

Снижение уровня фазовых шумов гетеродинов современных анализаторов спектра при применении образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов

В. В. РОМАШОВ, Л. В. РОМАШОВА, К. К. ХРАМОВ, К. А. ЯКИМЕНКО, А. Н. ДОКТОРОВ, Р. В. ОВЧИННИКОВ

Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия, e-mail: romashovmurom@mail.ru

Разработан гибридный синтезатор частот, в котором для улучшения шумовых характеристик использованы образы основной частоты цифрового вычислительного синтезатора. Показано, что представленный синтезатор способен формировать широкий диапазон выходных частот с малым шагом перестройки. Проведено математическое моделирование шумовых характеристик данного синтезатора и сравнение с шумовыми характеристиками гетеродинов современных анализаторов спектра.

Ключевые слова: гетеродин, анализатор спектра, гибридный синтезатор частот, цифровой вычислительный синтезатор, фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум.

A hybrid frequency synthesizer is presented with images of the fundamental frequency of direct digital synthesizer used to improve noise characteristics. It is shown that the developed synthesizer has a simple architecture and can generate a wide range of output frequencies with a small step size adjustment. A mathematical modelling of noise characteristics of the synthesizer is carried out and a comparison with the phase noise level of heterodynes of modern spectrum analyzers is made.

Key words: heterodyne, spectrum analyzer, hybrid frequency synthesizer, direct digital synthesizer, phase-locked loop, phase noise.

Низкий уровень фазовых шумов и малое количество дискретных побочных составляющих спектра выходного сигнала – важная цель, к которой стремятся разработчики гетеродинов современных радиосистем и прецизионной измерительной аппаратуры, в том числе анализаторов спектра. В настоящее время в качестве гетеродинов активно применяют гибридные синтезаторы частот на основе цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) и систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1–3]. Гибридные синтезаторы частот обеспечивают широкий диапазон выходных частот с малым шагом перестройки частоты и низкий уровень дискретных побочных составляющих спектра выходного сигнала [4, 5]. Авторы разработали гибридный синтезатор частот, в котором для снижения уровня фазовых шумов выходного сигнала использованы образы основной частоты ЦВС [5–7]. Образы основной частоты – это копии спектра основной частоты ЦВС, повторяющиеся симметрично через каждое значение тактовой частоты и возникающие как результат цифроаналогового преобразования цифрового кода в синусоидальное напряжение.

Цель данной работы – исследование возможности снижения уровня фазовых шумов гетеродинов современных анализаторов спектра за счёт применения образов основной частоты ЦВС.

Гетеродины современных анализаторов спектра. Супергетеродинные анализаторы спектра самой распространённой архитектуры содержат от двух до четырёх гетеродинов: первый – широкодиапазонный, остальные – узкодиапазонные [8]. Наиболее строгие требования предъявляются к первому гетеродину. Помимо широкого диапазона выходных частот он должен обеспечивать малый шаг перестройки (доли герца), а также низкий уровень фазовых шумов (для выходной частоты 4 ГГц: –90...–95 дБн/Гц на 100 Гц

отстройки и –118...–120 дБн/Гц на 10 кГц отстройки) и побочных составляющих спектра выходного сигнала.

Гибридные синтезаторы частот на основе ЦВС и многокольцевых систем ФАПЧ часто используются в качестве гетеродинов в современных анализаторах спектра, например, СК4-Белан [9]. На рис. 1 приведена схема одного из вариантов гетеродина на основе двух ЦВС, тактируемых генератором опорной частоты ГОЧ, а также двух колец ФАПЧ. Выходной сигнал первого синтезатора ЦВС1 подаётся на первое кольцо ФАПЧ, образованное фазовым детектором ФД1, первым петлевым фильтром нижних частот ФНЧ1 и управляемым генератором с резонатором на железо-иттриевом гранате ЖИГ. Первый фазовый детектор формирует управляющий сигнал, который через первый фильтр нижних частот подстраивает управляемый генератор. Управляемый генератор формирует выходной сигнал частотой $f_{\text{вых}}$. Этот сигнал является выходом всего устройства и подаётся через цепь обратной связи на смеситель СМ. Полосно-пропускающий фильтр ППФ выделяет разностную частоту, поступающую на второй вход первого фазового детектора.

