

УДК 621.396

Анализ алгоритма частотного планирования формирователей сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов

Докторов А.Н.

В статье проводится анализ алгоритма частотного планирования формирователей сигналов с использованием образов основной частоты выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов. Приводится структурная схема формирователя сигналов, перечислены основные параметры частотного планирования. Рассматривается порядок расчета частотного плана, выявляются недостатки существующей реализации алгоритма. Вырабатываются рекомендации к улучшению работы алгоритма, представлению результатов расчета частотного плана.

Ключевые слова: Цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС), образы основной частоты, формирователь сигналов, частотное планирование.

Введение

В современных системах синтеза сигналов широко используются цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС) и формирователи сигналов на их основе. ЦВС имеют множество достоинств перед традиционными системами формирования сигналов. Он обеспечивает высокое быстродействие, широкий диапазон, малый шаг сетки частот. Наличие цифрового интерфейса позволяет управлять работой ЦВС программным методом. Однако имеется и существенный недостаток, ограничивающий применение таких синтезаторов для создания сигналов СВЧ и КВЧ диапазонов. Это низкая частота выходного сигнала цифрового вычислительного синтезатора. В настоящий момент для лучших интегральных ЦВС она может достигать 1500 – 1700 МГц, что составляет 40-45% от частоты тактового сигнала 3500 МГц. [1] В состав многих интегральных ЦВС входит умножитель тактовой частоты на системе ФАПЧ, позволяющий использовать низкочастотный кварцевый генератор опорной частоты (ГОЧ) [2].

Преодолевается такое ограничение, с одной стороны, совершенствованием техпроцесса изготовления цифровых интегральных микросхем и ростом тактовой частоты, которая в настоящий момент у лучших ЦВС составляет единицы ГГц. Дальнейшее продвижение по такому пути затруднено физическими пределами, ограничивающими уровень техпроцесса, размерами наименьших

элементов цифровых интегральных микросхем.

С другой стороны, повысить выходную частоту ЦВС можно, комбинируя способы умножения частоты и использования различных систем ФАПЧ.

Кроме того, для повышения выходной частоты имеется возможность использования высокочастотных дискретных составляющих - образов основной частоты ЦВС [3]. Они появляются в процессе работы цифроаналогового преобразователя, входящего в состав цифрового вычислительного синтезатора. В большинстве случаев данное явление не используется, и от образов избавляются с помощью ФНЧ. Одной из причин такого подхода является низкая амплитуда образов относительно амплитуды гармоники основной частоты. Поэтому для использования требуемого образа применяют полосовой фильтр и дополнительный усилитель. Но все дополнительные элементы, так или иначе, ухудшают шумовые характеристики создаваемого формирователя частот. Поэтому важное значение имеет оптимальное частотное планирование и анализ шумовых характеристик формирователей сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов. Частотное планирование и шумовые характеристики формирователей сигналов с ЦВС на образцах рассмотрены в [4,5,6,7]. Анализ шумовых характеристик новых интегральных ЦВС компании Analog Devices AD9914, AD9915 проведен в [8]. Одним из перспективных вариантов формирования сигналов является исполь-

зование образов ЦВС в гибридных синтезаторах с многопетлевыми ФАПЧ [9].

В процессе исследований выяснилось, что частотное планирование таких формирователей затрудняется множеством факторов – фильтрацией выбранного образа, расчетом частоты образа при большом числе исходных параметров частотного планирования. Такими параметрами являются: частота ГОЧ, диапазон изменения тактовой частоты выбранного цифрового вычислительного синтезатора, коэффициенты умножения умножителей частоты. Для решения данной задачи был разработан алгоритм частотного планирования, позволяющий рассчитать некоторые варианты частотного плана данных формирователей.

Описание алгоритма частотного планирования

Целью данной работы является анализ алгоритма частотного планирования формирователей сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов.

Структурная схема формирователя сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов показана на рис.1, где ГОЧ – генератор опорной частоты, УЧ1 – встроенный умножитель тактовой частоты интегрального ЦВС, ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор, ПФ – полосовой фильтр, УЧ2 – выходной умножитель частоты; $f_{ГОЧ}$ – частота сигнала опорного генератора; f_T – тактовая частота; $f_{ЦВС}$ – основная выходная частота ЦВС; n_1 – коэффициент умножения умножи-

теля тактовой частоты; n_2 – коэффициент умножения выходного умножителя частоты; n – номер образа основной частоты, k – номер гармоники основной частоты в спектре выходного сигнала ЦВС; $f_{обр}$ – частота выделенного образа, f_{Φ} – частота выходного сигнала формирователя.

