

## **Гибридные формирователи сигналов радиолокационных станций на основе быстродействующих цифроаналоговых преобразователей**

В.В. Ромашов<sup>1</sup>, К.А. Якименко<sup>1</sup>, А.Н.Докторов<sup>1</sup>, И.Д. Грошков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых*

*600000, г. Владимир, ул. Горького, 87*

*E-mail: romashovmirom@mail.ru*

<sup>2</sup>*АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов»*

*602267, г. Муром, Владимирская область, Карачаровское шоссе, 2*

*В данной работе представлена обобщенная структурная схема гибридного синтезатора частот на основе прямого цифрового и прямого аналогового методов синтеза, в которой для повышения рабочей частоты используется быстродействующий цифроаналоговый преобразователь в специальных режимах работы. Проведено моделирование шумовых характеристик гибридного синтезатора с ЦАП, работающим в двух специальных режимах. Ключевые слова: гибридный синтезатор частот, цифровой вычислительный синтезатор, фазовый шум, цифроаналоговый преобразователь, ЦАП*

## **Radar hybrid signal generators based on high-speed digital-to-analog converters**

V.V. Romashov<sup>1</sup>, K.A. Yakimenko<sup>1</sup>, A.N. Doktorov<sup>1</sup>, I.D. Groshkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Vladimir State University.*

<sup>2</sup>*JSC "Murom Plant of Radio Measuring Instruments" (JSC "MP RMI").*

*This paper presents a generalized block diagram of a hybrid frequency synthesizer based on direct digital and direct analog synthesis methods, which uses a high-speed digital-to-analog converter in special operating modes to increase the operating frequency. The noise characteristics of a hybrid synthesizer with a DAC operating in two modes are simulated.*

*Keywords: hybrid frequency synthesizer, digital computing synthesizer, phase noise, digital-to-analog converter, DAC*

### **Введение**

В качестве формирователей гармонических сигналов радиолокационных станций в настоящее время широко используются синтезаторы прямого цифрового метода синтеза — цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС)[1–3]. К достоинствам таких синтезаторов можно отнести высокую скорость и малый шаг перестройки по частоте, хорошие шумовые характеристики, поддержку различных видов модуляции. Наряду с достоинствами ЦВС имеют некоторые недостатки, а именно: относительно невысокие выходные частоты, значительное количество дискретных побочных составляющих спектра.

Гибридный метод синтеза частот (основанный на комбинациях нескольких методов синтеза) позволяет объединить достоинства и снизить влияние недостатков других методов синтеза. В радиосистемах, где от формирователей сигналов требуется высокая спектральная чистота (например, в контрольно-измерительной аппаратуре), как правило, используются гибридные синтезаторы на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза частот [4, 5]. В радиолокационных станциях и телекоммуникационных системах, где основное требование к формирователям — высокая скорость перестройки, часто используются гибридные синтезаторы на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза [6]. При этом

формирователь сигналов любой радиосистемы должен иметь низкий уровень фазовых шумов, поскольку от этого напрямую зависят основные тактико-технические характеристики радиосистемы: чувствительность, дальность действия, помехоустойчивость.

Целью данной работы является исследование методов улучшения спектральных и шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза при использовании их в качестве формирователей сигналов радиолокационных станций.

### **Специальные режимы работы быстродействующих цифроаналоговых преобразователей**

Для увеличения выходной частоты цифровых вычислительных синтезаторов используются умножители частоты, однако применение умножителей приводит к существенному росту уровня фазовых шумов и нежелательных дискретных побочных составляющих спектра. Другим способом повышения выходной частоты ЦВС является использование копий спектра выходного сигнала ЦВС — образов основной частоты. Недостатком использования образов является их относительно невысокая амплитуда, которая уменьшается с увеличением номера образа. Для повышения амплитуды образов в литературе [7–9] предлагается использовать цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), входящий в состав цифрового вычислительного синтезатора в специальных режимах работы. Выделяют следующие режимы работы быстродействующих ЦАП:

1. Нормальный режим работы (англ. non-return-to-zero— NRZ). Образ с максимальным уровнем находится в первой зоне Найквиста. Амплитуды образов с более высокими номерами уменьшаются с увеличением зон Найквиста по закону  $\sin(x)/x$ .

