

Метод воспроизведения нормированных сигналов с цифровой модуляцией

Иван Владимирович Могилев^{1✉}, Николай Рудольфович Баженов²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹mogilev@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7371-6937>

²bazhenov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8283-4129>

Аннотация. Исследована возможность создания калибратора параметров сигналов с цифровой модуляцией, основанного на генераторе сигналов произвольной формы. Разработан метод воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением модуля вектора ошибки (error vector magnitude, EVM) путём добавления нормированной помехи. Рассмотрен частный случай метода, где в качестве нормированной помехи используется амплитудная и фазовая модуляции. Экспериментально подтверждена возможность передачи единиц коэффициента амплитудной модуляции и девиации фазы соответственно от Государственного первичного эталона единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020 и Государственного первичного эталона единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний ГЭТ 180-2010 калибратору параметров сигналов с цифровой модуляцией.

Ключевые слова: цифровая модуляция, коэффициент битовой ошибки, модуль вектора ошибки, прослеживаемость, эталон, калибратор, квадратурная амплитудная модуляция, мобильная связь пятого поколения (5G), коэффициент амплитудной модуляции, девиация фазы

Для цитирования: Могилев И. В., Баженов Н. Р. Метод воспроизведения нормированных сигналов с цифровой модуляцией // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 56–61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-56-61>

Method for digitally modulated signals synthesis with normalized parameters

Ivan V. Mogilev^{1✉}, Nikolay R. Bazhenov²

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹mogilev@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7371-6937>

²bazhenov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8283-4129>

Abstract. The paper investigates the possibility of creating a calibrator of the parameters of signals with digital modulation based on an arbitrary waveform generator. A method is proposed for reproducing calibration signals with a given value of the error vector magnitude by adding a normalized distortion. A particular case of the method is considered, where amplitude and phase modulation is used as the normalized distortion. Experimental confirmation of the possibility of transferring the size of units of the modulation depth and phase deviation from the primary standards GET 166-2020 and GET 180-2010 to the calibrator of the parameters of signals with digital modulation has been obtained.

Keywords: digital modulation, bit error rate (BER), error vector magnitude (EVM), traceability, standard, calibrator, quadrature amplitude modulation (QAM), the 5th generation mobile network (5G), amplitude depth, phase deviation

Введение. В последние два десятилетия стремительно развиваются системы связи, увеличивается скорость передачи информации. К основным способам увеличения скорости передачи информации относятся расширение спектра радиосигналов в связи с освоением новых диапазонов частот и повышение спектральной эффективности радиосигналов в результате внедрения более сложных многопозиционных видов модуляции. Радиосигналы со сложными многопозиционными видами модуляции 64-QAM, 256-QAM (QAM – quadrature amplitude modulation, квадратурная амплитудная модуляция), несмотря на высокую спектральную

эффективность менее помехоустойчивы, чем сигналы с более простыми видами модуляции BPSK, QPSK, что ужесточает требования к качеству сложномодулированных сигналов. В миллиметровом частотном диапазоне увеличивается чувствительность широкополосных сигналов к вносимым искажениям и нарушениям структуры, что повышает требования к аппаратуре, применяемой в системах связи.

Итоговым критерием качества работы цифровых систем связи часто служит коэффициент битовой ошибки (bit error rate, BER). BER характеризует частоту появления ошибочно восстановленных битов демодулированного радиосигнала.

Однако по измеренному значению BER невозможно определить причину и место возникновения неполадки при выходе BER за допустимые пределы. Цифровым системам связи свойственен пороговый эффект, когда минимальное ухудшение качества радиосигнала может привести к обрыву связи. Поэтому оценка близости системы к такому порогу срыва позволит установить запас по качеству радиосигналов, применяемых в системах связи. В связи с этим для количественной оценки качества радиосигналов с цифровой модуляцией широко применяется модуль вектора ошибки – error vector magnitude (EVM). Следует отметить, что EVM не имеет устоявшегося названия и определения на русском языке. В настоящей статье приведён вариант названия и определения с учётом отечественных и зарубежных источников [1–6].

