

## Программный расчет комплексного гармонического колебания с флуктуацией фазы для беспроводных систем связи

Ф.А. Цветков  
В.В. Васильев  
Вит.А. Михайловский  
Вал.А. Михайловский  
А.В. Ломакина

### Ссылка для цитирования

Цветков Ф.А., Васильев В.В., Михайловский Вит.А., Михайловский Вал.А., Ломакина А.В. Программный расчет комплексного гармонического колебания с флуктуацией фазы для беспроводных систем связи // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 4. С. 686–694. doi: 10.15827/0236-235X.142.686-694

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.09.2023

После доработки: 10.10.2023

Принята к публикации: 19.10.2023

**Аннотация.** В статье описывается программа генерирования последовательности временных отсчетов комплексного гармонического колебания с флуктуацией фазы в виде фликкер-шума с заданной спектральной плотностью. Предлагается решение задачи оценки устойчивости современных каналов передачи цифровых данных к помехам и шумам, что на первом этапе проектирования канала выясняется с помощью моделирования. В моделирующей программе исходной характеристикой генерируемого колебания является желаемая спектральная плотность флуктуаций его начальной фазы. На ее основании рассчитывается амплитудно-частотная характеристика формирующего цифрового фильтра. На вход фильтра подается некоррелированная нормальная псевдослучайная последовательность, на выходе получается последовательность временных отсчетов флуктуирующей начальной фазы комплексного гармонического колебания с некоторой средней частотой (в частности, равной нулю). Для каждого из этих отсчетов вычисляются вещественная и мнимая компоненты выходного колебания генератора. Их совокупность и является искомым комплексным гармоническим колебанием с флуктуацией фазы. Программа написана на языке графического программирования NI LabVIEW, что позволяет видеть все этапы ее работы. Для оценки качества функционирования разработанной программы выполнено тестовое моделирование колебания высокостабильного генератора E5052B Signal Source Analyzer. Последующий численный анализ параметров полученного колебания и сравнение их с известными параметрами генератора подтвердили корректность работы программы. Предложенный в статье способ моделирования влияния фазовых шумов на сигналы в канале связи может быть полезен для специалистов в области исследования и проектирования различных систем беспроводной связи, а также в процессе изучения основ передачи радиосигналов в рамках образовательного процесса в высших учебных заведениях.

**Ключевые слова:** программа, фазовый шум, программная модель, спектральная плотность мощности фазового шума, колебание с фазовым шумом, LabVIEW

**Благодарности.** Работа поддержана Южным федеральным университетом, проект № ВнГр/23-01-РТ

**Введение.** В современных системах связи и навигации широко применяются высокостабильные гармонические колебания. Для таких систем важным параметром является оценка флуктуаций их мгновенной частоты. Согласно рекомендациям IEEE, для характеристики этих флуктуаций используются спектральная плотность мощности начальной фазы и фазовых шумов в одиночной боковой полосе и другие подобные параметры. В данном исследовании речь идет о таком параметре фазового шума, как спектральная плотность мощности фликкер-шума.

Причиной возникновения фазового шума является внезапное отклонение фазы несущей волны, что обуславливает существенное изменение спектральной плотности мощности выходного сигнала. В конечном итоге это может привести к падению общей производительности системы из-за частичной потери согласованно-

сти между параметрами передаваемого и принятого сигналов в процессе передачи данных, что и дает толчок к более тщательному изучению фазового шума гетеродинов и созданию моделей, способных дать глубокое понимание влияния таких шумов на разные системы связи [1–3].

Основным фактором, влияющим на снижение производительности системы беспроводной связи, является несовершенство генераторов, которые используются для преобразования немодулированного сигнала в сигнал в заданной полосе частот на стороне передатчика и для обратного преобразования сигнала на стороне приемника. Идеальные генераторы производят синусоидальные волны со стабильной частотой и опорной фазой. На практике они сочетают в себе реальные пассивные и активные элементы, поэтому синусоида, создаваемая реальным генератором, имеет случайные колебания фазы.

Проектирование канала передачи цифровых данных начинается с его предварительного численного моделирования. Обычно в качестве дестабилизирующего фактора используют аддитивный белый гауссов шум, реже вводят в модель генератора фазовый шум [4, 5]. Однако в этих моделях практически не используется в качестве исходного параметра спектральная плотность мощности для фазового шума. В настоящей работе сделана попытка создать вариант программной модели генератора комплексного гармонического напряжения со случайной начальной фазой, исходным параметром которой является спектральная плотность мощности начальной фазы.

### Современные исследования по проблеме моделирования фазового шума в различных системах связи

Фазовый шум – очень важный и достаточно сложный объект изучения для разработчиков любых видов систем связи. Хотя причины появления таких шумов и способы их подавления довольно подробно изучены, по-прежнему нет полного понимания их происхождения и твердой математической основы для систем с фазовым шумом [6, 7].

Уровень фазового шума является важным параметром во многих системах, поскольку может существенно ограничивать их производительность и приводить к неправильному приему информации. Особенно важно создавать подобные модели для исследования систем с ортогональным частотным уплотнением (Orthogonal Frequency Division Modulation, OFDM), так как, несмотря на высокую эффективность использования спектра и устойчивость к частотной избирательности канала, одним из существенных недостатков OFDM является чувствительность к фазовому шуму. При этом даже небольшой шум приводит к значительной потере производительности. В работе [3] проанализировано влияние фазового шума на системы OFDM и представлена модель, позволяющая реализовать методы для его уменьшения.

