

УДК 681.3

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Чуфаров И.Г., инженер-программист, e-mail: 23174harry@mail.ru.

**Ключевые слова:** цифровая звукозапись, сигма-дельта модуляция, обработка сигналов, децимация, интерполяция, моделирование, шум квантования.

### Введение

В современном мире звукозаписи существует две взаимно противоположные тенденции. Одна из них — это стремление к как можно меньшему объему хранимых данных. При этом важное значение имеет введение предварительной и постобработки записываемого сигнала. Так, например, адаптивная обработка, предложенная в [1,2], позволяет производить оцифровку и воспроизведение звука с наименьшими искажениями, за счёт подобранных параметров адаптивного алгоритма.

Вторая тенденция — это повышение качества за счет увеличения объема звуковой информации. Пример таких решений — DVD-Audio и SACD. В свете появления носителей большей вместимости, например Blu-Ray, а также в результате исследований [3,4], была предложена принципиально новая методика звукозаписи с использованием сигма-дельта модуляции DMS-SDM [5].

Суть предлагаемой технологии цифровой звукозаписи — использование мультибитного сигма-дельта модулированного сигнала непосредственно с выхода многоразрядного сигма-дельта модулятора. При этом частота дискретизации сохраняемого сигнала должна соответствовать частоте, на которой работает сигма-дельта модулятор. Учитывая сложность обработки сигма-дельта модулированных сигналов, важным вопросом является её адекватная реализация.

### Сложность обработки сигма-дельта модулированных сигналов

Классическая теория цифровой обработки сигналов звукового диапазона частот исходит из предположения, что обрабатываемый сигнал оцифрован с частотой вдвое превышающей максимальную частоту полезного сигнала. На практике же, в большинстве случаев, при аналого-цифровом и цифро-аналоговом преобразовании используется сигма-дельта модуляция с избыточной частотой дискретизации.

Переход от сигма-дельта модулированного сигнала с избыточной частотой дискретизации к сигналу с Найквистовской частотой дискретизации осуществляется путём децимации. В результате элайзинга шум может просачиваться в область с полезным сигналом. Для предотвращения подобного эффекта перед понижением частоты дискретизации используется фильтрация. Фильтрация, так

*Предлагается технология цифровой звукозаписи с использованием мультибитного сигма-дельта модулированного сигнала непосредственно с выхода многоразрядного сигма-дельта модулятора. Проведенные исследования показали, что данный способ сохранения информации звукового сигнала обеспечивает лучшие характеристики как по сравнению с традиционными форматами PCM, так и с 1-битным DSD. Отражены результаты исследований, свидетельствующие о возможности обработки сигма-дельта модулированного сигнала DMS-SDM и сохранении результата с качеством, не уступающим 32-битному PCM.*

или иначе, в большей или меньшей степени, приводит к искажению полезного сигнала.

Первыми отказаться от децимации предложили компании Sony и Phillips, разработавшие методику записи прямого цифрового потока DSD (Direct Stream Digital), реализованную в SACD [6]. Суть идеи — запись в формате 1 бит 2,8224 МГц. При этом основной акцент в рекламной кампании и технических публикациях ставился именно на использование 1-битного формата (был даже организован 1-битный консорциум). Тем не менее, серьезная техническая проблема, с которой столкнулись разработчики аппаратуры, реализующей новый формат — невозможность цифровой обработки сигнала с сохранением 1-битного представления.

Для цифровой обработки DSD сигналов был введен формат DXD [7]. Параметры формата — 24 бита, 352,8 кГц. Таким образом, идея отказа от децимации была отвергнута. При этом 1-битный DSD сигнал для обработки должен быть сконвертирован с 8-кратной децимацией. После обработки, разумеется, должно осуществиться обратное преобразование в DSD формат с использованием 1-битного сигма-дельта модулятора.

Практические результаты, полученные в [8,9], показывают, что деградация качества сигнала в результате подобных преобразований весьма существенна.

Существуют и другие объективные недостатки DSD формата. С момента внедрения стандарта 1-битные сигма-дельта АЦП и ЦАП морально устарели, распространение как в профессиональной, так и бытовой технике приобрели мультибитные сигма-дельта АЦП и ЦАП. Поэтому называть сегодня DSD формат прямоточным или форматом без преобразования оцифрованного сигнала уже нельзя.

