

## **Применение быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей при прямом цифровом синтезе высокочастотных радиосигналов**

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

*Федеральное государственное бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых",  
E-mail: romashovmurot@mail.ru, doctorov\_a\_n@mail.ru*

*Представлены основные возможности быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, предназначенных для прямого цифрового синтеза радиочастотных сигналов диапазонов УВЧ и СВЧ. Предложена структурная схема цифрового формирователя сигналов, построенная на основе быстродействующих ЦАП. Исследованы основные специализированные режимы работы быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, позволяющие эффективно использовать побочные компоненты спектра, возникшие при восстановлении сигнала из цифровой в аналоговую форму.*

*The main features of high-speed digital-to-analog converters designed for direct digital synthesis of radio frequency signals in the UHF and microwave ranges are presented. A block diagram of a digital signal generator based on high-speed DACS is proposed. The main specialized modes of operation of high-speed digital-to-analog converters are researched, which make it possible to effectively use the side components of the spectrum that arise when restoring a signal from digital to analog form.*

### **Введение**

Современные телекоммуникационные системы, системы радиолокации и дистанционного зондирования Земли содержат в своем составе цифровые синтезаторы частоты, построенные либо на основе прямого цифрового метода синтеза (цифровые вычислительные синтезаторы, ЦВС) [1-3], цифрового косвенного (импульсная система фазовой автоподстройки частоты, ФАПЧ), либо комбинациями данных методов, реализующими гибридный синтез частоты.

Одним из важнейших направлений развития данной области науки и техники является повышение выходной частоты когерентного синтеза, когда все множество выходных колебаний, определяемых сеткой частот синтезатора, сформировано с помощью одного опорного малошумящего источника, называемого генератором опорной частоты (ГОЧ). Когерентный синтез очень важен для передовых систем радиолокации, широкополосных систем радиодоступа и связи, систем дистанционного зондирования Земли, реализующих метод пространственно-временного разделения каналов на основе цифровых антенных решеток (ЦАР) [4, 5]. Повышение рабочей частоты синтезаторов в таких системах позволяет увеличить ширину полосы передаваемого сигнала, тем самым увеличив количество и скорость передачи данных, снизить время зондирующего импульса и многое другое. Благодаря цифровым вычислительным синтезаторам появилась возможность цифрового синтеза широкополосных и сверхширокополосных сигналов [3].

Развитие микроэлектроники позволило создать быстродействующие цифроаналоговые преобразователи, позволяющие формировать высокочастотные сигналы как одиночной несущей, так и сигналы со сложными методами модуляции непосредственно в диапазонах УВЧ и СВЧ. Синтезаторы на основе данных ЦАП могут формировать сигналы от единиц герц и до нескольких десятков ГГц. Серийно выпускаемые быстродействующие ЦАП имеют максимальную тактовую частоту 12 ГГц. В данной работе исследуются особенности работы данных синтезаторов, а также

возможности формирования высокочастотных сигналов с помощью быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей [6, 7, 8], работающих в специальных режимах синтеза для повышения эффективности использования побочных высокочастотных компонентов спектра выходного сигнала. Данные компоненты называются образами (копиями спектра) основной частоты и образуются вследствие эффекта дискретизации.

### Обобщенная структурная схема цифрового формирователя сигналов на основе быстродействующих ЦАП

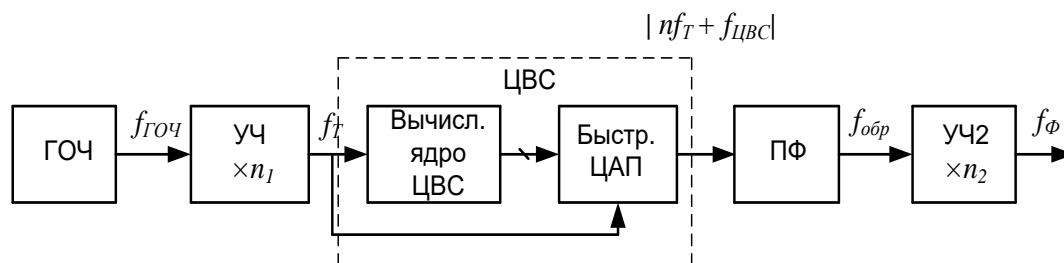
У интегральных широко распространенных ЦВС имеется недостаток: основная частота формируемого колебания не превышает 45% тактовой частоты и составляет в настоящее время 1400-1600 МГц [8]. Для решения данной проблемы применяются копии спектра выходного сигнала – образы основной частоты [9]:

$$f_{обp} = |nf_T + f_{ЦВС}|, \quad (1)$$

где  $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$  – номер образа. При  $n = 0$  на выходе ЦВС выделяется основная частота  $f_{ЦВС}$ .

