

Зеленов Н.К., Храмов К.К.

Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23 e-mail: zelenov_95@mail.ru

Разработка программы моделирования дисбаланса квадратурного модулятора

В большинстве цифровых систем связи модуляторы и демодуляторы строят по квадратурным схемам. Квадратурный модулятор является универсальным устройством, которое может быть использовано для получения сигнала с линейно-модулированной несущей, включая такие виды, как амплитудная, фазовая и амплитудно-фазовая модуляции [1].

Структурная схема квадратурного модулятора (рис. 1) содержит два балансных модулятора (перемножителя) и сумматор высокочастотных сигналов, на выходе которого образуется квадратурно-модулированный сигнал $s(t)$. Получение различных видов модуляции в этой схеме обеспечивается подачей на его входы определенных синфазной и квадратурной составляющих $I(t)$ и $Q(t)$, представляющих собой сигналы с амплитудно-импульсной модуляцией в основной полосе (baseband).

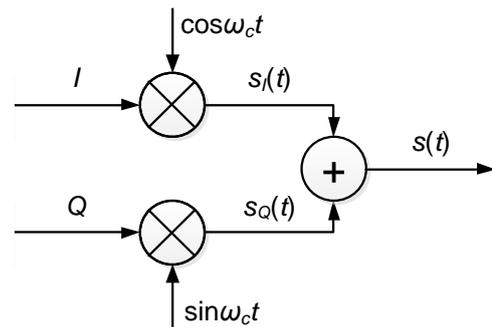


Рис. 1. Структурная схема квадратурного модулятора

Квадратурный модулятор широко используется в качестве схемы модуляции для цифровых телекоммуникационных систем таких, как набор стандартов IEEE 802.11. Наиболее распространенными формами амплитудно-фазовой модуляции является квадратурная амплитудная модуляция (КАМ, QAM) 16-QAM (рис. 2,а), 64-QAM и 256-QAM. Модуляции 64-QAM и 256-QAM используются в цифровом кабельном телевидении и кабельных модемах. Для ретрансляции спутниковых потоков актуальным является использование 32-QAM. Системы связи, предназначенные для достижения высокой спектральной эффективности, обычно используют сигнальные созвездия более высокого порядка. Например, в устройствах Ethernet Power Plug AV2 500 Mbit используются модуляции 1024-QAM и 4096-QAM [1].

Как правило, квадратурный модулятор – это аналоговое устройство, параметры которого зачастую нестабильны и зависят от условий и режимов эксплуатации, температуры и т.д. Вследствие этого в квадратурном модуляторе могут возникать дисбалансы различной природы. Если по какой-либо причине сигнал синфазной составляющей $I(t)$ по амплитуде окажется больше (или меньше) сигнала квадратурной составляющей $Q(t)$, то такое состояние называется амплитудным дисбалансом (gain imbalance). Независимо от места возникновения данного дефекта его влияние на выходной сигнал будет одинаково. Форма сигнального созвездия сигнала на выходе модулятора при наличии амплитудного дисбаланса будет отличаться от идеальной (рис. 2,б). Это ухудшает распознавание сигнала в приемном устройстве [2].

В большинстве передатчиков прямого преобразования сдвиг фазы сигнала гетеродина на 90° осуществляется с использованием многофазного фильтра. При этом фазовое разделение никогда не бывает идеальным. Например, если имеется квадратурная ошибка $\Delta\varphi = 1^\circ$,

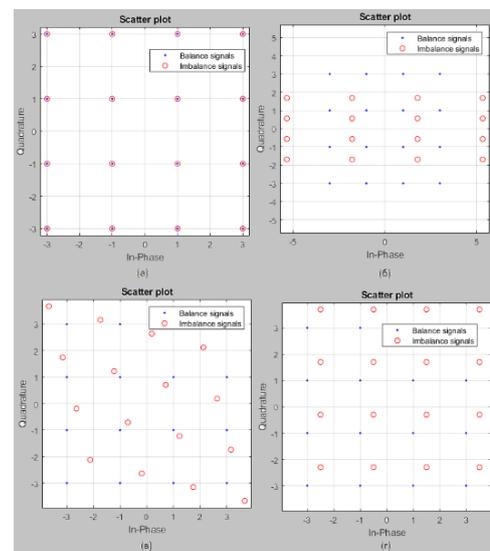


Рис. 2. Сигнальное созвездие 16-QAM (а) и его искажения (б-д)

то форма результирующего сигнального созвездия исказится (рис. 2,в). Данное рассогласование по фазе носит название фазового дисбаланса (phase imbalance). Причиной такого дисбаланса может также являться рассогласование фазовых характеристик аналоговых фильтров квадратурных каналов. Величина фазового разбаланса в данном случае будет увеличиваться при возрастании скорости передачи данных.

Сигнал на выходе квадратурного модулятора может быть описан выражением:

$$s(t) = 0,5 \{ \cos(\omega_{bb} - \omega_c)t - G_{LO} G_{bb} \cos[(\omega_{bb} - \omega_c)t + \varphi_{LO} - \varphi_{bb}] \} \quad (1)$$

где G_{bb} и φ_{bb} – дисбаланс амплитуды и фазы в модулирующих сигналах; G_{LO} и φ_{LO} – дисбаланс амплитуды и фазы в каналах гетеродина.

