

УДК 621.376

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ЧАСТОТНОМ ПЛАНИРОВАНИИ ФОРМИРУЮЩИХ КАНАЛОВ РАДИОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЦВС

**Ромашов Владимир Викторович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* romashovmurom@mail.ru.

**Храмов Константин Константинович**

кандидат технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектроники и компьютерных систем Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* hramovkk.lan@mit.ru.

*Адрес:* 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.

*Аннотация:* Рассматривается применение разработанного программного комплекса частотного планирования формирующих каналов радиосистем, построенных на основе прямого цифрового метода синтеза. Описаны алгоритмы частотного планирования диапазонных формирователей, использующих образы основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов. Приведены результаты работы программы и сравнительный анализ использования в качестве ЦВС интегральных синтезаторов и ПЛИС.

*Ключевые слова:* формирование сигналов, цифровой вычислительный синтезатор, частотное планирование, образы частот, ПЛИС, программный комплекс.

### Введение

В настоящее время при построении формирующих каналов радиосистем различного назначения активно используются цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), основанные на методе прямого цифрового синтеза и обладающие рядом существенных преимуществ перед синтезаторами на основе ФАПЧ и широкими функциональными возможностями [1, 2]. Однако применение ЦВС для формирования сигналов непосредственно в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн ограничено максимальным значением основной частоты выходного сигнала, которое в настоящее время не превышает 1,5 ГГц.

Для преодоления этой проблемы на практике применяется ряд методов повышения выходной частоты формирователей сигналов: перенос частоты с помощью смесителей, систем ФАПЧ, использование образов основной частоты ЦВС [2-6]. При этом исследования, проведенные в [7], показали, что последний метод позволяет при определенных условиях получить выигрыш по уровню спектральной плот-

ности мощности (СПМ) фазовых шумов по сравнению с традиционным методом применения ЦВС.

При проектировании формирователей одним из основных вопросов является вопрос их частотного планирования, тесно связанный со схемотехнической реализацией и проблемой получения требуемой полосы излучаемого сигнала.

Применение методов математического моделирования для расчета частотного плана устройств формирования сигналов, построенных на основе ЦВС, позволяет упростить этап структурного проектирования и повысить надежность функционирования формирователей.

Целью статьи является исследование алгоритмов и применение программной реализации частотного планирования формирующих каналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов с использованием образов основной частоты.

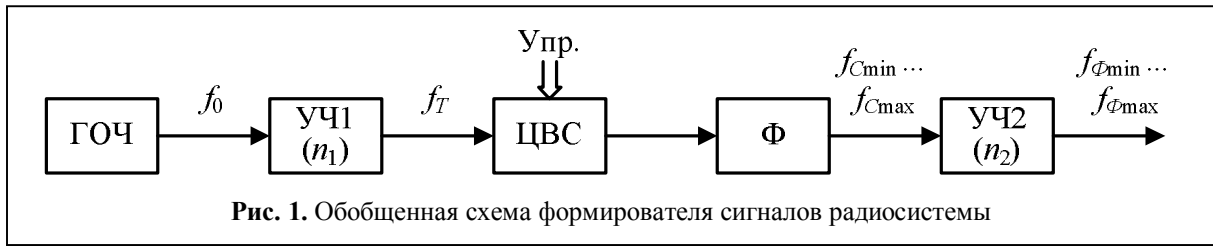


Рис. 1. Обобщенная схема формирователя сигналов радиосистемы

**Основные соотношения**

Рассмотрим структурную схему формирующего канала радиосистемы при использовании ЦВС и умножителей частоты (что характерно, например, для систем радиолокации), приведенную на рис. 1 [2, 5, 9]. Такая структура может рассматриваться как гибридный синтезатор частот, сочетающий в себе прямой аналоговый и прямой цифровой методы синтеза [11]. Для упрощения на схеме приведены лишь те блоки, которые имеют непосредственное отношение к частотному планированию формирователя: ГОЧ – генератор опорной частоты  $f_0$ , умножители частоты УЧ1 и УЧ2 с коэффициентами  $n_1$  и  $n_2$ , используемые для формирования тактовой частоты  $f_T = n_1 f_0$  ЦВС и повышения частоты синтезируемых сигналов, соответственно. Фильтр  $\Phi$  (в общем случае – полосовой) выделяет из спектра выходного сигнала ЦВС требуемые спектральные компоненты в полосе [9]

