

УДК 519.711.2

**Методы передискретизации использующиеся в дельта-сигма модуляторах систем связи нового поколения**

Матерухин С.Е.

В данной работе описаны основные методы передискретизации, применяемые для увеличения выходной частоты и улучшения шумовых характеристик дельта-сигма модуляторов. Рассмотрены принципы, на которых основана дельта-сигма модуляция. Оценена возможность применения основных методов передискретизации в дельта-сигма модуляторах для увеличения выходной частоты сигнала и соотношения сигнал/шум.

*Ключевые слова:* Дельта-сигма-модулятор нижних частот, дельта-сигма-модулятор на основе огибающей, полосовой дельта-сигма модулятор, 5G, шумовые характеристики, СПМ шума квантования.

В системах мобильной связи 5G и следующего поколения для увеличения скорости передачи данных, были внедрены: технология Massive MIMO - система с несколькими входами и несколькими выходами и метод агрегации несущих - метод, используемый для увеличения скорости передачи данных на одного пользователя, при котором одному и тому же пользователю назначается несколько частотных блоков. Максимально возможная скорость передачи данных на одного пользователя увеличивается тем, чем больше частотных блоков назначено пользователю. Суммарная скорость передачи данных ячейки также увеличивается из-за лучшего использования ресурсов. Для этого используют несколько передатчиков с широкополосной модуляцией сигнала, что приводит к увеличению в размерах оборудования. Более того, ожидается, что полоса пропускания сигнала модуляции превысит несколько 100 МГц при постоянно растущем количестве передатчиков. Поэтому важно решить проблемы миниатюризации передатчиков и подавления помех между несколькими высокочастотными аналоговыми цепями (аналоговый смеситель, гетеродин и т.д.).

Одноразрядные дельта-сигма модуляторы, использующие метод передискретизации, который помогает преобразовывать радиосигналы в высокоскоростную 1-битовую цифровую последовательность импульсов, позволяют решить данные проблемы. Одноразрядный цифровой радиочастотный передатчик может выводить данные непосредственно с

цифровых компонентов в виде высокоскоростной 1-разрядной цифровой последовательности импульсов со скоростью несколько Гбит/с и устраняет необходимость в аналоговых радиочастотных компонентах и их периферийных схемах и, таким образом, позволяет избежать создаваемых ими помех.

Рассмотрим структурную схему 1-разрядного дельта-сигма модулятора приведенную на рис.1. Основным блоком является блок дельта-сигма модуляции (ДСМ), который имеет контур отрицательной обратной связи. В состав контура входит петлевой фильтр (в англоязычной литературе loop filter), который формирует управляющее напряжение (или сигнал ошибки). В дополнение к блоку передискретизации так же используется 1-разрядный квантователь.

Входным сигналом  $\Delta\Sigma$  модулятора может быть любой сигнал с ограниченной полосой пропускания. Например, это может быть цифровой эквивалент сигнала основной полосы пропускания, т.е. немодулированный сигнал или модулированный радиочастотный сигнал. Выходной сигнал  $\Delta\Sigma$  модулятора представляет собой сигнал формы NRZ. Форма NRZ означает, что уровень мощности сигнала идентичен сигналу NRZ, т.е. существует только два уровня мощности, и уровни мощности не возвращаются к нулю с периодом в

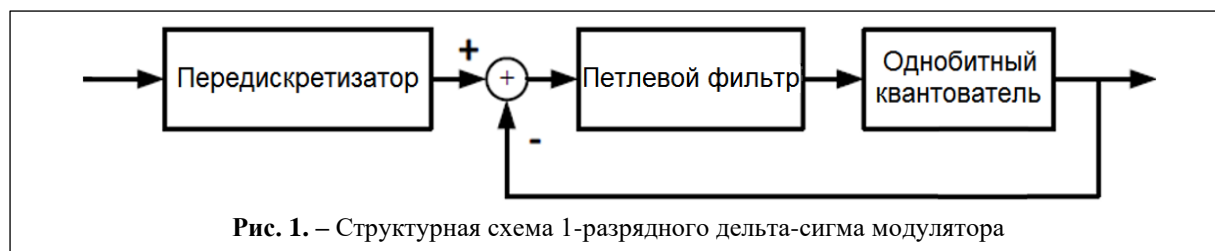


Рис. 1. – Структурная схема 1-разрядного дельта-сигма модулятора

половину бита. Однако распределение вероятностей битов “0” и “1” отличается при идеальном сигнале NRZ, т.е. спектр этого сигнала отличается от СПМ сигналов NRZ.