Фазовый шум можно измерить в различных точках системы или определить с помощью численного моделирования и математических моделей. При численном моделировании каналов связи возникает необходимость ввести в программную модель канала связи некую случайную нестабильность, обусловленную нестабильностью частоты (начальной фазы) опорных генераторов. Поэтому актуальным явля-

ется моделирование генераторов с нестабильной начальной фазой, статистические характеристики которой могут быть заданы. Так, например, в программной среде Matlab (Simulink) имеется модель `ex_simrf_phase_noise`, позволяющая сгенерировать колебание с фазовым шумом. Аналогичная модель существует и в среде программирования LabVIEW – `MT Add Phase Noise`, с ее помощью можно добавить шумовую составляющую к фазе вектора входного комплексного сигнала. Эти модели работают только в соответствующих средах и, как правило, не дают понимания тонкостей реализованных в них алгоритмов. Поэтому при получении неожиданных результатов работы дополнительно приходится тщательно исследовать свойства этих моделей, чтобы убедиться, что причина не в них.

В результате данного исследования создана программная модель формирователя комплексного колебания с флуктуацией фазы в виде фликкер-шума. Она использует простейшие функциональные узлы языка программирования LabVIEW, поддающиеся легкой проверке. Модель открытая, при необходимости в нее можно вносить изменения. Выбор языка LabVIEW обусловлен еще и тем, что на нем разрабатывалась программная модель канала передачи цифровых данных, публикация сведений о которой предполагается в ближайшее время.

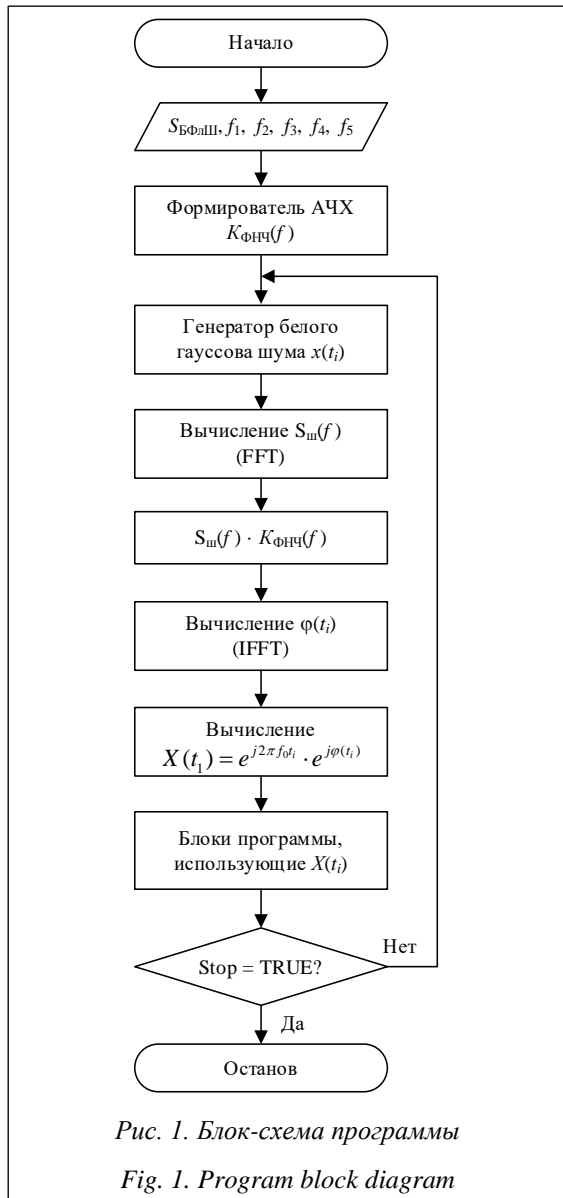
### Разработка программы расчета отсчетов искомого колебания

Генератор комплексного колебания с флуктуацией фазы представляет собой программу на языке LabVIEW, рассчитывающую последовательность комплексных отсчетов искомого колебания для конечного количества равноотстоящих моментов времени. Блок-схема программы показана на рисунке 1.

Сначала по задаваемым параметрам желаемой спектральной плотности фазового шума (вида  $1/f^{\alpha}$ ) рассчитывается необходимый модуль *амплитудно-частотной характеристики* (АЧХ) формирующего вещественного фильтра в виде вещественной четной функции частоты (с нулевым сдвигом фаз).

