

УДК 621.376.9

А.Ю. Абраменко

Компенсация дисбаланса квадратурного модулятора

Квадратурный модулятор является неотъемлемой частью современных систем телекоммуникации. Поэтому качество принимаемого сигнала, выражаемого в частоте появления битовых ошибок, во многом зависит от его параметров. Рассогласование амплитуды и фазы квадратурных составляющих является одним из важнейших факторов, вносящим наибольший вклад в амплитуду вектора ошибки. Компенсация дисбаланса квадратур позволяет значительно повысить характеристики системы в целом. В работе предлагается метод нахождения оптимальных параметров за минимальное число измерений, за счет применения формулы математического описания уровня подавления зеркального канала в зависимости от изменения исследуемых параметров.

Ключевые слова: квадратурный модулятор, дисбаланс квадратурных составляющих, ошибка коэффициента усиления, ошибка коэффициента фазы.

Передающее устройство на основе квадратурного модулятора имеет следующие составные блоки (рис. 1): цифроаналоговый преобразователь (1), восстанавливающий фильтр (2), квадратурный модулятор (4), генератор тактового сигнала (3). Отметим факторы, влияющие на дисбаланс квадратурных составляющих сигнала на выходе передатчика: дисбаланс коэффициента усиления и фазы в цифроаналоговом преобразователе, дисбаланс коэффициента усиления и фазы в квадратурном модуляторе для несущего колебания и модулирующего сигнала, дисбаланс коэффициента усиления и фазы, вносимого восстанавливающим фильтром [1, 2]. Влияние большинства факторов можно уменьшить за счет внесения предварительных искажений сигнала в цифровом виде при формировании квадратурных составляющих I и Q , что позволяет улучшить характеристики сигнала. При этом основной задачей является поиск оптимальных коэффициентов компенсации дисбаланса квадратурных составляющих на основе экспериментальных данных.

В основе существующих методов поиска необходимых коэффициентов лежат итерационные алгоритмы, а сам поиск корректирующих коэффициентов осуществляется методом последовательного перебора [3]. Ошибка по амплитуде и фазе квадратурных составляющих определяется уровнем подавления зеркального канала, анализ которого позволяет определить наиболее оптимальные параметры для компенсации погрешности фазы и коэффициента усиления сигнала. Признаком определения оптимальных параметров служит уровень подавления зеркального канала. Так, параметры компенсации дисбаланса квадратурных составляющих являются оптимальными при условии максимального подавления зеркального канала относительно основного. Недостатком такого метода является необходимость проводить множество измерений, что увеличивает время нахождения оптимальных параметров. Решением является изменение уровня подавления зеркального канала в заданных точках и нахождение оптимальных параметров путем математического анализа.

Математический анализ сигнала на выходе квадратурного модулятора. Сигнал на выходе квадратурного модулятора можно описать математически при помощи формулы (1) [1]. В этой формуле учтены параметры погрешности фазы и коэффициента усиления для несущего колебания и модулирующего сигнала:

$$F_S = \frac{1}{2} \times A_S \times A_{LO} \times \cos(\omega_{LO} - \omega_S) - \frac{1}{2} \times A_S \times A_{LO} \times \cos(\omega_{LO} + \omega_S) + \frac{1}{2} \times A_S \times K_S \times A_{LO} \times K_{LO} \times \cos(\omega_{LO} - \omega_S + \varphi_{LO} - \varphi_S) + \frac{1}{2} \times A_S \times K_S \times A_{LO} \times K_{LO} \times \cos(\omega_{LO} + \omega_S + \varphi_{LO} + \varphi_S), \quad (1)$$