$$(f_{Cmin} \dots f_{Cmax}) = (f_{\Phi min} \dots f_{\Phi max}) / n_2.$$

Реализация УЧ1 такого формирователя возможна с использованием умножителей частоты на нелинейных элементах или на базе системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ). Второй умножитель частоты во избежание увеличения времени перестройки необходимо выполнять на нелинейных элементах.

Применение интегрального ЦВС со встроенным умножителем тактовой частоты на основе ИФАПЧ позволяет реализовать практически любой целочисленный коэффициент умножения  $n_1$ , изменяемый с шагом 1 [1]. Использование транзисторных умножителей накладывает ограничения на выбор коэффициента умножения, поскольку он будет определяться последовательно соединенными умножителями с коэффициентами умножения 2, 3 или 5.

Как известно [1], выходной сигнал ЦВС содержит кроме основной частоты  $f_{осч}$  спектральные компоненты (образы) с частотами, расположенными симметрично относительно гармоник тактовой частоты  $f_T$  и имеющими номер  $n$  [2, 5, 7-9].

При использовании образов основной частоты необходимо учитывать, что выбросы и нелинейность ЦАП, включенного на выходе ЦВС, могут явиться причиной появления дополнительных побочных компонентов, которые могут попасть в интересующий частотный диапазон. Кроме того, огибающая спектра выходного сигнала ЦВС изменяется в соответствии с частотной характеристикой ЦАП, повторяющей с точностью до масштабного коэффициента функцию  $\text{sinc}(x)$ , что вызывает уменьшение амплитуды образов по сравнению с основной выходной частотой  $f_{осч}$ . В результате отношение сигнал/шум при использовании побочных компонентов снижается.

В работах [8, 9] рассмотрен и описан алгоритм частотного планирования формирователей сигналов на основе ЦВС с использованием образов основной частоты, который сводится к определению диапазонов допустимых значений коэффициента умножения  $n_2$  при заданных значениях частоты ГОЧ  $f_0$ , диапазона выходных частот  $f_{\Phi min} \dots f_{\Phi max}$  и различных значениях  $n_1$ :

- при использовании основной частоты ЦВС  $f_C = f_{осч}$

$$n_{20 min} = \frac{f_{\Phi max}}{n_1 f_0 K_{ЦВС max}}; n_{20 max} = \frac{f_{\Phi min}}{n_1 f_0 K_{ЦВС min}}, \quad (1)$$

- при использовании  $n$ -го образа основной частоты ЦВС  $f_C = f_{обр n}$

$$n_{2n min} \Big|_{n < 0} = \frac{f_{\Phi max}}{n_1 f_0 (|n| + \text{sgn}(n) K_{ЦВС min})}; \quad (2a)$$

$$n_{2n min} \Big|_{n > 0} = \frac{f_{\Phi max}}{n_1 f_0 (|n| + \text{sgn}(n) K_{ЦВС max})},$$

$$n_{2n \max} \Big|_{n < 0} = \frac{f_{\phi \min}}{n_1 f_0 (|n| + \operatorname{sgn}(n) K_{\text{ЦВС max}})}; \quad (2б)$$

$$n_{2n \max} \Big|_{n > 0} = \frac{f_{\phi \min}}{n_1 f_0 (|n| + \operatorname{sgn}(n) K_{\text{ЦВС min}})},$$