Существует три типа дельта-сигма модуляторов, использующих разные методы передискретизации сигналов:

1) Дельта-сигма-модулятор нижних частот (LP-DSM) [1-2]

2) Дельта-сигма-модулятор на основе огибающей (E-DSM) [3]

E-DSM как и LP-DSM имеет структуру, в которой цифровые данные генерируются путем умножения частоты гетеродина и скорость передачи данных пропорциональна несущей частоте, поэтому может быть реализован передатчик только с одной несущей. Изменение несущей частоты не позволяет получить одинаковые значения скорости передачи данных, частоты передискретизации или соотношения сигнал/шум.

3) Полосовой дельта-сигма модулятор (BP-DSM) [4-7].

Полосовой дельта-сигма модулятор преобразует сигнал с квадратурной модуляцией в высокоскоростную 1-битную цифровую последовательность. Скорость передачи данных может быть установлена независимо от несущей частоты, тем самым обеспечивая одновременное использование нескольких несущих.

Рассмотрим каждый тип более подробно.

#### 1. Дельта-сигма-модулятор нижних частот

Дельта-сигма модуляция впервые была представлена в Японии профессором Y. Yasuda в 1960-х годах [8]. В то время максимальная частота дискретизации дельта-сигма

модулятора составляла всего 3 кГц из-за ограничения из-за ограничений транзисторов.

В настоящее время основным применением многоуровневого дельта-сигма модулятора является дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь, а целью дельта-сигма модулятора является формирование шума квантования для улучшения отношения сигнал/шум.

Однобитный дельта-сигма модулятор впервые был представлен в конце 1990-х годов. Принципы однобитного дельта-сигма модулятора аналогичны дельта-сигма АЦП, поскольку бит квантователя устанавливается равным единице, т.е. существует только один порог. Теоретически это имеет смысл, но для этого требуется гораздо более высокая частота дискретизации, чем у дельта-сигма аналого-цифровой преобразователя.

При условии, что существует сигнал с полосой пропускания  $f_b$ , дискретизированный на частоте Найквиста и квантованный N-битным квантователем, спектральная плотность мощности (СПМ) шума квантования равен [9]

$$P(f) = \frac{1}{2^{N-1} \sqrt{12} f_b} \quad (1)$$

Одним из решений для уменьшения шума квантования является увеличение количества бит квантования N, что и используется в обычных АЦП. В случае дельта-сигма АЦП применяется контур отрицательной обратной связи с циклическим фильтром для формирования шума квантования. Поскольку полоса пропускания циклического фильтра ограничена, частота дискретизации дельта-сигма АЦП всегда выше частоты Найквиста, т.е.

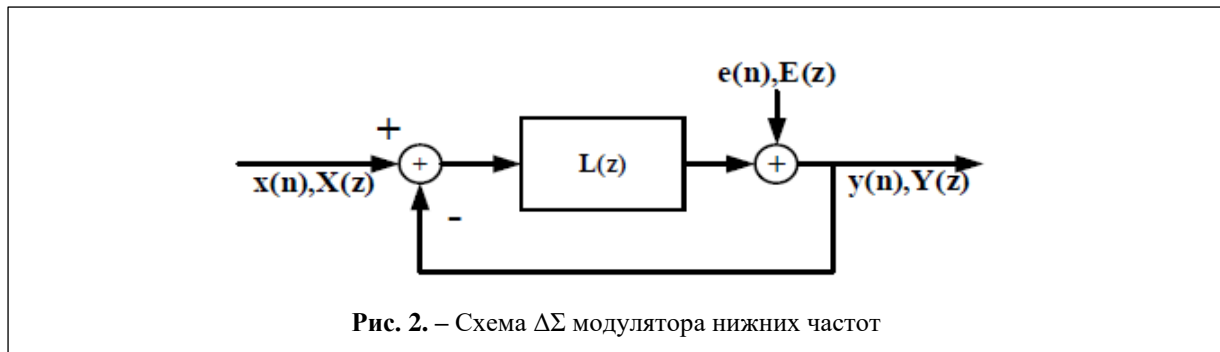


Рис. 2. – Схема ΔΣ модулятора нижних частот

происходит избыточная дискретизация. Таким образом, СПМ шума квантования дельта-сигма АЦП равен,