В [5] предложен новый метод высококачественной цифровой звукозаписи с использованием мультибитной сигма-дельта модуляции. Проведенные в [5] исследования показали, что данный способ сохранения информации после аналого-цифрового преобразования сигналов звукового диапазона частот, названный DMS-SDM (Direct Multibit Stream from Sigma-Delta Modulator — прямой мультибитный поток с сигма-дельта модулятора), обеспечивает лучшие характеристики как по сравнению с традиционными форматами PCM, так и в сравнении с 1-битным DSD.

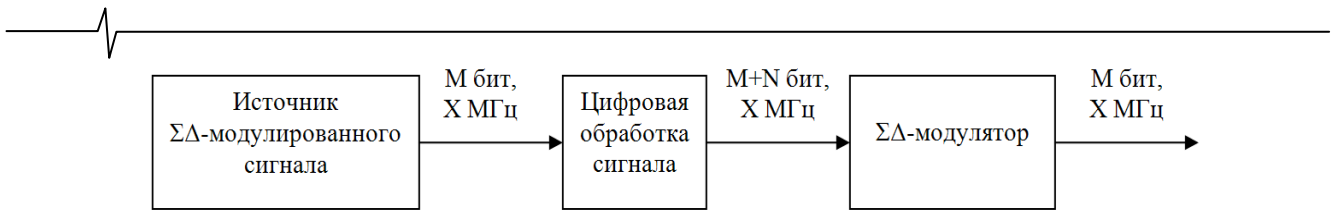


Рис. 1. Схема цифровой обработки сигма-дельта модулированного сигнала

Однако, чтобы говорить о серьезной практической применимости нового формата, требуется определить, возможна ли в принципе цифровая обработка сигма-дельта модулированного сигнала звукового диапазона частот с качеством, как минимум не худшим чем при обработке сигнала в PCM форме.

Сложность обработки сигма-дельта модулированного сигнала заключается в необходимости повторной сигма-дельта модуляции после произведенных преобразований (рис. 1).

Из схемы видно, что в процессе цифровой обработки (например, при типичном случае фильтрации) увеличивается разрядность сигнала. Этот эффект является следствием перемножения коэффициентов фильтра и отсчетов дискретного сигнала в конкретные моменты времени.

Обеспечить сохранение разрядности обрабатываемого сигнала можно было бы, ограничив уровень входного сигма-дельта модулированного сигнала и разрядность коэффициентов фильтра. Но это соответствовало бы уменьшению эффективной разрядности сигнала, определяемой по динамическому диапазону, так что такой вариант является неприемлемым.

Для уменьшения разрядности до исходной, после обработки сигнала необходимо произвести усечение бит. При этом простое отбрасывание разрядов приведет к неприемлемому шуму квантования, поэтому применяется повторная сигма-дельта модуляция с формированием шума.

Более того, как отмечается в [10–12], при обработке сигнала необходимо оперировать количеством разрядов, как минимум не меньшим, чем эффективная разрядность сигнала, определяемая динамическим диапазоном. Это значит, что сигнал с динамическим диапазоном порядка 120 дБ необходимо подвергать цифровой обработке с разрядностью не менее 20 бит, независимо от частоты дискретизации.

Величина погрешности, которая возникает при двойной сигма-дельта модуляции, определяет применимость формата данных для цифровой обработки.

На практике установлено, что 1-битное сигма-дельта модулированное представление сигнала с частотой дискретизации 2,8224 МГц (DSD) обеспечивает неудовлетворительные результаты с точки зрения двойной сигма-дельта модуляции при цифровой обработке.

Поскольку предложенная в [5] технология обеспечивает существенно лучшие характеристики сигнала по сравнению с 1-битной, логично предположить, что двойная сигма-дельта модуляция системы DMS-SDM не приводит к такой деградации качества сигнала, как при 1-битной сигма-дельта модуляции.

### Математическая основа цифровой обработки сигма-дельта модулированных сигналов

Как уже было сказано выше, на качество цифровой обработки сигма-дельта модулированных сигналов большое влияние оказывает повторная сигма-дельта модуляция.

На рис. 2. приведена общая топология сигма-дельта модулятора [13]. Под Q в данной схеме подразумевается блок квантования, U и V соответственно входной и выходной сигналы модулятора, Y — квантуемый сигнал, а  $L_0$ ,  $L_1$  — соответствующие передаточные характеристики фильтров в z-области.