где  $K_{\text{ЦВС}} = f_{\text{оч}} / f_T$  – коэффициент деления ЦВС, который ограничен интервалом допустимых значений

$$K_{\text{ЦВС}} \in [K_{\text{ЦВС min}}; K_{\text{ЦВС max}}].$$

Выражения (1) и (2) справедливы для множества положительных действительных значений коэффициентов умножения  $n_1$  и  $n_2$ . При реализации целочисленных значений этих коэффициентов, как показано в [9], алгоритм расчета частотного плана формирователя сводится к заданию величин  $f_0, f_{\phi \min}, f_{\phi \max}, K_{\text{ЦВС min}}, K_{\text{ЦВС max}}$ ; выбору типа ЦВС и определению для него максимально возможного коэффициента  $n_{1 \text{ доп}}$ ; расчету целочисленных значений  $n_2$  по выражениям (1), (2) для различных  $n$  и целочисленных  $n_1$ .

### Реализация и применение программного комплекса

Описанный выше алгоритм расчета частотного плана формирователя был программно реализован в среде Matlab компании The MathWork Inc в составе специализированного программного комплекса [10]. Программа содержит модули расчета реализуемых на практике действительных и целочисленных комбинаций коэффициентов умножения  $[n_1; n_2]$ , вычисляемых по выражениям (1) и (2), графический интерфейс, обеспечивающий диалог с пользователем, компонент организации вывода данных в файл или на печать, а также диалоговую программу для организации связей между модулями. Исходными данными для расчета являются: частота ГОЧ, требуемая выходная частота (диапазон частот) передатчика, предельные значения коэффициента передачи ЦВС, частотные параметры используемого типа ЦВС.

Программный комплекс был использован при частотном планировании формирователей, построенных в соответствии с рис. 1, с выходными частотами в диапазоне  $f_{\phi} = 3 \dots 3,1$  ГГц. В качестве ЦВС использовались: 1) интеграль-

ный синтезатор прямого цифрового метода синтеза со встроенным умножителем и максимальной тактовой частотой  $f_{T \max 1} = 1000$  МГц; 2) NCO-ядро программируемой логики (ПЛИС) специального назначения с внешним умножителем и максимальной тактовой частотой  $f_{T \max 2} = 350$  МГц. На рис. 2 и 3 приведены результаты работы программы частотного планирования для двух значений частоты ГОЧ ( $f_0 = 24$  и  $72$  МГц), при  $K_{\text{ЦВС}} = 0, 2 \dots 0, 3$  и  $|n| \leq 3$ . Приведенные зависимости позволяют выбрать допустимые вещественные и целочисленные комбинации коэффициентов умножения УЧ1 и УЧ2  $[n_2; n_1]$  для реализации формирователя с заданными значениями частоты ГОЧ и диапазона выходных частот для основной частоты ( $n = 0$ ) и ее образов.

Из полученных графиков следует, что с ростом максимальной тактовой частоты ЦВС увеличивается число практически реализуемых вариантов частотного плана формирователя. Это вызвано возрастанием частоты Найквиста и, как следствие, расширением диапазонов допустимых значений основной частоты ЦВС и ее образов, зависящих от  $K_{\text{ЦВС}}$  и  $f_T$

