
Анализ сигналов и систем

УДК 621.396

Цифро-аналоговые преобразователи с дельта-сигма модуляцией для систем связи пятого поколения

Матерухин С.Е.

В данной работе описаны основные методы построения цифроаналоговых преобразователей на основе дельта-сигма модуляции. Рассмотрены принципы, на которых основана дельта-сигма модуляция. Описаны структура и принцип работы цифроаналоговых преобразователей. Рассмотрены особенности построения основных блоков. Оценена возможность применения цифро-аналоговых преобразователей с дельта-сигма модуляцией для увеличения выходной частоты сигнала и соотношения сигнал/шум.

Ключевые слова: 5G, цифровой формирователь сигналов, дельта-сигма модуляция, ЦАП, шумовые характеристики.

В настоящее время весь мир переходит к новому поколению систем связи (5G).

В сетях 5G планируется работа неограниченного количества устройств, начиная от бытовой техники и заканчивая автомобильной промышленностью и сельским хозяйством. Однако для качественной работы беспроводных сетей нового поколения необходимо серьезное улучшение их основных параметров: увеличение скорости передачи данных, увеличение ёмкости сетей и уменьшение задержек передачи

В существующей системе связи четвертого поколения 4G в базовой станции имеется с десятков портов для антенн, обрабатывающих весь трафик: восемь работают на передачу и четыре на прием. Для систем связи 5G базовые станции должны поддерживать около сотни портов и целый массив антенн. Это означает, что базовая станция сможет отправлять и принимать сигналы от колоссального количества пользователей одновременно, увеличивая пропускную способность мобильной сети в десятки и сотни раз. Эту задачу можно решить, используя технологию Massive MIMO. Технология Massive MIMO представляет собой усовершенствованную

технология MIMO для сети 5G. Эта технология подразумевает подключение к базовой станции сотни и тысячи антенн для увеличения пропускной способности и спектральной эффективности.

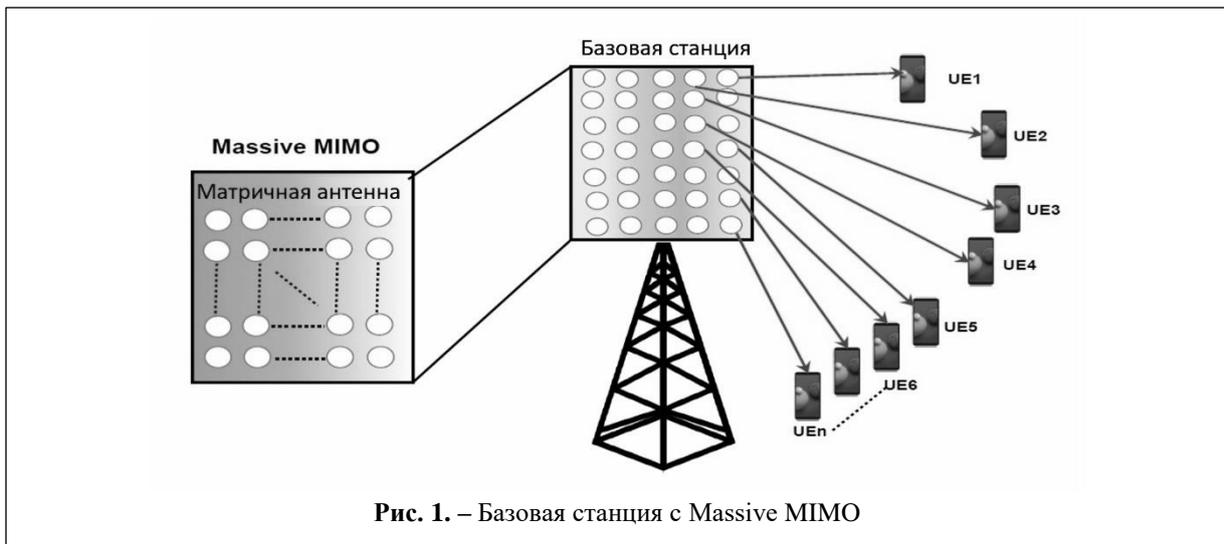
Рассмотрим основные особенности Massive MIMO:

- скорость передачи данных, технология считается одной из наилучших для получения высокой скорости беспроводной передачи данных на уровне гигабит в секунду.