$$P(f) = \frac{1}{2^{N-1} \sqrt{12OSRf_b}} \cdot NTF(f), \quad (2)$$

где OSR - коэффициент передискретизации, а NTF - функция передачи шума. NTF здесь можно рассматривать как фильтр высоких частот.

Контур обратной связи является важнейшим компонентом дельта-сигма (ΔΣ) модулятора нижних частот. Поскольку однобитовый квантователь является нелинейным устройством, т.е. знаковой функцией в математике, которая не удовлетворяет условиям преобразования Фурье, невозможно напрямую записать функцию контуров обратной связи. Как обсуждалось в [10-12]

СПМ шума квантования такой же, как у белого шума. Таким образом, квантователь можно представить как смеситель, добавляющий шум квантования к исходному сигналу, схема показана на рис.2.

На рис.2.  $x(n)$  выборки входного сигнала,  $e(n)$  является квантования шум, и  $y(n)$  является выходной сигнал.  $L(z)$  является передаточная функция фильтра петли.  $X(z)$ ,  $E(z)$ , и  $Y(z)$  являются z-преобразованиями вышеуказанных величин. Взаимосвязь между ними может быть описана с помощью.

$$Y(z) = E(z) + L(z) \cdot [X(z) - Y(z)], \quad (3)$$

$$Y(z) = \frac{L(z)}{1+L(z)} \cdot X(z) + \frac{1}{1+L(z)} \cdot E(z). \quad (4)$$

Таким образом, функция передачи сигнала (STF) и функция передачи шума (NTF) задаются соответственно с помощью

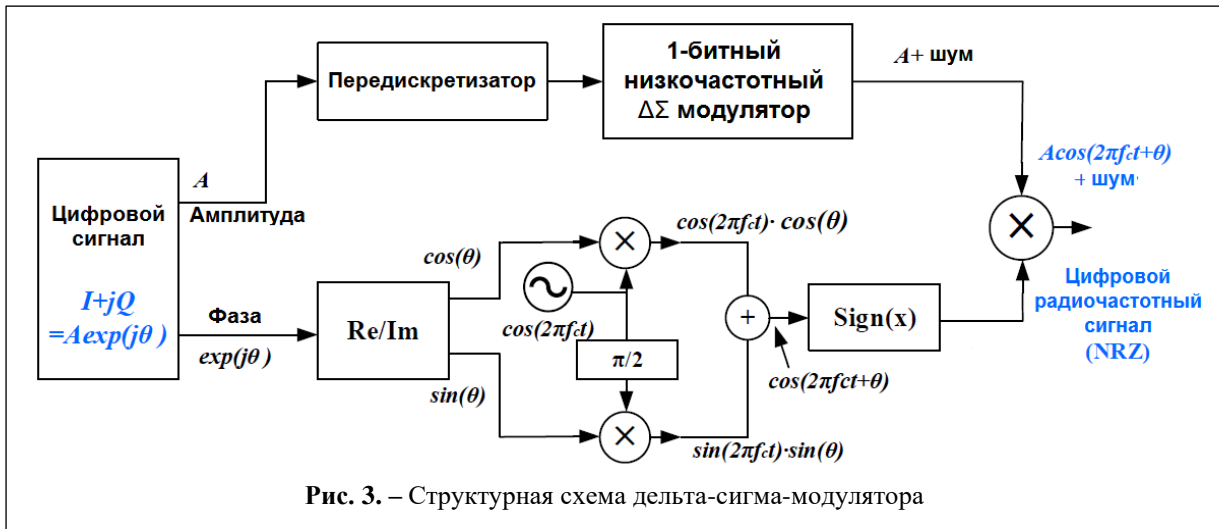
$$STF(z) = \frac{L(z)}{1+L(z)}, \quad (5)$$

$$NTF(z) = \frac{1}{1+L(z)}. \quad (6)$$

Во-первых, следует учесть, что входной сигнал является немодулированным сигналом, т.е. сигналом нижних частот в частотной области. Установив NTF в качестве фильтра верхних частот, шум квантования в низкочастотном диапазоне будет отфильтрован.