Дальнейшие вычисления выполняются в цикле в виде последовательности операций:

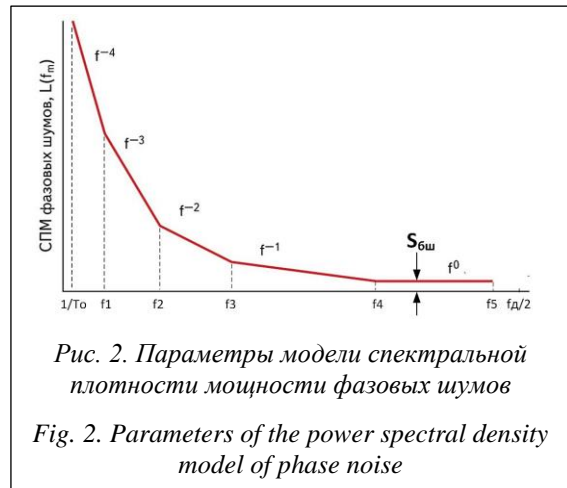
– создается последовательность псевдослучайных отсчетов белого нормального шума и вычисляется ее спектр;



- спектр шума умножается на АЧХ формирующего фильтра, то есть определяется спектр формируемого фликкер-шума;
- от полученного спектра фликкер-шума вычисляется обратное преобразование Фурье с получением вещественной функции времени – мгновенных значений начальной фазы (фликкер-шума фазы) генерируемого комплексного колебания;
- для каждого из моментов времени интервала существования генерируемого комплексного гармонического колебания вычисляется его комплексный отсчет;
- полученная последовательность отсчетов генерируемого колебания со случайной начальной фазой передается в блоки программы, использующей ее.

Этот процесс повторяется необходимое для получения статистически устойчивого результата моделирования количество раз, то есть до остановки оператором или до выполнения заданного заранее условия. Рассмотрим подробнее действия в каждом из модулей алгоритма.

При определении АЧХ формирующего фильтра используется модель спектральной плотности мощности фазовых шумов из [8], показанная на рисунке 2 (обе оси в логарифмических масштабах).

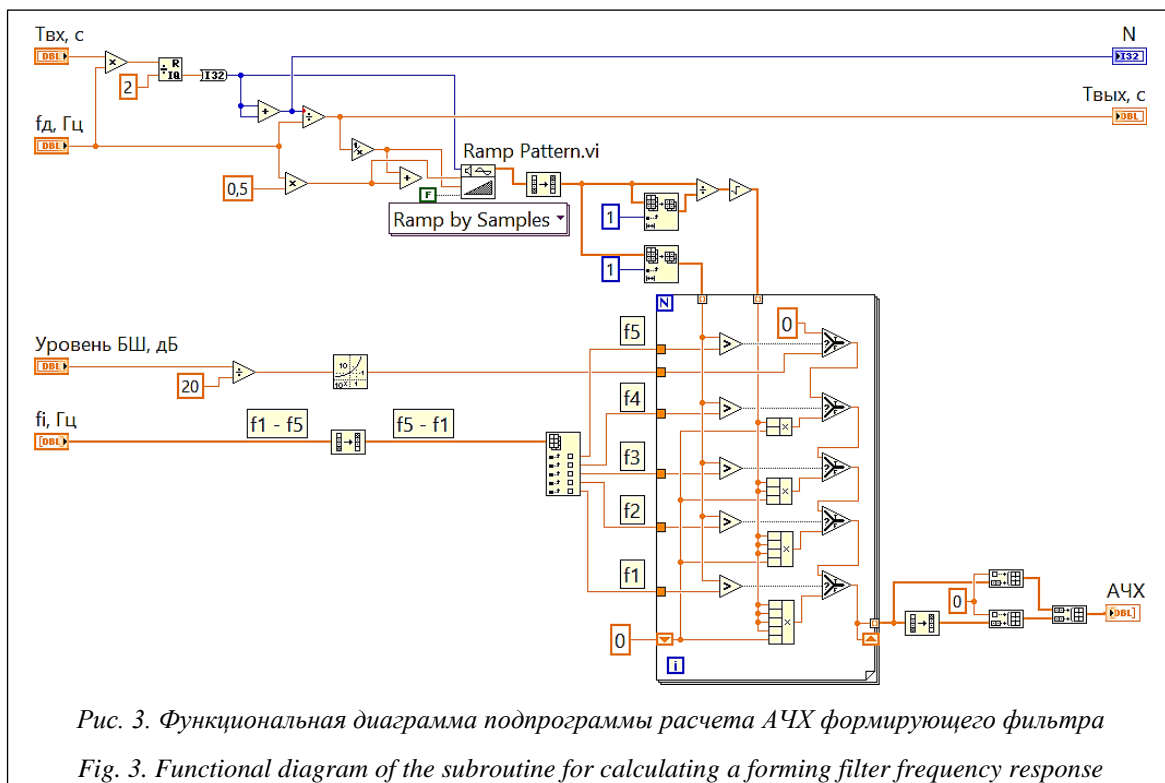


На рисунке отмечены частоты границ участков, в пределах которых характер частотной зависимости неизменен. Используются обозначения:  $T_0$  – длительность отрезка формируемого комплексного гармонического колебания;  $f_d$  – частота дискретизации;  $S_{бш}$  – уровень спектральной плотности мощности на участке «белый шум» (от частоты  $f_4$  до частоты  $f_5$ ). Кроме того, на частоте 0 и в полосе частот от  $f_5$  до  $f_d/2$  уровень спектральной плотности мощности принимается равным 0.

Вся программа разбивается на две подпрограммы: «АЧХ фильтра.vi» – от начала и до завершения модуля «Формирователь АЧХ» и «Генер с фаз шумом.vi», включающую остальные модули, являющиеся телом цикла. Функциональная диаграмма подпрограммы «АЧХ фильтра.vi» расчета АЧХ формирующего фильтра показана на рисунке 3.

