

УДК 621.396.41

МОДЕЛЬ ФАЗОВОГО ШУМА С УЧЕТОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ МАСКИ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТЫ И ГЕНЕРАТОРОВ СИГНАЛА

Крюков Яков Владимирович,

аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники
радиотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники»,
Россия, 634000, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: yaachik@gmail.com

Рогожников Евгений Васильевич,

аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники
радиотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники»,
Россия, 634000, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: udzhon@mail.ru

Покаместов Дмитрий Алексеевич,

аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники
радиотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники»,
Россия, 634000, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: dmal@sibmail.com

Актуальность и цель исследования. При разработке электронных устройств важное значение имеет расчет шумовых характеристик. В процессе проектирования систем связи расчет приемно-передающего тракта особенно важен для достижения высокого отношения сигнал/шум на выходе приемника/передатчика, что накладывает ограничение на использование того или иного оборудования. Фазовый шум является, пожалуй, важнейшим критерием стабильности генератора и синтезатора. Однако при небольшом различии в характеристике уровня мощности фазового шума цена на устройства может отличаться в несколько раз. В связи с этим важным является компромисс между ценой и качеством конкретного оборудования для разрабатываемой системы. Для упрощения процесса выбора оборудования требуется создание адекватной модели фазового шума с учетом спектральной маски синтезаторов частоты и генераторов сигнала.

Методы исследования. Прогресс в области создания новых радиотехнических схем обуславливает необходимость использования математического аппарата и программных средств для правильной оценки шумовых характеристик схемы. Распространенным методом такой оценки параметров систем связи является симуляционное моделирование, например, в платформе «Matlab», которое позволяет учитывать спектральную маску плотности мощности фазового шума, предоставляемую производителем. На основании такой модели можно делать вывод о целесообразности использования тех или иных устройств при проектировании тракта. В данной статье предлагается метод моделирования фазового шума конкретных устройств в платформе «Matlab» по характеристикам, предоставляемым производителями этих устройств.

Результаты. Создана модель фазового шума с учетом спектральной маски синтезаторов частоты и генераторов сигнала, адекватность которой подтвердилась проведенным экспериментом.

Ключевые слова:

Фазовый шум, синтезатор, спектральная маска фазового шума, спектральная маска, системная модель фазового шума, OFDM.

Системная модель

Проблемам расчета фазового шума [1–6] в генераторах и синтезаторах посвящено значительное число работ [7–12], однако вопрос об эффективном и корректном вычислительном методе расчета все еще остается открытым. Комплексный сигнал определяется как:

$$S(t) = [S_0(t) + \Delta S(t)] \cdot e^{j[\varphi(t) + \Delta\varphi(t)]},$$

где $\Delta S(t)$ – амплитудные флуктуации; $\Delta\varphi(t)$ – флуктуации фазы.

Фазовый шум (ФШ) имеет случайную природу возникновения сначала [13]. К такой природе возникновения относится также дробовый шум и фликкер-шум [14] в полупроводниковых элементах. Для количественной оценки ФШ источника

используется оценки девиации частоты или фазы в частотной либо временной области. Фундаментальным определением фазового шума является спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых флуктуаций в заданной полосе частот [15]:

$$S_\varphi(f_m) = [\Delta\varphi_{\text{ск}}^2(f_m)] / BW,$$

где f_m – частота отстройки от несущей; $\Delta\varphi_{\text{ск}}^2$ – среднеквадратичное значение флуктуации фазы; BW – полоса, которая используется при измерении $\Delta\varphi_{\text{ск}}^2$.

Чаще всего используют другое определение характеристики фазового шума – спектральная плотность мощности фазового шума (СПП ФШ) в одиночной боковой полосе $L(f_m)$:

