

Анализ сигналов и систем

УДК 621.396.61

Проектирование многоканальных формирователей высокочастотных сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов

Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А.

В статье рассматриваются проблемы проектирования многоканальных формирователей высокочастотных сигналов. Предлагается использование образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов для повышения выходной частоты и улучшения шумовых характеристик формирователей сигналов. Показаны особенности расчета частотного плана, математического моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователя и его структурных элементов. Показано преимущество использования образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов, проявляющееся в виде уменьшения числа каскадов выходных умножителей частоты. Обоснована необходимость выбора оптимальной с точки зрения минимума спектральной плотности мощности фазовых шумов структурной реализации многоканальных формирователей сигналов.

Ключевые слова: Цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС), образы основной частоты, многоканальные формирователи сигналов, частотное планирование, спектральная плотность мощности фазовых шумов.

Современные системы связи, радионавигации и радиолокации активно развиваются в направлении увеличения пропускной способности передачи информации, многоканальной передачи, повышения точности определения координат цели, одновременного сопровождения множества целей. Одним из эффективных методов для решения поставленных задач является использование цифровых антенных решеток или множества пространственно разнесенных антенн.

В цифровых антенных решетках или системах передачи информации с пространственным разнесением антенн каждый элемент антенной решетки соединяется с приемопередающим модулем, содержащим АЦП в канале приема и ЦАП в канале передачи. Преобразование аналогового сигнала в цифровой код и обратно происходит непосредственно на рабочей частоте (рис. 1) [1].

Такое решение позволяет управлять амплитудой частотой и фазой в каждом элементе цифровой антенной решетки. Благодаря этому появляется возможность создания пространственно-временного разделения кана-

лов передачи и приема в высокоскоростных системах связи нового поколения 5G, ММО [2]. В радиолокации становится возможным одновременное сопровождение множества целей, практически мгновенная перестройка частоты и оперативное изменение многолучевой диаграммы направленности антенной системы.

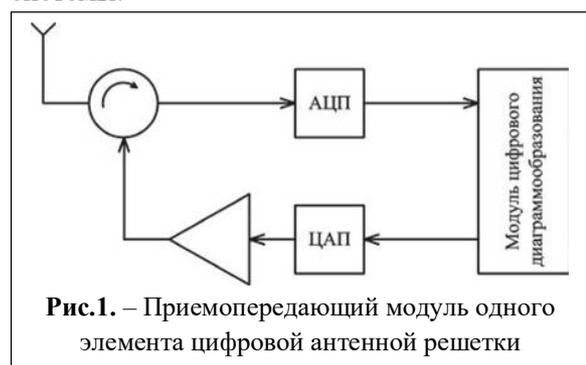


Рис.1. – Приемопередающий модуль одного элемента цифровой антенной решетки

Проблема формирования сигналов когерентных систем в диапазонах СВЧ и КВЧ заключается в том, что основная частота выходного сигнала цифрового вычислительного синтезатора недостаточно высока. В настоящий момент для лучших интегральных ЦВС она может достигать 1500 – 1700 МГц, что