Входные параметры подпрограммы:  $T_{вх}$ , с – длительность отрезка формируемого комплексного гармонического колебания;  $f_d$ , Гц – частота дискретизации; Уровень БШ, дБ – уровень спектральной плотности мощности на участке «белый шум»;  $f_i$ , Гц – массив частот границ участков  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ .

Выходные данные подпрограммы:  $N$  – количество отсчетов формируемого комплексного



гармонического колебания (оно же – количество частотных точек всех его спектров);  $T_{\text{вх}, \text{с}} = T_o$  – фактическая длительность отрезка формируемого комплексного гармонического колебания; АЧХ – массив вещественных отсчетов коэффициента передачи формирующего фильтра в функции частоты в полосе  $[-f_d/2, +f_d/2]$  с шагом  $f_d/N$ .

При запуске подпрограммы вычисляется произведение  $T_{\text{вх}} \times f_d$ , которое может быть и с дробной частью. Результат делится нацело на 2; удвоенная целая часть является целым четным числом, которое выдается как  $N$ . Четность  $N$  необходима для корректного применения быстрого преобразования Фурье. По найденному корректному значению  $N$  вычисляется фактическая длительность  $T_{\text{вх}, \text{с}}$  отрезка моделируемого комплексного гармонического колебания.

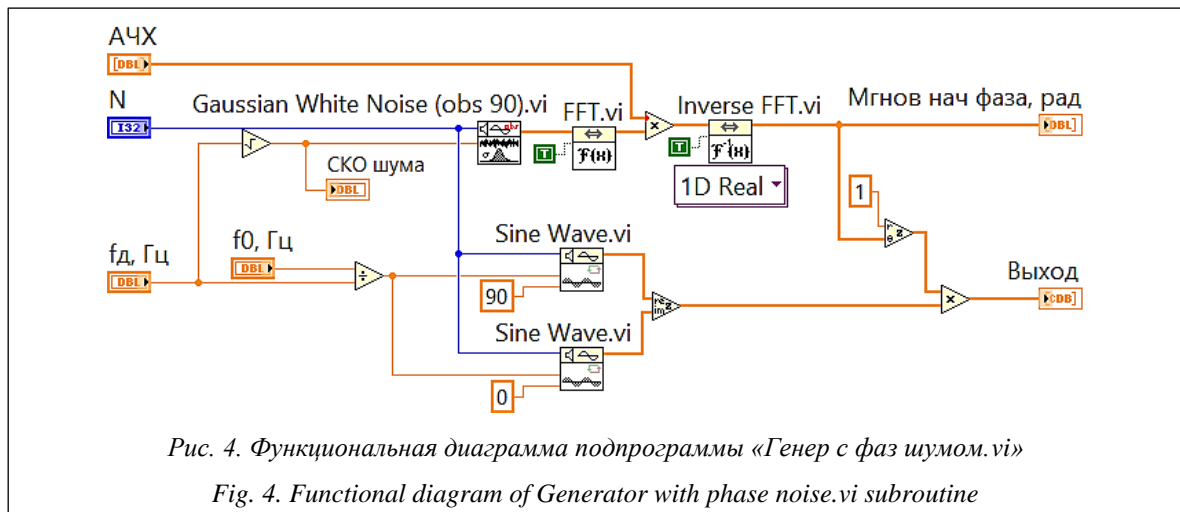
Так как АЧХ в диапазоне частот  $[-f_d/2, +f_d/2]$  является четной функцией относительно частоты 0, вычисляется только половина ее значений – в диапазоне частот от  $1/T_{\text{вх}}$  до  $f_d/2$ . Массив равноотстоящих частот формируется узлом Ramp pattern.vi. При вычислении значений АЧХ используется корень квадратный из отношения значений соседних частот (корень квадратный потому, что АЧХ – это отношение выходного и входного напряжений, а не мощностей). Расчет выполняется от большей ча-

стоты к меньшей, для чего массив расчетных частот реверсируется, реверсируется также и порядок частот в массиве  $f_i$ , Гц. Значения АЧХ вычисляются в цикле, при этом текущее значение частоты сравнивается со значениями частот  $f_i$ , и по мере его уменьшения, то есть перехода к участкам АЧХ, более близким к частоте 0, растет крутизна изменения АЧХ. После цикла по вычисленным значениям АЧХ для положительных частот конструируется АЧХ для всего диапазона частот  $[-f_d/2, +f_d/2]$ , причем на частоте 0 значение АЧХ задается равным нулю.

На лицевой панели подпрограммы «АЧХ фильтра.vi» отражены заданные входные параметры и полученные результаты расчетов для массива значений АЧХ, сами значения показаны только в окрестности частоты 0 (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/7.jpg>).

Рассчитанная АЧХ (по вертикали и горизонтали масштабы логарифмические) позволяет проследить характер изменения АЧХ на разных участках частот и соответствие параметров АЧХ заданным значениям (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/8.jpg>).

В подпрограмме «Генер с фаз шумом.vi» выполняется расчет массива отсчетов комплексного гармонического колебания с флуктуирующей начальной фазой. Функциональная диаграмма подпрограммы показана на рисунке 4.