Цель настоящего исследования – обеспечение единства измерений параметров сигналов с цифровой модуляцией, в частности модуля вектора ошибки EVM.

Определение EVM. EVM – это коэффициент искажения сигнала с цифровой модуляцией, который выражается в процентах или децибелах и рассчитывается как относительное среднеквадратическое значение длин векторов ошибок $|\mathbf{e}_k|$:

$$EVM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{e}_k|^2} / P_n, \quad (1)$$

где N , k – количество и номер символов соответственно; P_n – коэффициент нормировки.

Вектор ошибки $\mathbf{e}_k$ представляет собой разность векторов комплексных огибающих принятого (анализируемого) $\mathbf{z}_k$ и опорного $\mathbf{r}_k$ сигналов в момент детектирования k -го символа:

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{r}_k.$$

Вектор ошибки $\mathbf{e}_k$ на комплексной плоскости представлен на рис. 1. За опорный сигнал принята идеальная математическая модель сигнала, вид модуляции и последовательность символов которого соответствует принятому сигналу. Длина модуля $|\mathbf{e}_k|$ вектора ошибки вычисляется после оцифровки и коррекции [1] принятого сигнала по амплитуде, фазе и частоте:

$$|\mathbf{e}_k| = \sqrt{(I_{i[k]} - I_{p[k]})^2 + (Q_{i[k]} - Q_{p[k]})^2},$$

где $I_{p[k]}$, $Q_{p[k]}$ и $I_{i[k]}$, $Q_{i[k]}$ – соответственно расчётные значения действительной и мнимой частей комплексной огибающей

опорного сигнала и измеренные значения действительной и мнимой частей комплексной огибающей анализируемого сигнала в момент детектирования k -го символа.

Значения $I_{p[k]}$, $Q_{p[k]}$, $I_{i[k]}$, $Q_{i[k]}$ изображены на комплексной плоскости в правой верхней части рис. 1 чёрными и красными точками соответственно, а также изображены на осциллограммах в левой верхней части рис. 1 соответственно чёрными и красными линиями.