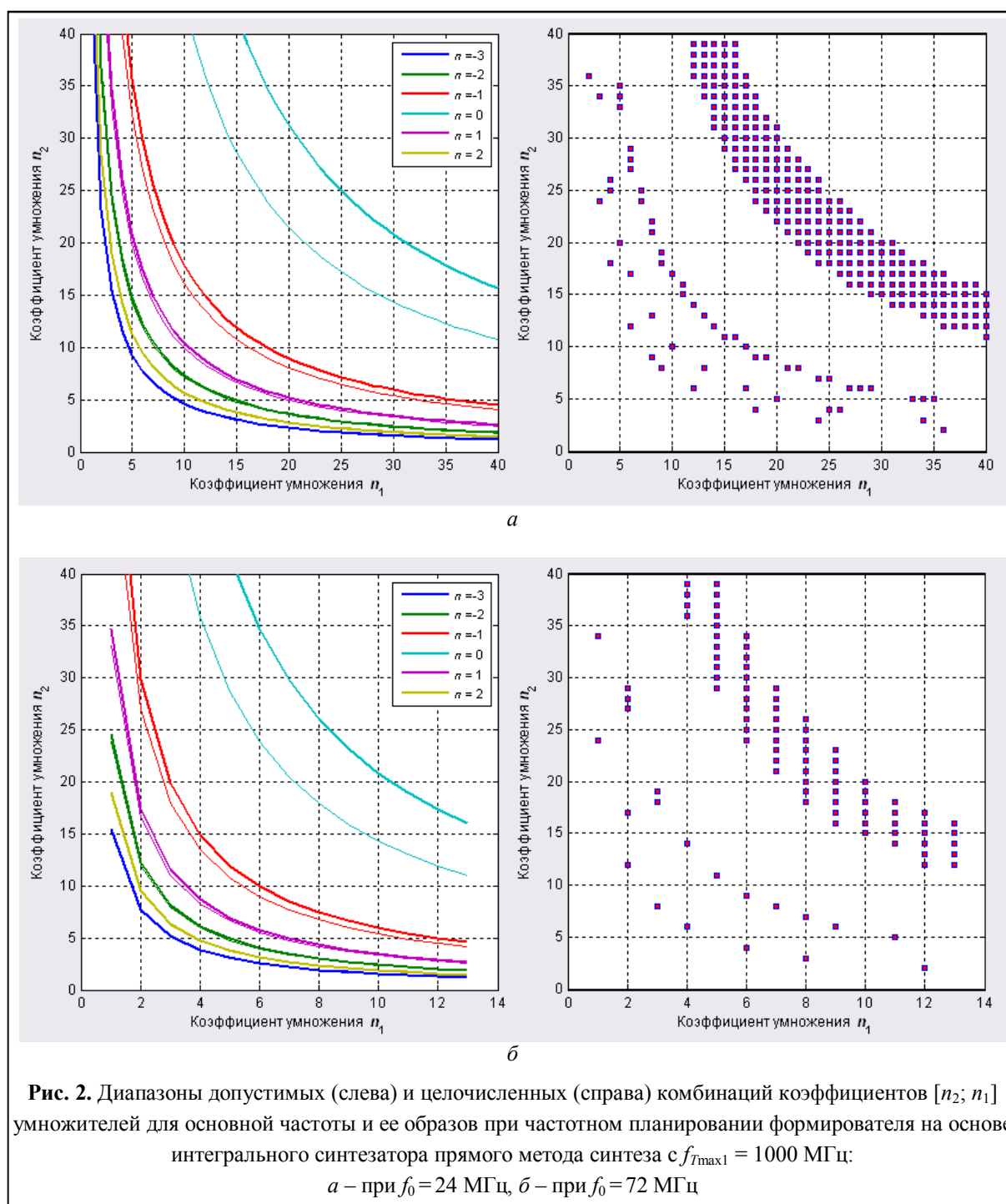
$$(f_{\text{оч min}} \dots f_{\text{оч max}}) = (K_{\text{ЦВС min}} f_T \dots K_{\text{ЦВС max}} f_T).$$

Также количество реализуемых вариантов можно увеличить за счет снижения частоты опорного генератора при одновременном увеличении значений коэффициента  $n_1$ . Такой результат объясняется тем, что при уменьшении частоты ГОЧ в  $k$  раз и неизменной  $f_T$  во столько же раз возрастает величина максимально возможного коэффициента  $n_{1 \text{ доп}}$

$$n_{1 \text{ доп}} = f_T / f_0,$$

и на диаграммах диапазоны допустимых значений также расширяются в  $k$  раз.

