

УДК 527.624

Специальные режимы изменения огибающей спектра выходного сигнала быстродействующих цифроаналоговых преобразователей для прямого цифрового синтеза высокочастотных сигналов

Сочнева Н.А.

Показана эффективность использования образов основной частоты (копий спектра сигнала) для повышения выходной частоты формирователей сигналов. Проведен обзор режимов работы быстродействующих ЦАП. Приведены режимы восстановления NRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2, RFZ3 и RFZ4 и их огибающие спектра выходного сигнала. Выполнен анализ величин амплитуд образов в каждом из приведенных режимов по сравнению с нормальным режимом работы NRZ.

Ключевые слова: Цифровой формирователь сигналов, быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), образы основной частоты, фазовый шум, режим восстановления.

Увеличение выходной частоты (освоение все более высокочастотных диапазонов) и снижение уровня фазовых шумов способствует развитию техники формирования высокочастотных сигналов. Все это позволяет использовать сложные методы модуляции и расширять полосу частот для увеличения количества передаваемой информации, повышения тактико-технических характеристик радиосистем. При этом во всех современных формирователях сигналов используются цифровые синтезаторы, позволяющие организовать сетку частот и быстрое переключение выходного сигнала в пределах данной сетки частот. Особые требования к синтезаторам частот предъявляют современные радиосистемы с цифровыми антенными решетками и технологией Massive MIMO, работа которых основана на использовании когерентных сигналов с низким уровнем фазовых шумов; эффективное создание данных сигналов возможно прежде всего с помощью прямого цифрового синтеза.

Основной проблемой традиционного прямого цифрового синтеза является то, что основная частота выходного сигнала данных синтезаторов может быть не более 45% от тактовой частоты.

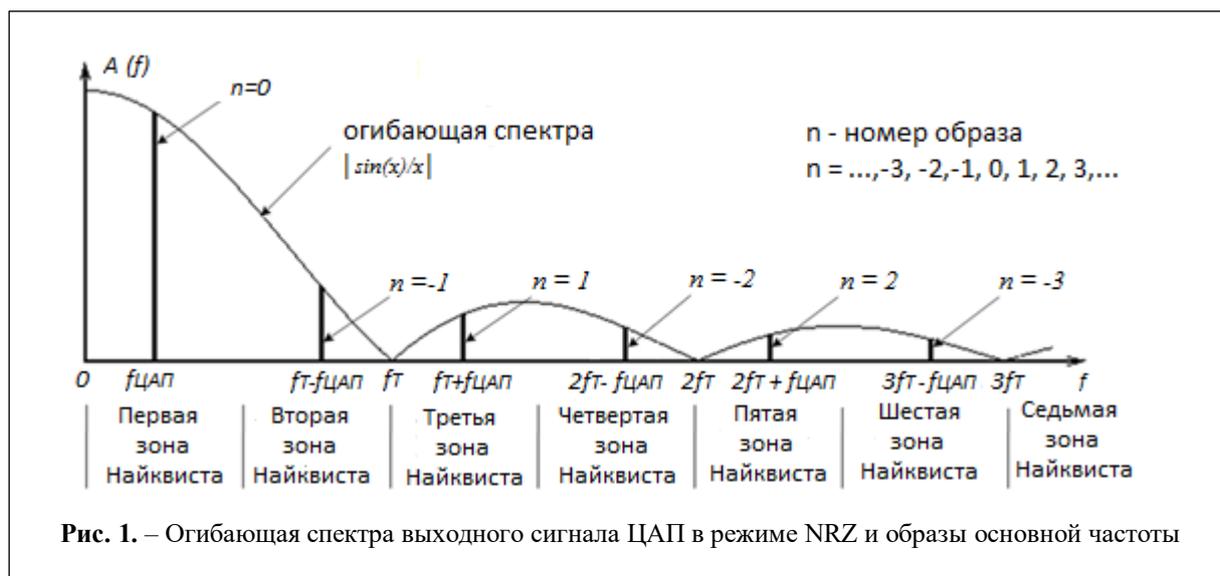
Одним из перспективных методов решения данной проблемы является применение образов основной частоты (копий спектра сигнала), появляющихся в результате явления дискретизации при восстановлении аналогового сигнала на выходе ЦАП. Повысить эффективность применения образов основной

частоты можно с помощью применения различных режимов работы быстродействующих ЦАП. При этом можно увеличить амплитуду гармоники образа, то есть эквивалентно снизить отношение шум/сигнал, что приведет к уменьшению уровня фазовых шумов.