2. Режим  $2xNRZ$  — ЦАП работает с удвоенной тактовой частотой, если новые выборки данных фиксируются в ядре ЦАП как по переднему, так и по заднему фронту,

3. Режим return-to-zero (RZ). В данном режиме уменьшается длительность  $\tau$  тактовых импульсов. Особенность режима RZ — увеличение амплитуды образа с номером  $-1$  во второй зоне Найквиста.

4. Режим радиочастоты (англ. radiofrequency— RF). Каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами длительностью  $\tau = T/2$ . Максимальная амплитуда у образов во второй и третьей зонах Найквиста.

5. Режим RFZ (*radiofrequency return-to-zero mode*). Уменьшается длительность разнополярных импульсов режима RF относительно момента  $t = 0$ .

6. Режим, условно названный RFZ2. Длительность разнополярных импульсов, также как в режиме RFZ, составляет  $\tau < T/2$ , однако изменение их длительности осуществляется относительно моментов времени  $t = 0$  и  $t = T/2$ .

В соответствии с результатами исследований применение быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы позволяет увеличить амплитуду образов на 6–8 дБ, вследствие чего отпадает необходимость применения многокаскадных усилителей, вносящих дополнительный фазовый шум.

### **Структурная схема гибридного синтезатора частот на основе быстродействующих цифроаналоговых преобразователей**

Принцип действия гибридных синтезаторов на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза заключается в том, что сетка частот с малым шагом перестройки, формируемая ЦВС, переносится на более высокий диапазон частот за счет смешивания с частотой сигнала, формируемого дополнительным генератором

опорной частоты (ГОЧ). Однако во многих областях радиотехники актуальным представляется применение одного ГОЧ в целях обеспечения когерентности фаз опорного и выходного сигналов. Обобщенная структурная схема гибридного синтезатора на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза выглядит следующим образом (рис. 1).

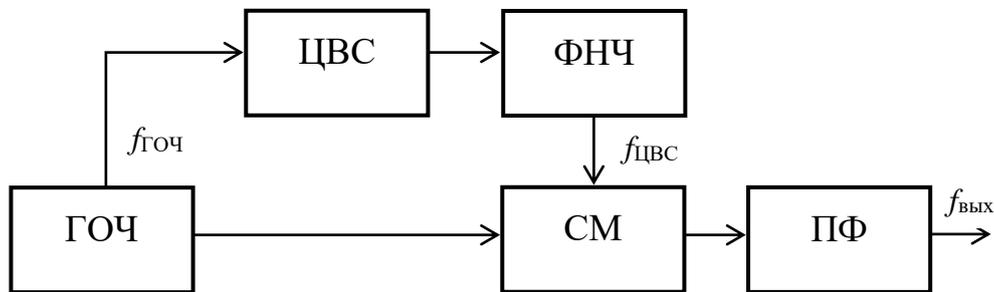


Рис. 1. Обобщенная структурная схема гибридного синтезатора

Генератор опорной частоты формирует тактовый сигнал для ЦВС с частотой  $f_{ГОЧ}$ ; этот же сигнал подается на один из входов смесителя. На второй вход смесителя подается выходной сигнал ЦВС, проходящий через фильтр нижних частот (ФНЧ), выделяющий сигнал с основной частотой  $f_{ЦВС}$ . На выходе смесителя присутствует сигнал со значениями суммы и разности входных частот, из которого в полосовом фильтре ПФ выделяется сигнал с требуемой частотой  $f_{ВЫХ}$ . Диапазон изменения выходной частоты в таком случае определяется диапазоном изменения выходной частоты ЦВС, а также характеристиками элементов фильтрации, поскольку при малых значениях коэффициента передачи ЦВС ( $K_{ЦВС} = f_{ЦВС} / f_{ГОЧ}$ ) труднее отделить суммарную частоту от разностной на выходе смесителя.