Второй синтезатор ЦВС2 подключён ко второму кольцу ФАПЧ с единичным коэффициентом деления в цепи обратной связи, образованной вторым фазовым детектором ФД2, вторым петлевым фильтром нижних частот ФНЧ2 и генератором, управляемым напряжением ГУН. Выход этого генератора подключён к генератору гармоник на диоде с накоплением заряда ДНЗ. Выходной сигнал генератора представляет собой набор гармоник выходной частоты генератора, управляемого напряжением, и подаётся на второй вход смесителя.

Гетеродин формирует выходные частоты в диапазоне 4421,4–7621,4 МГц. Мелкий шаг перестройки частоты обеспечивается циф-

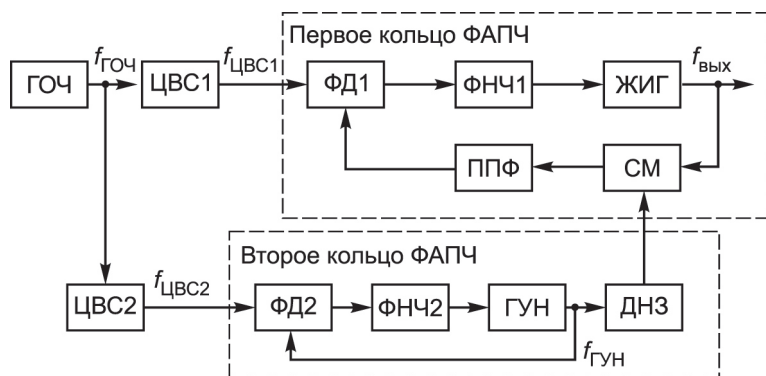


Рис. 1. Структурная схема гетеродина на основе двух цифровых вычислительных синтезаторов и двух колец ФАПЧ: ГОЧ – генератор опорной частоты; ЦВС1, ЦВС2 – первый и второй ЦВС, соответственно; ФД1, ФД2 – первый и второй фазовые детекторы, соответственно; ФНЧ1, ФНЧ2 – первый и второй петлевые фильтры нижних частот, соответственно; ППФ – полосу-пропускающий фильтр; ГУН – генератор, управляемый напряжением; ЖИГ – управляемый генератор с резонатором на железо-иттриевом гранате; СМ – смеситель; ДНЗ – генератор гармоник на диоде с накоплением заряда

ровыми вычислительными синтезаторами, а грубый шаг перестройки – за счёт генератора гармоник. В качестве недостатков данной схемы следует отметить её сложность и значительное время перестройки из-за наличия двух колец ФАПЧ.

Гибридный синтезатор частот, использующий образы основной частоты ЦВС. Образы основной частоты ЦВС имеют частоты

$$f_{\text{обр}} = f_{\text{ЦВС}} \text{sign}(n) + |n|f_{\text{т}} = f_{\text{т}}(K_{\text{ЦВС}} \text{sign}(n) + |n|),$$

где $\text{sign}(\cdot)$ – оператор выделения знака числа; $n = \pm 1, 2, 3, \dots$ – номер образа; $f_{\text{ЦВС}}$ – основная частота ЦВС; $f_{\text{т}}$ – тактовая частота ЦВС; $K_{\text{ЦВС}} = f_{\text{ЦВС}}/f_{\text{т}}$ – коэффициент передачи ЦВС.

Амплитуда образов уменьшается с увеличением номера образа. Проведённые экспериментальные исследования показали, что амплитуда образов (до $n=3$) достигает $-10 \dots -15$ дБн. Структурная схема разработанного авторами гибридного синтезатора частот на основе ЦВС и системы ФАПЧ представлена на рис. 2. В синтезаторе задействованы образы основной частоты ЦВС.