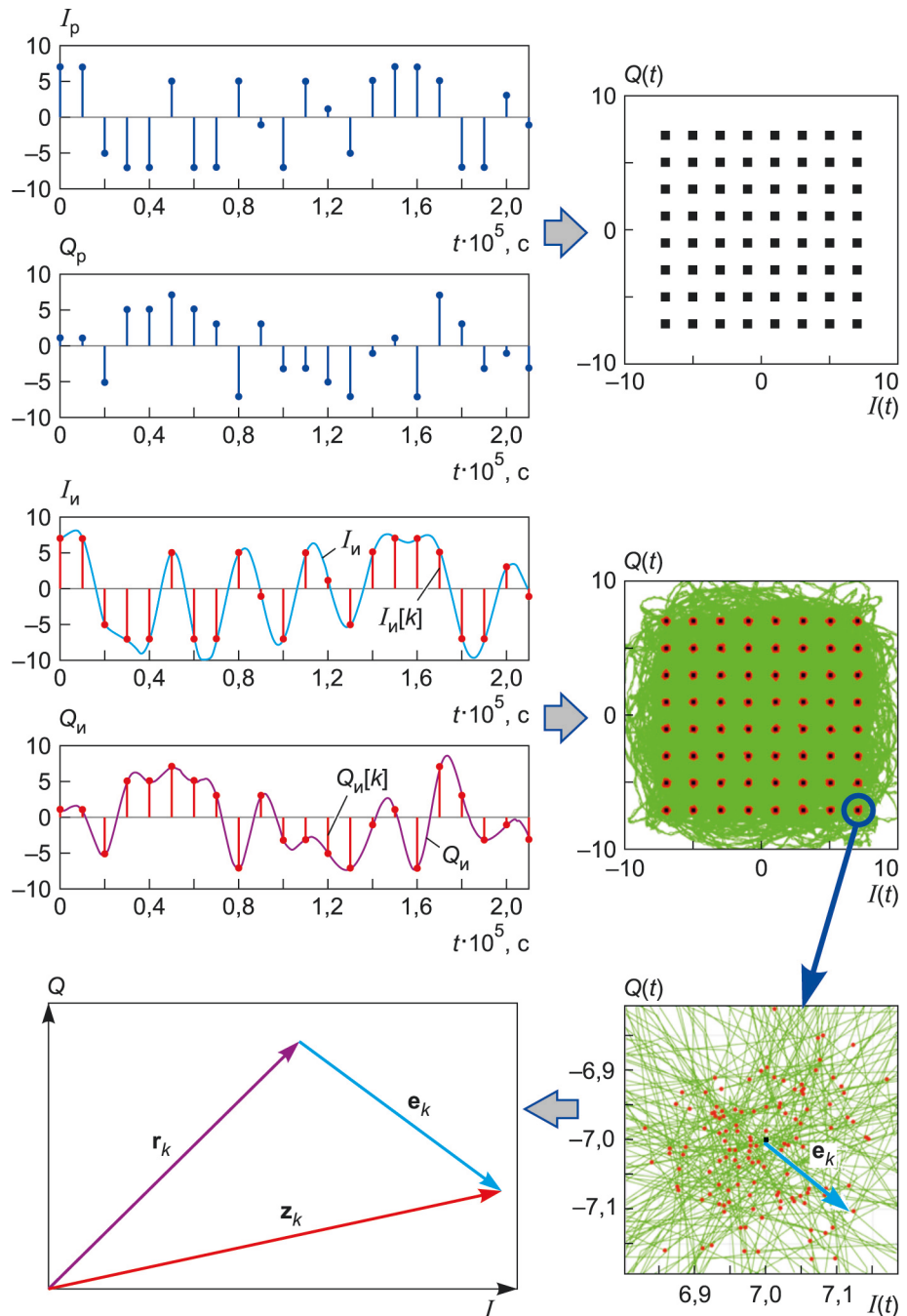


Рис. 1. Вектор ошибки $\mathbf{e}_k$ на комплексной плоскости, графики комплексных огибающих опорного и анализируемого сигналов и осциллограммы их действительных и мнимых частей

Fig. 1. Image of the error vector $\mathbf{e}_k$, complex envelopes of the reference and analyzed signals and waveforms of their real and imaginary parts

Коэффициент нормировки P_H можно рассчитывать различными способами в зависимости от стандарта связи. Наиболее часто коэффициент нормировки вычисляется как среднеквадратическое значение длин векторов $|r_k|$ опорного сигнала:

$$P_H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |r_k|^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_{p[k]}^2 + Q_{p[k]}^2)}. \quad (2)$$

Рассчитанное значение EVM даёт количественную оценку качества сигналов с цифровой модуляцией, т. е. степень отклонения символьных точек принятого сигнала относительно символьных точек опорного сигнала. При отклонении принятого сигнала от опорного по амплитуде и фазе в момент детектирования символов изменяется значение EVM.

Постановка задачи. В современных международных стандартах сотовой связи прописаны требования к передатчикам по значениям EVM. Консорциум 3rd Generation Partnership Project (3GPP), разрабатывающий международные стандарты мобильной связи, определил требования к характеристикам радиосигналов передатчиков по значениям EVM. Требования 3GPP TS 38.101-1 V16.0.0 [1] к радиопередатчикам сигналов в стандарте мобильной связи 5G: EVM не более 17,5; 12,5; 8,0; 3,5 % для модуляции видов QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM соответственно. К средствам измерений (СИ)

параметров радиосигналов с цифровой модуляцией, активно применяющихся при разработке и тестировании систем связи на соответствие стандартам по EVM, можно отнести векторные генераторы сигналов, анализаторы спектра, анализаторы цепей и цифровые осциллографы с опциями векторного анализа сигналов.

В документации производителей СИ параметров радиосигналов с цифровой модуляцией обычно указываются собственные значения EVM для векторных генераторов сигналов. Анализаторы спектра, осциллографы и анализаторы цепей с опцией векторного анализа функционально позволяют оценивать диапазон и точность измерений EVM.