В то же время, поскольку  $STF(z)+NTF(z)=1$ , STF является фильтром нижних частот, и большая часть частотных составляющих входного сигнала будет сохранена. Более того, СПМ квантования известна как белый шум. Таким образом, функция NTF - это СПМ сформированного шума. Поэтому при разработке ΔΣ-модулятора сначала проектируется NTF.

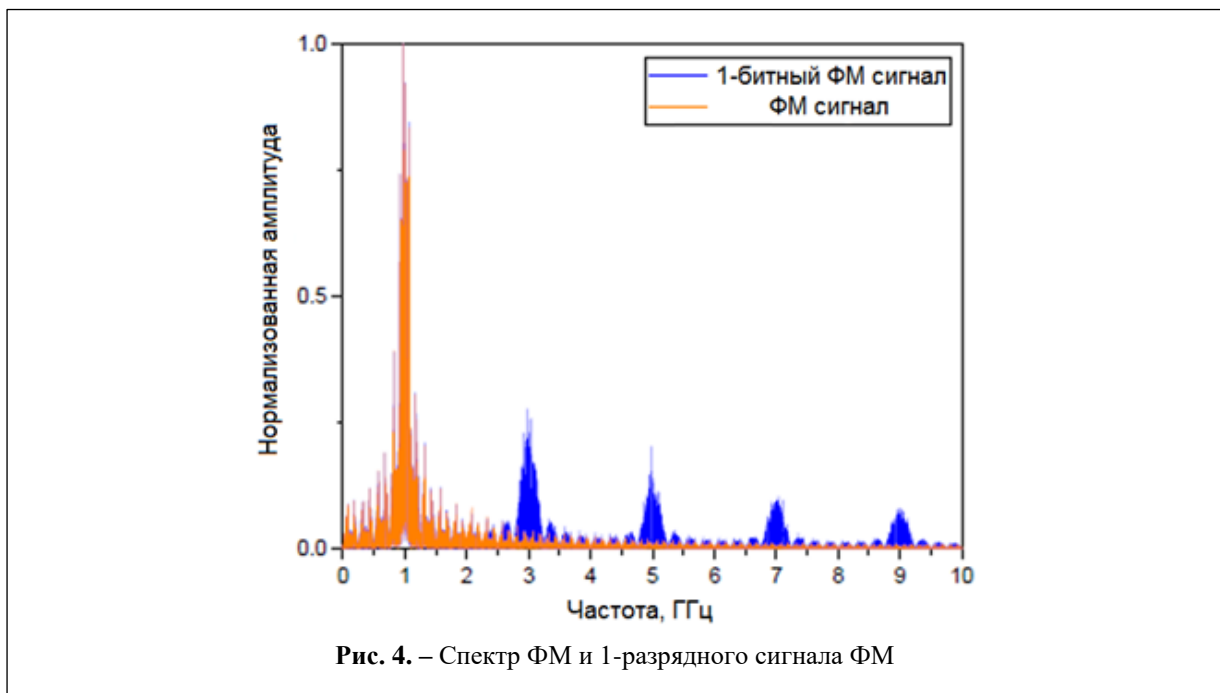
Примерно до 2010 года рабочая частота ДСМ, которые реализовались с КМОП транзисторов, достигала 4 ГГц [13] и [14,15], что соответствует требованиям стандартов LTE. Это делает внедрение дельта-сигма-модуляции актуальной темой. Одним из методов реализации является использование технологии СБИС [14,15]. Другой метод заключается в использовании FPGA [15-18]. Преимуществом ДСМ на базе FPGA является возможность использования дополнительных алгоритмы обработки сигналов для повышения производительности и надежности передачи. Однако для генерации радиочастотного сигнала FPGA требуются дополнительные высокочастотные источники тактовой частоты.

