

# Методы и устройства повышения качества передачи информации

УДК 527.624

## Применение цифро-аналогового преобразователя с дельта-сигма модуляцией для формирователей высокочастотных сигналов

Матерухин С.Е.

В данной работе описаны основные методы, применяемые для увеличения выходной частоты и улучшения шумовых характеристик цифровых формирователей сигналов. Рассмотрены принципы, на которых основана дельта-сигма модуляция. Оценена возможность применения цифро-аналоговых преобразователей с дельта-сигма модуляцией для увеличения выходной частоты сигнала и соотношения сигнал/шум.

**Ключевые слова:** Цифровой формирователь сигналов, сигма-дельта модуляция, ЦАП, шумовые характеристики.

Устройства формирования радиосигналов, построенные на основе прямого цифрового синтеза, в настоящее время получили широкое распространение в технике радиосвязи, радиолокации и навигации, телекоммуникационной, измерительной и медицинской аппаратуре.

Основой таких устройств являются цифровые вычислительные синтезаторы, реализующие прямой цифровой синтез, когда из базового тактового высокостабильного сигнала методом цифровой обработки создаётся поток цифрового кода, определяющий амплитуду, частоту и фазу синтезируемого аналогового сигнала (рис. 1). Основой ЦВС яв-

ляются цифро-аналоговые преобразователи [1].

Основными преимуществами ЦВС перед другими методами синтеза являются [2]:

- цифровая обработка позволяет существенно повысить точность и качество синтезируемого сигнала, в результате чего частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны;
- высокое разрешение по частоте и фазе, управление которыми осуществляется в цифровом виде;
- быстрый переход на новую частоту (или фазу), перестройка по частоте без разрыва фазы, выбросов и других аномалий, связан-

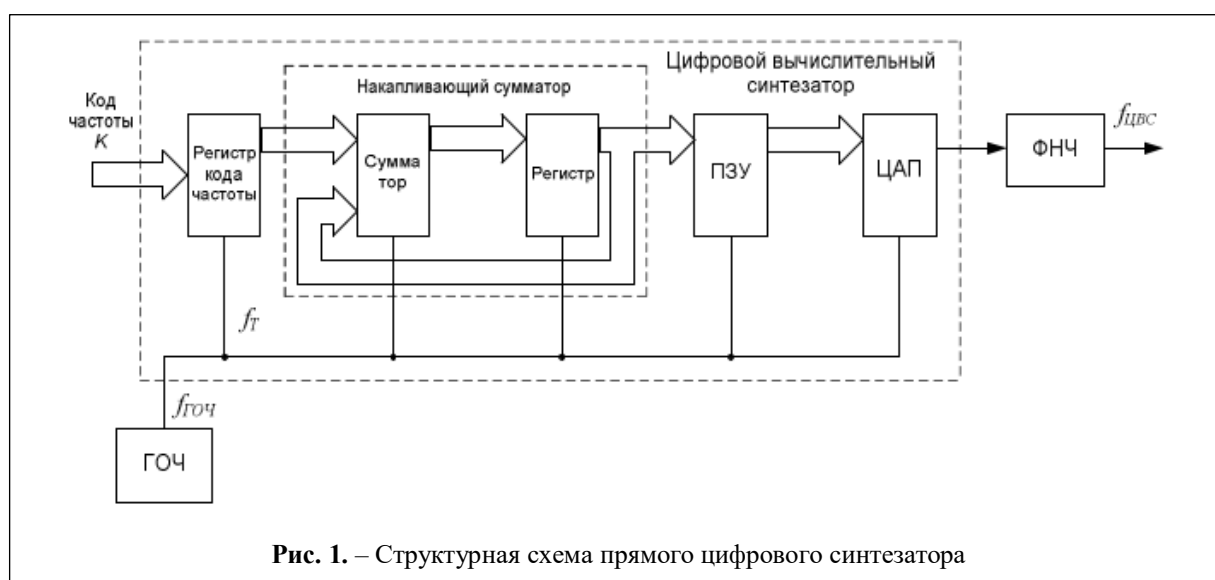


Рис. 1. – Структурная схема прямого цифрового синтезатора

ных с переходными процессами;

- архитектура устройств, основанная на ЦВС, исключает необходимость применения точной подстройки опорной частоты ввиду крайне малого шага перестройки синтезатора,

- цифровой интерфейс позволяет легко реализовать микроконтроллерное управление;

- ЦВС практически не подвержены температурному дрейфу и старению элементов. Единственным элементом, который обладает свойственной аналоговым схемам нестабильностью, является ЦАП;

- архитектура ЦВС позволяет значительно снизить затраты на их изготовление.