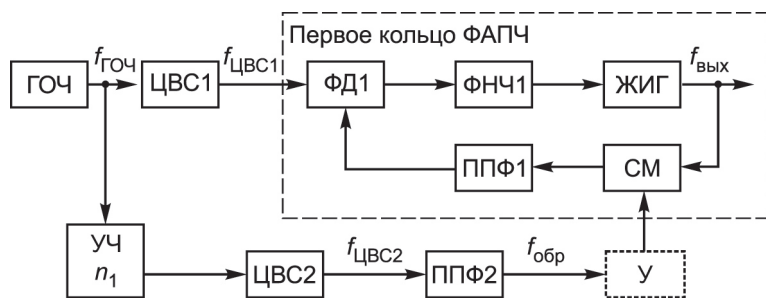


Рис. 2. Структурная схема гибридного синтезатора частот, использующего образы основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов: УЧ – умножитель частоты с коэффициентом умножения n_1 ; У – усилитель; остальное – как на рис. 1

Архитектура гибридного синтезатора частот, в котором применены образы основной частоты ЦВС, основана на использовании двух ЦВС и одного кольца ФАПЧ. Цепь смещения образована умножителем опорной частоты УЧ с переменным коэффициентом умножения n_1 , вторым синтезатором ЦВС2, полосу-пропускающим фильтром ППФ2, выделяющим требуемый образ основной частоты второго ЦВС, а также, при необходимости, усилителем У. Умножитель частоты обычно встроен в интегральные микросхемы ЦВС и реализован в виде петли ФАПЧ.

Выходная частота гибридного синтезатора частоты, использующего образы основной частоты ЦВС, определяется по формуле

$$f_{\text{ГЧ}} = f_{\text{ГОЧ}}[K_{\text{ЦВС1}} + n_1(K_{\text{ЦВС2}} \text{sign}(n) + |n|)], \quad (1)$$

где $f_{\text{ГОЧ}}$ – частота, формируемая генератором опорной частоты; $K_{\text{ЦВС1}}, K_{\text{ЦВС2}}$ – коэффициенты передачи первого и второго ЦВС, соответственно;

Из формулы (1) следует, что у предложенного гибридного синтезатора частот перестройка синтезируемой частоты может осуществляться в широком диапазоне за счёт изменения номера образа n коэффициентов $n, n_1, K_{\text{ЦВС1}}, K_{\text{ЦВС2}}$. Как правило, диапазон изменения выходной частоты первого ЦВС невелик, поскольку ограничен максимально допустимой частотой сравнения в фазовом дискриминаторе.

Для фильтрации и обеспечения приемлемого уровня образа целесообразно ограничить коэффициент передачи второго ЦВС диапазоном значений

$$K_{\text{ЦВС2}} \in [0,15; 0,35]. \quad (2)$$

Рассмотрим пример частотного планирования гибридного синтезатора частот, применяющего образы основной частоты ЦВС, при заданном диапазоне требуемых выходных частот 4421,4–7521,4 МГц, опорной частоте $f_{\text{ГОЧ}} = 100$ МГц, частоте сравнения $f_{\text{ср}} = f_{\text{ЦВС1}} = 21,4$ МГц. Для достижения заданного диапазона выберем номер образа основной частоты второго ЦВС $n=3$. При установке коэффициента умножения $n_1=14$ тактовая частота второго ЦВС составляет 1400 МГц. Изменив $K_{\text{ЦВС2}}$ в соответствии с условием (2), найдём по формуле (1) диапазон выходных частот гибридного синтезатора частот. Он составит 4435–4715 МГц. Далее необходимо переключить коэффициент умножения на $n_1=15$. Получим диапазон выходных частот этого синтезатора в пределах 4750–5050 МГц. Аналогично при изменении n_1 на значения от 16 до 23 перекрывается заданный диапазон до 7730 МГц. Расширить нижнюю границу диапазона до заданного значения 4421,4 МГц можно подстройкой первого ЦВС.

Если имеются технические ограничения на изменение коэффициента умножения n_1 , то можно использовать не один, а несколько номеров образов. Например, коэффициент умножения изменяется только от 21 до 25. Для нахождения нижнего значения заданного диапазона установим коэффициент умножения $n_1=25$ и выделим образ с номером $n=-2$. Тогда диапазон выходных частот гибридного синтезатора частот составит 4150–4650 МГц. Далее переключим умножитель на $n_1=21$ и выделим образ с номером $n=2$. Получим диапазон выходных частот гибридного синтезатора частот 4540–4960 МГц.