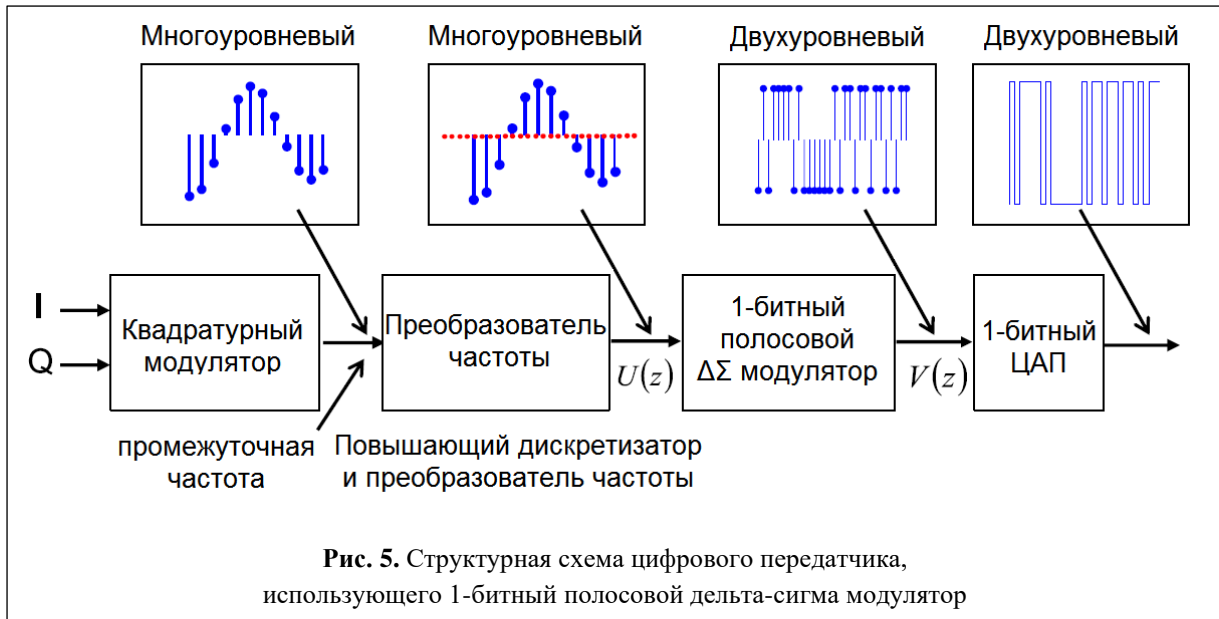


**2. Дельта-сигма-модулятор на основе огибающей**

На рис.3 показана структура дельта-сигма-модуляции огибающей (EDSM). Как обсуждалось в [19], ортогонально модулированный сигнал в основной полосе частот может быть разделен на огибающую и фазовую части. Для фазовой ветви фазовый сигнал сначала модулируется квадратурным модулятором, использующий аналоговый синусоидальный сигнал в качестве несущей с частотой  $f_c$ . Таким образом,  $\text{sign}(x)$  на рисунке 3 является стандартным сигналом с фазовой модуляции (ФМ) постоянной огибающей. И он может

быть оцифрован с помощью 1-битного квантователя, т.е.  $\text{sign}(x)$  на рис.3, непосредственно сигнал без генерации внутрисполосного шума квантования [19]. Однако шум квантования станет гармониками, как показано на рис. 4. Было выяснено, что основной лепесток ФМ сигнала, перекрывается основной составляющей частоты в 1-битового ФМ сигнала. Т.е. после  $\text{sign}(x)$  в спектре 1-битного ФМ сигнала присутствуют гармоники нечетного порядка. Сигнал в ветви огибающей может быть подвергнут избыточной дискретизации и преобразован в цифровую форму с помощью низкочастотного  $\Delta\Sigma$  модулятора, поскольку спектр сигнала огибающей является