- зависимость между частотой волны и размером антенны, наблюдается обратно пропорциональная зависимость друг другу (низкочастотных сигналов нужна антенна большего размера и наоборот).

- количество пользователей, для технологий предыдущего поколения одна сота состояла примерно из 10 антенн. В технологии 5G одна сота содержат в себе более 100 антенн. Следовательно, в соте одновременно можно подсоединить несколько пользователей, как показано на рис. 1.

Роль MIMO в 5G: Massive MIMO будет играть решающую роль в развёртывании



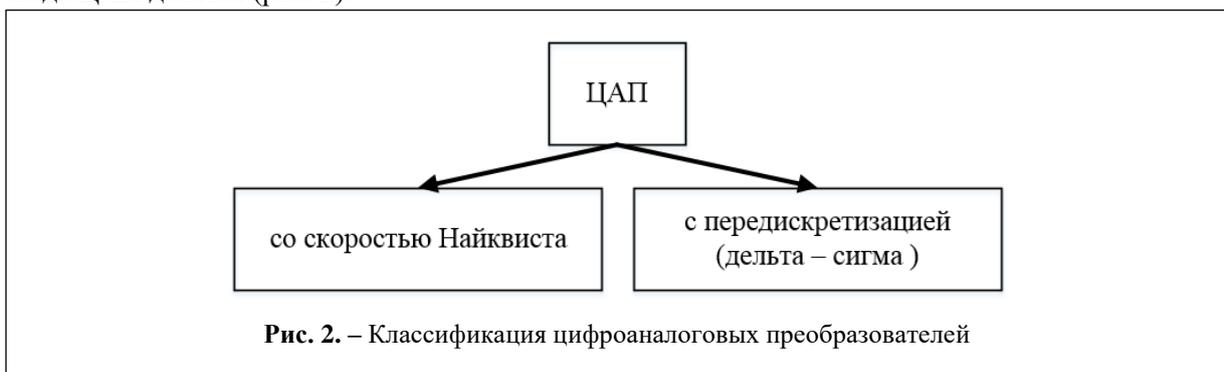
будущих сетей 5G, поскольку может быть обеспечена более высокая спектральная и энергоэффективность.

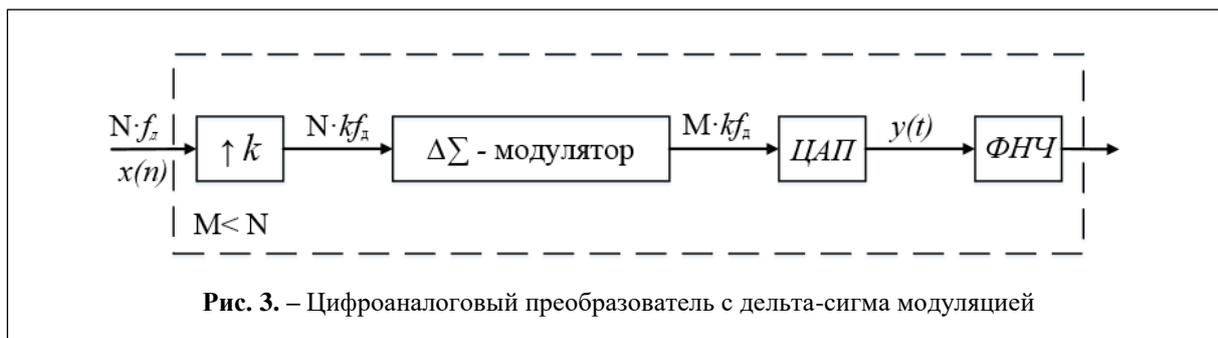
Важнейшей частью данной технологии является цифровая антенная решетка (ЦАР). Основу ЦАР составляет набор приемо-передающих модулей, одним из основных элементов которых является синтезатор сетки частот, от стабильности формируемой частоты которого во многом зависят тактико-технические характеристики всей телекоммуникационной системы в целом. Стабильность частоты формирователя оценивается спектральной плотностью мощности (СПМ) фазовых шумов в зависимости от частоты отстройки.