$$L(f_m) = \frac{1}{2} S_\varphi(f_m).$$

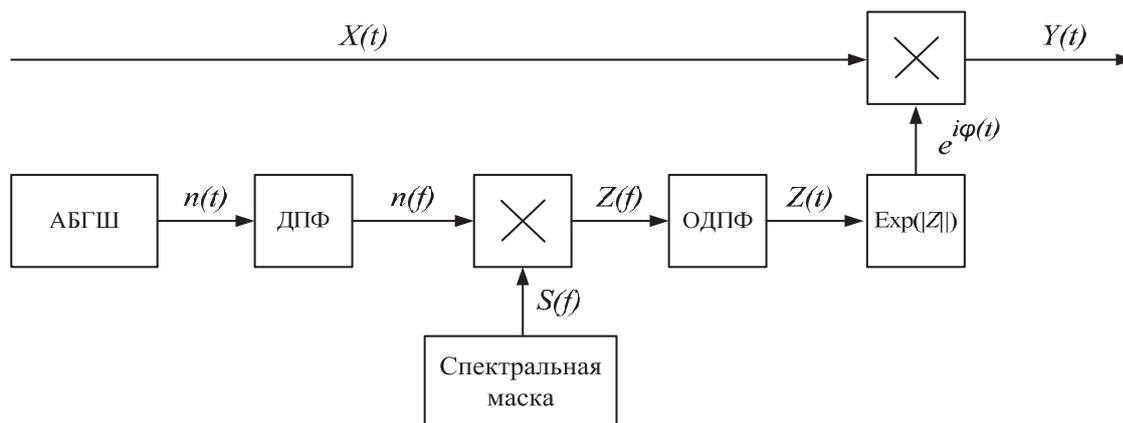


Рис. 1. Структурная схема модели фазового шума

Fig. 1. Flow diagram of phase noise model

Основное функциональное назначение предлагаемой модели – генерирование фазового шума с параметрами, соответствующими спектральной маске интересующего нас устройства. Структура предлагаемой модели формирования фазового шума представлена на рис. 1, где введены следующие обозначения: АБГШ – генератор аддитивного белого гауссова шума; ДПФ – дискретное преобразование Фурье; ОДПФ – обратное дискретное преобразование Фурье.

Модель реализована в пакете «Matlab» [16] и основывается на преобразовании в частотной области сгенерированного АБГШ и представлении его в качестве мультипликативной помехи. На спектр АБГШ накладывается спектральная маска фазового шума устройства, тем самым фазовый шум устройства эквивалентен фазовому шуму модели.

Комплексный сигнал с фазовым шумом на выходе модели (рис. 1):

$$Y(t) = X(t) \cdot e^{i\varphi(t)},$$

где $\varphi(t)$ – флуктуация фазы.

$$Z(t) = IFFT\{FFT[n(t) \cdot S_{\varphi}(\omega)]\},$$

где $Z(t)$ – АБГШ после процедуры наложения на него спектральной маски; $S_{\varphi}(\omega)$ – спектральная маска плотности мощности ФШ; $IFFT$ – обратное быстрое преобразование Фурье, $n(t)$ – сгенерированный комплексный амплитудный АБГШ, средняя мощность которого на интервале определения сигнала равна средней мощности самого сигнала на этом интервале (Отношение сигнал/шум=0); FFT – быстрое преобразование Фурье.

Спектральная маска плотности мощности ФШ:

$$S_{\varphi}(\omega) = 2 \cdot \sqrt{10^{\frac{L_{\log}}{10}}},$$

где L_{\log} – спектральная плотность мощности фазового шума в одиночной боковой полосе в логарифмическом масштабе, приводимая в характеристиках оборудования, которое вносит фазовые искажения. В модели L_{\log} вычисляется путем аппроксимации сколь угодно количества крайних точек (рис. 2):

$$L_{\log}(\omega) = \text{interp}[СПМ(f_m), f_m],$$

где interp – функция кусочно-линейной аппроксимации; $СПМ(f)$ – спектральная плотность мощности ФШ на частоте отстройки от несущей f_m .

СПМ ФШ (дБн)
[-92 -92 -90 -88 -115 -137 -145 -146]
Отстройка частоты (Гц)
[1e2 1e3 8e3 1e4 1e5 1e6 5e6 7e6]

Рис. 2. Пример ввода параметров СПМ ФШ синтезатора ADF4360–7 фирмы Analog Devices в модель

Fig. 2. Input of phase noise capacity spectral density (PNCS) parameters of synthesizer ADF4360–7 (Analog Devices) into the model

Для демонстрации работоспособности предлагаемой модели на рис. 3 изображена СПМ ФШ в одиночной боковой полосе для синтезатора ADF4360–7 (рис. 3, а) и его представление в модели (рис. 3, б). Также на рис. 4 приведен спектр гармонического сигнала в полосе 16 МГц синтезатора ADF4360–7.

Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование проводилось с целью подтверждения результатов моделирования. На рис. 5 приведена структурная схема экспериментальной установки.

