

Храмов К.К.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: hramovkk.lan@mit.ru*

### **Быстродействующие ЦАП и их использование для формирования широкополосных радиосигналов**

Как известно из теории цифровой обработки сигналов [1], спектр дискретного сигнала образован бесконечным рядом сдвинутых копий (образов) спектра основного колебания (исходного непрерывного сигнала). Передаточная характеристика ЦАП зависит от длительности и формы тактовых импульсов [2, 3], поэтому последние будут определять амплитудное распределение образов основного колебания в спектре выходного сигнала ЦАП.

Традиционно в ЦАП реализуется интерполяция нулевого порядка, когда сигнал тактируется прямоугольными импульсами длительностью  $T$ . Такой режим работы ЦАП в иностранной литературе принято называть non-return-to-zero (NRZ) или normal mode. При этом огибающая спектра выходного сигнала пропорциональна функции синуса Котельникова с нулями на частотах  $f_k = kT^{-1}$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$ .

Наличие образов в спектре дискретного сигнала, повторяющихся с частотой  $f_T = T^{-1}$ , позволяет, путем их фильтрации на выходе ЦАП, формировать колебания на частотах, превышающих тактовую частоту преобразования [3, 4]. Это позволяет снизить скорость передачи данных в основной полосе и уменьшить рассеиваемую ЦАП мощность. Ограничение заключается в том, что амплитуда копий спектра, расположенных в 2...4 зонах Найквиста, на 10...20 дБ меньше амплитуды основного колебания. Кроме того, при необходимости формирования широкополосного сигнала в этих зонах в режиме NRZ возникает проблема значительной (до 3...5 дБ) неравномерности в полосе.

Быстродействующие ЦАП, активно разрабатываемые в последние годы [5-7], призваны преодолевать эти ограничения. При этом возможны два основных пути решения возникающих проблем. Первый заключается в значительном увеличении тактовой частоты ЦАП (расширении зон Найквиста) без изменения режима NRZ и дополнительном использовании корректирующей функции вида  $x/\sin(x)$  для уменьшения неравномерности частотной характеристики ЦАП в основной полосе (первой зоне Найквиста) [6].

При втором подходе увеличение тактовой частоты ЦАП сопровождается изменением режима работы преобразователя за счет изменения формы и длительности тактовых импульсов. Наиболее простой и очевидный способ – уменьшение длительности  $\tau$  тактовых импульсов без изменения периода тактирования  $T$ . Режим работы ЦАП, соответствующий этому способу, получил название return-to-zero (RZ) mode. Увеличение скважности  $q = T/\tau$  тактовых импульсов приводит к расширению частотной характеристики ЦАП в  $q$  раз за счет перераспределения амплитуд образов основной частоты. На практике при реализации в быстродействующих ЦАП режима RZ аппаратно задается значение  $q = 2$  [5-8].

Принципиально другим режимом работы, применяемым в некоторых быстродействующих ЦАП, является radio frequency (RF) или mix mode [5, 6]. При его реализации каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами длительностью  $\tau = T/2$ .

Путем уменьшения длительности разнополярных импульсов режима RF относительно момента начала импульса, разработчики реализуют еще один режим работы быстродействующих ЦАП, известный как RFZ (radio frequency return-to-zero mode) [9]. При практической реализации режима RFZ в быстродействующих ЦАП имеет место значение  $q = 4$  [5], что требует четырехкратного увеличения тактовой частоты по сравнению с режимом NRZ.

Автором предложен и проанализирован еще один режим работы ЦАП, условно названный RFZ2, когда 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 докладе подробно рассмотрены режимы работы современных быстродействующих ЦАП и проводится их сравнительный анализ. Для каждого из них получены аналитические выражения, а также частотные и импульсные характеристики, которые позволяют выбрать наиболее подходящие режимы работы быстродействующих ЦАП для формирования широкополосных радиосигналов с требуемыми параметрами.

### Литература

1. Применение цифровой обработки сигналов. Под ред. Э. Оппенгейма: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Рязанцева. – М.: Мир, 1980.
2. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирование сигналов в ОВЧ и УВЧ диапазонах при использовании метода прямого цифрового синтеза частот // Радиотехника. 2007, №6. С.39-41.
3. Храмов К.К. Эффективное использование образов спектра в ОВЧ и УВЧ диапазонах при прямом цифровом синтезе частот // Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. науч. тр. – №11. – М.: Радиотехника, 2009. – С.108-112.
4. Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. “The Use of Images of DDS Fundamental Frequency for High-Frequency Signals Formation,” 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014, pp. 310-311.
5. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: **официальный сайт компании Maxim Integrated, 2018.** URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master>.
6. High Speed DAC [Электронный ресурс]: **официальный сайт компании Analog Devices, Inc., 2018.** URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-dac-converters.html>.
7. High-speed DACs [Электронный ресурс]: официальный сайт компании Texas Instruments, Inc., 2018. URL: <http://www.ti.com/data-converters/dac-circuit/high-speed/overview.html>.
8. Kuckreja Ajay, Ostrem Geir, “High-Speed DACs ease transmitter designs,” Microwave & RF, August 2010.
9. Application note 3901, “Synchronizing Multiple High-Speed Multiplexed DACs for Transmit Applications“. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3901>.