Рассмотрим основные режимы работы быстродействующего ЦАП, входящего в состав цифрового формирователя сигналов.

1. Нормальный режим работы (non-return-to-zero (NRZ)). На рис. 1 представлена частотная характеристика цифро-аналогового преобразователя в режиме работы NRZ. Во время одного периода тактового сигнала поддерживается одинаковый уровень выходного сигнала, определяемый цифровым кодом и подключенными к выходу эталонными источниками тока или напряжения. На следующем периоде тактового сигнала по восходящему фронту происходит переключение на другое значение цифрового кода, обновленное на цифровом входе ЦАП. Возврата к нулю между импульсами восстановления нет [1].

Можно увидеть, что максимум частотной характеристики находится в первой зоне Найквиста. Расположенная в ней гармоника называется основной частотой. В работах [2-7] вводится ее обозначение как $f_{цвс}$ для выходных сигналов цифровых вычислительных синтезаторов или $f_{цап}$ для выходных сигналов быстродействующих ЦАП. Аналогично коэффициенты передачи по частоте можно записать формулами $K_{цвс} = f_{цвс} / f_T$ и $K_{цап} = f_{цап} / f_T$ соответственно.



В высших зонах Найквиста располагаются гармоники, получившие названия образов основной частоты. Образы, расположенные в нечетных зонах, например, в 3-й, 5-й и т.д. называются положительными, а в четных – отрицательными. Номера образов обозначаются в соответствии с ближайшим кратным значением частоты тактового сигнала [8].

Исследования показали, что использование образов вместо основной гармоники способно повысить частоту формируемого сигнала. Однако в режиме работы NRZ не рекомендуется использовать образы, расположенные в высших зонах Найквиста, так как в этом случае огибающая частотной характеристики $(\sin x)/x$ вызывает уменьшение амплитуды образов. Данная особенность режима работы NRZ формулирует основную задачу при разработке новых высокочастотных ЦАП – изменение частотной характеристики ЦАП для увеличения амплитуды гармоник образов. Для достижения данной цели проводятся работы по созданию специальных режимов работы ЦАП, отличающихся от режима NRZ другой формой импульсов восстановления [1].

2. Режим работы ЦАП с возвратом к нулю (return-to-zero, RZ) [9-10]. Огибающая спектра выходного сигнала ЦАП в режиме RZ также представляется функцией $(\sin x)/x$, но нули функции расположены на частотах, кратных $2f_{\text{CLK}}$. Преимущество режима RZ заключается