Оборудование, использованное при проведении эксперимента:

1. Векторный генератор сигналов: RSSMBV 100A.
2. Смеситель № 1: ADE-25M.
3. Опорный генератор: Г4–218.
4. Векторный анализатор спектра: RSFSL 18.

Параметры сигнала, используемого в эксперименте:

1. OFDM [17] – сигнал, модулированный QPSK [18].
2. Размерность быстрого преобразования Фурье (БПФ) – 1024.
3. Частота дискретизации – 11,2 МГц.
4. Полоса сигнала – 10 МГц.

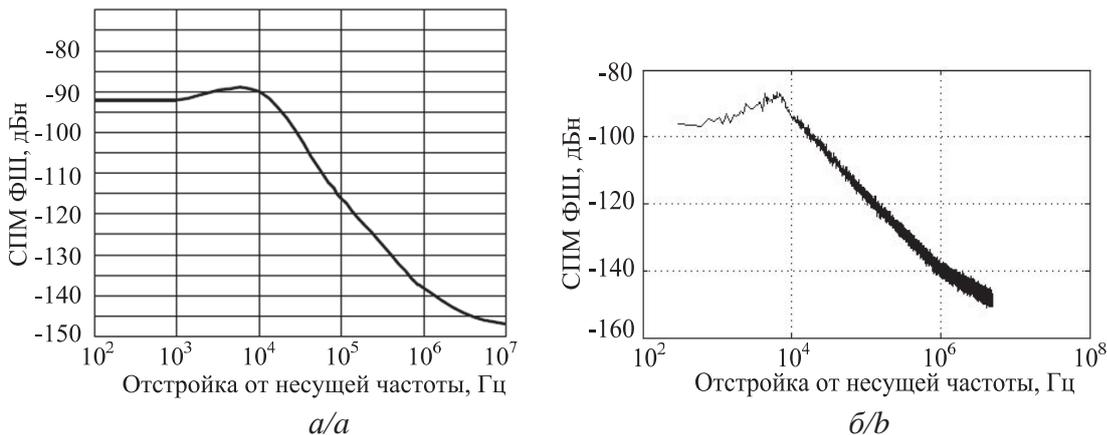


Рис. 3. СПМ ФШ в одиночной боковой полосе: а) синтезатор ADF4360-7; б) модель синтезатора ADF4360-7

Fig. 3. PNCS D in a single sideband: a) synthesizer ADF4360-7; b) model of synthesizer ADF4360-7

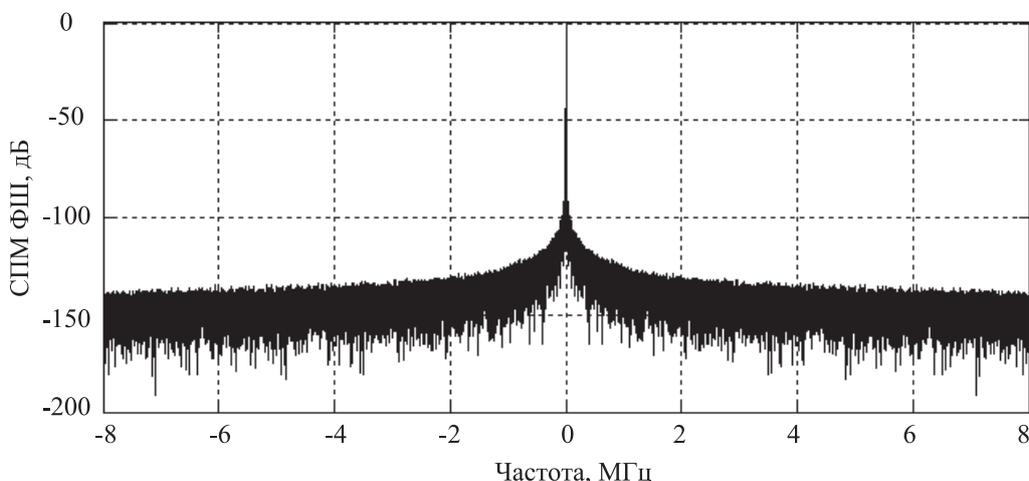


Рис. 4. Смоделированный спектр синусоиды в полосе 16 МГц с фазовым шумом

Fig. 4. Simulated sine curve spectrum within 16 Mhz band with phase noise

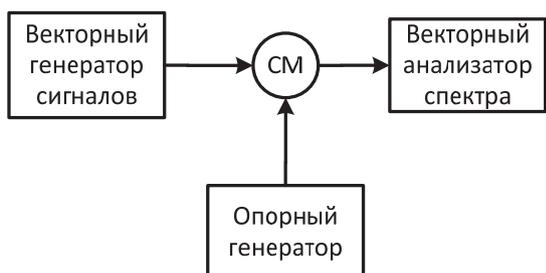


Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки

Fig. 5. Test unit structure

Методика проведения эксперимента:

1. Экспериментальное измерение фазового шума используемых синтезаторов (SMBV100A, Г4-218) на отстройках [10 кГц, 100 кГц, 1 МГц, 5 МГц] представлено в табл. 1. Спектр тестового сигнала в полосе 10 МГц изображен на рис. 6.
2. Сборка экспериментальной установки по схеме приведена на рис. 5. Производится установка параметров приборов.

Таблица 1. Экспериментальное измерение фазового шума синтезаторов

Table 1. Experimental measurement of synthesizer phase noise

Мощность фазового шума Phase noise capacity	Отстройка от несущей частоты, дБс Offset from carrier frequency, dBc			
	10 кГц/kHz	100 кГц/kHz	1 МГц/MHz	5 МГц/MHz
Синтезатор SMBV100A Synthesizer SMBV100A	-130	-140	-155	-160
Синтезатор Г4-218 Synthesizer Г4-218	-25	-35	-85	-100

3. Регистрация сигнала векторным анализатором спектра.
4. Обработка экспериментальных данных.
Экспериментальная обработка данных:
 1. Регистрация сигнала (рис. 7).
 2. Корреляционным методом определяется начало символа [19] (рис. 8).
 3. По первому символу производится оценка передаточной функции канала распространения [20], которая используется для устранения

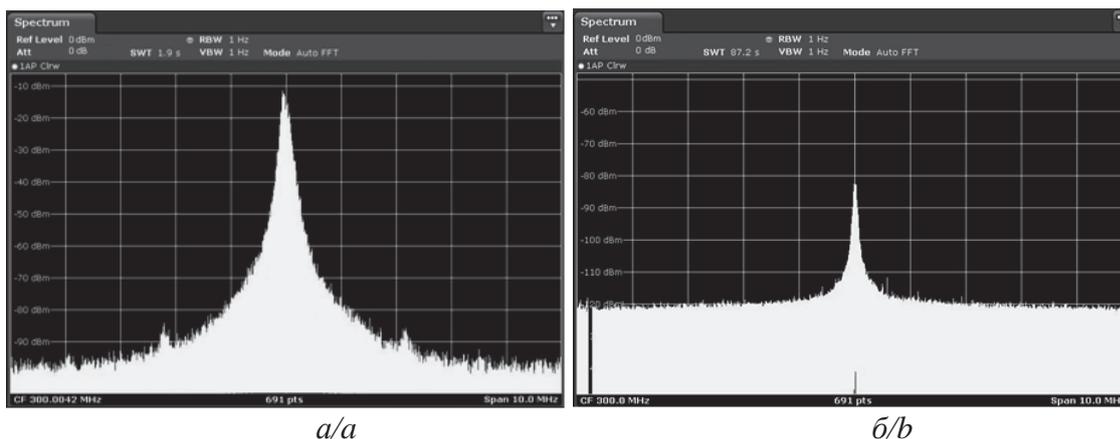


Рис. 6. Спектр тестового сигнала в полосе 10 МГц: а) синтезатор Г4–218; б) синтезатор SMBV100A

Fig. 6. Test signal spectrum within 10 MHz band: a) synthesizer Г4–218; b) synthesizer SMBV100A

влияния постоянной составляющей в тракте передачи (рис. 9, б), а также для устранения фазового набега (рис. 9, в), вызванного ошибкой временной синхронизации, после осуществления оценки отношения сигнал/шум.