К основным недостаткам ЦВС, ограничивающим их применение в настоящий момент, относят предел синтезируемой частоты в 1500-3500 МГц и наличие в спектре синтезируемого сигнала дискретных паразитных спектральных составляющих [2].

- увеличение выходной частоты с помощью дискретных умножителей частоты на транзисторах;

- увеличение выходной частоты с помощью выходного умножителя на петле ФАПЧ;

- увеличение выходной частоты с помощью образов основной частоты ЦВС;

- построение ЦВС на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, работающих в специальных режимах работы;

- использование новых методов построения генераторов опорной частоты (ГОЧ).

Использование высших зон Найквиста (образов основного сигнала) для формирования высокочастотных сигналов с применением высокочастотных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) известно и отражено в ряде работ зарубежных и отечественных авторов. Для увеличения амплитуд соответствующих образов применяются специальные режимы работы ЦАП, что приводит к

существенному усложнению схем формирования [3].

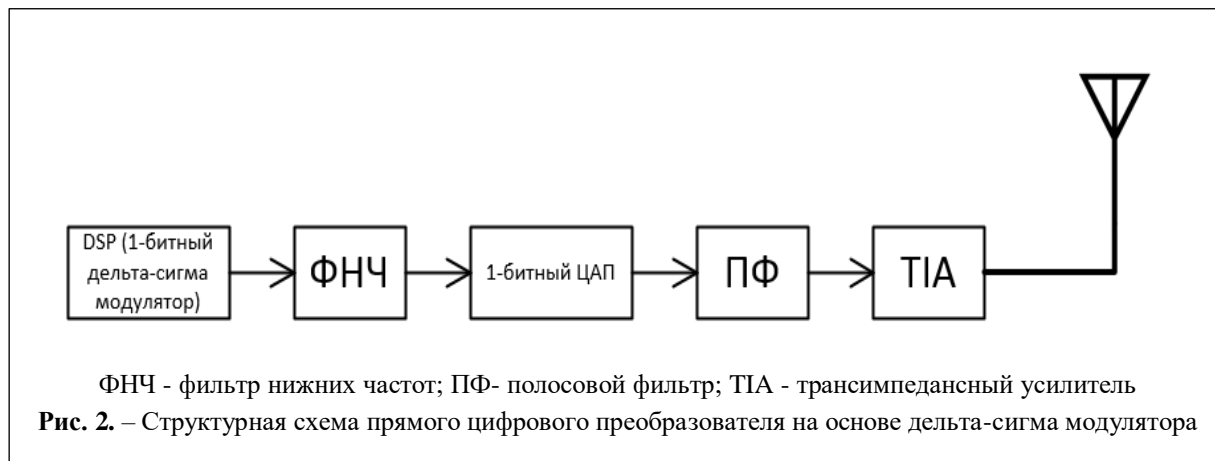
Поэтому в последние годы появились публикации, в которых предлагается использовать высшие зоны Найквиста ЦАП с дельта-сигма модуляцией. Данная идея была реализована в работах Masafumi Kazuno, Noriharu Suematsu и некоторых других авторов, и является весьма перспективной. Применение однобитного ЦАП с дельта-сигма модуляций позволяет исключить шумы квантования.