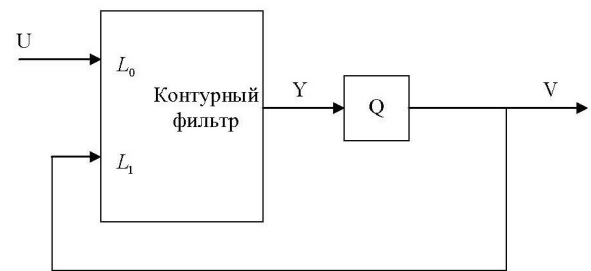


Рис. 2. Общая топология сигма-дельта модулятора

Сигнал на выходе модулятора при такой модели будет представлен следующим образом:

$$Y(z) = L_0(z) \cdot U(z) + L_1(z) \cdot V(z) \quad (1)$$

Произведя несложные преобразования, можно переписать данное выражение следующим образом:

$$V(z) = \frac{L_0(z)}{1-L_1(z)} \cdot U(z) + \frac{1}{1-L_1(z)} \cdot E(z) = STF(z) \cdot U(z) + NTF(z) \cdot E(z), \quad (2)$$

где

$$STF(z) = \frac{L_0(z)}{1-L_1(z)}, \quad (3)$$

$$NTF(z) = \frac{1}{1-L_1(z)}.$$

Здесь  $STF(z)$  и  $NTF(z)$  — соответственно передаточные функции относительно преобразования сигнала и шума модулятора.

Фундаментальное значение для определения характеристик, прежде всего шумовых и динамических, имеет выбор передаточной функции по отношению к шуму ( $NTF$  — Noise Transfer Function). Данная характеристика показывает, каким именно образом будет отфильтрован шум. В общем случае передаточная функция определяется выражением:

$$NTF(z) = \prod_{i=1}^N \frac{z - z_i}{z - p_i}, \quad (4)$$

где  $z_i$  — нули, а  $p_i$  — полюса передаточной функции формирователя шума.

Согласно теореме Герциона-Кравена [14], при уменьшении шума в одной полосе частот, в оставшейся полосе шум будет пропорционально увеличен таким образом, что при линейном масштабе по оси частот и логарифмическом по оси амплитуд площади, ограниченные АЧХ, будут равны (рис. 3).

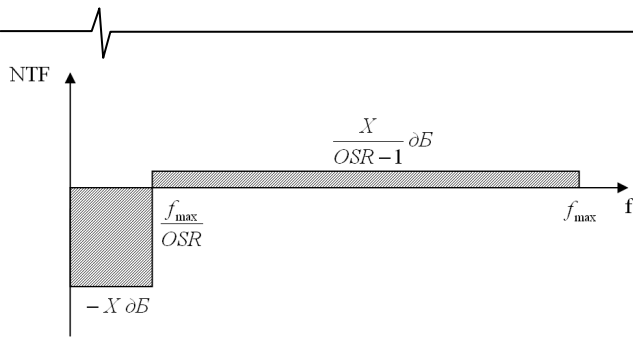


Рис.3. Теоретическая АЧХ формирователя шума

На данном графике  $OSR$  — коэффициент избыточной дискретизации (Over Sampling Ratio),  $X$  — степень подавления шума в рабочей полосе,  $f_{max}$  — максимальная рабочая частота сигма-дельта модулятора, равная половине частоты дискретизации.

Вид передаточной функции  $NTF(z)$  определяется видом фильтра. Таким образом, шумовые характеристики конкретного сигма-дельта модулятора зависят от типа аппроксимации теоретической АЧХ, от выбора параметров степени подавления шума  $X$  и коэффициента избыточной дискретизации  $OSR$ . Кроме того, разумеется, значительное влияние оказывает выбор разрядности квантователя.

Максимальное усиление вне рабочей полосы, равное  $X/(OSR-1)$ , определяется бесконечной нормой передаточной функции относительно шума:

$$\|H\|_{\infty} = \max_{\omega} |H(e^{j\omega})|, \tag{5}$$

где

$$H(z) = NTF. \tag{6}$$

Максимально возможное ослабление в рабочей полосе при фиксированном коэффициенте избыточной дискретизации определяется максимально возможным усилением вне рабочей полосы, не приводящим к неустойчивости модулятора.