В настоящее время актуально создание метрологической базы [7] для обеспечения измерений параметров радиосигналов с цифровой модуляцией, в основе которой будут лежать государственные первичные эталоны единиц величин. В частности, необходимо обеспечить метрологическую прослеживаемость параметра EVM к первичным эталонам для калибровки и поверки СИ параметров радиосигналов с цифровой модуляцией [8, 9].

Решение задачи. В существующих методах воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением EVM применяются эквивалентные сигналы [3, 8, 9], принципиально отличающиеся по спектральным и амплитудно-частотным характеристикам от сигналов с цифровой модуляцией,

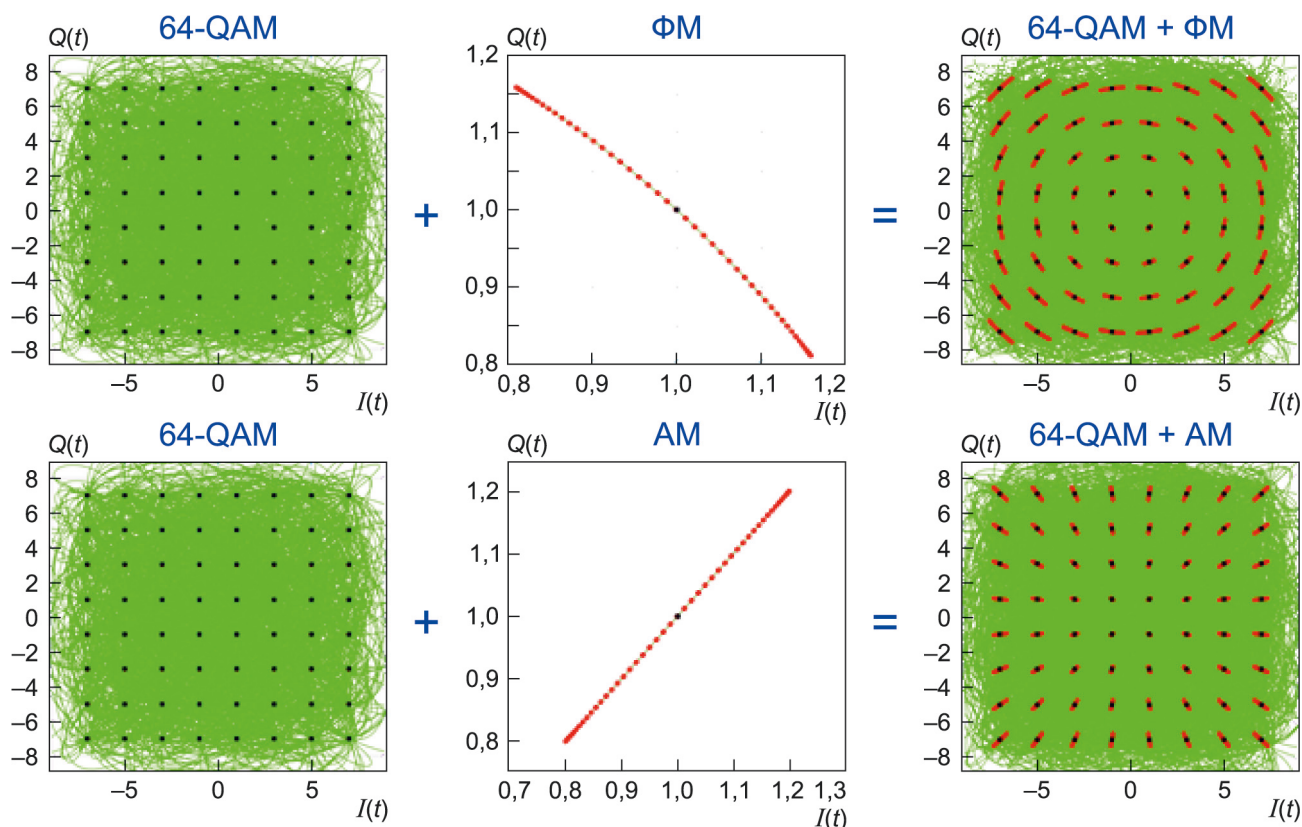


Рис. 2. Комплексная огибающая радиосигнала с модуляцией вида 64-QAM после добавления амплитудной АМ или фазовой ФМ модуляций