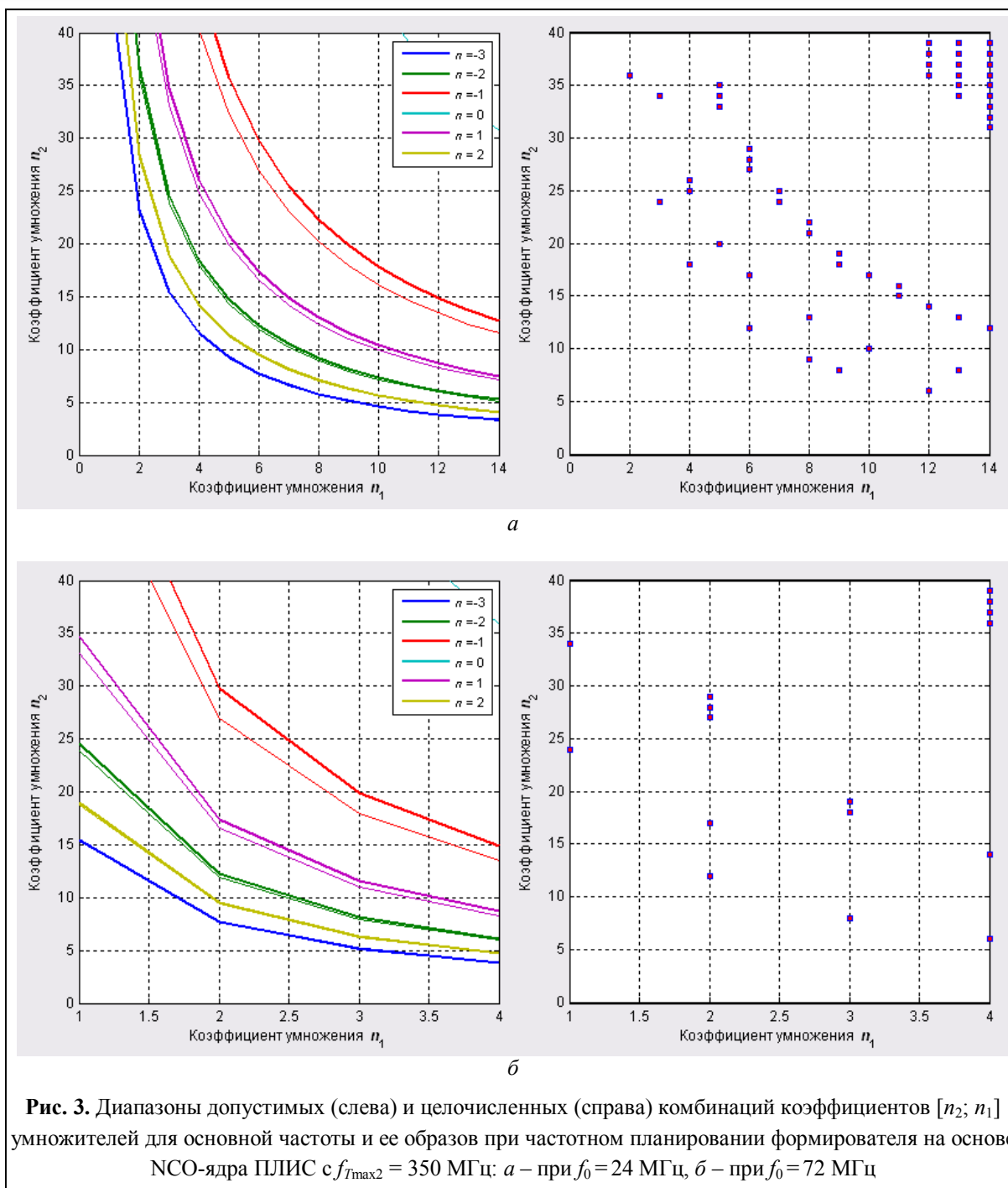
Зависимости, приведенные на рис. 2 и 3, свидетельствуют также, что применение умножителя тактовой частоты и использование образов основной частоты ЦВС позволяет существенно уменьшить значения коэффициента  $n_2$  и упростить реализацию УЧ2. Так, при формировании сигнала на основной частоте в соответствии с рис. 2,а увеличение коэффициента  $n_1$  с 15 до 36 позволяет снизить коэффициент умножения УЧ2 до 12 вместо 29, а исполь-



зование образа  $n = -2$  при тех же данных дает возможность уменьшить значение  $n_2$  до 2. Минимальное значение  $n_2$  для формирователя с  $f_0 = 24$  МГц и  $f_{T_{\max 2}} = 350$  МГц (рис. 3,а) достижимо также при использовании образа  $n = -2$  и составляет  $n_2 = 6$ .