Для 1-битного сигма-дельта модулятора условие устойчивости определяется выражением:

$$\|H\|_{\infty} = \max_{\omega} |H(e^{j\omega})| < 1,5. \tag{7}$$

Таким образом, 1-битное представление не позволяет использовать формирователь шума с уровнем усиления шума вне рабочей полосы большим, чем 3,52 дБ. Это ограничивает возможность увеличения динамического диапазона системы при фиксированном значении коэффициента избыточной дискретизации.

Ограничения по усилению вне рабочей полосы для многобитного сигма-дельта модулятора имеют несколько иной вид. Модулятор с квантователем разрядностью  $M$  будет устойчив для любого воздействия, удовлетворяющего условию:

$$\max_n |u(n)| \leq M + 1 - \|h\|_1, \tag{8}$$

где

$$\|h\|_1 = \sum_{n=0}^{\infty} |h(n)|. \tag{9}$$

Под  $h(n)$  подразумевается обратное z-преобразование от передаточной функции относительно шума. Соответственно, именно вид данной передаточной

функции должен обеспечивать с одной стороны достаточное ослабление шума в рабочей полосе, а с другой — приемлемое значение нормы  $\|h\|_1$ , которая обуславливает ограничение динамического диапазона сверху.

### Моделирование обработки сигма-дельта модулированного сигнала

В качестве объектов моделирования были выбраны три сигма-дельта модулятора.

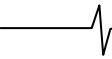
1. Сигма-дельта модулятор DSD, используемый в SACD. Согласно материалам Sony и Philips, в качестве сигма-дельта модулятора используется система с 1-битным квантователем и фильтром формовки шума 7-го порядка. В ходе моделирования был синтезирован сигма-дельта модулятор подобный тому, что используется при записи SACD.

Целью моделирования данной системы было установление факта несовершенства самой методики кодирования, а не какой либо конкретной её реализации в устройствах записи и воспроизведения DSD.

2. Стандартный мультибитный сигма-дельта модулятор подобный тем, что используются ведущими производителями при производстве микросхем АЦП и ЦАП. Данный вариант предусматривает использование 5-битного квантования и фильтра формовки шума 3-го порядка. Характеристики таких сигма-дельта модуляторов широко известны. Цель моделирования — проверка верности построенной математической модели путем сравнения полученных результатов с уже известными.

3. Сигма-дельта модулятор DMS-SDM. Поскольку формат DMS-SDM подразумевает использование разрядности и частоты дискретизации наиболее совершенных из существующих аппаратных устройств АЦП и ЦАП, была, как и во втором случае, использована модель с 5-битным квантователем. Тем не менее, современные преобразователи всё ещё не обеспечивают истинно даже 24-битного динамического диапазона 144 дБ. Но поскольку рассматриваемая модель не привязана к аппаратной реализации, и вся обработка производится в цифровом виде, была поставлена задача синтеза фильтра формовки шума, обеспечивающего более низкий уровень шума квантования, чем современные микросхемы. В частности, был применен фильтр 7-го порядка, причем, учитывая отсутствие ограничений, свойственных 1-битной сигма-дельта модуляции, был использован фильтр с более сильным ослаблением шума в рабочей полосе частот. Цель моделирования — определение возможности сигма-дельта модуляции с шумовыми характеристиками лучшими, чем при использовании DSD или современных микросхем АЦП и ЦАП.

Каждый из сигма-дельта модуляторов был промоделирован при различных значениях коэффициента избыточной дискретизации  $OSR=64$ ,  $OSR=32$  и  $OSR=16$ . На вход сигма-дельта модулятора подавалось синусоидальное колебание амплитудой половины полной шкалы системы. Для выходного сигнала модулятора строился его спектр и вычислялось значение соотношения сигнал-шум в рабочей полосе частот. При этом графики строились в нормированных единицах. За единицу была принята частота дискретизации сигма-дельта модулятора. По оси амплитуд за 0 дБ был выбран максимально возможный для



разрядности модулятора уровень сигнала.

Результат моделирования 1-битного сигма-дельта модулятора 7-го порядка показан на рис. 4.