Точно так же, изменив n , на значения от 22 до 25, в итоге можно перекрыть диапазон до 5900 МГц. Далее переходим на следующий образ. Для полного перекрытия заданного диапазона при коэффициентах умножения от 21 до 25 необходимо задействовать образы с номерами от $n = -2 \dots 3$.

Кроме расширения диапазона, первый ЦВС можно применять для коррекции неудачных частотных соотношений, при которых в спектре выходного сигнала второго ЦВС возникают нежелательные дискретные побочные составляющие спектра, проникающие в полосу пропускания второго петлевого фильтра нижних частот. Алгоритм коррекции разрабатывают исходя из параметров используемых интегральных ЦВС (разрядности аккумулятора фазы и постоянного запоминающего устройства). Кроме того, с помощью первого ЦВС можно организовать различные виды модуляции.

Анализ шумовых характеристик гетеродинов анализаторов спектра. Методика составления математической модели спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов применима для синтезаторов частот различных архитектур [3, 5]. В соответствии со структурной схемой гетеродина (см. рис. 1) запишем математическую модель СПМ фазовых шумов первого гетеродина анализатора спектра:

$$S_r(F) = [S_1(F) + S_{Гоч}(F)K_{ЦВС1}^2 + S_{ЦВС1}(F) + S_{Фд1}(F) + S_{Фнч1}(F) + S_{Ппф}(F) + S_{См}(F)]|H_{311}(F)|^2 + S_{Жиг}(F)|H_{321}(F)|^2; \quad (3)$$

$$S_1(F) = n_{днз}^2 [S_{Гоч}(F)K_{ЦВС2}^2 + S_{ЦВС2}(F) + S_{Фд2}(F) + S_{Фнч2}(F)]|H_{312}(F)|^2 + S_{Гун}(F)|H_{322}(F)|^2;$$

$$H_{311}(p) = H_{11}(p)/(1 + H_{11}(p));$$

$$H_{312}(p) = H_{12}(p)/(1 + H_{12}(p));$$

$$H_{321}(p) = (1 + H_{11}(p))^{-1};$$

$$H_{322}(p) = (1 + H_{12}(p))^{-1};$$

$$H_{11}(p) = F_{Фнч1}(p)s_{Фд1}s_{Жиг}/p;$$

$$H_{12}(p) = F_{Фнч2}(p)s_{Фд2}s_{Гун}/p,$$

где $S_1(F)$ – СПМ фазовых шумов второго кольца ФАПЧ; $S_{Гоч}(F)$ – модель СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты; $S_{ЦВС1}(F)$, $S_{ЦВС2}(F)$ – модели СПМ фазовых шумов первого и второго ЦВС, соответственно; $S_{Фд1}(F)$, $S_{Фд2}(F)$ – модели СПМ фазовых шумов соответственно первого и второго фазовых детекторов; $S_{Фнч1}(F)$, $S_{Фнч2}(F)$ – модели СПМ фазовых шумов соответственно первого и второго фильтров нижних частот; $S_{Ппф}(F)$ – модель СПМ фазовых шумов полосно-пропускающего фильтра; $S_{См}(F)$ – модель СПМ фазовых шумов смесителя; $S_{Жиг}(F)$, $S_{Гун}(F)$ – модели СПМ фазовых шумов управляемого генератора с резонатором на железо-иттриевом гранате и генератора, управляемого напряжением, соответственно; $n_{днз}$ – номер используемой

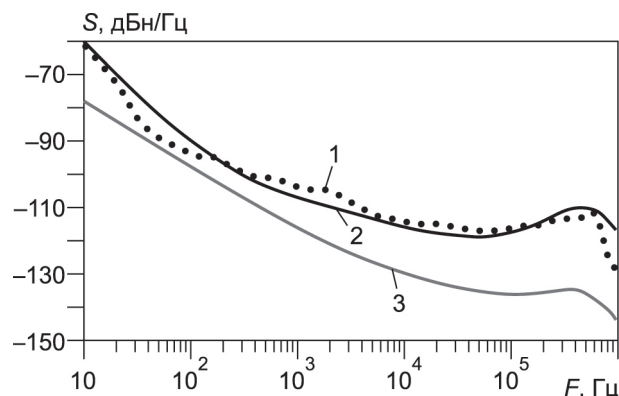


Рис. 3. Сравнение спектральной плотности мощности фазовых шумов гетеродина (см. рис. 1) и гибридного синтезатора частот, использующего образы основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов (см. рис. 2):