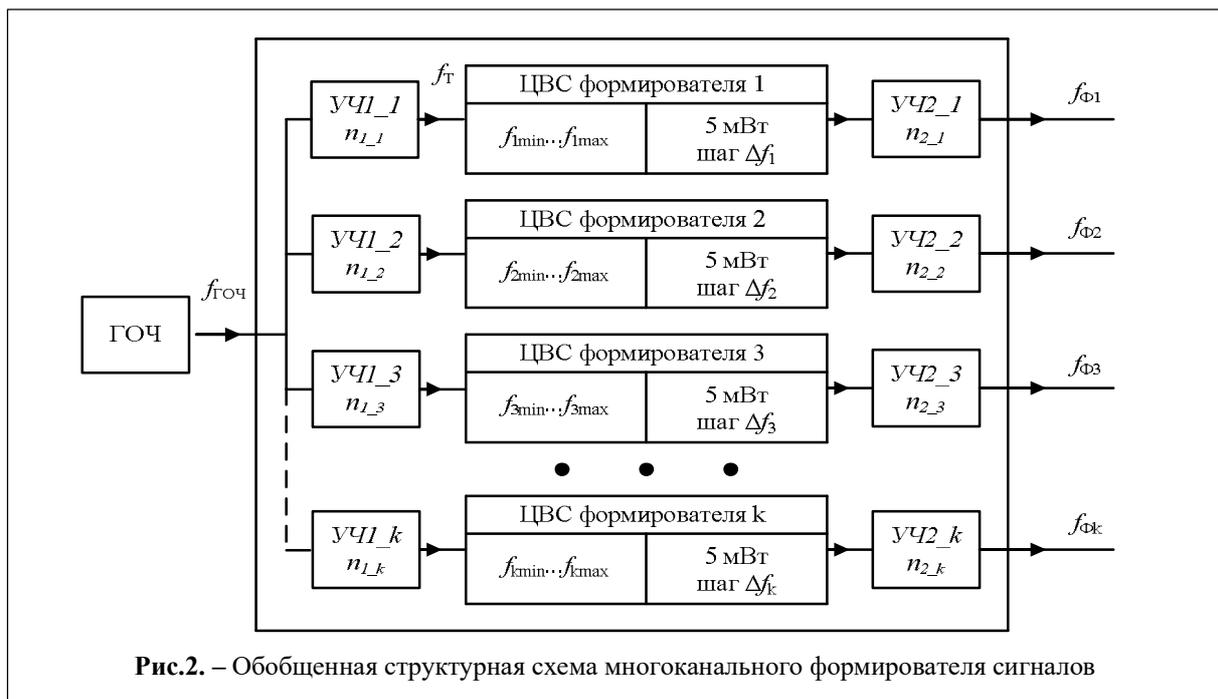


Рис.2. – Обобщенная структурная схема многоканального формирователя сигналов

составляет 40-45% от частоты тактового сигнала 3500 МГц [3]. В состав многих интегральных ЦВС входит умножитель тактовой частоты на системе ФАПЧ, позволяющий использовать низкочастотный кварцевый генератор опорной частоты (ГОЧ)[4].

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.

Структурная схема многоканального

формирователя сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов и умножителей частоты показана на рис. 2.

Использование высокочастотных дискретных составляющих - образов основной частоты ЦВС [5, 6] позволяет увеличить частоту выходного сигнала ЦВС без использования умножителей. Образы появляются в процессе работы цифроаналогового преобразователя, входящего в состав цифрового вычислительного синтезатора [7]. Структурная схема формирователя сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов показана на рис. 3, 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; $f_{ЦВС}$ - ос-

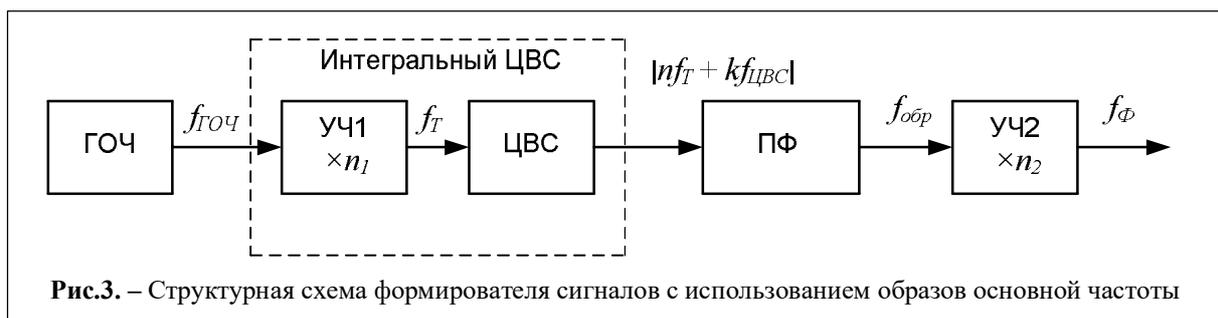


Рис.3. – Структурная схема формирователя сигналов с использованием образов основной частоты

новная выходная частота ЦВС; n_1 – коэффициент умножения множителя тактовой частоты; n_2 – коэффициент умножения выходного множителя 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. В работе [8] показана методика частотного планирования данного формирователя сигналов, создан алгоритм частотного планирования.

Рассмотрим пример проектирования четырехканального формирователя радиосигналов. В качестве исходных данных для расчета были следующие параметры:

тодике, изложенной в [5, 6].

Результаты математического моделирования шумовых характеристик данных вариантов частотного планирования показаны на рис. 4.

Анализ спектральных плотностей фазовых шумов различных вариантов реализации каналов формирования сигналов показывает, что уровень СПМ фазового шума на образцах основной частоты на выходе формирователя в большинстве случаев практически равен уровню СПМ фазовых шумов на основной частоте (рис. 4, а). Однако в некоторых случаях, как например, на рис. 4, б происходит превышение уровня СПМ фазовых шумов первого отрицательного образа над уровнем

Таблица 1. Исходные данные для проектирования многоканального формирователя

	Частота ГОЧ	Тип ЦВС	Частота выходного сигнала	Номера образов
Первый канал	24 МГц	AD9910	$f_{\phi 1} = 875$ МГц	$n = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$
Второй канал		AD9910	$f_{\phi 2} = 1670$ МГц	$n = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$
Третий канал		AD9910	$f_{\phi 3} = 1410$ МГц	$n = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$
Четвертый канал		AD9910	$f_{\phi 4} = 2250$ МГц	$n = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$

Пример основных результатов частотного планирования для трех тактовых частот двух каналов формирования показан в таблице 2.