Delta-sigma модуляция ( $\Delta\Sigma$ ) это метод кодирования аналоговых сигналов с преобразованием их в цифровую форму, что обычно делают аналого-цифровые преобразователи, АЦП (ADC). Принцип дельта-сигма также используют для преобразования высокоразрядных, низкочастотных цифровых сигналов в высокочастотные, низкоразрядные - как часть преобразования цифровых сигналов в аналоговые, что применяется в цифро-аналоговых преобразователях, ЦАП (DAC).

В дельта-сигма модуляции точность модуляции улучшается путем пропускания цифрового вывода через 1-битный ЦАП и добавлением (sigma) полученного аналогового сигнала к входному сигналу (тому, который имеется перед delta-модуляцией), тем самым уменьшая ошибку, которая вводится delta-модуляцией [4].

Дельта-сигма ЦАП кодирует входной цифровой сигнал высокого разрешения в сигнал низкого разрешения, но на высокой частоте выборки, который отображается на напряжения, и затем сглаживается аналоговым ФНЧ. Временное использование сигнала низкого разрешения упрощает проектирование схем и повышает эффективность.

Рассмотрим структурную схему прямого цифрового преобразователя на основе дельта-сигма модулятора (рис.2) предложенную в работах Masafumi Kazuno, Noriharu Suematsu [5].



Основным преимуществом этой архитектуры передатчика заключается в том, что гетеродин и смеситель могут быть удалены. Таким образом, его легко реализовать из-за меньшего размера и меньшего энергопотребления. Но существует ограничение максимальной частоты выходного сигнала, исходящее из предела Найквиста, равного половине частоты дискретизации.

Для того, чтобы генерировать гораздо более высокую частоту, чем предел Найквиста, возможно использование прямого цифрового приемопередатчика, который использует изображение более высокого порядка на выходе ЦАП с 1-разрядным дельта-сигма модулятором и уже продемонстрировал возможность прямого цифрового радиочастотного приемопередатчика в диапазоне 26 ГГц с использованием 8 Гбит/с [5].

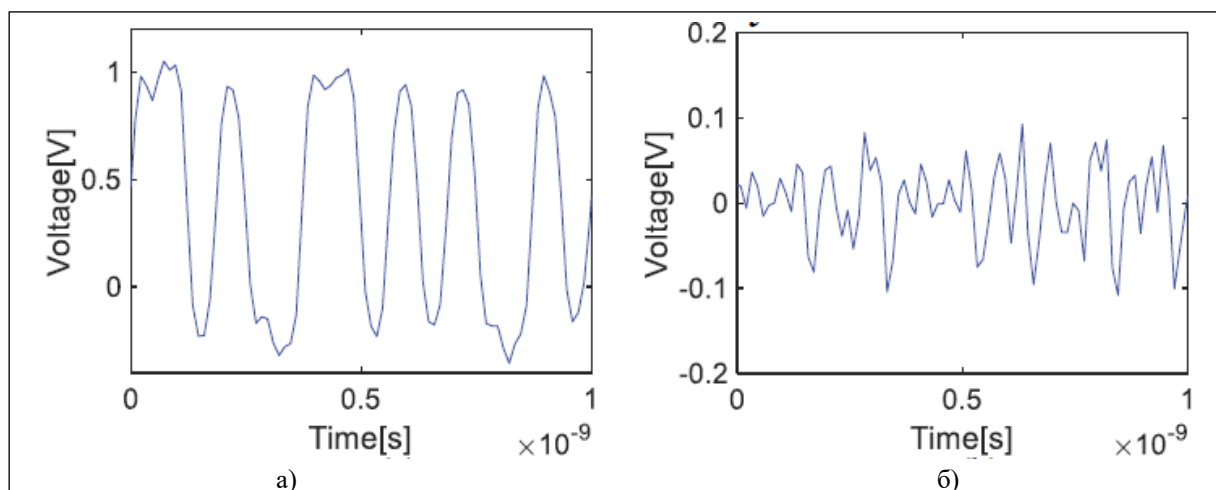
Для улучшения (усиления /повторной генерации) образов сигнала более высокого

порядка с фильтром нижних частот можно использовать 1-битный ЦАП. Этот ЦАП будет подключен к выходу лавинного фотодиода (APD)/усилителю трансимпеданса (ТИА) оптоволоконной линии связи

На рис. 3 представлены результаты измерений входного (а) и выходного (б) сигналов прямого цифрового приемопередатчика.