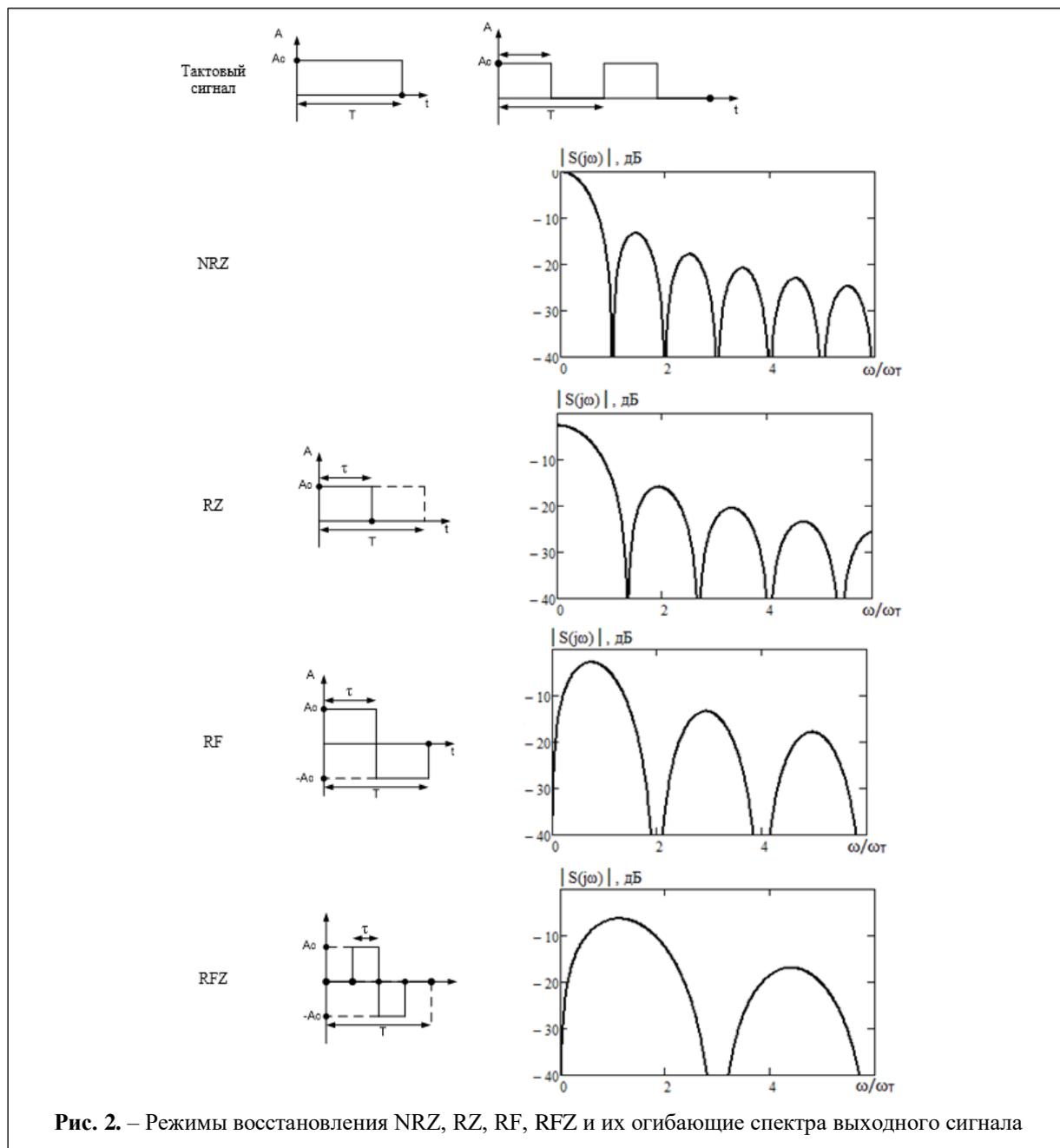
в том, что увеличивается амплитуда гармоники образа с $n=-1$ во второй зоне Найквиста.

3. Режим работы ЦАП с использованием биполярных импульсов (RF). При его реализации каждый тактовый импульс режима NRZ представляется двумя разнополярными импульсами длительностью $\tau=T/2$. Режим радиочастоты RF является оптимальным для работы на высокой частоте выходного сигнала, во второй и третьей зонах Найквиста.

4. Режимы работы ЦАП с использованием двухполярных импульсов с возвратом к нулю (RFZ, RFZ2). Сокращение длительности двухполярных импульсов для режима RF приводит к созданию нового режима RFZ [10]. В данном режиме область первого нуля функции $(\sin x)/x$ расположена возле $4f_s$. Режим RFZ2 создан путем изменения последовательности импульсов. Форма огибающей спектра в данном режиме похожа на огибающую для режима RF, только уменьшается ширина областей с нулевым значением [1].

Далее приводятся новые режимы работы ЦАП. Данные режимы работы способны увеличить частоту формируемых колебаний с сохранением значения соотношения сигнал/шум путем увеличения амплитуды образов основной частоты в высших зонах Найквиста.

5. Режим работы с использованием двух биполярных импульсов (RF2). В данном режиме время периода дискретизации делится



на восемь частей, соответственно длительность импульсов и интервалов между ними составляет $1/8 T_s$.

6. Режим работы RFZ3. Сигнал RFZ3 представляет собой последовательность импульсов разной полярности. Всего на интервале T размещены две последовательности импульсов. Два положительных импульса на одной половине тактового интервала и два отрицательных импульса – на второй половине тактового интервала. Длительности импульсов и расстояние между ними одинаковы и равны

$\tau = \frac{T}{8}$. Расположение импульсов и огибающая спектра выходного сигнала приведены на рис. 2.

7. Режим работы RFZ4. Данный режим получен из режима работы RFZ3 изменением положения отрицательных импульсов на сдвиг равный $\tau = \frac{T}{8}$. Временная диаграмма выходного сигнала в режиме RFZ4 и огибающая спектра выходного сигнала приведены на рис. 2.

Все перечисленные режимы восстановления и их огибающие спектра выходного сигнала приведены на рис. 2 и рис.3.

Проанализировав полученные графические зависимости можно сделать следующие выводы:

1) В режиме работы RZ наиболее эффективным будет использование первого положительного, первого отрицательного, третьего положительного и третьего отрицательного образов – так как их уровень возрастает на 12-15 дБ по сравнению с режимом работы NRZ. Это позволяет использовать эти образы для формирования сигнала с такой же амплитудой, но с частотой, большей основной на порядок и более. Кроме того, выигрыш по

уровню фазового шума должен составить примерно 12- 15 дБ.