Узел Gaussian White Noise (obs 90).vi формирует реализацию псевдослучайного шума в виде последовательности  $N$  вещественных отсчетов белого гауссова шума со среднеквадратическим отклонением  $\sigma = \sqrt{f_d}$ . Такое значение  $\sigma$  обеспечивает спектральную плотность мощности шума, равную  $1 \text{ рад}^2/\text{Гц}$  ( $0 \text{ дБрад}^2/\text{Гц}$ ) во всей полосе частот  $[-f_d/2, +f_d/2]$ .

Полученная реализация шума подается на узел FFT.vi, работающий с параметром shift? = TRUE и выдающий массив комплексных значений спектральных составляющих в формате математического спектра (в середине массива элемент соответствует частоте 0).

Вычисленный комплексный спектр умножается на значения АЧХ, рассчитанные подпрограммой «АЧХ фильтра.vi», LabVIEW автоматически преобразует вещественные значения АЧХ в комплексные (с мнимой частью 0). С выхода перемножителя массив чисел поступает на узел Inverse FFT.vi, работающий также с параметром shift? = TRUE, то есть принимающий спектр в математическом формате. На выходе этого узла получается временная последовательность отсчетов, рассматриваемая как мгновенные значения случайной начальной фазы генерируемого комплексного гармонического колебания. Эта последовательность используется как фазы вспомогательного массива комплексных чисел, модули которых равны 1.

Вспомогательный массив поэлементно умножается на массив комплексного гармонического колебания с нулевой начальной фазой и частотой  $f_0$ , формируемого двумя узлами Sine Wave.vi. На выходе перемножителя получается искомый массив отсчетов комплексного гармонического колебания со случайной начальной фазой.

На лицевой панели подпрограммы «Генер с фаз шумом.vi» представлены входные параметры и расчетные показатели (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/9.jpg>).

Пример результата вычисления возможной реализации комплексного гармонического колебания (реальная и мнимая компоненты) иллюстрирует рисунок (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/10.jpg>). Для построения использованы параметры, отраженные на лицевых панелях «АЧХ фильтра.vi» и «Генер с фаз шумом.vi».

### Анализ полученных результатов

Для оценки корректности функционирования разработанной программы проведена тестовая проверка. Диаграмма тестовой программы, являющаяся примером использования подпрограмм «АЧХ фильтра.vi» и «Генер с фаз шумом.vi», показана на рисунке 5.

В программе можно выделить три части.

Первая часть содержит подпрограмму «АЧХ фазов шума.vi», в которую вводятся параметры моделируемого колебания (за исключением  $f_0$ ). Результатом ее работы является массив отсчетов АЧХ формирующего фильтра. Эта часть обрабатывает один раз при запуске тестовой программы.

Вторая часть является циклом с не заданным заранее количеством повторений (останов цикла происходит по нажатию оператором кнопки «stop» на лицевой панели). Номер текущего цикла выдается на индикатор  $N_{\text{тек}}$ , что позволяет оператору следить за работой программы. Для ускорения вычислений никакие графики в теле цикла не выдаются. В цикле запускается подпрограмма «Генер с фаз шум.vi». Используя массив отсчетов АЧХ формирую-

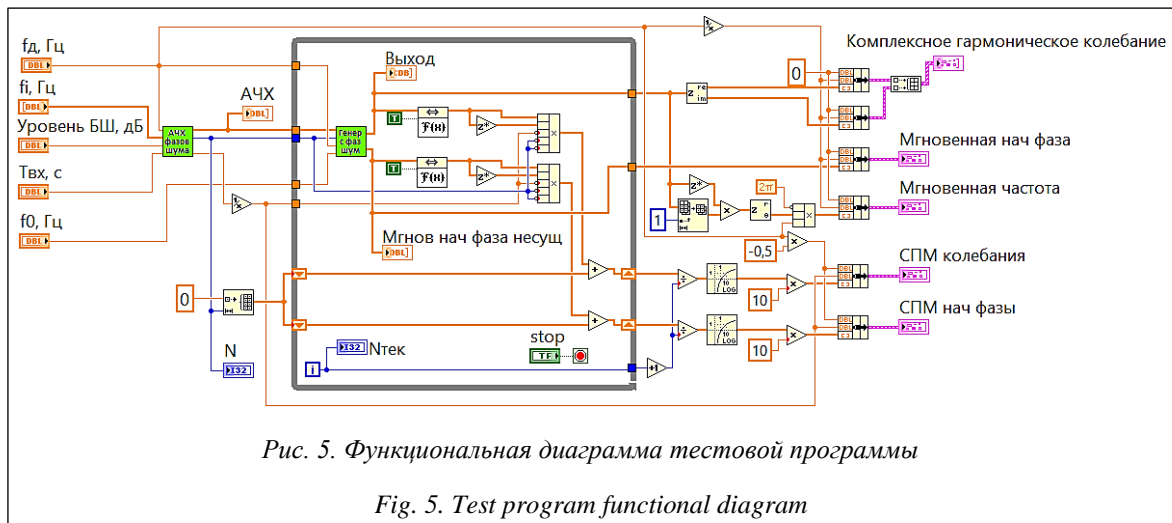


Рис. 5. Функциональная диаграмма тестовой программы

Fig. 5. Test program functional diagram

щего фильтра, она рассчитывает отсчеты комплексного гармонического колебания с фазовым шумом и с центральной частотой  $f_0$ . Рассчитанные в каждой итерации цикла массив вещественных отсчетов «Мгнов нач фаза несущ» (отклонения полной фазы генерируемого колебания от линейной составляющей) и массив рассчитанных комплексных отсчетов «Выход» подаются на цифровые индикаторы и на границу цикла, где сохраняются только их значения, рассчитанные в последней итерации. Кроме того, эти же массивы подаются на FFT-преобразователи, вычисляющие их комплексные спектры в математическом формате (средний элемент массива соответствует частоте 0). Для каждого из этих спектров вычисляется квадрат модуля каждой спектральной составляющей, деленный на шаг по оси частот, то есть вычисляется оценка спектральной плотности мощности. Для получения статистически корректных результатов массивы оценок вычисляются многократно и накапливаются как суммы массивов с помощью регистров сдвига.