На рис.3(а) видно, что по сравнению с идеальным квадратурным сигналом входной сигнал, генерируемый генератором импульсной диаграммы направленности, имеет явные потери на высокой частоте. На рис.3 (б) можно наблюдать более высокочастотные компоненты с более высоким уровнем мощности, что, в принципе, означает усиление сигнала на образцах. Максимальная амплитуда выходного сигнала намного меньше входного.

Рассмотрим спектр входного и выходного сигнала полученных [5] (рис.4). Н рис.4,



**Рис. 3.** – Входной (а) и выходной (б) сигналы прямого цифрового приемопередатчика

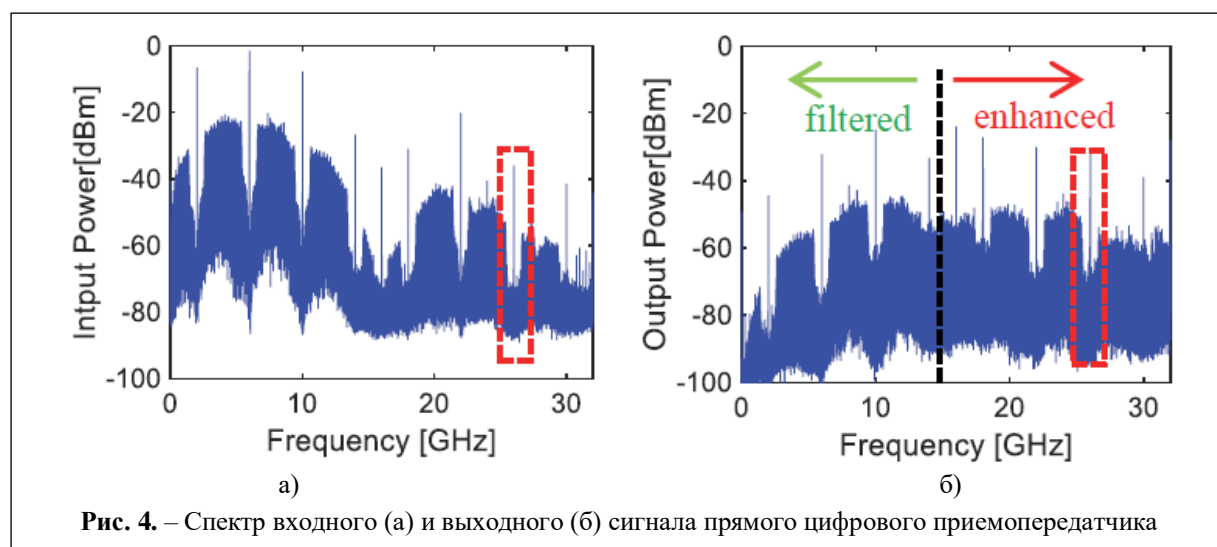


Рис. 4. – Спектр входного (а) и выходного (б) сигнала прямого цифрового передатчика

видно, что сигнал низкой частоты ниже 15 ГГц фильтруется, а сигнал в районе 7-й зоны Найквиста (26,01 ГГц) усиливается.

На рис.5 (а) и (б) изображен спектр сигнала в 7-й зоне Найквиста (26,01 ГГц). Рас-

высокого порядка из компонентов сигнала низкого порядка. Представленный ЦАП успешно улучшает выходную мощность и отношение сигнал/шум в 7-й зоне Найквиста (26,01 ГГц) около 4,6 дБ и 6,1 дБ соответ-