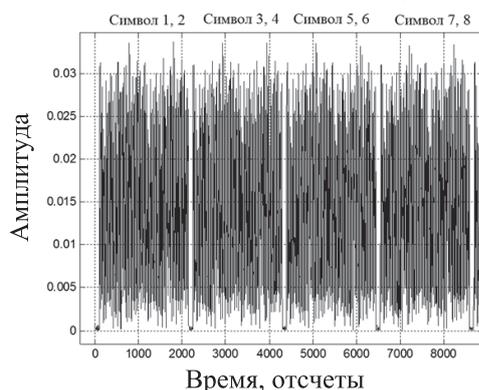


Рис. 7. Регистрация сигнала

Fig. 7. Signal recording

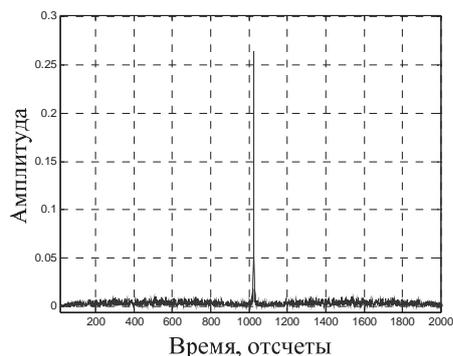


Рис. 8. Функция корреляции и определение начального отсчета

Fig. 8. Correlation function and start readout definition

С экспериментом проводится моделирование – синтезатору частоты Г4–218, вносящему фазовые искажения в канал, ставится в соответствие модель фазового шума с индивидуальными параметрами

спектральной мощности фазового шума, которые были получены в ходе экспериментального измерения (табл. 1). Сравнение результатов эксперимента и моделирования изображено на рис. 10. При этом рассчитанные отношения сигнал/шум приведены в табл. 2.

Таблица 2. Рассчитанные отношения сигнал/шум в ходе эксперимента и моделирования

Table 2. Calculated ratios signal / noise in the experiment and simulation

Рассчитанное отношение сигнал/шум (ОСШ) Noise (RSN)/Calculated ratio signal	Эксперимент Experiment	Моделирование Simulation
		дБ/dB
	27,5	28,9

Рассчитанное ОСШ в результате моделирования совпадает с рассчитанным ОСШ в результате эксперимента, что подтверждает корректную работу модели фазового шума с учетом спектральной маски и возможность использования в процессе расчета приемо-передающего тракта.

Стоит отметить, что в OFDM сигнале фазовые искажения приводят к амплитудным искажениям вследствие межчастотной интерференции и нарушения ортогональности поднесущих [21], причем амплитудные искажения возрастают с увеличением поднесущих в OFDM символе. На рис. 11 представлены 1000 реализаций символа QPSK (0,707+j0,707) модулированного OFDM для количества поднесущих в OFDM-символе=2 и 512 при одинаковом уровне спектральной мощности фазовой помехи в канале.

Заключение

В статье представлена реализация в пакете «Matlab» симуляционной модели фазового шума, учитывающей спектральную маску плотности фазового шума реального синтезатора или генератора частоты. Такая модель позволяет моделировать фазовые искажения в приемо-передающем тракте

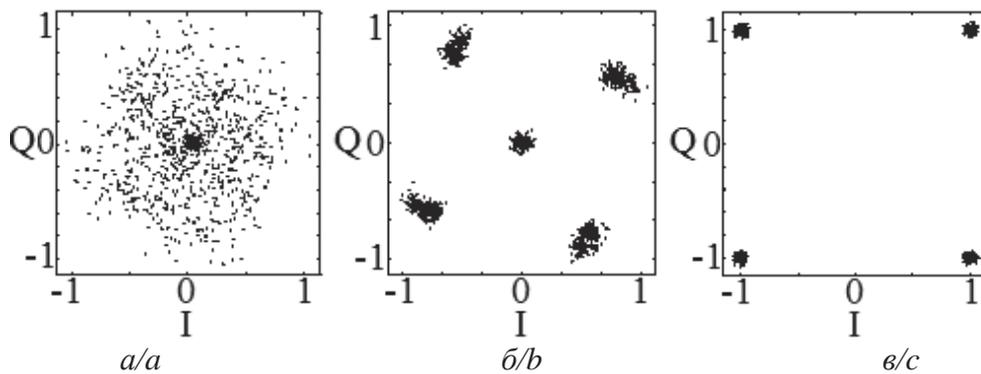


Рис. 9. Коррекция влияния тракта передачи: а) без коррекции; б) устранение частотного сдвига; в) устранение постоянной составляющей тракта

Fig. 9. Correlation of transmission path impact: a) without correction; b) frequency shift elimination; c) elimination of a path constant component