По завершении цикла обрабатывает третья часть тестовой программы, которая выдает на индикаторы лицевой панели:

- графики  $Re$ - и  $Im$ -компонентов сгенерированного комплексного сигнала («Комплексное гармоническое колебание») и график мгновенной фазы («Мгновенная нач фаза») (оба графика отражают данные по последней итерации цикла);
- график «СПМ колебания»;
- график «СПМ нач фазы» (по оси частот – отклонения от частоты  $f_0$ );
- график мгновенной частоты как функции времени, рассчитанный по отсчетам массива «Выход».

В качестве примера смоделировано колебание, генерируемое в приборе Keysight Technologies E5052B Signal Source Analyzer. В [8–10] приведен результат измерения фазовых шумов этого колебания с частотой 100 МГц на отстройках от 10 Гц до 5 МГц. Результат показан на рисунке 6 (из оригинального рисунка удалены только некоторые служебные данные прибора и изменена его цветовая палитра).

Разработанная программная модель генератора колебания с фазовыми шумами позволяет симулировать колебание со спектральной плотностью мощности фазовых шумов, подобной изображенной на рисунке 6, но в диапазоне ее частот от 2 Гц до 150 кГц. Были подобраны параметры модели (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/11.jpg>).

Построенный график (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/12.jpg>) демонстрирует спектральную плотность мощности колебания, сгенерированного программной моделью, при этом выполнено усреднение по 2 000 реализаций колебаний с фазовым шумом. Точками обозначены значения, указанные цифрами в верхней части рисунка 6. Очевидно хорошее совпадение результатов моделирования с ними.

График зависимости усредненных значений частоты от времени (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/13.jpg>), рассчитанный по мгновенным значениям частоты при времени усреднения 100 мс, иллюстрирует, что эти значения частоты флуктуируют в пределах  $\pm 0,001$  Гц ( $\pm 1 \cdot 10^{-11}$  по отношению к частоте 100 МГц), что характеризует колебание в E5052B Signal Source Analyzer как высокостабильное.

Результаты теста программной модели позволяют сделать заключение о корректности ее работы и возможности использования в со-

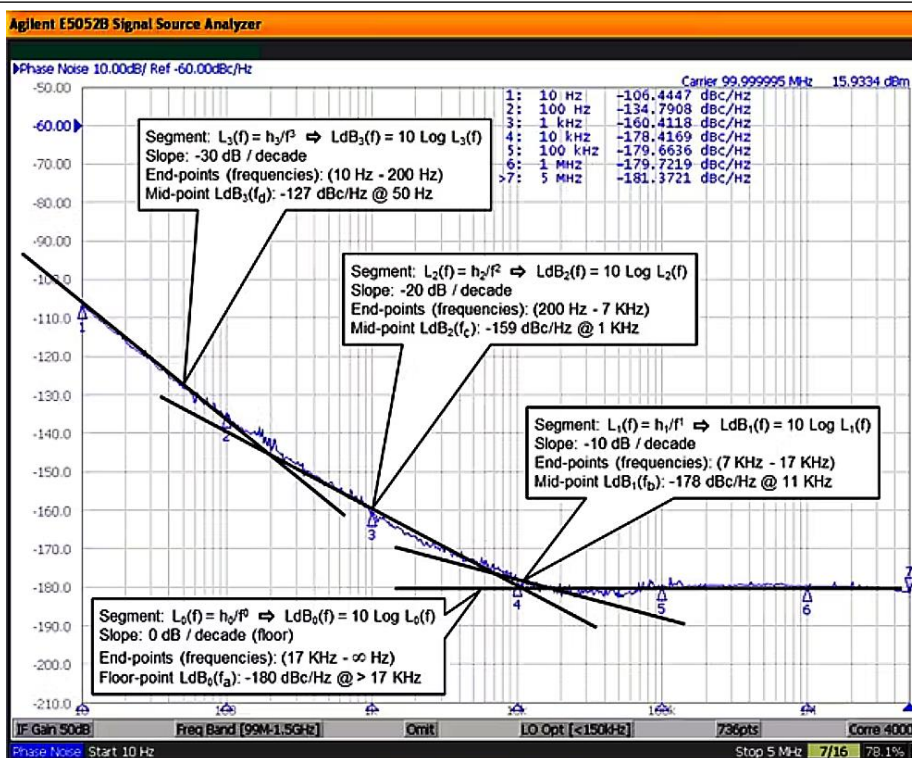


Рис. 6. Результат измерения фазовых шумов колебания в E5052B Signal Source Analyzer

Fig. 6. Result of measuring fluctuation phase noise in E5052B Signal Source Analyzer

ставе программ, моделирующих каналы передачи данных.