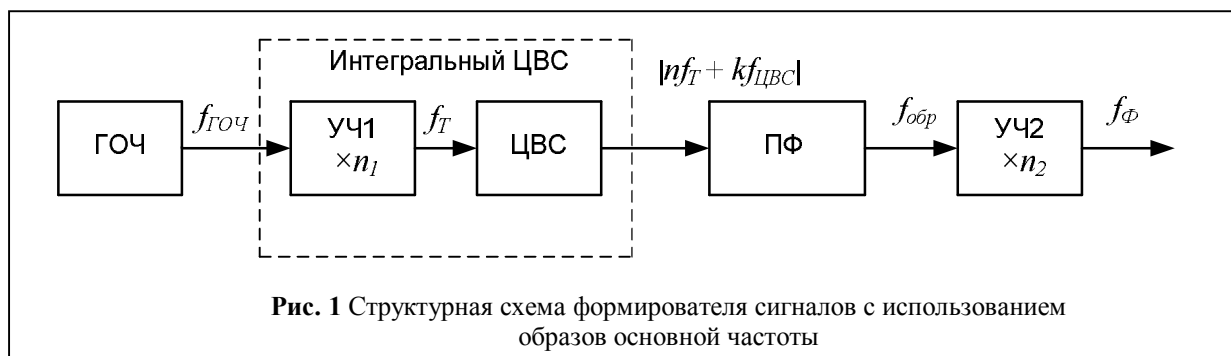
Частотное планирование данного формирователя сигналов заключается в том, что требуется на основе исходных данных о частоте ГОЧ, максимальной тактовой частоте ЦВС, диапазоне изменения $K_{ЦВС}$, выходной частоте формирователя произвести расчет комбинаций следующих параметров: коэффициентов n_1 , n_2 , номера образа n , основной частоты $f_{ЦВС}$ и частоты выделенного образа $f_{обр}$. При проведении частотного планирования для обеспечения фильтрации требуется исключить из расчета те варианты частотного плана, для которых не выполняется условие [4]:

$$K_{ЦВС\min} \leq K_{ЦВС} \leq K_{ЦВС\max}, \quad (1)$$

где $K_{ЦВС} = f_{ЦВС} / f_T$ – коэффициент деления ЦВС. Наиболее часто используются образы основной частоты с номерами $n = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$.

Полученные варианты частотного плана определяют значения частот входных и выходных сигналов блоков структурной схемы формирователя, а также их коэффициенты передачи по частоте – $K_{ЦВС}$, n_1, n_2 .

С учетом условия фильтрации (1), а также ограничения, что коэффициент n_2 должен быть кратен 2, 3, и 5, частотное планирование формирователей сигналов на основе ЦВС с использованием образов основной



частоты является сложной задачей.

В работе [10] показана методика частотного планирования данного формирователя сигналов, создан алгоритм частотного планирования.

Данный алгоритм состоит из следующих этапов:

1. Задается частота ГОЧ $f_{ГОЧ}$, выходная частота формирователя сигналов f_{Φ} , максимальное значение тактовой частоты ЦВС f_{Tmax} , диапазон изменения значения коэффициента передачи ЦВС $K_{ЦВСmin} \dots K_{ЦВСmax}$. Далее устанавливается максимальное количество образов, для которых ведется расчет частотного плана, равное например трем: $n_{max} = 3$.

2. Находится среднее значение $K_{ЦВС}$.

3. Затем рассчитываются номера образов

$$n = -n_{max} \dots n_{max} \quad (2)$$

4. Вычисляется максимальное значение коэффициента умножения тактового множителя

$$n_{1max} = \text{trunc}(f_{Tmax} / f_{ГОЧ}) \quad (3)$$

Здесь применена функция отбрасывания дробной части для результата деления $f_{Tmax} / f_{ГОЧ}$, поскольку коэффициент умножения – целое число.

5. Рассчитывается диапазон значений коэффициента умножения тактового множителя

$$n_1 = 1 \dots n_{1max} \quad (4)$$

6. Определяется тактовая частота по формуле

$$f_T = n_1 \cdot f_{ГОЧ} \quad (5)$$

7. Осуществляется предварительный расчет коэффициента умножения n_2 выходного множителя

- при $n = 0$:

$$n_2 = \text{round}\left(\frac{f_{\Phi}}{f_T \cdot K_{ЦВС}}\right); \quad (6)$$

- при $n \neq 0$:

$$n_2 = \text{round}\left(\frac{f_{\Phi}}{f_T \cdot (|n| + \text{sign}(n)K_{ЦВС})}\right), \quad (7)$$

где $\text{round}()$ - функция округления до целого числа, $\text{sign}(n)$ - функция, определяющая знак номера образа n .