Fig. 2. Complex envelope of the 64-QAM signal after adding AM or PM

которые используются в системах связи. Обычно производители СИ параметров радиосигналов в документации указывают собственное значение или погрешность измерения EVM при определённых частоте несущей, виде модуляции, символьной скорости, типе фильтра и других параметров, указанных в требованиях стандартов связи. Это обусловлено тем, что сигнал будет искажаться по-разному при прохождении через тракт СИ в зависимости от перечисленных параметров. Поэтому применение эквивалентных сигналов даёт неполную оценку приборной погрешности измерения EVM.

В связи с этим авторами настоящей статьи разработан метод воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением EVM путём добавления нормированной помехи к реальному радиосигналу с цифровой модуляцией. В общем виде сигнал $s(t)$ с цифровой модуляцией можно описать формулой

$$s(t) = \operatorname{Re}[Z(t)\exp(j\omega_0 t)],$$

где $Z(t)$ – комплексная огибающая сигнала; ω_0 – несущая частота сигнала.

Комплексная огибающая сигнала определяется суммой $Z(t) = I(t) + jQ(t)$ действительной $I(t)$ и мнимой частей $Q(t)$, где $I(t) = a(t)\cos\varphi(t)$; $Q(t) = a(t)\sin\varphi(t)$; $a(t)$, $\varphi(t)$ – соответственно амплитуда и фаза комплексной огибающей.

Для формирования сигнала с заданным значением EVM необходимо внести искажения в амплитуду и фазу комплексной огибающей сигнала $Z(t)$. Рассмотрим добавление

гармонической амплитудной модуляции (АМ) $f_{AM}(t)$ и фазовой модуляции (ФМ) $f_{FM}(t)$ в качестве нормируемой помехи:

$$\begin{cases} f_{AM}(t) = m\cos(2\pi f_M t); \\ f_M \ll f_C; \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_{FM}(t) = \frac{\varphi_d \pi}{180} \cos(2\pi f_M t); \\ f_M \ll f_C, \end{cases}$$

где m – коэффициент амплитудной модуляции; f_M – модулирующая частота; f_C – частота следования символов; φ_d – девиация фазы.

После добавления АМ и ФМ действительная и мнимая части комплексной огибающей сигнала $Z_1(t)$, а также сигнал $s_1(t)$ будут описываться формулами

$$I_1(t) = a(t)[1 + f_{AM}(t)]\cos[\varphi(t) + f_{FM}(t)];$$

$$Q_1(t) = a(t)[1 + f_{AM}(t)]\sin[\varphi(t) + f_{FM}(t)];$$

$$s_1(t) = \operatorname{Re}[Z_1(t)\exp(j\omega_0 t)].$$

На рис. 2 представлена комплексная огибающая $Z_1(t)$ радиосигнала с видом модуляции 64-QAM после добавления АМ или ФМ. В этом случае заданное значение EVM рассчитывается по формуле (1), где в качестве комплексных огибающих опорного и принятого сигналов принимаются $Z(t)$ и $-Z_1(t)$.