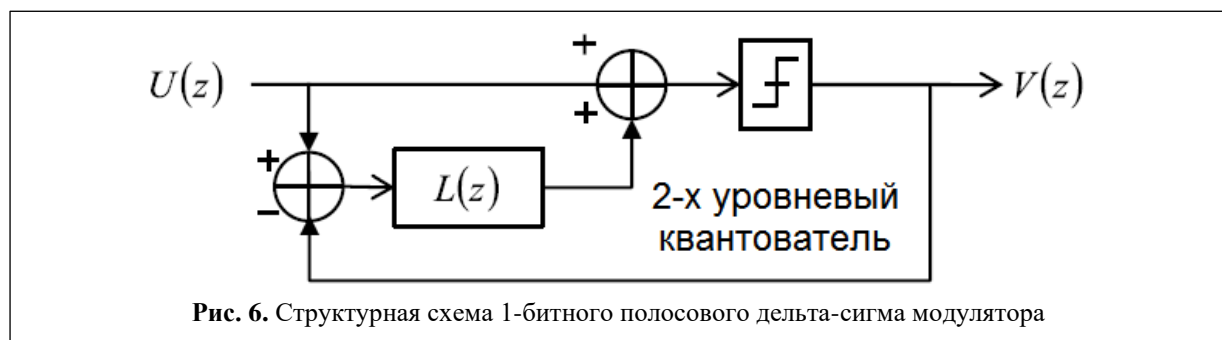


низкочастотным. После оцифровки огибающей и фазового сигналов система перемножает их вместе, и создается оцифрованный радиочастотный сигнал в формате NRZ. Кроме того, поскольку огибающая и фазовый сигнал перед умножением преобразуются в формат NRZ, эта операция может быть реализована с помощью логического элемента "И" вместо радиочастотного микшера. В этом случае EDSM требует однополярного NRZ, т.е. 0 и 1 вместо -1 и 1, поскольку большинство распространенных логических элементов не принимают отрицательную мощность.

### 3. Полосовой дельта-сигма модулятор (BP-DSM).

На рис. 5 показана структурная схема цифрового передатчика, использующего 1-битный полосовой дельта-сигма модулятор. Синфазные и квадратурно-фазовые сигналы ос-

новной полосы частот квадратурно модулируются и выводятся на промежуточной частоте. Далее квадратурно-модулированный сигнал дискретизируются с повышением частоты и преобразуются в радиочастотный сигнал с помощью цифрового преобразователя частоты и выводятся в виде многоуровневого оцифрованного радиочастотного сигнала. Обычно используемая частота дискретизации примерно в 100 раз превышает полосу пропускания модулятора. В преобразователе частоты входной сигнал преобразуется в импульсы с использованием метода передискретизации, который вставляет дополнительные нули, и преобразование частоты выполняется в частотной области с использованием генерации большого количества. Несущая частота может быть определена по n-й частоте с псевдонимом, которая генерируется на основе промежуточной частоты, перестраиваемой с помощью квадратурного модулятора.