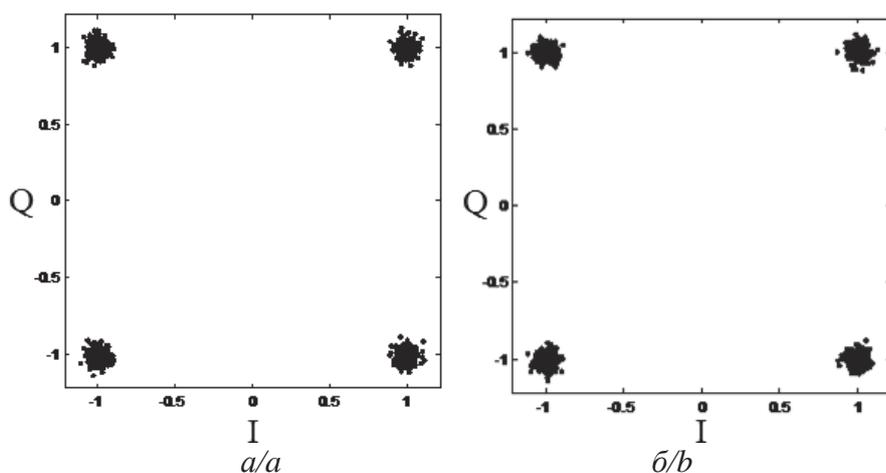


Рис. 10. Диаграмма созвездия, полученная в результате: а) эксперимента; б) моделирования

Fig. 10. Constellation diagram obtained in: a) experiment; b) simulation

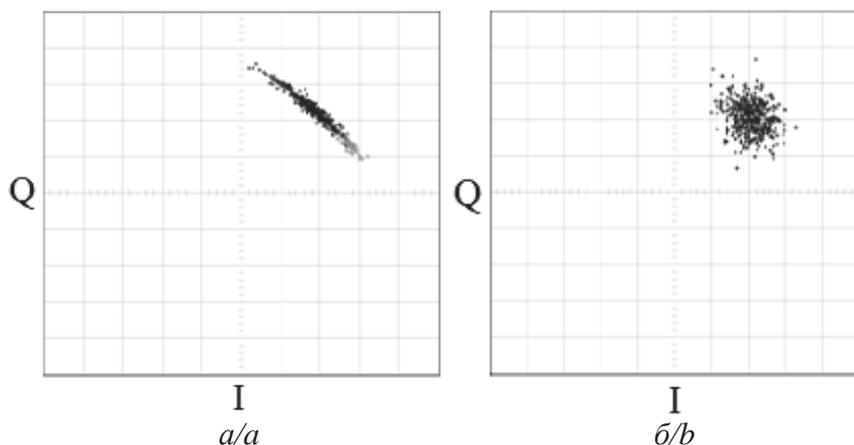


Рис. 11. Реализация одного символа диаграммы созвездия QPSK модулированного OFDM сигнала на выходе канала, вносящего фазовые искажения – количество поднесущих в OFDM: а) 2; б) 512

Fig. 11. Implementation of a diagram symbol in QPSK star pattern of a modular OFDM signal at the channel output which introduces phase distortion – amount of subcarriers in OFDM: a) 2; б) 512

системы связи и определять требования к допустимому уровню фазового шума, на основании которых можно выдвигать требования к используемо-

му оборудованию. Экспериментально было выявлено, что модель фазового шума работает адекватно и рассчитанное ОСШ в модели и эксперименте

различаются на 1,4 дБ. Это может быть обусловлено погрешностью измерения спектральной мощности фазового шума генератора Г4–218 на первом этапе проведения эксперимента. Также стоит от-