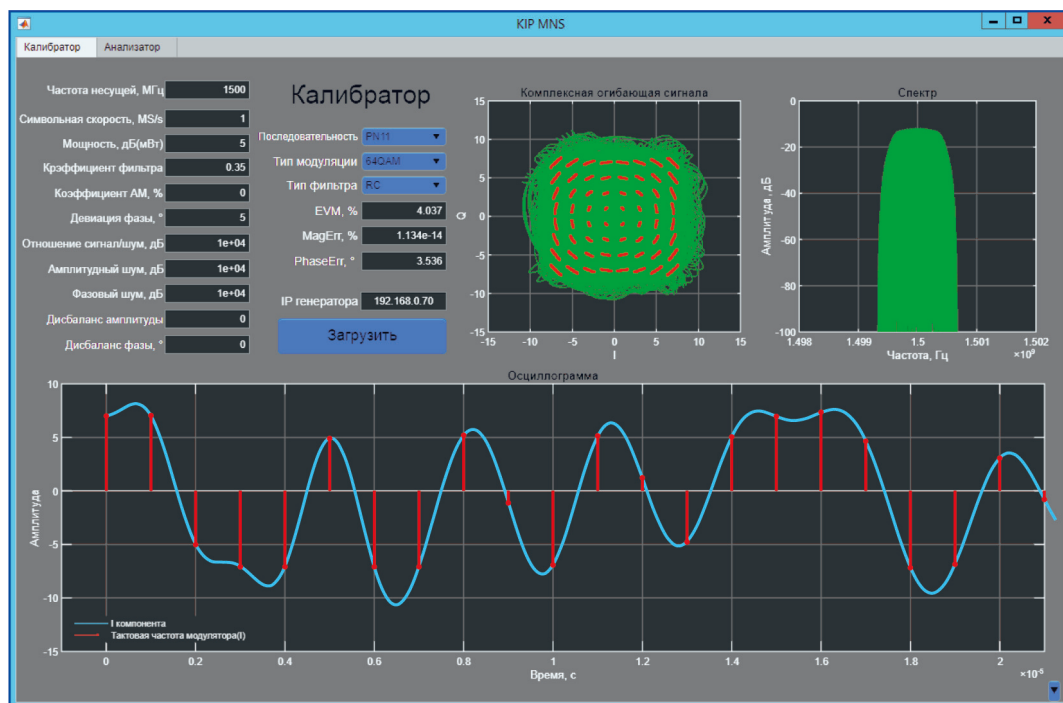


Рис. 3. Диалоговое окно программного обеспечения калибратора EVM

Fig. 3. The EVM calibrator software window

Математическая модель модулированного сигнала с нормируемой помехой реализована в разработанном авторами настоящей статьи программном обеспечении. Сигналы воспроизводятся генератором сигналов произвольной формы (ГСПФ). Метод воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением EVM также был опробован и с использованием векторного генератора сигналов, но с учётом качественно сопоставимых результатов в настоящей статье приведены только результаты применения ГСПФ.

В качестве ГСПФ применён генератор M8190A, к его функциональным возможностям относится запись в память программно сформированного сигнала для последующего воспроизведения. На рис. 3 представлено диалоговое окно программного обеспечения калибратора EVM. В настоящее время созданное программное обеспечение позволяет формировать сигналы с цифровой модуляцией (например, видов QAM16-256, BPSK, QPSK и др.) и фильтрами типа «приподнятый косинус – RC-фильтр» и «корень из приподнятого косинуса – RRC-фильтр», а также с помехами различных видов, которые можно описать математически и воспроизвести на ГСПФ (паразитными АМ и ФМ, белым и фазовым шумами, смещением частоты несущей,

дисбалансом квадратур и т. д.). Такие широкие функциональные возможности калибратора EVM на основе ГСПФ и разработанного программного обеспечения потенциально дают возможность оценивать не только точность измерения EVM, но и устойчивость технических средств, например модемов, к помехам разных видов.

С целью установления шкалы воспроизведения EVM оценена погрешность воспроизведения коэффициента m и девиации фазы калибратором на основе ГСПФ по Государственному первичному эталону единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний ГЭТ 180-2010 и Государственному первичному эталону единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020 соответственно. Измерения проведены на несущей $\omega_0=1$ ГГц и модулирующей $f_m=1$ кГц частотах. Выбор данных параметров обусловлен частотными диапазонами применяемых первичных эталонов и близостью к несущим частотам действующих систем связи. Результаты измерений приведены в табл. 1, 2, где m_y , m_i , Δm и $\varphi_{д.у}$, $\varphi_{д.и}$, $\Delta\varphi_{д.}$ – установленное и измеренное значения, а также абсолютные погрешности воспроизведения коэффициента m и девиации фазы соответственно.