Приведенное выражение свидетельствует, что погрешности амплитуды и фазы сигналов гетеродина оказывают такое же влияние на уровень подавления зеркального канала, как и погрешности амплитуды и фазы модулирующих сигналов [3].

Другим ключевым компонентом выходного сигнала является наличие в нем постоянной составляющей. Как правило, это показатель дисбаланса перемножителей. Этот параметр имеет особое значение для IQ-модуляторов и демодуляторов, поскольку он вызывает просачивание сигнала гетеродина (LO leakage) на выход модулятора (рис. 2,г), что приводит к появлению нежелательной спектральной компоненты на частоте гетеродина, которую трудно подавить при помощи фильтрации [4].

Поскольку оценка влияния вышеупомянутых рассогласований в квадратурном модуляторе на качество выходного сигнала представляет собой важную задачу, направленную на повышение качества устройств формирования сигналов, целесообразным является разработка программы для моделирования каждого вида дисбаланса и их комбинаций.

Разрабатываемая программа, графический пользовательский интерфейс которой изображен на рис. 3, позволит проводить наглядное моделирование амплитудного и фазового дисбалансов, возникающих как в каналах модулирующего сигнала, так и в тракте гетеродина, а также – постоянного смещения в квадратурных каналах модулирующего сигнала. Программа даст возможность анализировать временную форму и спектр синфазной и квадратурной составляющих, сигнала генератора и выходного сигнала, получить сигнальные созвездия, соответствующие заданному виду модуляции, при отсутствии и наличии дисбаланса.

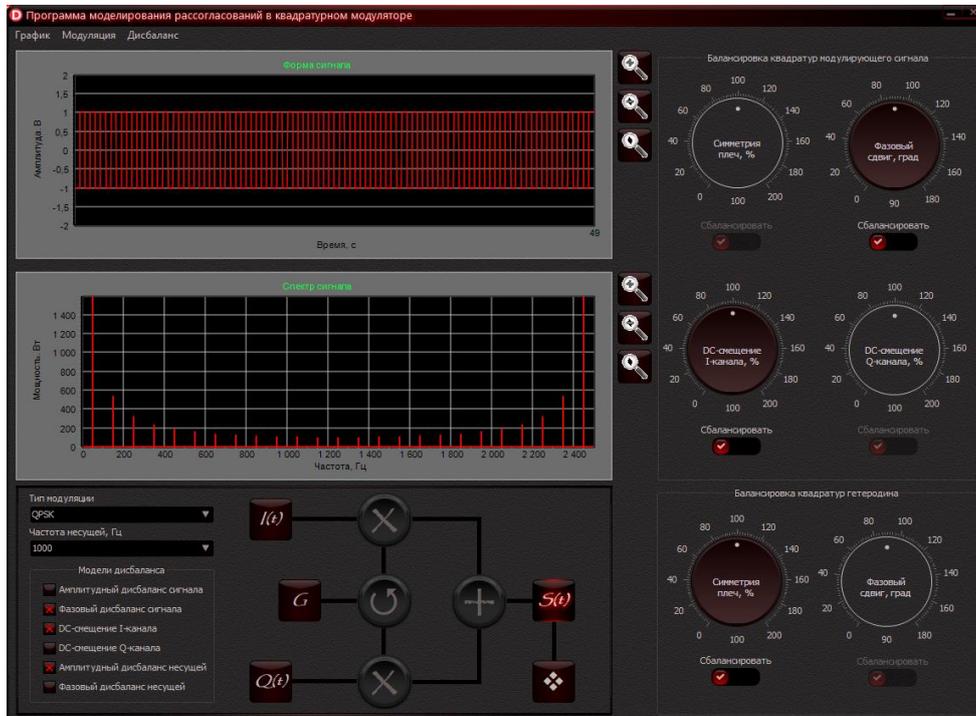


Рис. 3. Графический пользовательский интерфейс программы моделирования рассогласований в квадратурном модуляторе

Дополнительными функциями создаваемого приложения являются возможность моделирования алгоритмов компенсации рассогласований и оценки каждого вида дисбаланса с расчетом коэффициентов компенсации.

Таким образом, функционал программы позволит использовать ее не только в учебных целях, но и в практических задачах – на этапах проектирования и разработки устройств генерирования и формирования модулированных сигналов радиотехнических систем.

Литература

1. Прокис Джон. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.
2. Correcting Imperfections in IQ Modulators to Improve RF Signal Fidelity. AN-1039 Application Note [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1039.pdf>. – Яз. англ.
3. Broadband Low Error Vector Magnitude (EVM) Direct Conversion Transmitter. Circuit Note CN-0134 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/cn0134.pdf>. – Яз. англ.
4. Transmit LO Leakage (LOL) – An Issue of Zero-IF That Isn't Making People Laugh Out Loud [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-51/number-3/articles/transmit-lo-leakage-lol-an-issue-of-zero-if-that-isn-t-making-people-laugh-out-loud.pdf>. – Яз. англ.