### Заключение

Понимание и моделирование фазовых шумов крайне важны для разработки высокопроизводительных систем связи. Чтобы как можно лучше изучить влияние фазового шума, необходимо иметь возможность анализировать поведение фазового шума в различных частях системы связи. Созданная программа формирует

комплексное колебание с флуктуацией фазы и рассчитывает последовательность его комплексных отсчетов для конечного количества равноотстоящих моментов времени. Разработанная программа была протестирована путем сравнения с результатами, полученными в ходе эксперимента с помощью реального прибора Keysight Technologies E5052B Signal Source Analyzer. Результаты тестирования не противоречат фундаментальным положениям теории колебаний со случайной начальной фазой типа фликкер-шум.

### Список литературы

1. Aminu M.U., Lehtomaki J., Juntti M. Beamforming and transceiver optimization with phase noise for mmWave and THz bands. Proc. ISWCS, 2019, pp. 692–696. doi: 10.1109/ISWCS.2019.8877230.
2. Chen X., Fang C., Zou Y., Wolfgang A., Svensson T. Beamforming MIMO-OFDM systems in the presence of phase noises at millimeter-wave frequencies. Proc. WCNCW, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/WCNCW.2017.7919036.
3. Chen X., Wang H., Fan W., Zou Y., Wolfgang A., Svensson T., Luo J. Phase noise effect on MIMO-OFDM systems with common and independent oscillators. Wireless Communications and Mobile Computing, 2017, art. 8238234. doi: 10.1155/2017/8238234.
4. Delos P. System-level LO phase noise model for phased arrays with distributed phase-locked loops. RFPD, 2018. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/system-level-lo-phase-noise-model-for-phased-arrays-with-distributed-phase-locked-loops.html> (дата обращения: 20.05.2023).
5. Качармина Е.Г., Толкачев П.А., Шахтарин Б.И. Полиномиальная модель расчета уровня шумов в синтезаторах частот. Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 2. doi: 10.18698/0236-3933-2018-2-41-47.
6. Free Ch.E., Aitchison C.S. Oscillators. In: RF and Microwave Circuit Design: Theory and Applications, Wiley Publ., 2021, pp. 301–358. doi: 10.1002/9781119332237.ch11.

7. Fang Y., Qiu L., Liang X., Ren C. Cell-Free massive MIMO systems with oscillator phase noise: Performance analysis and power control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, vol. 70, no. 10, pp. 10048–10064. doi: 10.1109/TVT.2021.3100862.

8. Weist F. Phase-noise modeling, simulation, and propagation in phase-locked loops: Part 1. *Microwaves & RF*, 2023. URL: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21259311/phasenoise-modeling-simulation-and-propagation-in-phaselocked-loops-part-1> (дата обращения: 20.05.2023).

9. Weist F. Phase-noise modeling, simulation, and propagation in phase-locked loops: Part 2. *Microwaves & RF*, 2023. URL: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21259311/phasenoise-modeling-simulation-and-propagation-in-phaselocked-loops-part-2> (дата обращения: 20.05.2023).

10. Weist F. Phase-noise modeling, simulation, and propagation in phase-locked loops: Part 3. *Microwaves & RF*, 2023. URL: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21259311/phasenoise-modeling-simulation-and-propagation-in-phaselocked-loops-part-3> (дата обращения: 20.05.2023).

Software &amp; Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.686-694

2023, vol. 36, no. 4, pp. 686–694

### Software calculating complex harmonic oscillation with phase fluctuation for wireless communication systems

Fedor A. Tsvetkov  
Vitaly A. Mikhaylovsky  
Vasily V. Vasilyev  
Valery A. Mikhaylovsky  
Anna V. Lomakina

#### For citation

Tsvetkov, F.A., Mikhaylovsky, Vit.A., Vasilyev, V.V., Mikhaylovsky, Val.A., Lomakina, A.V. (2023) ‘Software calculating complex harmonic oscillation with phase fluctuation for wireless communication systems’, *Software & Systems*, 36(4), pp. 686–694 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.686-694

#### Article info

Received: 19.09.2023

After revision: 10.10.2023

Accepted: 19.10.2023

**Abstract.** The paper describes a program for generating a sequence of complex harmonic oscillation time samples with phase fluctuation in the form of flicker noise with a given spectral density. One of the reasons of failures in data transmission channels are synchronization errors in a receiver caused by frequency instability (initial phase) of reference generators in both a transmitter and a receiver since signals transmitted in wireless communication systems are quite sensitive to random distortions of the phase structure of a signal received by a receiver. This leads to errors in received data and, therefore, to a decrease in a data transfer rate. Thus, it is important to solve the problem of assessing stability of modern digital data transmission channels to interference and noise, which is found out at the first stage of channel design using modeling. In a modeling program, the initial characteristic of a generated oscillation is a desired spectral density of fluctuations in its initial phase. It becomes a basis for calculating an amplitude-frequency response of a forming digital filter. Filter input is an uncorrelated normal pseudo-random sequence; filter output is a sequence of time samples of a fluctuating initial phase of a complex harmonic oscillation with some average frequency (in particular, equal to zero). A real and imaginary components of generator output oscillation are calculated for each of these samples. Their totality is a desired complex harmonic oscillation with phase fluctuation. The program is written in NI LabVIEW graphical programming language, which shows all work stages. To assess the quality of the developed program, the authors performed a test simulation of the oscillation of a highly stable E5052B Signal Source Analyzer generator. The subsequent numerical analysis of the obtained oscillation parameters and their comparison with the known generator parameters confirmed the correctness of the program. The proposed method for modeling a phase noise effect on signals in a communication channel can be useful for specialists in the field of research and design of various wireless communication systems, as well as in studying radio signal transmission basics within an educational process in higher educational institutions.