2) В режиме работы RF уровни первого положительного, первого отрицательного, третьего положительного и третьего отрицательного образов возрастают относительно несущей до 10 дБ. Это также позволяет эффективно использовать их для формирования сигнала с меньшим уровнем фазовых шумов.

3) RFZ режим при сокращении длительности импульсов восстановления позволяет расширять лепестки огибающей относительно режима RF и сместить ноль функции в область значений $3f_T$. Это повышает эффектив-

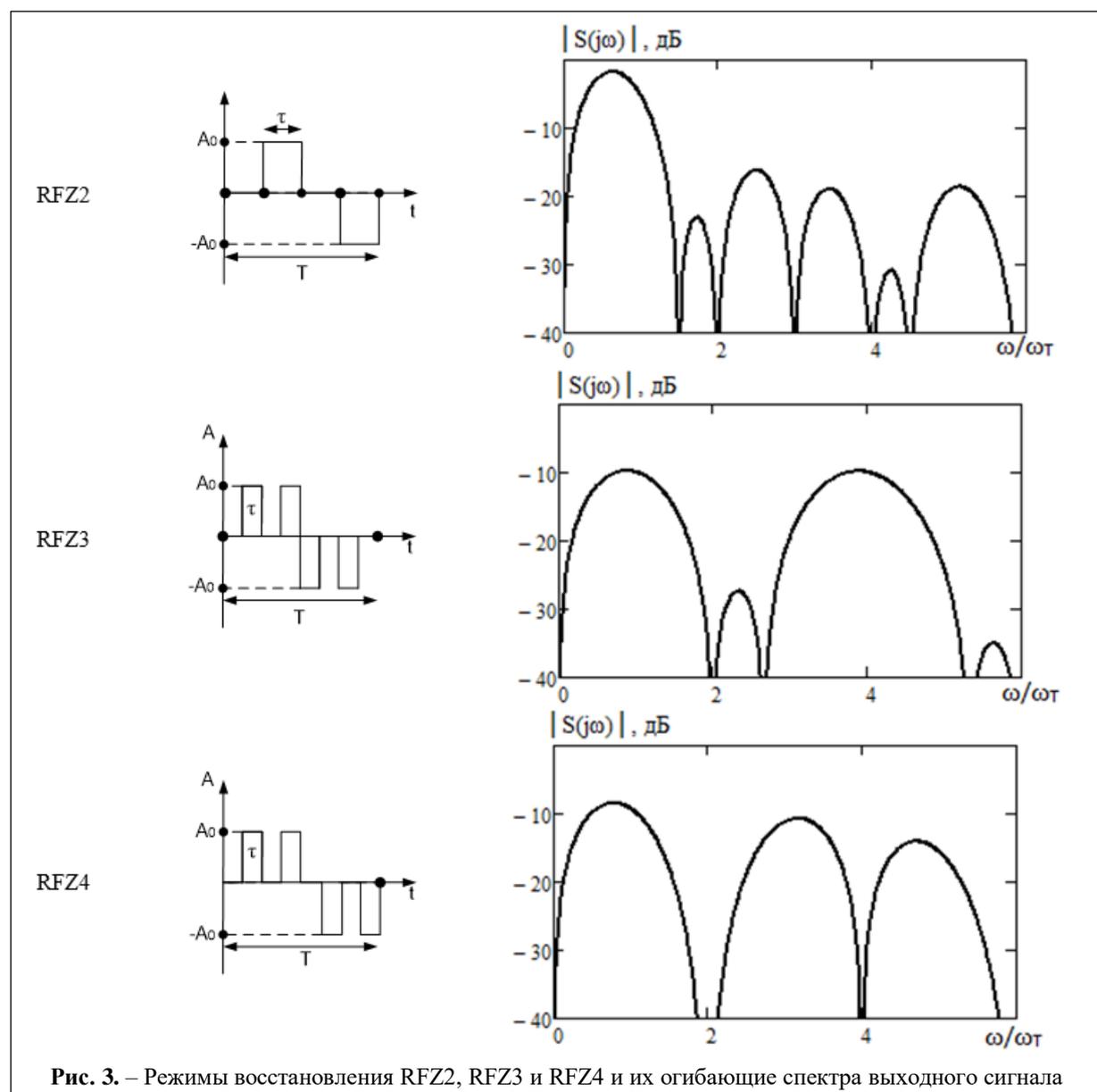


Рис. 3. – Режимы восстановления RFZ2, RFZ3 и RFZ4 и их огибающие спектра выходного сигнала

ность синтеза гармоник второго отрицательного и второго положительного образов в четвертой и пятой зонах Найквиста.