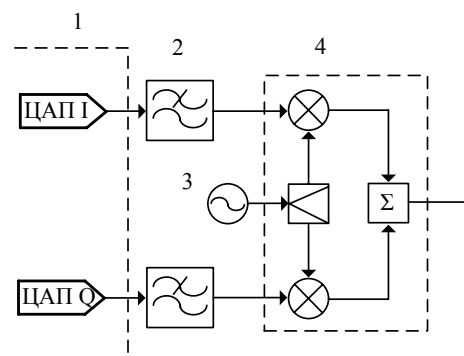


Рис. 1. Функциональная схема типового передатчика

где A_S – амплитуда синфазной составляющей модулируемого сигнала; K_S – ошибка коэффициента усиления между квадратурными составляющими модулируемого сигнала; A_{LO} – амплитуда синфазной составляющей несущего колебания; K_{LO} – ошибка коэффициента усиления между квадратурными составляющими несущего колебания; φ_{LO} – сдвиг по фазе между квадратурными составляющими несущего колебания; φ_S – сдвиг по фазе между квадратурными составляющими модулируемого сигнала.

Путем тригонометрических преобразований была получена формула (2), описывающая зависимость уровня подавления зеркального канала от погрешности фазы и коэффициента усиления. Эта формула учитывает коэффициент φ_{LO} , в отличие от формулы, приведенной в статье [1]:

$$IR = \frac{K - K^2 \times \cos(\varphi_{LO} + \varphi_S) + 1}{K + K^2 \times \cos(\varphi_{LO} - \varphi_S) + 1}, \quad (2)$$

где K – ошибка коэффициента усиления (в разах) между квадратурными составляющими несущего колебания и модулирующего сигнала; IR – отношение уровня мощности зеркального канала к уровню мощности основного канала.

Здесь $K = \frac{K_a}{K_o}$, где K_a – абсолютное значение коэффициента усиления; K_o – оптимальное значение коэффициента усиления.

Из формулы (2) можно сделать следующий вывод: уровни несущего колебания и модулирующего сигнала перемножаются. Это позволяет компенсировать погрешность коэффициента усиления в устройстве формирования сигнала. Тем не менее, как показывает формула, для полной компенсации погрешности по фазе необходимо вносить сдвиг по фазе как при формировании сигнала, так и для несущего колебания. Большинство прецизионных модуляторов имеет в своем составе делитель несущего колебания со сдвигом фазы на 90° , что не позволяет внести дополнительное смещение фазы, но при этом гарантирует минимальный дисбаланс фазы.

Формула (2) может использоваться для достаточно точного описания зависимости уровня подавления зеркального канала от дисбаланса квадратурных составляющих, что подтверждается сравнительным анализом расчетных значений и данными, полученными в результате эксперимента. Результат представлен на рис. 2. В эксперименте использовались: ЦАП фирмы Analog Devices AD9779, модулятор ADL5372. Уровень зеркального и основного каналов измерялся на анализаторе спектра Tektronix 494P. Использовался сигнал с однополосной модуляцией (SSB).