Добиться минимально возможных значений  $n_2$  и  $n_1$  можно за счет увеличения частоты ГОЧ

и использования образов основной частоты ЦВС. Для формирователя со значениями  $f_0 = 72$  МГц и  $f_{T_{\max 1}} = 1000$  МГц (рис. 2,б) допустимы минимальные значения коэффициентов умножения  $[n_2; n_1] = \{[8; 3], [6; 4], [4; 6], [3; 8]\}$ , а для формирователя со значениями  $f_0 = 72$  МГц и  $f_{T_{\max 2}} = 350$  МГц (рис. 3,б) возможны комбинации  $[n_2; n_1] = \{[8; 3], [6; 4]\}$ . В [11] показано,



что такой способ позволяет также получить выигрыш по уровню фазовых шумов выходного сигнала формирователя по сравнению с работой на основной частоте.

Из выражений (1) и (2) также следует, что при расширении полосы частот выходного сигнала формирователя  $\Delta f_\phi$  диапазоны допустимых комбинаций коэффициентов  $[n_2; n_1]$  сужаются и, как следствие, число возможных

точек частотного плана уменьшается. Например, число точек на рис. 3,б, равное 16 при  $\Delta f_\phi = 0,1$  ГГц, уменьшится до 6 при расширении полосы частот до значения  $\Delta f_\phi = 0,2$  ГГц.

### Заключение

Применение программного комплекса частотного планирования позволяет визуализировать и упростить расчет частотных планов форми-

рователей сигналов, построенных на базе ЦВС с использованием основной частоты и ее образов, а также выбрать наиболее подходящие значения параметров функциональных звеньев с точки зрения получения требуемых характеристик формирователей, в т.ч. минимального уровня фазового шума на выходе.

Проведенный сравнительный анализ показал, что при построении формирователей на базе прямого цифрового метода синтеза предпочтительнее использовать интегральные ЦВС со встроенным умножителем тактовой частоты и максимально возможным ее значением.

### Литература

1. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. – 1998. – John Wiley & Sons, Ltd. – 396 с.
2. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирование сигналов в СВЧ и УВЧ диапазонах при использовании метода прямого цифрового синтеза частот // Радиотехника. 2007, №6. С.39-41.
3. Левин В.А., Черкашин А.А. Методы построения синтезаторов частот в СВЧ-диапазоне // Электросвязь. 2004, Вып. 2. С.19-22.
4. Кусов Г.А., Очков Д.С., Ратцева Л.В., Силаев Е.А., Сударенко А.А., Терехин М.Я., Формальный И.С., Шилов В.П. Формирование высокостабильных сигналов миллиметрового диапазона для радиолокационных устройств // Радиотехника. 2006, №4. С.33-35.
5. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирователи сетки опорных частот возбудителя передатчика с

использованием образов основной частоты // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011, №13. С.44-47.

6. Молчанов Е.Г., Очков Д.С., Силаев Е.А., Формальный И.С., Чубаров Д.В. Источники сигнала СВЧ-диапазона с низким уровнем фазовых шумов для систем радиолокации и связи // Радиотехника. 2006, №10. С.38-40.

7. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образах основной частоты // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, №2. С.13-17.

8. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, №4. С.10-15.

9. Ромашов В.В., Храмов К.К. Частотное планирование диапазонных формирователей радиосигналов с использованием образов основной частоты ЦВС // Проектирование и технология электронных средств. 2013, № 3. С. 38-43.

10. Ромашов В.В., Храмов К.К. Программный комплекс для частотного планирования и исследования шумовых характеристик формирователей сигналов на основе ЦВС // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2013, № 15. С. 22-27.