метить, что данная модель фазового шума уже применялась в расчете тракта приема-передачи модемного оборудования стандарта беспроводной связи Wi-MAX для выбора синтезаторов частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Egan W.F. Modeling phase noise in frequency dividers // *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions*. – 1990. – V. 37. – № 4. – P. 307–315.
- Hajimiri A., Lee T.H. A general theory of phase noise in electrical oscillators // *Solid-State Circuits, IEEE Journal*. – 1998. – V. 33. – № 2. – P. 179–194.
- Gordon J.P., Mollenauer L.F. Phase noise in photonic communications systems using linear amplifiers // *Optics letters*. – 1990. – V. 15. – № 23. – P. 1351–1353.
- Razavi B. A study of phase noise in CMOS oscillators // *Solid-State Circuits, IEEE Journal*. – 1996. – V. 31. – № 3. – P. 331–343.
- Hajimiri A., Limotyrakis S., Lee T.H. Jitter and phase noise in ring oscillators // *Solid-State Circuits, IEEE Journal*. – 1999. – V. 34. – № 6. – P. 790–804.
- Rael J.J., Abidi A.A. Physical processes of phase noise in differential LC oscillators // *Custom Integrated Circuits: Proceedings of the IEEE 2000*. – Orlando, 2000. – P. 569–572.
- Томозов Д.А., Петров А.С. Расчет фазового шума в синтезаторах частот, реализованных на кольцах ФАПЧ // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2010. – Т. 15. – № 4. – С. 57–68.
- Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов. – Муром: ВлГУ, 2012. – 85 с.
- Гурарий М.М., Жаров М.М., Ульянов С.Л. Вычислительный метод расчета фазового шума в автогенераторах // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем*. – М.: ИПИМ РАН, 2010. – С. 96–101.
- Ромашова Л.В., Ромашов А.В. Анализ собственных шумов цифровых вычислительных синтезаторов частот // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. – 2011. – № 3. – С. 25–29.
- Leeson D.B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum // *Proceedings of the IEEE*. – Salt Lake City, 1966. – Т. 54. – № 2. – С. 329–330.
- Sauvage G. Phase noise in oscillators: A mathematical analysis of Leeson's model // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1977. – Т. 26. – № 4. – С. 408–410.
- Dutta P., Horn P.M. Low-frequency fluctuations in solids: 1 f noise // *Reviews of Modern physics*. – 1981. – V. 53. – № 3. – P. 497–516.
- Розанов Ю.А. Стационарные случайные процессы. – М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 272 с.
- Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже –120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или Борьба за децибелы // *Компоненты и технологии*. – 2009. – № 6. – С. 142–147.
- Васильев К.К., Служивый М.Н. Математическое моделирование систем связи. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 170 с.
- Nee R., Prasad R. OFDM for wireless multimedia communications. – Boston: Artech House, Inc., 2000. – 260 с.
- Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – С. 538–562.
- Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х т. Т. 1 / пер. с фр. – М.: Мир, 1983. – 311 с.
- Van de Beek J.J. et al. On channel estimation in OFDM systems // *Vehicular Technology Conference, 45th IEEE*. – Chicago, 1995. – V. 2. – P. 815–819.
- Robertson P., Kaiser S. Analysis of the effects of phase-noise in orthogonal frequency division multiplex (OFDM) systems // *Gateway to Globalization: 1995 IEEE International Conference*. – Seattle, 1995. – V. 3. – P. 1652–1657.

Поступила 24.07.2014.

UDC 621.396.41

PHASE NOISE MODEL CONSIDERING SPECTRAL MASK OF FREQUENCY SYNTHESIZERS AND SIGNAL GENERATORS

Yakov V. Kryukov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634000, Russia. E-mail: yaachik@gmail.com

Eugeniy V. Rogozhnikov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634000, Russia. E-mail: udzhon@mail.ru

Dmitriy A. Pokamestov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634000, Russia. E-mail: dmal@sibmail.com

Relevance and the aim of the study. When developing the electronic devices it is important to calculate noise characteristics. While designing the communication systems the computation of receiving and transmitting tract is of particular importance to achieve a high signal/noise ratio at the output of the receiver/transmitter, which imposes restrictions on application of certain equipment. Phase noise is perhaps the most important criterion for generator and synthesizer stability. However, with a small difference in characteristics of phase noise power level, the price of the product may differ in several times. In this connection the compromise between the price and the quality of the specific equipment for the system being developed is important. To simplify the equipment selection it is necessary to develop an adequate mathematical model of phase noise considering spectral mask of frequency synthesizers and signal generators.

Method of study. The progress in development of new electronic circuits conditions the necessity to use mathematics and software tools to assess properly the noise characteristics of the circuit. A common method of estimating the parameters of such a communication system is a simulation modeling, for example, in the platform «Matlab». For reliable assessment of phase noise impact on the system, it is sufficient to use the model, which allows taking into account the spectral power density mask in data-sheet supplied by the manufacturer. Based on this model the feasibility of using device in the design can be concluded. In the paper the authors propose a method of phase noise mathematical modeling in the «Matlab» by the device-specific characteristics provided by the manufacturers.

Results and conclusions. The authors developed a mathematical model of phase noise with spectral mask of frequency synthesizers and signal generators, which adequacy was proved by the experiment.