Также экспериментально исследованы возможности калибровки анализаторов спектра (модель N9040B с опцией векторного анализа сигналов) по значению EVM для сигналов с модуляцией 64-QAM. Параметры калибровочных сигналов: $\omega_0=1$ ГГц; $f_c=1$ МГц; RC-фильтр с коэффициентом сглаживания 0,35; псевдослучайная последовательность вида PN-11. Применение псевдослучайной последовательности позволяет получить равномерный спектр и равномерное распределение символов на диаграмме созвездия калибровочного сигнала, что уменьшает методическую погрешность воспроизведения EVM.

Значения EVM калибровочных сигналов с нормированной помехой рассчитаны по формуле (1) с учётом установленных параметров АМ и ФМ, а также с использованием фактических результатов (см. табл. 1, 2). Коэффициент нормировки P_n рассчитан по формуле (2). Результаты оценки представлены на рис. 4, согласно которому отличие воспроизводимых и измеренных значений EVM составило 0,005–0,130 %. При этом минимальные и максимальные отличия были получены при значениях EVM соответственно более 1 и 0,1 %. Такое отклонение значений EVM обусловлено отличием программной модели сигнала от реального выходного сигнала калибратора. Нелинейность тракта ГСПФ и в большей степени шумы искажают сформированный сигнал, что в свою очередь уменьшает точность воспроизведения значения EVM.

Заключение. Разработанный метод воспроизведения сигналов с цифровой модуляцией позволяет задавать значение EVM путём добавления к сигналу нормированной помехи. Рассмотренный частный случай предложенного метода с применением в качестве нормируемой помехи гармонических сигналов АМ и ФМ экспериментально подтвердил возможность передачи единиц коэффициента амплитудной модуляции и девиации фазы от ГЭТ 180-2010 и ГЭТ 166-2020 к калибратору параметров сигналов с цифровой модуляцией на основе ГСПФ.

Таблица 1

Погрешность воспроизведения коэффициента m калибратором с ГСПФ

m_y , %	m_i , %	Δm , %
0	0,003	0,003
0,2	0,216	0,016
0,5	0,513	0,013
1,0	1,009	0,009
2,0	2,000	0,000
4,0	4,004	0,004
5,0	4,998	–0,002

Таблица 2

Погрешность воспроизведения девиации фазы калибратором с ГСПФ

$\varphi_{д.у}$, °	$\varphi_{д.и}$, °	$\Delta\varphi_{д.}$, °
0	0,127	0,127
0,2	0,240	0,040
0,5	0,511	0,011
1,0	1,003	0,003
2,0	1,996	–0,004
4,0	4,003	0,003
5,0	5,006	0,006

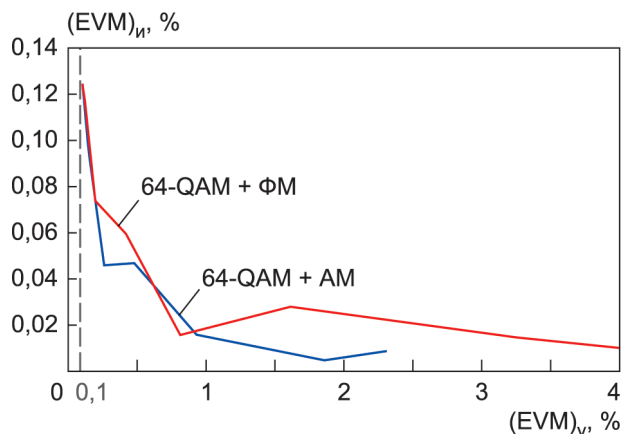


Рис. 4. Графики зависимости измеренных $(EVM)_и$ от установленных $(EVM)_у$ значений модуля вектора ошибки

Fig. 4. Plots of measured EVM values versus set

Список источников

References

1. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access. Network Base Station (BS) conformance testing (FDD) (Release 16), Dec. 2018.