8. Определяется частота n -го образа

$$f_{обр} = f_{\Phi} / n_2 \quad (8)$$

9. Производится уточняющий расчет коэффициента передачи ЦВС

- при $n = 0$

$$K_{ЦВС} = \left(\frac{f_{\Phi}}{f_T \cdot n_2}\right); \quad (9)$$

- при $n \neq 0$:

$$K_{ЦВС} = \left(\frac{\text{sign}(n)f_{\Phi}}{f_T \cdot n_2} - n\right) \quad (10)$$

при условии

$$\begin{aligned} &[\text{sign}(n)f_{\Phi} / f_T \cdot n_2 - n] \leq K_{ЦВСmax} \\ &\wedge [\text{sign}(n)f_{\Phi} / f_T \cdot n_2 - n] \geq K_{ЦВСmin} \end{aligned} \quad (11)$$

Данное действие позволяет выделить варианты частотного плана, которые возможно реализовать в соответствии с условием (1); для остальных вариантов, не удовлетворяющих данному условию фильтрации, значения $K_{ЦВС}$ приравниваются к нулю.

10. В дальнейшем расчете используются значения n_2 , для которых $K_{ЦВС} \neq 0$. Если $K_{ЦВС} = 0$, то коэффициент умножения выходного множителя становится равным нулю, $n_2 = 0$. Это означает что данный вариант частотного плана реализовать невозможно.

11. Рассчитываются значения основной частоты ЦВС

- для $n = 0$:

$$f_{ЦВС} = f_{\Phi} / n_2; \quad (12)$$

- для $n \neq 0$ при $n_2 \neq 0$:

$$f_{ЦВС} = (\text{sign}(n)f_{\Phi} / n_2 - n \cdot f_T). \quad (13)$$

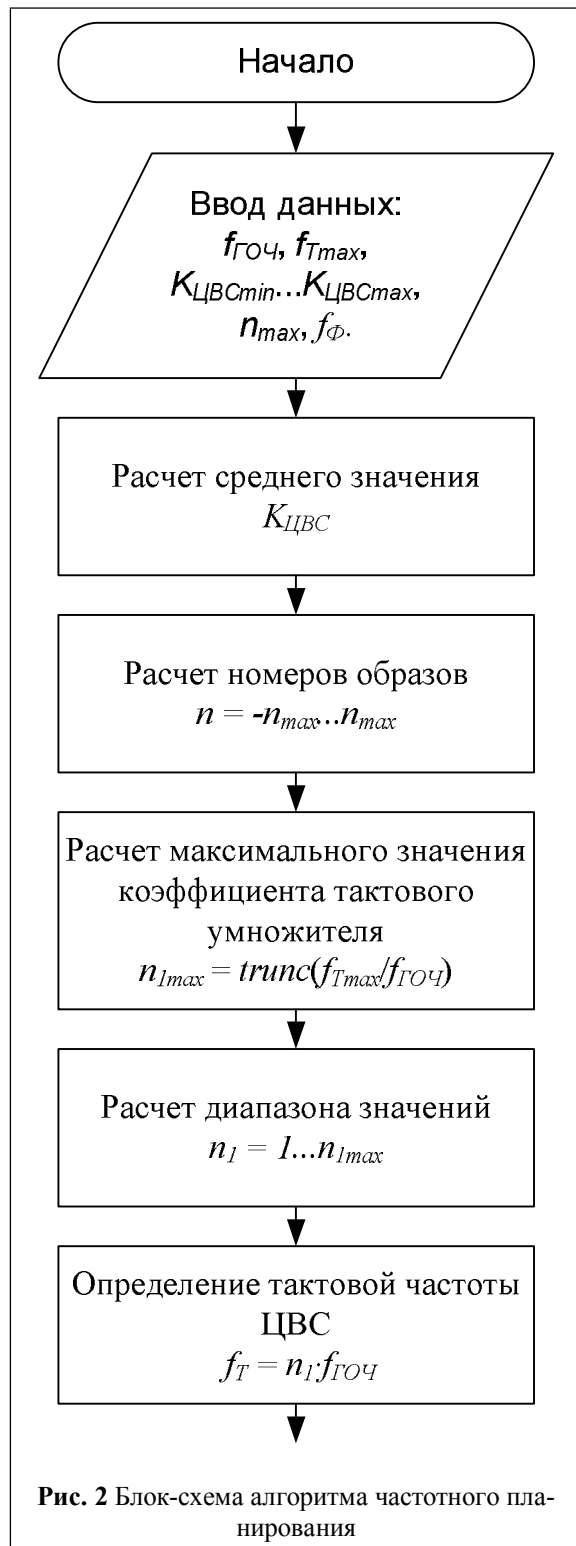
12. Производится уточняющий расчет выходной частоты ЦВС на n -м образе для $n_2 \neq 0$

$$f_{обр} = f_{\Phi} / n_2 \quad (14)$$

Блок-схема данного алгоритма показана на рис. 2, 3.