Key words:

Phase noise, synthesizers, phase noise spectral mask, spectral mask, phase noise system model, OFDM.

REFERENCES

- Egan W.F. Modeling phase noise in frequency dividers. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions*, 1990, vol. 37, no. 4, pp. 307–315.
- Hajimiri A., Lee T.H. A general theory of phase noise in electrical oscillators. *Solid-State Circuits, IEEE Journal*, 1998, vol. 33, no. 2, pp. 179–194.
- Gordon J.P., Mollenauer L.F. Phase noise in photonic communications systems using linear amplifiers. *Optics letters*, 1990, vol. 15, no. 23, pp. 1351–1353.
- Razavi B. A study of phase noise in CMOS oscillators. *Solid-State Circuits, IEEE Journal*, 1996, vol. 31, no. 3, pp. 331–343.
- Hajimiri A., Limotyrakis S., Lee T.H. Jitter and phase noise in ring oscillators. *Solid-State Circuits, IEEE Journal*, 1999, vol. 34, no. 6, pp. 790–804.
- Rael J.J., Abidi A.A. Physical processes of phase noise in differential LC oscillators. *Custom Integrated Circuits: Proceedings of the IEEE 2000*. Orlando, 2000, pp. 569–572.
- Tormozov D.A., Petrov A.S. Raschet fazovogo shuma v sintezatorakh chastot, realizovannykh na koltsakh FAPCH [Calculation of phase noise frequency synthesizer implemented on rings PLL]. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 57–68.
- Romashov V.V., Romashova L.V. Metodika rascheta koeffitsientov approksimatsiy spektralnoy plotnosti moshchnosti fazovykh шумов tsifrovyykh vychislitelnykh sintezatorov [Method of calculating the approximation coefficients of power spectral density of phase noise of digital computers synthesizers]. Murom, VIGU Publ., 2012, 85 p.
- Gurariy M.M., Ulyanov S.L., Zharov M.M., Vychislitilnyy metod rascheta fazovogo shuma v avtogeneratorakh [Computing method for calculating the phase noise in oscillators]. *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development*. Moscow, IPPM RAN Publ., 2010, pp. 96–101.
- Romashova L.V., Romashov A.V. Analiz sobstvennykh шумов tsyfrovyykh vychislitelnykh sintezatorov chastot [Analysis of the intrinsic noise of digital computing frequency synthesizers]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy – Radio and telecommunication systems*, 2011, no. 3, pp. 25–29.
- Leeson D.B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum. *Proceedings of the IEEE*. Salt Lake City, 1966. Vol. 54, no. 2, pp. 329–330.
- Sauvage G. Phase noise in oscillators: A mathematical analysis of Leeson's model. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1977, vol. 26, no. 4, pp. 408–410.
- Dutta P., Horn P. M. Low-frequency fluctuations in solids: 1 f noise. *Reviews of Modern physics*, 1981, vol. 53, no. 3, pp. 497–516.
- RozaNov Yu.A. *Statsionarnye sluchaynye protsessy* [Stationary random processes]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 272 p.
- Belchikov S. Fazovyy шум: kak spustitsya nizhe –120 dBn/Hz na otstroyke 10 kHz v diapazone chastot do 14 GHz, ili Borba za detsibely [Phase noise: how to get down below 120 dBc/Hz at 10 kHz in the frequency range up to 14 GHz, or the struggle for decibels]. *Komponenty i tekhnologii – Components & Technologies*, no. 6, pp. 142–147.
- Vasilev K.K. *Matematicheskoe modelirovanie sistem svyazi* [Mathematical modeling of communication systems]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2008, 170 p.
- Nee R., Prasad R. *OFDM for wireless multimedia communications*. Boston, Artech House, Inc., 2000, 260 p.
- Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011, pp. 538 – 562.
- Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh* [Methods and techniques of signal processing in physical measurements]. Moscow, Mir Publ., 1983. Vol. 1, 331 p.
- Van de Beek J.J. On channel estimation in OFDM systems. *Vehicle Technology Conference, 45th IEEE*. Chicago, IEEE, 1995. Vol. 2, pp. 815–819.
- Robertson P., Kaiser S. Analysis of the effects of phase-noise in orthogonal frequency division multiplex (OFDM) systems. *Gateway to Globalization, 1995 IEEE International Conference*. Seattle, 1995. Vol. 3, pp. 1652–1657.

Received: 24 July 2014.