Для увеличения диапазона изменения выходной частоты гибридного синтезатора используют умножители и делители частоты с переменными коэффициентами передачи. В [10] предлагается использовать в качестве умножителя генератор гармоник на основе диода с накоплением заряда. Применение такого генератора позволит существенно увеличить диапазон перестройки (до нескольких октав), сохраняя высокое частотное разрешение. Однако применение умножителей частоты требует большого количества фильтров с высоким порядком для подавления дискретных ПСС. В связи с этим, в данной работе предлагается в данных синтезаторах использовать вместо цифровых вычислительных синтезаторов формирователь цифрового кода (ФЦК) и быстродействующий цифроаналоговый преобразователь (ЦАП).

Обобщенная структурная схема гибридного синтезатора на основе ЦАП в специальных режимах работы представлена на рис. 2.

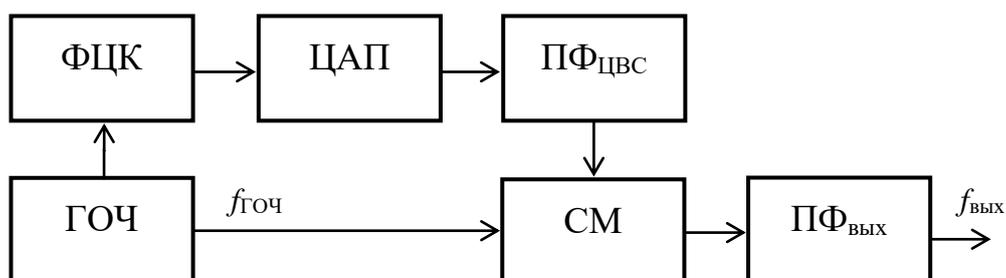


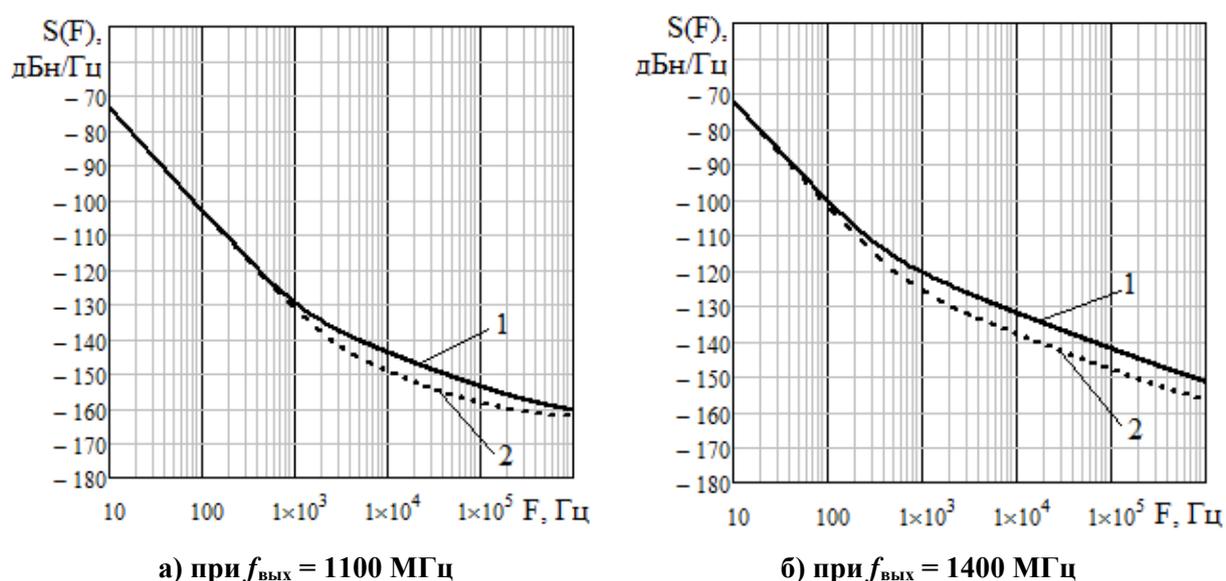
Рис. 2. Обобщенная структурная схема гибридного синтезатора

Отличается данная схема от предыдущей тем, что вместо ЦВС используется быстродействующий цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), на который подается особый цифровой код с формирователя цифрового кода (ФЦК). В зависимости от цифрового кода реализуется требуемый специальный режим работы ЦАП.