Из блок-схемы алгоритма видно, что расчет частотного плана достаточно сложен, поскольку требуется одновременная провер-

ка условия фильтрации используемого образа (1). Для каждого коэффициента умножения n_1 имеется ряд вариантов частотного плана, задаваемых количеством образов n . Каждый из данных вариантов проверяется на возможность фильтрации образа с помощью полосового фильтра.



Данный алгоритм частотного планирования формирователей сигналов на основе ЦВС с использованием образов основной частоты в настоящее время реализован средствами математического пакета MathCAD. Результаты расчета для одного n_1 выводятся в виде массивов, определяющих номер образа n , основную частоту $f_{ЦВС}$, частоту образа $f_{обр}$, и коэффициент умножения выходного умножителя n_2 . Нулевые значения параметров частотного плана для некоторых образов означают, что данные варианты реализовать невозможно, и их необходимо исключить из расчетов. В качестве примера результаты расчета частотного плана формирователя сигналов на ЦВС AD9910 приведены в табл. 1.

Заключение

Практическое использование разработанного алгоритма затруднено, поскольку для расчета требуется поочередно вводить коэффициент умножения тактовой частоты n_1 . Программа проводит перебор данного коэффициента с определенным шагом. Это является существенным недостатком, поскольку не отображаются полностью все варианты частотного плана. Также работу с алгоритмом затрудняет сложность поиска по полученным результатам частотного планирования оптимальных вариантов, характеризующихся использованием более высокочастотных образов, и минимальным значением n_2 . Для некоторых гибридных синтезаторов частот [7], также использующих образы основной частоты ЦВС, требуется внести в алгоритм существенные изменения. Тем не менее, алгоритм позволяет рассчитать варианты частотного плана формирователей сигналов с использованием образов основной частоты ЦВС.

В дальнейшей работе планируется учесть указанные недостатки алгоритма частотного планирования при создании на его основе специального программного комплекса частотного планирования в среде MathLAB. Для этого необходимо ввести автоматиче-

затора, работающего на образах основной частоты // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 2 (6). С. 13-17.

2. Romashov V.V., Romashova L.V., Doktorov A.N. The mathematical model of noise characteristics of a direct digital synthesizer with the built-in multiplier of clock frequency on PLL // Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Omsk: Siberian Federal University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.

3. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов на образах основной частоты // Радиопромышленность. 2012, №2. С.38-48.

4. 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.

5. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. The use of images of DDS fundamental frequency for high-frequency signals formation // 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.310-311. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959408)

6. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Методы повышения выходной частоты формирователей сигналов на основе цифровых вы-

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00299 мол а.

Поступила 20 июня 2017г.

There is analysis of algorithm of frequency planning of signal shapers with using images of fundamental frequency of the output signal of direct digital synthesizers in this research. There are describes the main parameters of the frequency planning and the block diagram of the signal shaper. Also there is research the procedure of calculation of the frequency plans, and disadvantages of realization of algorithm. Recommendations are made to improve the algorithm and presentation of the results of frequency planning.

Key words: direct digital synthesizer, DDS, images of the basic frequency, frequency planning, signal shaper.

Докторов Андрей Николаевич – аспирант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: doctorov_a_n@mail.ru.

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

числительных синтезаторов // Проектирование и технологии РЭС. 2014, № 1.

7. Ромашов В.В., Храмов К.К. Частотное планирование диапазонных формирователей радиосигналов с использованием образов основной частоты ЦВС // Проектирование и технологии РЭС. 2013, №3. С. 38-43

8. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Simulation of Noise Curves of the New Integrated DDS from Analog Devices // Proc. of the 2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.

9. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The use of images of DDS in the hybrid frequency synthesizers // 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Pp.302-303. Category number CFP14788-CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959404).

10. Докторов А.Н., Якименко К.А. Алгоритм частотного планирования формирователя сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов в режиме образов основной частоты // Научный потенциал молодежи – будущее России [Электронный ресурс]: V Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. V Всероссийской молодежной научной конференции. Муром, 22 апр. 2013 г.– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013.– 964 с.: ил.– 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – С. 320-321.