При использовании образов необходимо учитывать уменьшение уровня гармоник. Частично эту проблему решает использование не интегральных ЦВС, а ЦВС, построенных на основе быстродействующих специализированных ЦАП и ПЛИС в качестве вычислительного блока [10, 11].

Обобщенная схема цифрового формирователя высокочастотных сигналов, построенного на основе быстродействующих ЦАП, представляет собой цифровой вычислительный синтезатор, но не в едином интегральном исполнении, а разделенный на высокопроизводительные вычислительные блоки (рис. 1).



Р

Рис. 1 – Структурная схема формирователя сигналов

Для создания тактового сигнала с частотой  $f_T$  цифрового формирователя сигналов используется генератор опорной частоты, частота  $f_{ГОЧ}$  которого умножается отдельным умножителем частоты на транзисторных каскадах или системе ФАПЧ. Синтезированный высокочастотный сигнал выделяется полосовым фильтром, и его частота умножается выходным умножителем частоты.

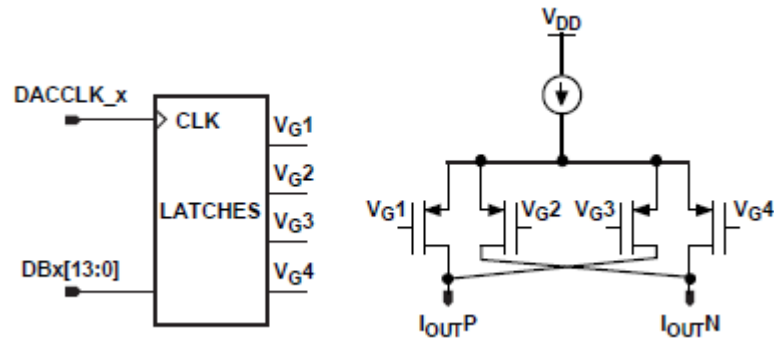
Важнейшим элементом в данной схеме цифрового формирователя является быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь, специальные режимы которого позволяют эффективно использовать выходной сигнал на частотах образов.

### Специальные режимы работы быстродействующих ЦАП

Ключевой особенностью, позволяющей быстродействующим цифро-аналоговым преобразователям эффективно формировать высокочастотные сигналы, является

внедрение четырехключевой архитектуры для управления источником тока каждого из эталонных разрядов ЦАП (рис.2) [12].

В большинстве распространенных цифро-аналоговых преобразователей применяется двухключевая архитектура, позволяющая подключать и отключать источник тока каждого из разрядов к выходу ЦАП на полное время одного периода тактового сигнала.

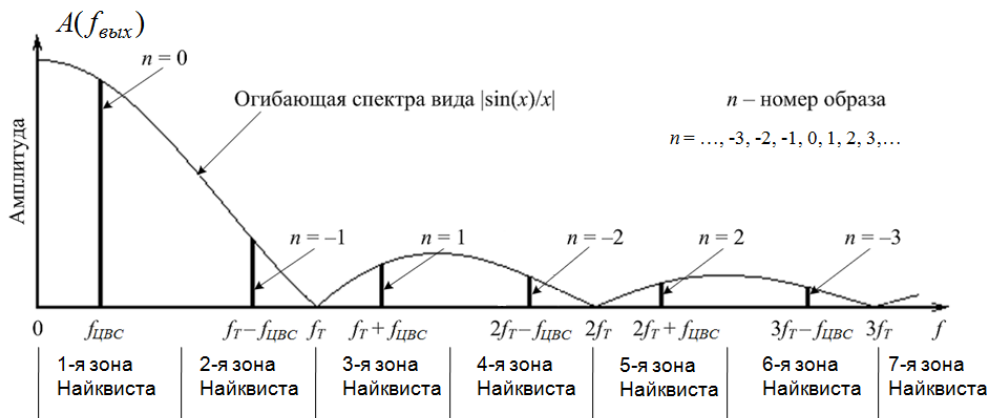


**Рис.2** Четырехключевая транзисторная архитектура управления источником тока каждого из разрядов преобразователя

Использование четырех полевых транзисторов позволяет производить переключение как минимум два раза за один период, во время нарастания переднего и спада заднего фронтов тактового импульса.