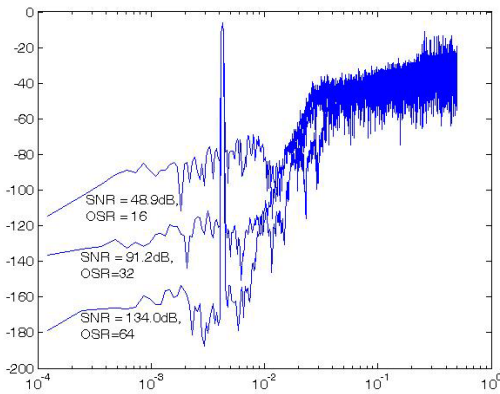


Рис. 4. Результат моделирования 1-битного сигма-дельта модулятора 7-го порядка

Следует отметить, что в случае частоты дискретизации сигма-дельта модулятора, равной 2,8224 МГц (стандарт DSD 2.8, используется в SACD), OSR=16 соответствует рабочей частотной полосе до 88,2 кГц, OSR=32 — полосе до 44,1 кГц и OSR=64 — полосе до 22,05 кГц. Из данного факта следует, что в целом формат может обеспечить порядка 130 дБ соотношения сигнал-шум в полосе до 22,05 кГц, порядка 90 дБ — в полосе до 44,1 кГц, либо порядка 50 дБ — в полосе до 88,2 кГц. Как это ни поразительно, данные ошеломляющие результаты вполне согласуются с полученными на практике [8].

Неизбежные отличия конкретных реализаций формата в различных продуктах обуславливаются различным выбором фильтра и коэффициента избыточной дискретизации. В частности, судя по графикам шума в [8] был использован формирователь шума, полученный для значения OSR=64. При этом нет никаких требований ограничения максимальной частоты рабочего диапазона именно  $f_s/64$ . Можно синтезировать  $NTF(z)$  с оптимизацией нулей и полюсов для OSR=64 и использовать сигма-дельта модуляцию с 16-кратной избыточностью частоты дискретизации. При этом в полосе до  $f_{max}/64$  будет расчетное соотношение сигнал шум, а в полосе  $f_{max}/16$  меньшее, но, возможно, технически приемлемое значение. Судя по всему, именно так и поступили разработчики DSD-рекордера KORG MR-1000, обзор которого содержится в [8].

Результат моделирования 5-битного сигма-дельта модулятора 3-го порядка, наиболее типичного для современных микросхем АЦП и ЦАП [15–19], представлен на рис. 5.

В случае, если частота дискретизации сигма-дельта модулятора равна 6,144 МГц (типичное значение, принятое в современных микросхемах АЦП и ЦАП), OSR=16 соответствует рабочей частотной полосе до 192 кГц, OSR=32 — полосе до 96 кГц и OSR=64 — полосе до 48 кГц. Из данного

факта следует, что в целом типичное сигма-дельта преобразование, используемое в современных микросхемах, может обеспечить порядка 140 дБ соотношение сигнал-шум в полосе до 48 кГц, порядка 120 дБ — в полосе до 96 кГц, либо порядка 95 дБ — в полосе до 192 кГц.

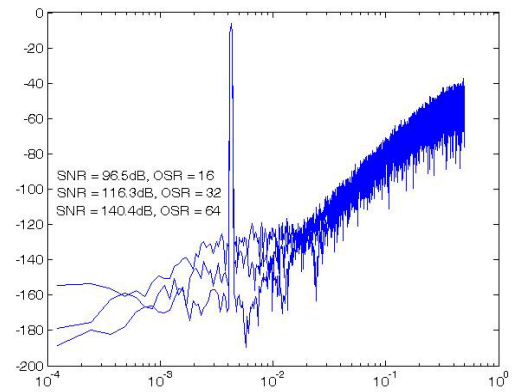


Рис. 5. Результат моделирования наиболее типичного для современных микросхем АЦП и ЦАП 5-битного сигма-дельта модулятора 3-го порядка

Следует отметить, что данный результат в целом также соответствует известным результатам и конкретным реализациям микросхем.

Самые лучшие результаты получаются при моделировании DMS-SDM сигма-дельта модулятора 7-го порядка, использующего 5-битное квантование. На рис. 6 приведен вид передаточной функции относительно шума в полосе с полезным сигналом при OSR=32.

Пунктирной линией показан уровень ослабления шума квантования в полезной полосе частот. Нетрудно подсчитать, что для этого случая усиление вне рабочего диапазона составит порядка 5 дБ.

На рис. 7 представлен результат моделирования DMS-SDM системы 7-го порядка при различных значениях OSR.

В случае, если используется частота дискретизации 6,144 МГц, что полностью соответствует идеологии DMS-SDM, можно говорить о том, что формат DMS-SDM по качеству не уступает форматам 25 бит и 384 кГц, 32 бит и 192 кГц, либо 37 бит и 96 кГц.