**Keywords:** phase noise, spectral power density of phase noise, software model, oscillation with phase noise, LabVIEW

**Acknowledgements.** The paper was supported by the Southern Federal University, project No. VnGr/23-01-RT “Research of software-defined radio systems”

#### References

1. Aminu, M.U., Lehtomaki, J., Juntti, M. (2019) ‘Beamforming and transceiver optimization with phase noise for mmWave and THz bands’, *Proc. ISWCS*, pp. 692–696. doi: 10.1109/ISWCS.2019.8877230.
2. Chen, X., Fang, C., Zou, Y., Wolfgang, A., Svensson, T. (2017) ‘Beamforming MIMO-OFDM systems in the presence of phase noises at millimeter-wave frequencies’, *Proc. WCNCW*, pp. 1–6. doi: 10.1109/WCNCW.2017.7919036.



3. Chen, X., Wang, H., Fan, W., Zou, Y., Wolfgang, A., Svensson, T., Luo, J. (2017) 'Phase noise effect on MIMO-OFDM systems with common and independent oscillators', *Wireless Communications and Mobile Computing*, art. 8238234. doi: 10.1155/2017/8238234.
4. Delos, P. (2018) 'System-level LO phase noise model for phased arrays with distributed phase-locked loops', *RFPD*, available at: <https://www.analog.com/en/technical-articles/system-level-lo-phase-noise-model-for-phased-arrays-with-distributed-phase-locked-loops.html> (accessed May, 20, 2023).
5. Kacharina, E.G., Tolkachev, P.A., Shakhtarin, B.I. (2018) 'Polynomial model for computing noise levels in frequency synthesizers', *Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering*, (2). doi: 10.18698/0236-3933-2018-2-41-47.
6. Free, Ch.E., Aitchison, C.S. (2021) 'Oscillators', in *RF and Microwave Circuit Design: Theory and Applications*, Wiley Publ., pp. 301–358. doi: 10.1002/9781119332237.ch11.
7. Fang, Y., Qiu, L., Liang, X., Ren, C. (2021) 'Cell-Free massive MIMO systems with oscillator phase noise: Performance analysis and power control', *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(10), pp. 10048–10064. doi: 10.1109/TVT.2021.3100862.
8. Weist, F. (2023) 'Phase-noise modeling, simulation, and propagation in phase-locked loops: Part 1', *Microwaves & RF*, available at: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21259311/phasenoise-modeling-simulation-and-propagation-in-phaselocked-loops-part-1> (accessed May, 20, 2023).
9. Weist, F. (2023) 'Phase-noise modeling, simulation, and propagation in phase-locked loops: Part 2', *Microwaves & RF*, available at: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21259311/phasenoise-modeling-simulation-and-propagation-in-phaselocked-loops-part-2> (accessed May, 20, 2023).
10. Weist, F. (2023) 'Phase-noise modeling, simulation, and propagation in phase-locked loops: Part 3', *Microwaves & RF*, available at: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21259311/phasenoise-modeling-simulation-and-propagation-in-phaselocked-loops-part-3> (accessed May, 20, 2023).

**Авторы**

**Цветков Федор Алексеевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
ведущий научный сотрудник,  
facvetkov@sfedu.ru

**Васильев Василий Васильевич**<sup>1</sup>,  
младший научный сотрудник, vasily@sunsdr.com

**Михайловский Виталий Алексеевич**<sup>1</sup>,  
младший научный сотрудник, vitaly@sunsdr.com

**Михайловский Валерий Алексеевич**<sup>2</sup>,  
директор, valera.mikhaylovsky@yandex.ru

**Ломакина Анна Владимировна**<sup>2</sup>,  
инженер-программист, lomakinaav90@gmail.com

**Authors**

**Fedor A. Tsvetkov**<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Engineering),  
Associate Professor, Leading Researcher,  
facvetkov@sfedu.ru

**Vasily V. Vasilyev**<sup>1</sup>, Junior Researcher,  
vasily@sunsdr.com

**Vitaly A. Mikhaylovsky**<sup>1</sup>, Junior Researcher,  
vitaly@sunsdr.com

**Valery A. Mikhaylovsky**<sup>2</sup>, Director,  
valera.mikhaylovsky@yandex.ru

**Anna V. Lomakina**<sup>2</sup>, Engineer-Programmer,  
lomakinaav90@gmail.com

<sup>1</sup> Южный федеральный университет,

г. Таганрог, 347900, Россия

<sup>2</sup> ООО «Ратем»,

г. Таганрог, 347900, Россия

<sup>1</sup> Southern Federal University,

Taganrog, 347900, Russian Federation

<sup>2</sup> Limited Liability Company «Ratem»,

Taganrog, 347900, Russian Federation