Проведем исследование шумовых характеристик представленной схемы. Математическая модель спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов гибридного синтезатора будет иметь вид:

$$S_{ГСЧ}(F) = S_{ЦАП}(F) + S_{ГОЧ}(F)K_{ЦАП}^2 + S_{ГОЧ}(F) + S_{СМ}(F) + S_{\phi}(F), \quad (1)$$

где  $S_{ЦАП}(F)$ ,  $S_{ГОЧ}(F)$ ,  $S_{СМ}(F)$ ,  $S_{\phi}(F)$  — модели шумовых характеристик быстродействующего ЦАП [11], генератора опорной частоты, смесителя, элементов фильтрации соответственно [12];  $K_{ЦАП} = f_{out} / f_T$  — коэффициент передачи ЦАП аналогично коэффициенту передачи ЦВС в (1). Проведем моделирование СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора при работе ЦАП в двух режимах: NRZ и 2xNRZ. Исходные параметры синтезатора для моделирования: частота ГОЧ  $f_{ГОЧ} = 1$  ГГц, выходные частоты  $f_{вых1} = 1100$  МГц,  $f_{вых2} = 1400$  МГц.



**Рис. 3. Моделирование СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП в специальных режимах работы: 1 — NRZ, 2 — 2xNRZ**

Результаты моделирования показали, что применение специального режима работы 2xNRZ позволяет на частотах отстройки от несущей свыше 1 кГц существенно (на 5–7 дБ) снизить уровень СПМ фазовых шумов.

### **Выводы**

В данной работе описана возможность использования специальных режимов работы быстродействующих цифроаналоговых преобразователей в гибридных синтезаторах частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза частот.

Результаты моделирования показали, что применение специального режима работы 2xNRZ позволяет на частотах отстройки от несущей свыше 1 кГц на 5–7 дБ снизить уровень СПМ фазовых шумов. В связи с этим, актуальным представляется проведение комплексных исследований по разработке универсальной

структурной схемы гибридного синтезатора на основе быстродействующих ЦАП и разработке алгоритма выбора оптимального режима на основе заданных требований к полосе частот синтезатора, ее шумовым и спектральным характеристикам.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-4044.2021.4, Совета по грантам Президента Российской Федерации*

### **Литература**

1. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. N. Y.: IEEE Press, 1998.
2. Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. 1999, Analog Devices, Inc.
3. Vankka, J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications : Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology / J. Vankka. – Helsinki University of Technology, 2000. – 208 p.
4. V.V. Romashov, K.A. Yakimenko, L.V. Romashova and A.N. Doktorov Algorithm for designing low-noise frequency synthesizers for remote sensing systems // Journal of Physics: Conference Series. Volume 1632. Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRSRWPD) 2020 23-25 June 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1632/1/012017.
5. Ryu, H.G. A new triple-controlled type frequency synthesizer using simplified DDFS-driven digital hybrid PLL system / H.G. Ryu, Y.Y. Kim, H.M. Y, H.S. Lee // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2002, Volume: 4. – Pp. 63-71.
6. Якименко К.А. Алгоритм построения гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2019. Т. 1. № 1-1. С. 35–37.
7. Romashov V. V., Doktorov A. N., Yakimenko K. A., Sochneva N.A. Application high-speed digital-to-analog converters for direct digital synthesis of high-frequency radio signals // Journal of Physics: Conference Series. Volume 1632. Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRSRWPD) 2020 23-25 June 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1632/1/012023.
8. HighSpeedDAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2020. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-dac-converters.html>
9. Kuckreja Ajay, OstremGeir, “High-Speed DACs ease transmitter designs,” Microwave & RF, August 2010.
10. Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Romashova L.V. Low-Noise Hybrid Frequency Synthesizers Based on Direct Digital and Direct Analog Synthesis. Measurement Techniques. DOI: 10.1007/S11018-020-01788-Y
11. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сошнева Н.А. Математические модели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей формирователей радиолокационных сигналов // Текущий выпуск.
12. Рыжков, А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.