Таким образом, сравнивая значение динамического диапазона системы DMS-SDM с динамическим диапазоном существующих форматов с прореживанием, лучшая из которых — DXD (имеет параметры 24 бита и 352,8 кГц), можно прийти к выводу, что повторная сигма-дельта модуляция при цифровой обработке сигма-дельта модулированного DMS-SDM сигнала не будет ограничивать динамический диапазон, и шумовые характеристики системы обработки существеннее, чем существующие форматы записи. При этом сохраняются все преимущества формата DMS-SDM, связанные с отсутствием прореживания сигнала [5].

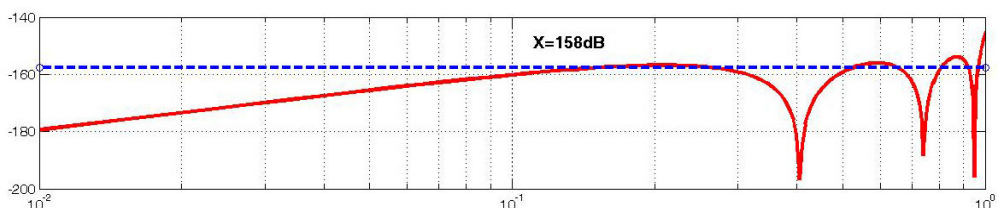


Рис. 6. Подавление шума квантования в полезной полосе частот DMS-SDM системой

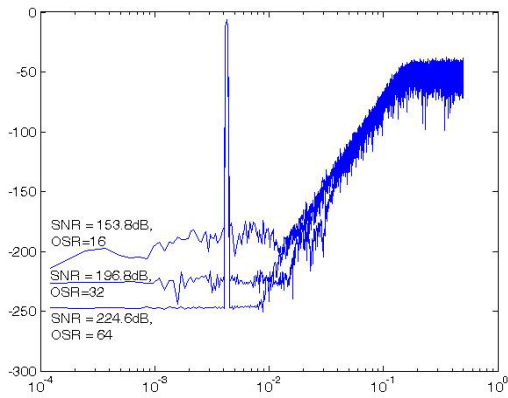


Рис. 7. Результат моделирования DMS-SDM сигма-дельта модулятора 7-го порядка

### Заключение

Для корректности оценки полученных результатов следует отметить, что параметры формирующих шум фильтров, рассмотренные при моделировании DSD и типичного для современных микросхем 5-битного сигма-дельта модулятора 3-го порядка, не претендуют на роль оптимальных. Тем не менее, порядок полученных результатов позволяет говорить об адекватности эксперимента.

По результатам исследования видно, что при частоте дискретизации 6,144 МГц в полосе частот до 100 кГц система DMS-SDM обеспечивает порядка 200 дБ динамического диапазона, что является беспрецедентным результатом по сравнению с существующими потребительскими форматами.

Если вернуться к рассмотрению системы цифровой обработки сигма-дельта модулированного сигнала, то можно заключить, что повторная сигма-дельта модуляция после окончания цифровой обработки не приведет к деградации сигнала, подобной той, что существует при конвертации в 1-битный DSD формат. Таким образом, было установлено, что при подборе соответствующих параметров повторной сигма-дельта модуляции, сигма-дельта модулированные сигналы могут быть эффективно подвергнуты цифровой обработке без деградации качества сигнала, свойственной DSD сигналам.

Более того, если рассмотреть систему, в которой входной 5-битный сигма-дельта модулированный сигнал обрабатывается фильтром с 32-битными коэффициентами, после чего конвертируется одновременно в два формата: один с прореживанием до 192 кГц с разрядностью 24 бита и второй без прореживания, но с сокращением разрядности до исходных 5 бит, то второй будет обладать на 50 дБ большим значением отношения сигнал-шум.

Таким образом, в отличие от приводящего к деградации качества сигнала 1-битного формата DSD, использование мультибитной сигма-дельта модуляции в формате DMS-SDM действительно позволяет сократить количество преобразований (фильтрации) сигнала за счет отказа от прореживания и интерполяции как на этапе аналого-цифрового и цифро-аналогового, так и при цифровой обработке сигма-дельта модулированных сигналов. Особенно важно, что цифровая обработка в

формате DMS-SDM может обеспечить сохранение результата с качеством лучшим, даже чем 32 бит 192 кГц, не говоря уже о параметрах, соответствующих стандартам DVD-Audio.