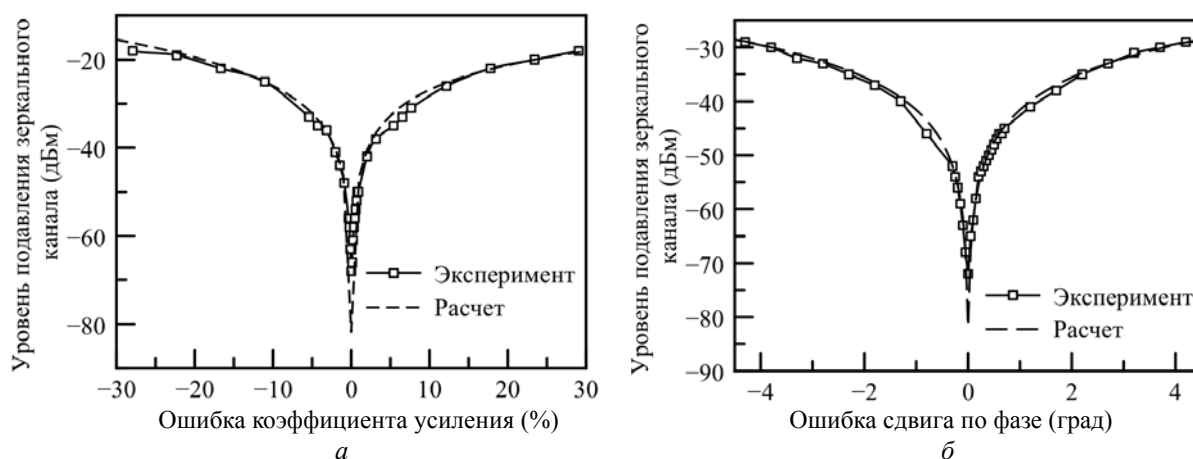


Рис. 2. Зависимость уровня подавления зеркального канала от дисбаланса квадратур

Из формулы (2) необходимо найти оптимальное значение коэффициента усиления. Для этого необходимо решить матрицу из четырех уравнений, зафиксировав значение ошибки по фазе. Тогда найдем следующее решение:

$$K_o = \sqrt{\frac{\frac{(1-IR_1) \times K_1}{IR_1 - IR_2} - \frac{(1-IR_2) \times K_2}{IR_1 - IR_2} + \frac{(1-IR_3) \times K_3}{IR_3 - IR_4} - \frac{(1-IR_4) \times K_4}{IR_3 - IR_4}}{\frac{1-IR_2}{(IR_1 - IR_2) \times K_2} - \frac{1-IR_1}{(IR_1 - IR_2) \times K_1} + \frac{1-IR_4}{(IR_1 - IR_2) \times K_4} - \frac{1-IR_3}{(IR_1 - IR_2) \times K_3}}}. \quad (3)$$

В формуле (3) числовой индекс означает порядковый номер измерения абсолютного значения коэффициента усиления и отношения уровня мощности зеркального канала к уровню основного канала. Воспользовавшись уже рассчитанным параметром оптимального значения коэффициента усиления, найдем формулу для коэффициента сдвига по фазе:

$$\varphi_o = \arccos\left(\frac{(1-IR_3) \times (K_3^2 + 1)}{2 \times K_3} - \frac{(1-IR_1) \times IR_3 \times (K_1^2 + 1)}{2 \times (IR_1 - IR_2) \times K_1} - \frac{(1-IR_2) \times IR_3 \times (K_2^2 + 1)}{2 \times (IR_1 - IR_2) \times K_2}\right). \quad (4)$$

Стоит отметить, что в формуле (4) коэффициент K_i – относительное значение, для нахождения которого используется рассчитанное ранее оптимальное значение коэффициента усиления. Данная формула имеет существенный недостаток – невозможность определить произошла отрицательная либо положительная ошибка по фазе, так как решением этого уравнения является натуральное значение.

Результаты экспериментов. На рис. 3 показаны два графика: график зависимости ошибки найденного коэффициента усиления от ошибки сдвига по фазе (рис. 3, а) и график ошибки найденного сдвига по фазе от ошибки сдвига по фазе (рис. 3, б). Измерения производились для разной ошибки по фазе и разной ошибки коэффициента усиления.