Рассмотрим основные режимы работы быстродействующего цифроаналогового преобразователя, входящего в состав цифрового вычислительного синтезатора, соответствующие переключениям транзисторной ключевой структуры.

1. Нормальный режим работы, или *non-return-to-zero* (NRZ). Частотная характеристика ЦАП в режиме NRZ показана на рис. 3. Максимум частотной характеристики приходится на первую зону Найквиста. При использовании образов, расположенных в других зонах Найквиста, необходимо учитывать, что огибающая частотной характеристики вида  $(\sin(x))/x$  вызывает уменьшение амплитуды.



**Рис. 3.** Частотная характеристика цифроаналогового преобразователя в обычном режиме работы NRZ

2. Режим работы ЦАП, в котором применяется уменьшение длительности  $\tau$  тактовых импульсов (рис. 4 ,б) так, что выходной сигнал оказывается как бы «вырезан» из сигнала режима NRZ в интервалы времени  $-\tau/2 < t < \tau/2$ . получил название *return-to-*

zero (RZ) mode. [12-14]. Преимущество режима RZ заключается в том, что увеличивается амплитуда гармоники образа с  $n=-1$  во второй зоне Найквиста.

3. Принципиально другим режимом работы, применяемым в некоторых быстродействующих ЦАП, является *radio frequency* (RF) или *mix mode* [12-14]. При его реализации каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами длительностью  $\tau=T/2$  (рис. 4,в). Режим радиочастоты RF является оптимальным для работы на высокой частоте выходного сигнала, во второй и третьей зонах Найквиста.

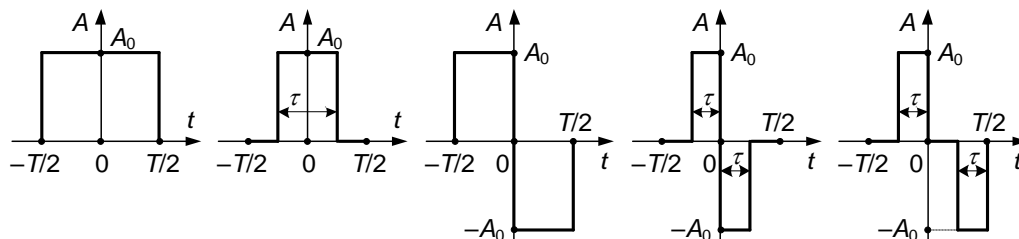


Рис. 4. Форма тактовых импульсов в различных режимах работы быстродействующих ЦАП: NRZ(а), RZ(б), RF(в), RFZ(г), RFZ2 (д)

4. Путем уменьшения длительности разнополярных импульсов режима RF относительно момента  $t = 0$  так, как показано на рис. 4,г, разработчики реализуют еще один режим работы быстродействующих ЦАП, известный как RFZ (*radio frequency return-to-zero mode*) [12-15].

5. Еще один режим работы ЦАП, условно названный RFZ2 [16]. В нем длительность разнополярных импульсов, также как в режиме RFZ, составляет  $\tau < T/2$ , однако изменение их длительности осуществляется относительно моментов времени  $t=0$  и  $t=T/2$  (рис. 4,д).

Частотные характеристики описанных быстродействующих ЦАП для различных режимов работы и гармоники образов основной частоты приведены на рис. 5.

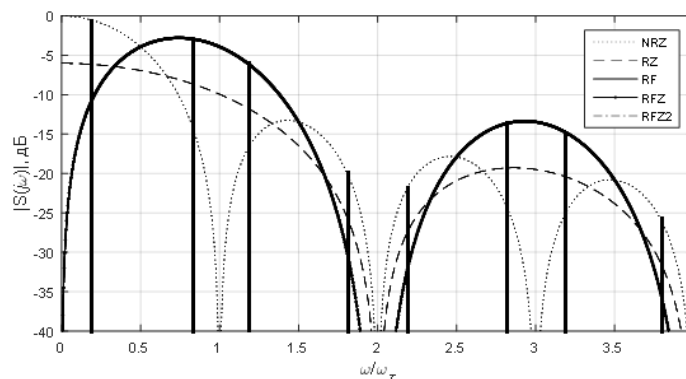


Рис. 5. Частотные характеристики в различных режимах работы

Частотные характеристики быстродействующего цифро - аналогового преобразователя, использующего специальные режимы работы, наглядно показывают изменение амплитуд компонентов спектра – как гармоники основной частоты, так и ее образов. Обычный режим NRZ, огибающая частотной характеристики, в котором спадает в соответствии с законом  $(\sin x)/x$ , эффективен лишь для основной полосы частот, расположенной в первой зоне Найквиста. Режим RZ, а особенно RF позволяют эффективно использовать нечетные образы, например  $n = -1, 1, -3, 3$  и так далее.