### Литература

1. И.Г.Чуфаров. Современная звукозапись. Нестандартный подход: адаптивное аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов звукового диапазона // Материалы 9-ой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – 2007», Москва, ИГТУ РАН, 2007.
2. И.Г.Чуфаров. Адаптивное аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов звукового диапазона // Труды кыштымского филиала ЮУрГУ, 2007.
3. И.Г.Чуфаров. Компенсация эффектов, связанных с уменьшением разрядности квантования при сжатии объема данных аудиосигналов // Труды кыштымского филиала ЮУрГУ, 2008.
4. А.Ю.Светлов, И.Г.Чуфаров. Компенсация эффектов, связанных со сжатием объема данных аудиосигналов // Материалы 16-ой международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии», 21 - 23 октября 2008 года.
5. И.Г.Чуфаров. Высококачественная цифровая звукозапись на основе сигма-дельта модуляции // Цифровая обработка сигналов, №1, 2009, с. 63-68.
6. "Super Audio Compact Disc: A Technical Proposal", Philips/Sony white paper, 12 pp. (1997).
7. The advantages of DXD for SACD. White paper
8. М.Лядов. DSD-рекордер KORG MR-1000 с поддержкой DSD 2.8/5.6 МГц и PCM 24/192. — Электронный журнал ixbt.com, 5.02.2008. — <http://www.ixbt.com/proaudio/korg-mr1000.shtml>
9. А. Стриганов. SACD vs. DVD-Audio: практическое исследование форматов высокого разрешения. Электронный журнал ixbt.com, 5.08.2004. <http://www.ixbt.com/dvd/sacd-dvd-a.shtml>
10. S. P. Lipshitz and J. Vanderkooy, "Why 1-Bit Sigma-Delta Conversion is Unsuitable for High-Quality Applications", presented at the 110th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, The Netherlands, 2001 May 12-15. (Companion to the present paper.)
11. S. P. Lipshitz and J. Vanderkooy, "Why Professional 1-Bit Sigma-Delta Conversion is a Bad Idea", presented at the 109th Convention of the Audio Engineering Society, Los Angeles, CA, 2000 Sept. 22-25, preprint 5188; a Supplementary Information booklet (9 pp.), handed out at the presentation, is obtainable from SPL by e-mail at [spl@audiolab.uwaterloo.ca](mailto:spl@audiolab.uwaterloo.ca). (This reference should be considered superseded by the present paper.)
12. J. Vanderkooy and S. P. Lipshitz, "Towards a Better Understanding of 1-Bit Sigma-Delta Modulators", presented at the 110th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, The Netherlands, 2001 May 12-15. (Companion to the present paper.)
13. Richard Schreier, Gabor C. Temes. Understanding Delta-Sigma Data Converters. New York, NY: IEEE Press, 2004.
14. Gerzon M. A. and Craven P. G. Optimal Noise Shaping and "Dither of Digital Signals", presented at the 87th Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol 37, p. 1072 (1989 Dec), preprint 2822.
15. T. Soh, "Five semiconductor makers to ship 24-bit DAC LSI's for use in audio equipment" (in Japanese), Nikkei Electron, no. 706, pp. 51-56, Jan. 1998.
16. J. C. Candy and G. C. Temes, "Oversampling Delta-Sigma Data Converters", IEEE, New York, NY, USA, 1992, ISBN 0-87942-281-5.
17. I. Fujimori, A. Nogi, and T. Sugimoto, "A multibit delta-sigma audio DAC with 120 dB dynamic range", in ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb.

1999, pp. 152-153.

18. D. Reefman et. al. , "A 128fs, Multi-bit  $\Sigma\Delta$  CMOS Audio DAC with Real-time DEM and 115 dB SFDR", Philips Semiconductors, Eindhoven, the Netherlands. AES Preprint 5846, March 2003.
19. T. Rueger et.al., "A 110dB Ternary PWM Current-Mode Audio DAC with Monolithic 2Vrms Driver", ISSCC 2004 Paper 20.7, February 2004.