1 – эксперимент; 2 – моделирование по формуле (3); 3 – моделирование по формуле (4)

гармоники в генераторе гармоник; H_{311} , H_{312} – передаточные функции, соответственно, первого и второго колец ФАПЧ по внешним шумам; $H_{311}(p)$, $H_{312}(p)$ – передаточные функции, соответственно, первого и второго колец ФАПЧ по внутренним шумам; $H_{11}(p)$, $H_{12}(p)$ – передаточные функции разомкнутых первого и второго колец ФАПЧ, соответственно; $F_{Фнч1}(p)$, $F_{Фнч2}(p)$ – операторные коэффициенты передачи, соответственно, первого и второго петлевых фильтров нижних частот; $s_{Фд1}$, $s_{Фд2}$ – крутизны дискриминационных характеристик, соответственно, первого и второго фазовых детекторов; $s_{Жиг}$, $s_{Гун}$ – крутизны регулировочных характеристик управляемого генератора с резонатором на железо-иттриевом гранате и генератора, управляемого напряжением, соответственно; $p = 2\pi jF$.

Структурные схемы гетеродина и разработанного гибридного синтезатора частот различаются цепью, формирующей сигнал смещения частоты в смесителе в цепи обратной связи. Поэтому математическую модель СПМ фазовых шумов разработанного гибридного синтезатора частот, использующего образы основной частоты ЦВС, можно представить в следующем виде:

$$S_{Гсч}(F) = [S_{Гоч}(F)K_{ЦВС1}^2 + S_{ЦВС1}(F) + S_{Фд1}(F) + S_{Фнч1}(F) + S_{Ппф1}(F) + S_{См}(F) + S_2(F)] \times |H_{311}(F)|^2 + S_{Жиг}(F)|H_{321}(F)|^2. \quad (4)$$

Составляющая $S_2(F)$ в формуле (4) определяется шумами формирователя сигнала смещения частоты с помощью образов основной частоты второго ЦВС:

$$S_2(F) = [S_{Гоч}(F)n_1^2 + S_{Уч}(F)](|n| + \text{sign}(n)K_{ЦВС2}^2) + S_{ЦВС2обр}(F) + S_{Ппф2}(F) + S_{У}(F),$$

где $S_{Уч}(F)$, $S_{ЦВС2обр}(F)$, $S_{У}(F)$ – модели СПМ фазовых шумов умножителя частоты, ЦВС на образах основной частоты и усилителя, соответственно [3, 5].

На рис. 3 представлены результаты моделирования шумовых характеристик гетеродина (см. рис. 1) и разработанного авторами

гибридного синтезатора частот с образами основной частоты ЦВС (см. рис. 2), а также экспериментальные шумовые характеристики гетеродина анализатора спектра СК4-Белан [9] для аналоговых частот. Из рис. 3 следует, что разработанная математическая модель СПМ фазовых шумов позволяет с высокой степенью точности проводить моделирование шумовых характеристик представленного на рис. 1 гетеродина. В соответствии с рис. 3 гибридный синтезатор частот с образами основной частоты ЦВС существенно выигрывает по уровню СПМ фазовых шумов перед гетеродином, представленном на рис. 1. Параметры разработанного гибридного синтезатора следующие: 7–17 дБн/Гц на отстройках до 100 Гц; 7–10 дБн/Гц на отстройках от 100 Гц до 1 кГц и 10–25 дБн/Гц на отстройках свыше 1 кГц. Это объясняется тем, что в структуре гетеродина для подачи сигнала смещения на смеситель применяется дополнительное кольцо ФАПЧ, фазовые шумы которого умножаются в генераторе гармоник, и за счёт этого вносится существенный вклад в результирующий уровень фазовых шумов.

На рис. 4 представлены результаты математического моделирования вкладов звеньев гетеродина и гибридного синтезатора частот, использующего образы основной частоты ЦВС, в результирующий уровень СПМ фазовых шумов. Основной вклад в результирующий уровень СПМ фазовых шумов гетеродина на отстройках до 200 Гц вносит генератор опорной частоты, а на отстройках свыше 200 Гц основной вклад определяется вторым ЦВС. Для разработанного гибридного синтезатора основной вклад в результирующий уровень СПМ фазовых шумов гетеродина вносит генератор опорной частоты. Вклад второго ЦВС, работающего на образах основной частоты, существенно меньше.