2. Шостко И. С., Деревянко Н. В. Анализ влияния искажающих факторов на качество сигнала эфирной цифровой телевизионной системы DVB // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2015. Вып. 182. С. 51–57.

3. Zhang Rui, Zhou Feng, Guo Long-qing, Wang Nan, *75th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 28 May 2010, Anaheim, CA, USA, IEEE, 2010.
<https://doi.org/10.1109/ARFTG.2010.5496333>

4. Hudlicka M., Laboratory System for a Traceable Measurement of Error Vector Magnitude, *39th European Microwave Conference (EuMC)*, 29 Sept. – 1 Oct. 2009, Rome, Italy.

5. Humphreys D. A., Harper M. R., McInnes L. K. J., Miall J., Strategy for traceability of complex modulated signals using RF waveform metrology, *Proc. of XXIX URSI General Assembly*, Chicago, USA, Aug. 2008, A03.6.

6. Zhang Rui, Zhou Feng, Gu Long-qing, Wang Nan, *CPEM 2010*, June 13–18, 2010, Daejeon, Korea (South) IEEE, 2010, pp. 361–362. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5543533>

7. Малай И. М., Баженов Н. Р., Мильников А. В. Новые задачи метрологического обеспечения измерений параметров радиотехнических сигналов // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 23–36.

8. Могилев И. В., Стальнова К. А. Калибровка измерителей параметров сигналов с цифровой модуляцией по величине амплитудной и фазовой ошибок с применением гармонических сигналов с амплитудной и фазовой модуляцией // Материалы VIII Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке», Менделеево, 21 марта 2019. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2019. С. 147–152.

9. Стальнова К. А., Титаренко А. В. Исследование возможности использования метода «эквивалентных сигналов» для воспроизведения сигналов с нормированной величиной модуля вектора // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 2. С. 212–217.

1. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access. Network Base Station (BS) conformance testing (FDD) (Release 16), Dec. 2018.

2. Shostko I., Derevyanko N., Analysis of distorting factors action on the signal quality of digital terrestrial television system DVB, *Radio engineering*, 2015, iss. 182, pp. 51–57. (In Russ.)

3. Zhang Rui, Zhou Feng, Guo Long-qing, Wang Nan, *75th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 28 May 2010, Anaheim, CA, USA, IEEE, 2010.
<https://doi.org/10.1109/ARFTG.2010.5496333>

4. Hudlicka M., Laboratory System for a Traceable Measurement of Error Vector Magnitude, *39th European Microwave Conference (EuMC)*, 29 Sept. – 1 Oct. 2009, Rome, Italy.

5. Humphreys D. A., Harper M. R., McInnes L. K. J., Miall J., Strategy for traceability of complex modulated signals using RF waveform metrology, *Proc. of XXIX URSI General Assembly*, Chicago, USA, Aug. 2008, A03.6.

6. Zhang Rui, Zhou Feng, Gu Long-qing, Wang Nan, *CPEM 2010*, June 13–18, 2010, Daejeon, Korea (South) IEEE, 2010, pp. 361–362. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5543533>

7. Bazhenov N. R., Mylnikov A. V., Malay I. M., New tasks of metrological assurance of measurements of parameters of radiotechnical signals, *Al'manac of Modern Metrology*, 2019, no. 2 (18), pp. 23–36. (In Russ.)

8. Mogilev I. V., Stalnova K. A., Calibration of meters of parameters of signals with digital modulation in terms of amplitude and phase errors using harmonic signals with amplitude and phase modulation, *Abstracts of the report at the VIII scientific-practical conference of young scientists, graduate students and specialists "Metrology in the XXI century"*, Mendeleev, 21 March 2019, Mendeleev, VNIIFTRI Publ., 2019, pp. 147–152. (In Russ.)

9. Stalnova K. A., Titarenko A. V., Investigation of the method of "equivalent signals" for the reproduction of signals with a normalized error vector magnitude, *Digital signal processing application considerations*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 212–217. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 16.02.2022; одобрена после рецензирования 25.02.2022; принята к публикации 01.03.2022.
The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 25.02.2022; accepted for publication 01.03.2022.