## DIGITAL PROCESSING SIGMA-DELTA OF THE MODULATED SIGNALS OF A SOUND RANGE OF FREQUENCIES

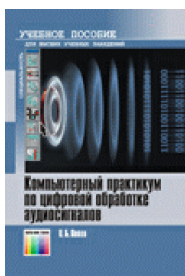
*Igor Chufarov*

Essence of offered technology of a digital sound recording — use multibit sigma-delta of the modulated signal

directly from an exit multidigit modulator sigma-delta. Thus frequency of digitization of a kept signal should correspond to frequency on which the sigma-delta the modulator works. The carried out researches have shown, that the given way of preservation of the information after analogue-digital transformation of signals of a sound range of frequencies, provides the best characteristics both in comparison with traditional formats PCM, and in comparison with 1-bit DSD.

Complexity of processing sigma-delta of the modulated signal consists in necessity repeated sigma-delta of modulation after the made transformations. In this respect, for example 1-bit format DSD used in SACD does not provide sufficient quality of transformation.

In article the results testifying to possibility of processing sigma-delta of modulated signal DMS-SDM and preservation of result with quality, not conceding 32-bit PCM are reflected.



Попов О. Б. **Компьютерный практикум по цифровой обработке аудиосигналов.** Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 176 с.: ил.

Цифровая обработка «сопровождает» звуковой вещательный сигнал (ЗВС) от пульта звукорежиссера до абонентского приемника - и при аналоговой и при цифровой передаче. Цель обработки заключается в согласовании свойств сигнала, как с возможностями канала передачи, так и с особенностями слухового восприятия. В учебном пособии приведены примеры практических работ по обработке и анализу свойств аудиосигналов в трактах канала звукового вещания. В ходе выполнения работ анализируются основные характеристики сигналов и каналов звукового вещания. Изучаются результаты использования базовых математических процедур, при цифровой обработке ЗВС. Моделируются способы представления и основные алгоритмы обработки сигнала в канале звукового преобразовании и компактном представлении, в процессе автоматического регулирования уровня и аудиопроецессорной обработки. Практические работы выполнены на базе программного звукового редактора COOL-2000, математических пакетов Mathcad и Matlab, но при их выполнении могут быть использованы и другие программы. Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Телекоммуникации», может быть полезна специалистам эксплуатационных служб радиосвязи, радиовещания и телевидения.



Галушкин А.И. **Нейронные сети: основы теории.** – М.: Горячая линия– Телеком, 2010. – 496 с.: ил.

Изложена методика синтеза многослойных нейросетей различной структуры: с полными и неполными последовательными связями, перекрестными и обратными связями, функционирующими в режимах обучения, самообучения, обучения с учителями, обладающих конечной квалификацией. Приведены этапы исследования надежности и диагностики нейронных сетей. Представлены основные постановки задач перспективных исследований в области теории нейронных сетей. Для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся разработкой и применением сверхвысокопроизводительной вычислительной техники.



Марченко А. Л., Марченко Е. А. **Основы преобразования информационных сигналов.** Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2010. – 288 с.: ил.

На современном уровне и в доступной форме изложены математические и инженерные приемы представления и преобразования информационных сигналов при модулировании, кодировании и передаче по каналам связи, а также при их прохождении через простейшие электрические цепи. Изложение материала иллюстрируется многочисленными, тщательно подобранными примерами. Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 210201 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 210202 – «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» направления 210200 – «Проектирование и технология электронных средств», может быть полезно специалистам.



Рихтер С. Г. **Кодирование и передача речи в цифровых системах подвижной радиосвязи.**

Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 304 с.: ил.

Систематизированы сведения в области преобразования и обработки информации в системах связи с подвижными объектами, причем основное внимание сосредоточено на речевых сигналах. Изучаются процедуры преобразования и обработки информации, осуществляемые в основном в абонентском терминале – ключевом элементе любой системы связи с подвижными объектами. Последовательно рассматриваются вопросы формирования и преобразования речевого сигнала на пути от микрофона на передающей стороне до телефона (громкоговорителя) – на приемной, особое внимание уделено вопросам кодирования речи. Предназначена для студентов вузов, обучающихся по специальности 201200 (210402) – «Средства связи с подвижными объектами» направления подготовки дипломированных специалистов 654400 – «Телекоммуникации», может быть использована при подготовке дипломированных специалистов по специальностям 201100 (210405) – «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» и 201400 (210312) – «Аудиовизуальная техника», а также бакалавров и магистров направлений «Радиотехника» и «Телекоммуникации» соответствующих специальностей.