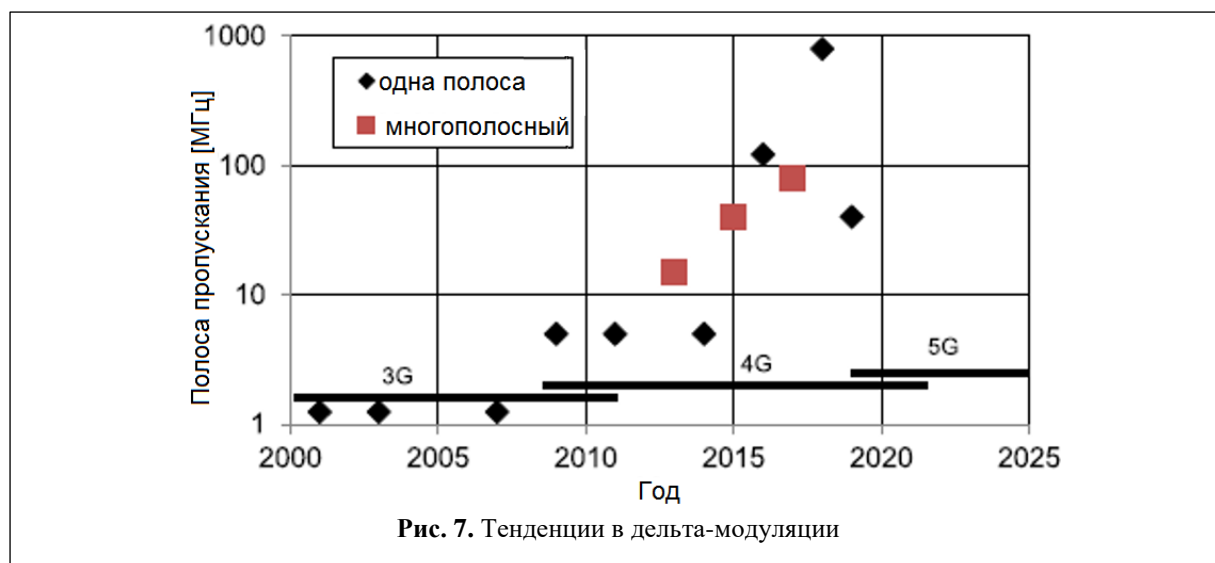


Рис. 7. Тенденции в дельта-модуляции

Многоуровневый оцифрованный радиочастотный сигнал поступает на вход 1-разрядного BP-DSM, преобразуется в двоичный код и выводится. Этот двоичный код цифровые данные выводятся в виде аналогового сигнала с невозвратом к нулю (NRZ) через генератор импульсов (или 1-разрядный цифроаналоговый преобразователь). Форма волны сигнала восстанавливается с помощью аналогового полосового фильтра и затем передается с антенны. Скорость передачи данных может быть установлена независимо от несущей частоты, тем самым обеспечивая одновременное использование нескольких несущих.

Теперь мы снова сосредоточимся на структурной схеме 1-разрядного BP-DSM, показанной на рис. 4(а). Входной сигнал  $U(z)$  выводится в виде выходного сигнала  $V(z)$  через двоичный квантователь, и разница между входным и выходным сигналами (шум квантования  $Q$ ) создает обратную связь через контурный фильтр  $L(z)$ . Выходной сигнал  $V(z)$  может быть выражен через (7).

$$V(z) = U(z) + NTF(z)Q(z), \quad (7)$$

$$NTF(z) = \frac{1}{1+L(z)}. \quad (8)$$

Второй член в (7), шум квантования  $Q(z)$ , имеет функцию передачи шума (NTF) в качестве фильтра с конечным откликом, имеющего коэффициенты действительного числа, и связан с фильтром контура  $L(z)$ , как в (8).

$NTF(z)$  спроектирован как цифровой фильтр с фильтром подавления полосы пропускания в полосе передачи, а второй член в (7) подавляет шум квантования в полосе сигнала для достижения высокого SNR в полосе. Полосовой режекторный фильтр может быть выполнен в виде однополосного и/или многополосного фильтра для подавления шума квантования для реализации параллельного многополосного модулятора [20,21].

На рис.7 показаны тенденции изменения полосы пропускания модулей за последние 20 лет. Начиная с 2000-х годов началось расширение полосы пропускания. А в 2013 году были реализованы многополосные системы. В мобильной связи 5G и следующего поколения полоса пропускания модуляции будет шире, и потребуются большая относительная полоса пропускания.

### Литература

1. R. F. Cordeiro, A. S. R. Oliveira, J.Vieira, and T. O. e Silva, "Wideband all-digital transmitter based on multicore DSM," in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., May 2016, pp. 1-4.
2. A. Frappe, A. Flament, B. Stefanelli, A. Kaiser, and A. Cathelin, "An all-digital RF signal generator using high-speed  $\Delta\Sigma$  modulators," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 44, no. 10, pp. 2722-2732, Jan. 2009.
3. S. Hori, K. Kunihiro, K. Takahashi, and M. Fukaishi, "A 0.7-3 GHz envelope modulator using phase modulated carrier clock for multi-mode/band switching amplifiers," in Proc. IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp., Jun. 2011, pp. 1-4.