Увеличение амплитуды гармоник образа из-за применения специальных режимов приводит к снижению отношения шум/сигнал и позволяет снизить спектральную плотность мощности фазовых шумов, как быстродействующего преобразователя, так и всего цифрового формирователя в целом. Коэффициенты, характеризующие снижение уровня фазовых шумов относительно режима NRZ, были получены в работе [17].

### **Выводы**

Применение быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, использующих специальные режимы работы, позволяет упростить структурные схемы цифровых формирователей, за счет снижения числа каскадов выходных умножителей частоты. Особенностью работы данных ЦАП является использование копий спектра - образов основной синтезируемой частоты для создания широкополосных и сверхширокополосных сигналов. Формирование полезного сигнала на образе позволяет увеличить выходную частоту и упростить структурную схему цифрового синтезатора.

Прямой цифровой когерентный синтез позволяет получить сигналы со сложными видами модуляции для телекоммуникационных, радиолокационных систем и систем дистанционного зондирования Земли. Быстродействующий ЦАП способен непрерывно в процессе работы переключать режимы работы. За счет этого достигается максимально широкая полоса синтезируемого сигнала.

Использование различных режимов работы ЦАП позволяет увеличить отношение сигнал/шум гармоник образов без использования дополнительных устройств путем изменения огибающей частотной характеристики. В целом все это приводит к улучшению шумовых характеристик цифровых вычислительных синтезаторов, использующих ЦАП. Для четных образов необходимо провести дополнительные исследования и определить наиболее эффективную форму тактового импульса и алгоритм переключения транзисторов выходного каскада каждого разряда ЦАП.

### **Литература**

1. Kroupa, V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. (1998) – John Wiley & Sons, Ltd. –P. 396
2. Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. 1999, Analog Devices, Inc.
3. Иванов Д.В., Иванов В.А., Чернов А.А. Прямой цифровой синтез длинноимпульсных сверхширокополосных радиочастотных сигналов для зондирования ионосферы // III Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике / Материалы IV Всероссийской научной конференции (Муром, 25-27 июня 2013 г.) – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013. – С164 - 169.
4. Малахов Р.Ю. Модуль бортовой цифровой антенной решетки // Дисс. канд. техн. наук. по специальности 05.12.07. — Москва, 2015.
5. Huang, M.-Y., Wang, H. A Mm-Wave Wideband MIMO RX with Instinctual Array-Based Blocker/Signal Management for Ultralow-Latency Communication // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Volume: 54 , Issue: 12 , Dec. 2019. P 3553 – 3564. DOI: 10.1109/JSSC.2019.2945267.
6. Гольцова М. Быстродействующие широкополосные ЦАП. Борьба на рынке коммуникационных систем усиливается // Электроника НТБ. 2001. №2. С. 24-28.
7. Ткаченко А. Прямая цифровая модуляция: принципы и решения // Электроника НТБ. 2014. №3. С. 162-174.
8. Evaluating High Speed DAC Performance by Walt Kester - Analog Devices MT-013 Tutorial.

9. Аналого-цифровое преобразование / Под ред. Уолта Кестера М: Техносфера. 2007. - 1016 с.
10. Charles Laperle, *Member, IEEE*, and Maurice O’Sullivan. Advances in High-Speed DACs, ADCs, and DSP for Optical Coherent Transceivers // *Journal of Lightwave Technology*, VOL. 32, NO. 4, February 15, 2014.
11. Скляр В., Горохов В., Борисов Ю., Горбунов Д., Битюцких С. Быстродействующие 14-разрядные ЦАП с токовым выходом серии 1273 // *Электронные компоненты*. 2009. №2. С. 21-24.
12. High Speed DAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2020. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-dac-converters.html>
13. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании MaximIntegrated, 2020. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master>
14. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании Texas Instruments, 2020. URL: <http://www.ti.com/data-converters/dac-circuit/high-speed/products.html>
15. Kuckreja Ajay, OstremGeir, “High-Speed DACs ease transmitter designs,” *Microwave & RF*, August 2010.
16. Khramov K.K., Romashov V.V. Mathematical modeling of operational modes of high-speed DACs. В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии. Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. 2018. С. 1403-1411.
17. Ромашов В.В., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А., Матерухин С.Е. Математическое моделирование шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2019. № 4. С. 52-59.