Неотъемлемой частью формирователя является цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), который формирует аналоговый сигнал из цифровой последовательности. По принципу работы, согласно соотношению частоты дискретизации и частоты обработки кода ЦАП делятся (рис. 2):

На вход цифровоаналогого N - разрядного преобразователя со скоростью Найквиста поступает N - разрядный код с частотой дискретизации f_d . ЦАП за период дискретизации T_d обрабатывает один отсчет и формирует выходной аналоговый сигнал. Полоса частот восстанавливаемых сигналов по формуле Найквиста равна половине частоты дискретизации [1].

Поэтому в последние годы рассматривается возможность использования высших зон Найквиста цифро-аналогого преобразователя (ЦАП) с дельта-сигма модуляцией. Данная идея представлена в работах Mike Shuo-Wei Chen, Masafumi Kazuno, Noriharu Suematsu и некоторых других авторов, и является весьма перспективной. Применение ЦАП с дельта-сигма модуляцией 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 высоко разрядных, низкочастотных цифровых сигналов в высокочастотные, низко разрядные - 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.

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

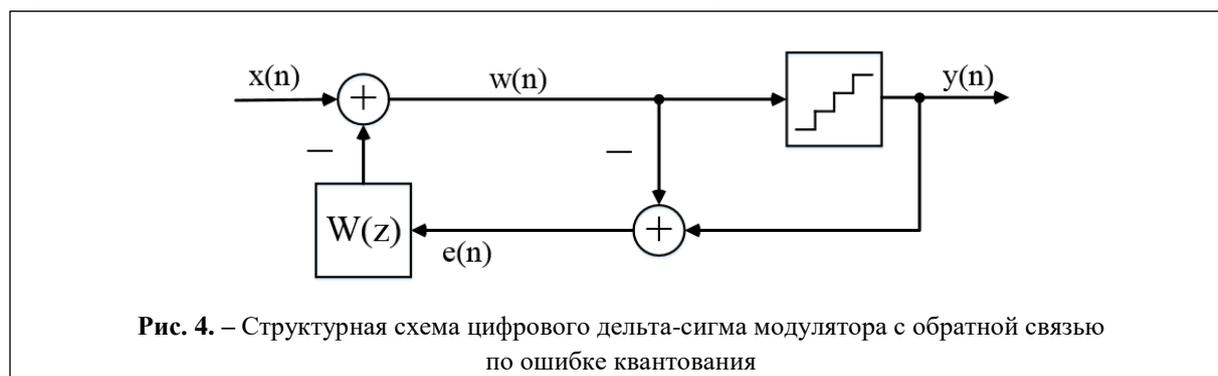
Рассмотрим структурную схему $\Delta\Sigma$ -ЦАП показанную на рис. 3.

Входной код поступает на вход передискретизатора, где его частота увеличивается в k раз. После этого код поступает на вход цифрового дельта-сигма модулятора, который формирует код более низкой разрядности M ($M < N$). Код подается на M разрядный ЦАП и преобразуется в аналоговый сигнал. Однако выходной сигнал помимо основной информационной составляющей содержит в себе шумы квантования дельта-сигма модулятора, которые могут быть отфильтрованы с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ).