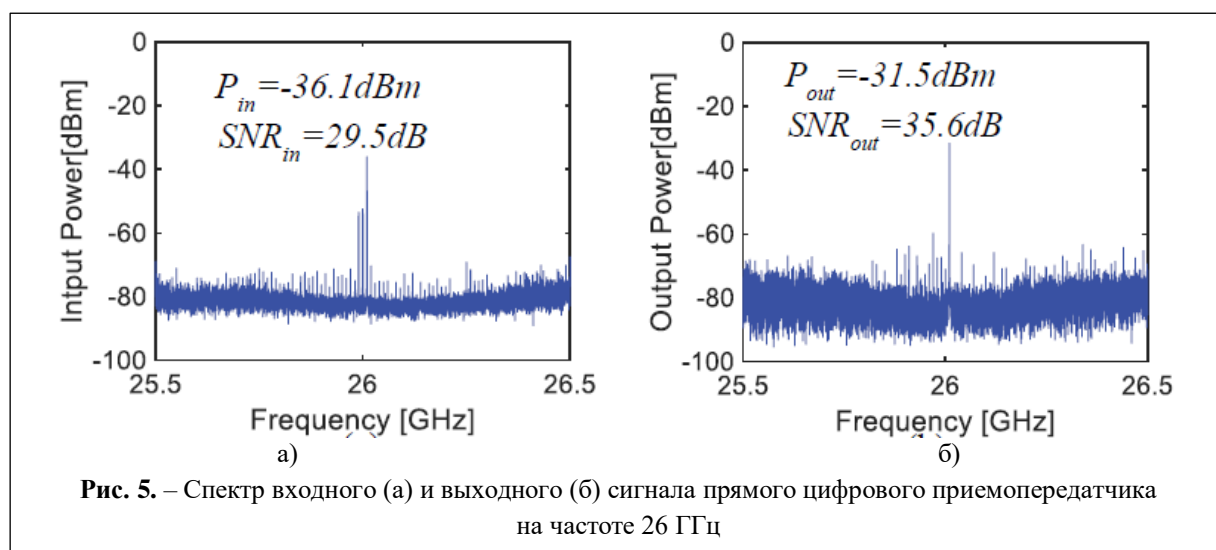


Рис. 5. – Спектр входного (а) и выходного (б) сигнала прямого цифрового передатчика на частоте 26 ГГц

сматриваемый 1-разрядный ЦАП с дельта-сигма модуляцией отображает изображение с частотой 26 ГГц повышая мощность сигнала на 4,6 дБ и улучшая его отношение сигнал/шум на 6,1 дБ.

Таким образом, 1-разрядный ЦАП для прямого цифрового радиочастотного передатчика, в котором используется 1-разрядный дельта-сигма модулятор, позволяет улучшать мощность выходного сигнала и его отношение сигнал/шум. Так, 1-разрядный ЦАП представленный университетом Тохоку [5] может улучшать образы

ственно. В условиях модулированного сигнала он достигает 4,3 дБ и 5,5 дБ улучшения выходной мощности и SNR.

### Литература

1. Опорный генератор для СЧ и ВЧ синтезаторов радиочастот [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cqf.su/technics/technics4-2.html>, свободный – (10.01.2022)
2. Устройства генерирования и формирования сигналов [Электронный ресурс]: научно образоват. модуль в системе дистанц. обучения Moodle / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. С. А. Гудков, А. А. Поту-

динский. - Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

3. 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 ISSN 2221-2574.

4. Махлин Александр Дельта-сигма модуляция: назад в будущее // Компоненты и Технологии. 2010. №112. С.154-158

5. J. Zhang, M. Kazuno, M. Motoyoshi, S. Kamada and N. Suematsu, "A 26GHz-Band Image Enhancement Type 1-Bit DAC for Direct Digital RF Modulator," 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2018, pp. 479-481, doi: 10.23919/APMC.2018.8617154.

**Поступила 25 сентября 2021 г.**

---

This paper describes the main methods used to increase the output frequency and improve the noise characteristics of digital signal generators. The principles on which delta-sigma modulation is based are considered. The possibility of using digital-to-analog converters with delta-sigma modulation to increase the output frequency of the signal and the signal-to-noise ratio is evaluated.

*Key words:* Digital signal generator, sigma-delta modulation, DAC, noise characteristics.

---

*Матерухин Сергей Евгеньевич* – аспирант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* materukhin.sergey@mail.ru.

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