4) RFZ2 наиболее эффективен для синтеза гармоник образов при $n = +2, -3, -4, -5$ для больших

$$K_{\text{ЦАП}} = f_{\text{ЦАП}} / f_{\text{T}}$$

5) Наиболее эффективным в режиме работы RFZ3 будет использование четвертого положительного и четвертого отрицательного образов. По сравнению с режимом работы NRZ выигрыш может составить от 12 до 25 дБ.

6) В режиме работы RFZ4 наблюдается увеличение амплитуды образов со следующими номерами: первого отрицательного, первого положительного, третьего отрицательного, третьего положительного, пятого отрицательного и пятого положительного. Наибольшее увеличение амплитуды (до 20 дБ) наблюдается у пятого отрицательного и пятого положительного образов.

Результаты исследования специальных режимов работы ЦАП показали, что их применение действительно способно увеличить частоту формируемых колебаний с сохранением значения соотношения сигнал/шум путем увеличения амплитуды образов основной частоты в высших зонах Найквиста. Разработка и исследование предлагаемых и других новых специальных режимов восстановления импульсов в быстродействующих цифроаналоговых преобразователях позволит усовершенствовать существующие и создать новые виды цифровых формирователей с большей рабочей частотой, приемлемым уровнем фазовых шумов, пригодные для эффективного цифрового синтеза когерентных сигналов современных телекоммуникационных, радиолокационных систем, использующих методы пространственно-временного разделения каналов связи, зондирования и сопровождения целей и увеличения скорости передачи информации в системах связи пятого поколения.

Литература

1. Romashov V.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A., Doktorov A.N. 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 Том 2094 (2021) Номер статьи 022067 III International Scientific Conference APITECH III 2021 Applied Physics, Information Technologies and Engineering, 2021 Krasnoyarsk, Russia, 24 September - 3 October. DOI:10.1088/1742-6596/2094/2/022067

2. Ромашов, В.В. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образах основной частоты / В.В. Ромашов, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. - No2 – С.13-17.

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

4. Ромашов, В.В. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов на образах основной частоты / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиопромышленность. – 2012. - No2. – С.38 – 48.

5. Ромашов, В.В. Моделирование шумовых характеристик новых интегральных цифровых вычислительных синтезаторов компании Analog Devices / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. - N2 – С.26-33.

6. Ромашов, В.В. Образы основной частоты ЦВС в гибридном методе синтеза / В.В. Ромашов, К.А. Якименко, А.Н. Докторов // X Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН. – 21-23 ноября 2016 г. – 390 с.

7. Докторов, А.Н. Математическое моделирование шумовых характеристик радиосистем с цифровыми вычислительными синтезаторами на образах основной частоты / А.Н. Докторов // Научный потенциал молодежи – будущее России. VI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Муром, 25 апр. 2014 г.– Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2014. – С. 432-434

8. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The Use of Images of DDS in the Hybrid Frequency Synthesizers // 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014, pp. 302-303. DOI 10.1109/CRMICO.2014.6959404

9. High-Speed DACs [Электронный ресурс]: сайт компании MaximIntegrated, 2017. URL: <https://para.maximintegrated.com/en/results.mvp?fam=hsdacs&tree=master>

10. High Speed DAC [Электронный ресурс]: сайт компании Analog Devices, Inc., 2017. URL:

<http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html>

11. Kuckreja Ajay, OstremGeir, "High-Speed DACs ease transmitter designs," *Microwave & RF*, August 2010.

12. Kroupa V.F. *Direct Digital Frequency Synthesizers*. 1998. John Wiley & Sons, Ltd. 396 с.

Поступила 12 марта 2021 г.

The efficiency of using fundamental frequency images (copies of the signal spectrum) to increase the output frequency of signal generators is shown. A review of the operating modes of high-speed DACs is carried out. The recovery modes NRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2, RFZ3 and RFZ4 and their envelopes of the output signal spectrum are given. The analysis of the values of the amplitudes of the images in each of the above modes is performed by comparison with the normal operating mode of NRZ.

Key words: digital signal generator, high-speed digital-to-analog converters, images of the fundamental frequency, phase noise, recovery mode.

Сочнева Наталья Александровна – аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru.

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