

Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А.
 Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного
 учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет име-
 ни Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23
 e-mail: hramovkk@gmail.com

Формирование широкополосных сигналов при прямом цифровом синтезе частот

Цифровые синтезаторы частот и сигналов, применяемые в современных системах связи и радиотехнических системах, позволяют сформировать требуемые сигналы со сложными типами модуляции и реализуют программное управление амплитудой, частотой и фазой синтезируемого сигнала. Одним из направлений развития данного метода синтеза является применение высокочастотных спектральных компонентов (образов) основной частоты, возникающих в цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП). Для повышения эффективности использования образов основной частоты применяют быстродействующие ЦАП, обладающие особой архитектурой выходных каскадов, позволяющей реализовать специальные режимы работы [1-2]. В этих режимах происходит изменение формы огибающей спектра выходного сигнала так, чтобы увеличить амплитуды требуемых образов спектра.

Традиционно в ЦАП реализуется интерполяция нулевого порядка, когда сигнал тактируется прямоугольными импульсами длительностью T (рис. 1,а). Такой режим работы ЦАП называют non-return-to-zero (NRZ) или normal mode [3].

Обзор существующих режимов работы быстродействующих ЦАП имеется [4]. В работах [4-6] были исследованы режимы работы RZ, RF, RFZ, RFZ2, которые позволяют увеличить амплитуды образов основной частоты во второй, третьей и четвертой зонах Найквиста.

Можно предложить и исследовать еще два режима работы ЦАП, условно названные RFZ3 и RFZ4, форма тактовых импульсов которых представлена на рис. 1,б-в.

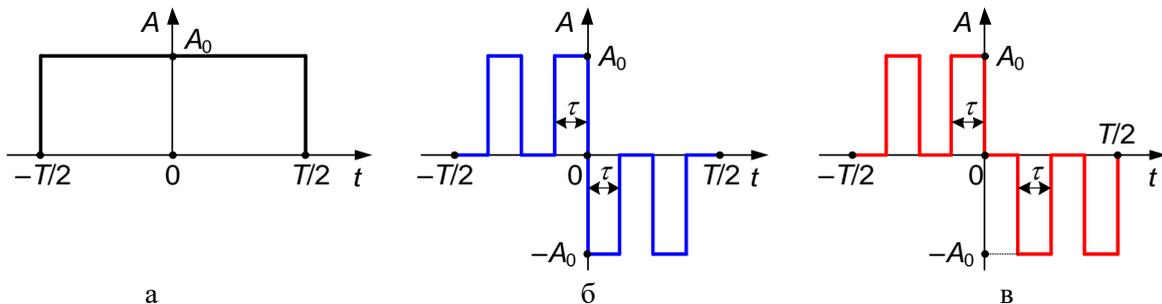


Рис. 1. Форма тактовых импульсов в различных режимах работы быстродействующих ЦАП: NRZ(а), RFZ3 (б), RFZ4 (в)

Режим RFZ3 является производным от режима RFZ, однако в каждом из интервалов $T/2$ содержит по два разнополярных импульса длительностью $\tau = T/8$. Огибающая спектра выходного сигнала ЦАП будет определяться выражением

$$\dot{S}_{RFZ3}(\omega) = j \frac{A_0 T}{4} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\omega T}{16}\right) \cdot \left[\sin\left(\frac{\omega T}{16}\right) + \sin\left(\frac{5\omega T}{16}\right) \right], \quad (1)$$

где A_0 – амплитудный коэффициент.

Режим RFZ4 аналогичен режиму RFZ3, но отрицательные импульсы имеют сдвиг на интервал $\tau = T/8$ (рис. 1,в). В этом режиме огибающая спектра выходного сигнала ЦАП

$$\dot{S}_{RFZ4}(\omega) = j \frac{A_0 T}{4} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\omega T}{16}\right) \cdot \left[\sin\left(\frac{\omega T}{8}\right) + \sin\left(\frac{3\omega T}{8}\right) \right] \cdot \exp\left(-j \frac{\omega T}{16}\right). \quad (2)$$

Анализ выражений (1) и (2) показал следующее. Применение режима RFZ3 наиболее эффективно для гармоник образов с номерами $n = -1, 1, 3, -4, 4$, которым соответствуют зоны

Найквиста с номерами 2, 3, 7, 8, 9. Для четвертого отрицательного и четвертого положительного образов наблюдается существенное увеличение амплитуды гармоник, если сравнивать огибающие спектров выходных сигналов в режимах NRZ и RFZ3. Выигрыш может составлять от 12 дБ до 25 дБ в зависимости от значения основной синтезируемой частоты в первой зоне Найквиста. Режим RFZ4 оказывается наиболее эффективным для образов основной частоты с номерами $n = -1, 1, -3, 3, -5, 5$. Его использование позволяет увеличить амплитуду гармоник на 10-20 дБ, особенно для пятого положительного и пятого отрицательного образов при низких значениях основной синтезируемой частоты (до 15% от частоты f_T тактового сигнала).

Также результаты исследования показали, что применение предлагаемых режимов для синтеза сигналов в восьмой и девятой зонах Найквиста (т.е. вблизи частоты $4f_T$) позволяет, теоретически, увеличить амплитуды гармоник до 20 дБ и более при низких значениях (до 15% от частоты тактового сигнала) основной синтезируемой частоты.

На основании полученных результатов была разработана дискретная модель быстродействующего ЦАП [7]. Данная модель может использоваться для изучения различных режимов работы быстродействующих ЦАП, для выбора оптимальных параметров цифро-аналогового преобразователя при синтезе широкополосных сигналов, для определения параметров фильтра на выходе ЦАП.

Литература

1. Kuckreja Ajay, Ostrem Geir, "High-Speed DACs ease transmitter designs," *Microwave & RF*, August 2010.
2. High Speed D/A Converters ≥ 30 MSPS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html>
3. Храмов К.К., Ромашов В.В. Сравнительный анализ режимов работы быстродействующих ЦАП // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2018, № 4. С.44-54.
4. V V Romashov, A N Doktorov, K A Yakimenko and K K Khramov Development of technology of high-speed digital-to-analogue converters to improve the efficiency of direct digital synthesis of radio-frequency signals, *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2094 (2021) 022067 DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022067.
5. Chen S.Y.-S, Kim N.S., Rabaey J.M. Multi-mode sub-nyquist rate digital-to-analog conversion for direct waveform synthesis, 2008 IEEE Workshop on Signal Processing Systems, SiPS: Design and Implementation. Article number 4671747. Pp 112-117. Washington, DC, 8 October 2008 - 10 October 2008. DOI: 10.1109/SIPS.2008.4671747.
6. Wei-Hsin Tseng, Chi-Wei Fan, and Jieh-Tsorng Wu, A 12-Bit 1.25-GS/s DAC in 90 nm CMOS With >70 dB SFDR up to 500 MHz, *IEEE Journal Solid-State Circuits*, Vol. 46, No. 12, December 2011.
7. Khramov K.K., Romashov V.V. "Operational modes of high-speed DACs: analysis and mathematical modeling," *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1096, Issue 1, 2019, p. 012158. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012158.