Рассмотрим структурную схему цифрового дельта-сигма модулятора, используемого в цифро-аналоговых преобразователях. На рис. 4 [5] представлена структурная схема модулятора с обратной связью по ошибке. На вход блока дискретной во времени передаточной функции $W(z)$ поступает сигнал ошибки с квантователя $e(n)$. В этом случае порядок модулятора зависит от вида передаточной функции $W(z)$. Выходной сигнал дельта-сигма модулятора можно представить в виде:

$$y = x + (1-W(z)) \cdot e. \tag{1}$$

Примем:



$$W(z) = z^{-1} \quad (2)$$

Тогда выражение для дельта-сигма модулятора первого порядка, осуществляющего подавление шума квантования в низкой области частот принимает вид:

$$y = x + (1 - z^{-1}) \cdot e \quad (3)$$

Подавление шума квантования возможна не только в области низких частот для этого достаточно просто изменить передаточную функцию $W(z)$, k -порядок модулятора. [6].

Таблица 1. Передаточная функция $W(z)$ для различных областей частот

| Тип модулятора | Передаточная функция $W(z)$ |
|-----------------|-----------------------------|
| Низкочастотный | $1 - (1 - z^{-1})^k$ |
| Полосовой | $1 - (1 + z^{-2})^k$ |
| Высокочастотный | $1 - (1 + z^{-1})^k$ |

В дельта-сигма модуляторе может быть реализовано как одноразрядное там и многоразрядное квантование. Рассмотрим основные достоинства и недостатки одноразрядного квантования.

Достоинства:

- максимальная простота, используется одноразрядный ЦАП;
- в роли переключающей ячейки ЦАП может использоваться любое ключевое устройство.

Недостатки:

- невысокий порядок;
- высокий уровень шумов.

Избавиться от недостатков позволяет использование многокаскадного квантования:

- позволяет повышать порядок модулятора при этом сохраняя устойчивость;
- снижает уровень шумов;
- уменьшает требования к выходному фильтру.

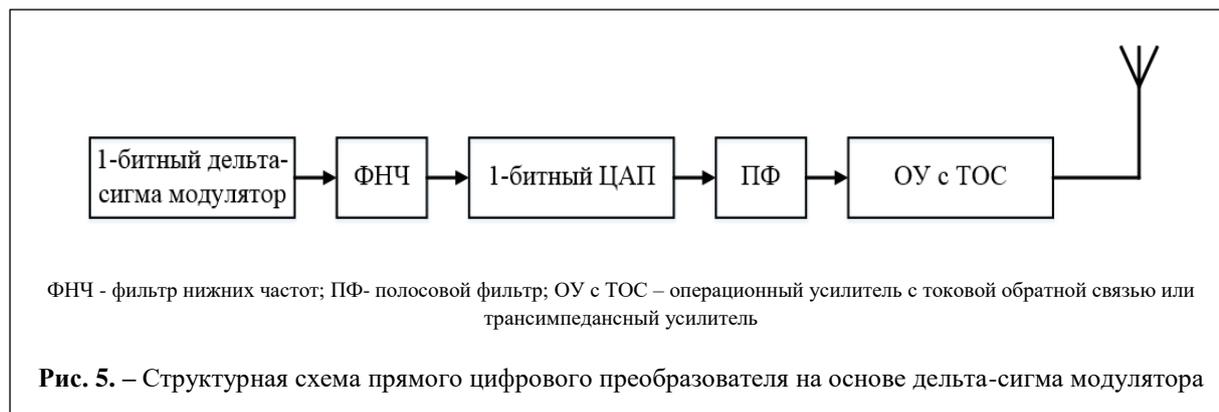
Основным недостатком является увеличение разрядности и усложнение структуры ЦАП.

Как правило, цифроаналоговый преобразователь, входящий в состав дельта-сигма ЦАП, является обычным ЦАП со скоростью Найквиста. И имеет те же принципы и подходы к разработке. Цифроаналоговый преобразователь может быть реализован по одной из следующих структур:

- бинарная – наиболее подвержена негативному влиянию отклонения взвешивающих элементов от номинального значения. Разрядность таких ЦАП ограничена;
- унарная – лишена недостатков бинарной структуры, однако требует большего количества управляющих сигналов.
- сегментная – компромиссное решение. Как правило здесь взвешивающие элементы расположены на одном кристалле.

