rectangular QAM-Modulator" из блоксета Communication System расширенной библиотеки Simulink. Блок "Random Integer Generator" будет моделировать подготовленный к модуляции низкочастотный сигнал цифрового телевизионного вещания.

Из блоков библиотеки Simulink были разработаны математические модели подсистем "Передатчик" и "Приемник" с учетом поворота сигнального созвездия. В приёмнике необходимо восстановить исходное положение сигнального созвездия. Поэтому, перед подачей на вход демодулятора принятый сигнал необходимо повернуть на угол, дополняющий угол поворота до 360° (обозначим его через φ'). Для того что бы каждый раз не требовалось вручную переводить значение угла φ из градусов в радианы и рассчитывать значение дополнительного угла φ' , дополним модель подсистемой выполнения этих расчётов.

Окончательная математическая модель для исследования влияния угла поворота сигнального созвездия на помехозащищённость квадратурных схем модуляций M-QAM примет следующий вид (рис. 1.3):

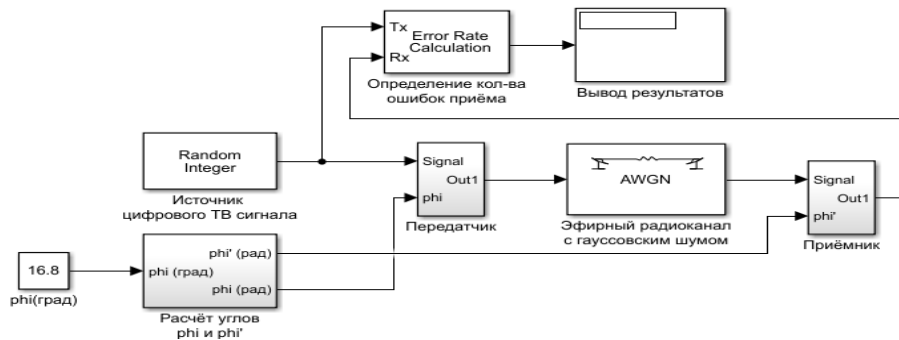


Рис.1.3. Математическая модель для исследования влияния угла поворота сигнального созвездия на помехозащищённость квадратурных схем модуляции

Устанавливая значение угла поворота в градусах (0 для начального состояния без поворота), подбираем в настройках блока "AWGN" значение параметра " E_b/N_0 " при котором наблюдается на перед заданная ошибка. Заносим значения угла поворота φ и соответствующие этому углу значения " E_b/N_0 " в таблицы для построения графиков функций " $E_b/N_0 = f(\varphi)$ ". Повторяем предыдущее действие для всех углов в диапазоне (0:1:90) для каждого типа модуляции. Результаты моделирования показаны на рис.1.4.

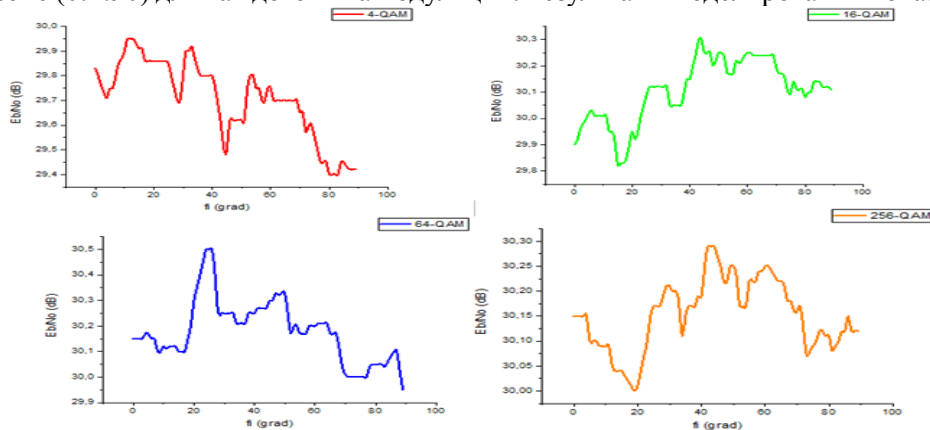


Рис.1.4. Графики зависимости отношения "сигнал/шум" (E_b/N_0) от угла поворота сигнального созвездия для модуляций 4-QAM (QPSK), 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из графиков, представленных на рис. 1.4 видно, что для каждой модуляции обнаружено несколько энергетических минимумов для которых отношение "сигнал/шум" меньше, чем для не повернутого сигнального созвездия. На основании этого можно сделать следующие выводы:

- Рекомендованные стандартом DVB-T2 углы поворота сигнального созвездия получили экспериментальное подтверждение.
- Для всех исследованных типов многопозиционной модуляции, кроме 16-QAM, помимо рекомендованного стандартом, имеются ещё и другие энергетически выгодные углы поворота сигнального созвездия. Это открывает простор для дальнейших исследований по данной теме.
- С увеличением коэффициента многопозиционности M эффект от поворота сигнального созвездия снижается.

Библиографический список:

1. Скляр Б. Цифровая связь. – М.: Вильямс, 2004.
2. Коржихин Е.О. Сравнение стандартов цифрового наземного вещания DVB-T и DVB-T2, Телекоммуникации и транспорт, 2012, № 6, стр. 203 – 204
3. Веденькин Д.А., Макарода Д.Г., Филареева И.Г. Анализ влияния поворота сигнального созвездия на уровень символьных и битовых ошибок в фазовых форматах модуляции, Инженерный вестник Дона, 2018, № 3
4. Sungwon Hong Eun Su Kang and Dong Seog Han. Additional data transmission with rotated qpsk constellation. // Electronics Letters, 51: pp. 394– 395, March 2015.
5. Schmogrow R., Nebendahl B., Winter M., Josten A., Hillerkuss D., Koenig S., Meyer J., Dreschmann M., Huebner M., Koos C., Becker J., Freude W., and Leuthold J. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats // Photonics Technology Letters, IEEE, 24(1): 61–63, Jan 2012.
6. Ньюман Э. Оптимизация приемника при помощи анализа модуля вектора ошибки // Беспроводные технологии. 2007. №9. – с. 57-60.
7. Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Власова К.В., Рушко М.В. Модельное исследование помехоустойчивости приёма радиосигналов с QPSK, BPSK и DBPSK, Известия КГТУ, 2017, № 46.
8. Дьяконов В.П. MATLAB R2006/2007/2008+Simulink5/6/7. Основы применения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 800с.