11. 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.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках гранта №13-07-97508 p\_центр\_a.*

**Поступила 10 мая 2014 г.**

**English**

### Application of program complex in frequency scheduling forming channel of radio systems on the basis of DDS

*Romashov Vladimir Viktorovich* – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Radio Engineering Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

*Khramov Konstantin Konstantinovich* – Candidate of Engineering, Associate Professor The Dean of the Department of Radio Electronics and Computer Systems Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

*Address:* Orlovskaya st., 23, Murom, 602264, Russia.

*Abstract:* Application of DDS for signal generation in ranges of decimeter and centimeter waves is limited to a peak value of base frequency of an output signal. A number of methods is applied to increase it in practice. Among them is the usage of DDS base frequency pattern. In this case, however, the most important is the problem of frequency scheduling of such generators taking into account allocation of patterns on the frequencies axis, their changes when reorganizing a synthesizer and the subsequent frequency multiplication. The structure of the signals generator on the basis of a DDS is given, an algorithm of frequency scheduling band generators using patterns of DDS base frequency is described. The algorithm includes determination of ranges of admissi-

ble values of multiplication coefficient of an output frequency multiplier at the given frequency values of a reference generator, indispensable output frequencies range and different multiplication coefficient values of DDS clock multiplier. A program complex for frequency scheduling forming channels of radio systems built on the basis of direct digital synthesis method has been developed with the usage of Matlab environment on the basis of the described algorithm. The paper deals with the problems of application of such program complex, the results of the program operation and the comparative analysis of generators structure parameters when using integral synthesizers and program logical integrated circuits as DDS. A series of practical conclusions which allow to choose the optimal alternative of embodying a generator structure from the point of view of obtaining the required performances of generators including minimization of phase noise level in the output.

*Key words:* signal generation, digital computer synthesizer, frequency planning, frequency images, FPGA, software package.

### References

1. *Kroupa V.F.* Direct Digital Frequency Synthesizers. 1998. John Wiley & Sons, Ltd. 396 p.
2. *Romashov V.V., Hramov K.K.* Signals Generation in the VHF and UHF Range when Using the Method of Direct Digital Synthesis of Frequencies. Radiotekhnika. 2007, № 6. P. 39-41.
3. *Levin V.A., Cherkashin A.A.* Methods of frequency synthesizers in microwave frequency range. Jeletrosvjaz. 2004, Vyp. 2. P.19-22.
4. *Kusov G.A., Ochkov D.S., Ratceva L.V., Silaev E.A., Sudarenko A.A., Terjohin M.Ja., Formalnov I.S., Shilov V.P.* Generation of high frequency signals of millimeter range for radars. Radiotekhnika. 2006, №4. P.33-35.
5. *Romashov V.V., Hramov K.K.* The Generators of Reference Frequency Spectrum of the Transmitter Driver with the Usage of Base Frequency Patterns. Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii. 2011, №13. P. 44-47.
6. *Molchanov E.G., Ochkov D.S., Silaev E.A., Formalnov I.S., Chubarov D.V.* Microwave signal sources with low noise level for radar systems. Radiotekhnika. 2006, №10. P. 38-40.
7. *Romashov V.V., Hramov K.K., Doktorov A.N.* The model of DDS operating reference frequency pattern. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2012, №2. P.13-17.
8. *Romashov V.V., Hramov K.K., Doktorov A.N.* Frequency Planning of the Signals Conditioner of Radio Systems on the basis of Direct Digital Synthesizers. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2012, № 4. P. 10-15.
9. *Romashov V.V., Hramov K.K.* Frequency Planning of the Radio Signals Spectrum Conditioner with the Usage of Base Frequency Patterns of DDS. Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv. 2013, №3. P. 38-43.
10. *Romashov V.V., Hramov K.K.* Program complex for frequency planning and Investigation of Noise Performance of Signal Conditioners using DDS. Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii. 2013, № 15. P. 22-27.
11. *Romashov V.V., Romashova L.V., Hramov K.K., Doktorov A.N., Jakimenko K.A.* The Noise Performance Simulation of Hybrid Frequency Synthesizers. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2014, № 1. P.5-20.