В дельта-сигма ЦАП разрядность кода на входе базового ЦАП может быть равна от 1 до 10 бит. При разрядности выше 4 бит используются как бинарные, так и унарные структуры. При высоких разрядностях в основном используется сегментная структура.

Рассмотрим структурную схему прямого цифрового преобразователя на основе дельта-сигма модулятора



сигма модулятора (рис.5) предложенную в работах Masafumi Kazuno, Noriharu Suematsu [2].

У рассмотренных схем 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 который уже продемонстрировал возможность прямого цифрового радиочастотного приемопередатчика в диапазоне 26 ГГц [3].

Для улучшения (усиления) образов сигнала более высокого порядка с фильтром нижних частот можно использовать 1-битный ЦАП, подключенному к лавинному фотодиоду трансимпедансного усилителя.

Данный синтезатор 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. 1-разрядный ЦАП представленный университетом Тохоку [5] может улучшать образы 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 соответственно. В условиях модулированного сигнала он достигает 4,3 дБ и 5,5 дБ улучшение выходной мощности и SNR [7]. Что позволяет использовать формирователи сигналов на основе ЦАП с дельта-сигма модулятором в сетях 5G/

Таким образом, использование дельта-сигма модуляторов позволяет устранить ряд

Поступила 18 октября 2022 г.

недостатков характерных цифроаналоговым преобразователям со скоростью Найквиста.

1. Позволяет снизить разрядность ЦАП с сохранением динамических характеристик. Возможно понижение разрядности до единицы и использование для формирования выходного аналогового сигнала любого ключевого устройства.

2. Введение цифрового дельта-сигма модулятора для понижения разрядности ЦАП снижает и долю аналоговых блоков в устройстве.

3. Позволяет повысить частоту выходного сигнала наряду с увеличением соотношения сигнал/шум

Литература

1. Kroupa, V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. / V.F. Kroupa –New York: John Wiley & Sons, Ltd, 1998. – 396 с.

2. Kazuno, Masafumi & Motoyoshi, Mizuki & Kameda, Suguru & Suematsu, Noriharu. (2018). 26 Hz-Band Direct Digital Signal Generation by a Manchester Coding 1-Bit Band-Pass Delta-Sigma Modulator using It's 7th Nyquist Zone. 1-3. 10.1109/GSMM.2018.8439555.

3. J. Zhang, M. Kazuno, M. Motoyoshi, S. Kameda 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.

4. Pavan S., Schreier R., Temes G.C. Understanding Delta-Sigma Data Converters. N.Y.: IEEE, 2017.

5. De la Rosa J.M. Sigma-Delta Converters: Practical Design Guide. N.Y.: IEEE, 2018.

6. Енученко, М.С. Цифроаналоговые преобразователи на основе дельта-сигма-модуляторов / М.С. Енученко, А.С. Коротков // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67. – № 1. – С. 3-19. – DOI 10.31857/S003384942201003X. – EDN XYDMRT.

7. Матерухин С. Е. Применение цифро-аналогового преобразователя с дельта-сигма модуляцией для формирователей высокочастотных сигналов. Методы и устройства передачи и обработки информации, [S.l.], п. 23, р. 50-54, июня 2022. ISSN 2311-598X.

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

This paper describes the main methods for constructing digital-to-analog converters based on delta-sigma modulation. The principles on which the delta sigma module is based are considered. The structure and principle of operation of digital-to-analog converters are described. The features of the construction of the main blocks are considered. The possibility of using digital-analog converters with delta-sigma modulation to increase the output frequency of the signal and the signal-to-noise ratio is evaluated.

Key words: 5G, digital signal generator, delta-sigma 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, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.