4. S. A. Jantzi, M. Snelgrove, and P. F. Ferguson, "A 4th-order bandpass sigma-delta modulator," in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf., May 1992, p. 16.
5. J. Ketola, J. Sommarek, J. Vankka, and K. Halonen, "Transmitter utilising bandpass delta-sigma modulator and switching mode power amplifier," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., May 2000, pp. 633-636.
6. T. Maehata, S. Kameda, and N. Suematsu, "1-bit band-pass delta-sigma modulator with parallel IIR form for concurrent multiband digital transmitter," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 100, no. 7, pp. 1152-1159, 2017.
7. R. Schreier and M. Snelgrove, "Bandpass delta-sigma modulation," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 23, pp. 1560-1561, Nov. 1989.
8. H. Inose and Y. Yasuda, "A Telemetry System by Code Modulation -  $\Delta$ - $\Sigma$  Modulation," in *IRE Transactions on Space Electronics and Telemetry*, vol. SET-8, no. 3, pp. 204-209, Sept. 1962.
9. B. Li, "Design of multi-bit sigma delta modulators for digital wireless communications," M.S. thesis, Department of Microelectronics & Information Technology, Royal Institute of Technology, Electrum, Kista, Sweden, 2003.
10. S. Hori *et al.*, "A 1-Bit Digital Transmitter System using a 20-Gbps Quadruple-Cascade Class-D Digital Power Amplifier with 45nm SOI CMOS," in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Boston, MA, USA, 2019, pp. 734-737.
11. T. Soma *et al.*, "A 200 MHz Bandwidth GaAs Switch-Mode Supply Modulator," in *2018 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*, San Diego, CA, USA, 2018, pp. 148-151.
12. Y. Seo *et al.*, "3-Level Envelope Delta-Sigma Modulation RF Signal Generator for High-Efficiency Transmitters," *ETRI Journal*, vol. 36, no. 6, pp. 924-930, December, 2014.
13. S. R. Abdollahi *et al.*, "Digital Radio over Fibre for Future Broadband Wireless Access Network Solution," in *2010 6th Int. Conf. on Wireless and Mobile Commun.*, Valencia, 2010, pp. 504-508.
14. A. Dupuy and Y. E. Wang, "High efficiency power transmitter based on envelope delta-sigma modulation (EDSM)," in *IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, Los Angeles, CA, USA, 2004, pp. 2092-2095.
15. M. Tanio *et al.*, "An FPGA-based all-digital transmitter with 28-GHz time-interleaved delta-sigma modulation," in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 1-4.
16. M. Tanio *et al.*, "An FPGA-based 1-bit Digital Transmitter with 800-MHz Bandwidth for 5G Millimeter-wave Active Antenna Systems," in *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA, USA, 2018, pp. 499-502.
17. A. Lorences-Riesgo *et al.*, "Real-Time FPGA-Based Delta-Sigma-Modulation Transmission for 60 GHz Radio-Over-Fiber Fronthaul," in *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Rome, Italy, 2018, pp. 1-3.
18. J. Wang *et al.*, "Delta-Sigma Modulation for Next Generation Fronthaul Interface," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, pp. 2838-2850, June, 2019.
19. S. Pavan *et al.*, *Understanding delta-sigma data converters*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
20. R. A. Shafik *et al.*, "On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics," in *2006 International Conference on Electrical and Computer Engineering*, Dhaka, Bangladesh, 2006, pp. 408-411.
21. S. Kumar and M. J. Deen, *Fiber optical communications fundamentals and applications*, 1st ed. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

**Поступила 18 августа 2023 г.**

This paper describes the main resampling methods used to increase the output frequency and improve the noise characteristics of delta sigma modulators. The principles on which delta sigma modulation is based are considered. The possibility of using basic resampling methods in delta sigma modulators to increase the output frequency of the signal and the signal-to-noise ratio is evaluated.

*Key words:* forecasting, Delta sigma low-pass modulator, delta sigma envelope-based modulator, bandpass delta sigma modulator, 5G, noise characteristics, SPM quantization noise.

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

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

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