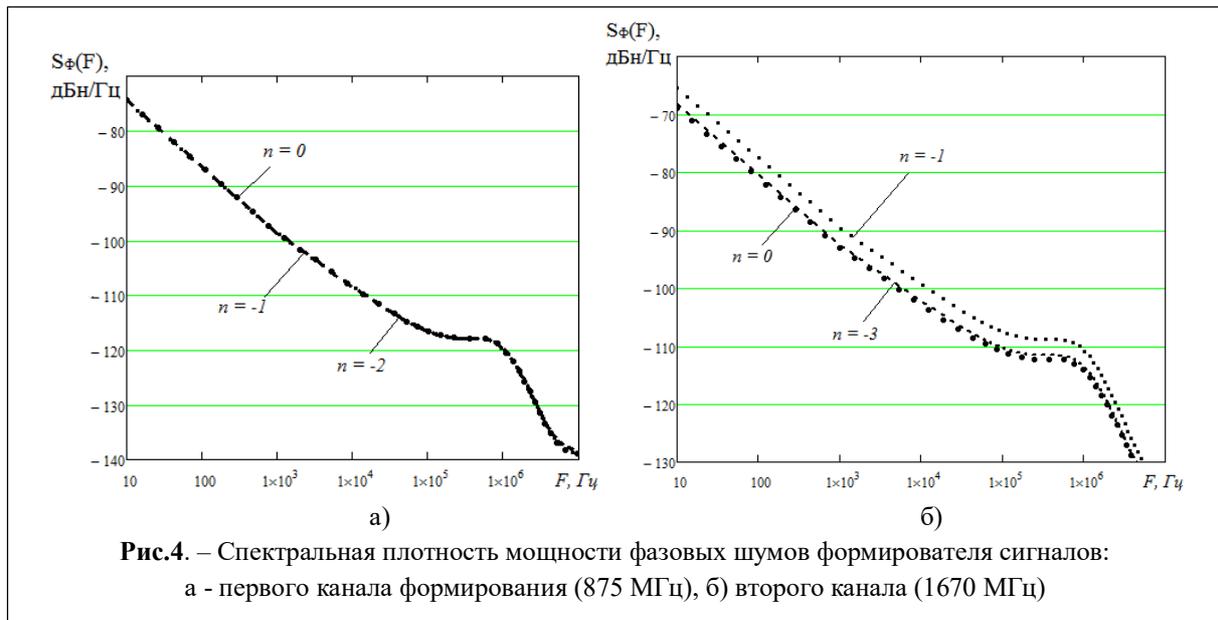
Как видно, использование образов по сравнению с основной выходной частотой позволяет снизить коэффициент умножения выходного множителя. Для первого и третьего канала формирования коэффициент умножения уменьшится в 7 раз, для второго – в 12 раз, для четвертого в 5 раз.

Проведем математическое моделирование СПМ фазовых шумов формирователя, по ме-

СПМ фазовых шумов основной частоты синтеза. Шум увеличивается примерно на 4 дБ практически во всей полосе частот отстройки (от 10 Гц до 1 МГц). В дальнейшем планируется исследование выявленной зависимости уровня фазовых шумов многоканального формирователя, использующего образы основной частоты от увеличения выходной частоты формирователя и изменения коэффициентов умножения выходного множителя частоты.

Таблица 2. Результаты частотного планирования многоканального формирователя

$f_{\phi 1} = 875$ МГц							$f_{\phi 2} = 1670$ МГц						
$n_{2,2}$	$n_{1,2}$	n	$f_{ЦВС2}$	f_{T2}	$K_{ЦВС2}$	$f_{обр2}$	$n_{2,2}$	$n_{1,2}$	n	$f_{ЦВС2}$	f_{T2}	$K_{ЦВС2}$	$f_{обр2}$
1	22	-2	181	528	0,343	875	1	25	-3	130	600	0,217	1670
2	22	-1	90,5	528	0,171	437,5	4	25	-1	182,5	600	0,304	417,5
7	22	0	125	528	0,237	125	12	25	0	150	600	0,232	139,2



Литература

1. Малахов Р.Ю. Модуль бортовой цифровой антенной решетки // Дисс. канд. техн. наук. по специальности 05.12.07. — Москва, 2015.
2. Huang, M.-Y., Wang, H. A Mm-Wave Wideband MIMO RX with Instinctual Array-Based Blocker/Signal Management for Ultralow-Latency Communication
3. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образах основной частоты // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 2 (6). С. 13-17.
4. Romashov V.V., Romashova L.V., Doctorov 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.
5. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вы-

Поступила 15 ноября 2019 г.

числительных синтезаторов на образах основной частоты // Радиопромышленность. 2012, №2. С.38-48.

6. 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)

7. 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.

8. Докторов, А.Н. Анализ алгоритма частотного планирования формирователей сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2017, № 19. С. 16-22.

The article deals with the problems of designing multichannel high-frequency signal shapers. It is proposed to use images of the basic frequency of direct digital synthesizers to increase the output frequency and improve the noise characteristics of signal shapers. The features of the design of the frequency plan, mathematical modeling of the spectral power density of the phase noise of the shaper and its structural elements are shown. The advantage of using images of the main frequency of digital computational synthesizers is shown, which is manifested in the form of reducing the number of cascades of output frequency multipliers. The necessity of choosing the optimal structural implementation of multichannel signal generators from the point of view of the minimum spectral power density of phase noise is substantiated.

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

Докторов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: doctorov_a_n@mail.ru

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

Якименко Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

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

Сочнева Наталья Александровна – магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru

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