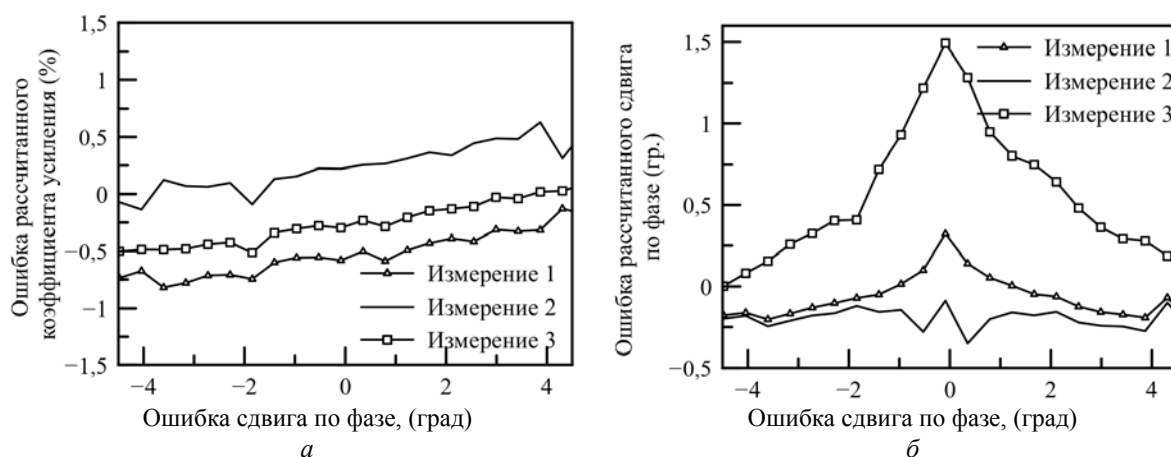


Рис. 3. Результаты экспериментальных измерений

При измерении на участке с отрицательной ошибкой коэффициента усиления (см. рис. 2, а) ошибка нахождения оптимального коэффициента усиления и корректирующего сдвига по фазе наибольшая (измерение 1). Для измерения 1 были взяты точки с ошибкой по коэффициенту усиления от -25 до -5% (в этих точках проводились измерения; в соответствии с рис. 2, а уровень подавления зеркального канала составляет порядка -18 дБ и -32 дБ при отсутствии ошибки по фазе).

Измерение 3 производилось на участке с положительной ошибкой коэффициента усиления (см. рис. 2, а). Были взяты точки, для которых максимальная ошибка по коэффициенту усиления не превышала +20%. Измерение 2 имеет общие точки с измерением 3 и 1, что отражается на графиках. Для его построения были взяты 2 точки на участке с отрицательной ошибкой и 2 точки на участке с положительной ошибкой. Кривая «измерение 2» является наиболее оптимальной с точки зрения ошибки нахождения коэффициентов. На основе экспериментальных данных было выдвинуто требование по выбору точек для нахождения оптимальных параметров: точки необходимо выбирать на участке с положительной и отрицательной ошибкой коэффициента усиления (желательно по две на каждом участке) и по возможности ближе к искомому значению коэффициента усиления.

Заключение. Применение предложенной методики совместно с методикой нахождения оптимальных параметров [3] позволит избежать прямого перебора параметров и ускорить нахождение

коэффициентов коррекции. Для нахождения оптимальных коэффициентов коррекции стоит придерживаться следующего алгоритма:

1) Производим измерения для I канала в произвольных четырех точках с обязательным условием неизменности сдвига по фазе. Находим оптимальный коэффициент компенсации ошибки по фазе с грубой погрешностью. Находим коэффициент компенсации ошибки сдвига по фазе. Определяем знак ошибки сдвига по фазе. Производим коррекцию. Определяем оптимальные точки для достижения наилучшей точности определения коэффициентов коррекции.

2) Производим измерения для Q канала в оптимальных четырех точках. Находим оптимальные параметры компенсации ошибки по коэффициенту усиления и сдвигу по фазе. Производим коррекцию.

3) Производим измерения для I канала в оптимальных четырех точках. Находим оптимальные параметры компенсации ошибки по коэффициенту усиления и сдвигу по фазе. Производим коррекцию. Если не достигнуты желательные параметры, тогда необходимо повторить п. 2 и 3.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Баланс квадратурных составляющих и подавления зеркального канала в беспроводных передатчиках / Джан И. // Беспроводные технологии. – 2011. – № 1. – С. 58–62.

2. Circuit Note CN-0134. Broadband Low Error Vector Magnitude (EVM) Direct Conversion Transmitter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN0134.pdf, свободный.

3. Application Note AN-1039. Correcting Imperfections in IQ Modulators to Improve RF Signal Fidelity [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1039.pdf, свободный.

Абраменко Александр Юрьевич

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУРа

Тел.: +7-960-979-13-42

Эл. почта: abramenko.alexander@gmail.com

Abramenko A. Yu.

Compensation of imbalance in vector modulators

Vector modulator is an important part of modern telecommunication systems. The quality of the received signal depends on vector modulator parameters. The imbalance of amplitude and phase in the quadrature components is one of the main parameters, which introduce the greatest contribution to the error vector magnitude (EVM). Compensation of the quadrature imbalance can significantly improve performance of the telecommunication system. In the article we describe the methods of finding phase and gain error rate.

Keywords: vector modulator, imbalance of the quadrature components, gain error, phase error.