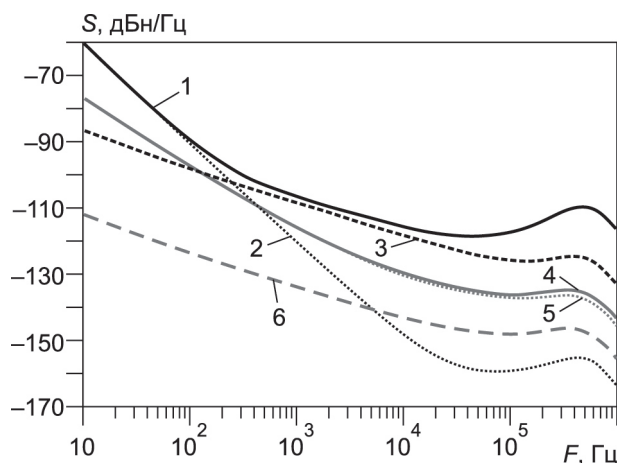


Рис. 4. Математическое моделирование вкладов звеньев синтезаторов частот в результирующие уровни спектральной плотности мощности фазовых шумов:

1 — результирующий уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов гетеродина анализатора спектра СК4-Белан (см. рис. 1); 2 — вклад генератора опорной частоты; 3 — вклад второго цифрового вычислительного синтезатора; 4 — результирующий уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридного синтезатора частот (см. рис. 2); 5 — вклад генератора опорной частоты; 6 — вклад второго цифрового вычислительного синтезатора на образах основной частоты

Заключение. В рамках данного исследования представлен гибридный синтезатор частот на основе цифровых вычислительных синтезаторов и системы ФАПЧ, формирующий широкий диапазон выходных частот с шагом перестройки в доли герца. Применение образов основной частоты ЦВС позволяет добиться существенного снижения уровня фазовых шумов за счёт замены второго кольца ФАПЧ системой формирования сигнала смещения более низкими собственными шумами. Дополнительный ЦВС в структуре позволяет при изменении частоты сравнения практически исключить попадание нежелательных дискретных побочных составляющих спектра в спектр выходного сигнала, а также организовать различные виды модуляции.

Проведённое моделирование СПМ фазовых шумов разработанного гибридного синтезатора частот показало, что его уровень СПМ фазовых шумов на 10–25 дБн/Гц ниже уровня фазовых шумов выходного сигнала использующихся в современных анализаторах спектра гетеродинов на основе гибридного метода синтеза с двумя петлями ФАПЧ для аналоговых выходных частот и отстроек.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00299 мол_а.

Литература

1. Kroupa V. F., Wiley J. Direct Digital Frequency Synthesizers. N. Y.: IEEE Press, 1998.
2. Ямпурин Н. П., Болонзев В. В., Сафронов Е. В., Жалнин Е. Б. Формирование прецизионных частот и сигналов: Учебное пособие. Нижний Новгород: НГТУ, 2003.
3. Рыжков А. В., Попов В. Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991.
4. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product. N. Y.: Artech House, 2010.
5. Ромашов В. В., Ромашова Л. В., Храмов К. К., Докторов А. Н., Якименко К. А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1. С. 5–20.
6. Romashov V. V., Romashov V. V., Romashova L. V., Kramov K. K., Yakimenko K. A. The use of images of DDS in the hybrid frequency synthesizers // Crimico-2014. 24th Int. Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology. Conf. Proc. 2014. Sevastopol, Crimea. P. 302–303. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959404.
7. Пат. 172814 РФ. Гибридный синтезатор частот с улучшенными спектральными характеристиками / В. В. Ромашов, Л. В. Ромашова, К. К. Храмов, К. А. Якименко // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 21.
8. Agilent Spectrum Analysis Basic. Application Note 150. USA: Agilent Technologies, 2004.
9. Бельчиков С. А. 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. № 5. С. 139–146.

Дата принятия: 11.01.2018.