

УДК 681.3

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ЦИФРОВАЯ ЗВУКОЗАПИСЬ НА ОСНОВЕ СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯЦИИ

Чуфаров И.Г.

История сигма-дельта преобразования звуковых сигналов

Наиболее распространенной и перспективной технологией аналого-цифрового преобразования сигналов звукового диапазона частот сегодня является сигма-дельта модуляция. История возникновения сигма-дельта преобразователей, описанная в [1], восходит к 1954 году, когда С.С. Cutler из Bell Labs запатентовал принцип избыточной дискретизации и преобразования шума с достижением высокого разрешения [2]. Следующее кардинальное усовершенствование было осуществлено в 1969 году, когда D.J. Goodman из Bell Labs опубликовал статью с описанием полного сигма-дельта АЦП Найквиста с цифровым фильтром и дециматором после модулятора [3]. Это стало первым применением сигма-дельта архитектуры непосредственно в производстве АЦП Найквиста.

В 1972 году фирмой Philips был разработан оптический способ записи информации на дисковый носитель. В июне 1979 года между фирмами Philips и Sony был заключен договор о проведении совместных работ по созданию системы оптической записи звука [4]. В результате к маю 1982 года был разработан проект международного стандарта на систему оптической звукозаписи «Компакт-диск» (CD-DA). В данном стандарте, существующем и по сей день, принята частота дискретизации 44,1 кГц и разрядность 16 бит.

При производстве параллельных преобразователей с такими параметрами выяснилось, что реализовать аналоговый фильтр, который бы эффективно подавлял частоты выше 22,05 кГц и не искажал сигнал в полосе 20 Гц–20 кГц практически невозможно. Тем не менее, именно такая фильтрация по идее должна осуществляться до АЦП и после ЦАП во избежание проблем с наложением спектров. Данные ограничения привели индустрию к внедрению и повсеместному использованию сигма-дельта архитектуры, при которой аналоговый сигнал оцифровывается с высокой частотой дискретизации, после чего полученный цифровой поток прореживается в цифровом фильтре-дециматоре (ЦФ-дециматор). При цифро-аналоговом преобразовании осуществляется обратная последовательность действий: сигнал интерполируется (ЦФ-интерполятор), в результате чего повышается частота дискретизации, затем с помощью сигма-дельта модуляции в цифровом виде понижается разрядность цифрового потока, и такой сигнал переводится в аналоговую форму. После этого используется аналоговый фильтр, но, учитывая частоту сигма-дельта модулятора, реализация выходного фильтра не вызывает затруднений. Простейший вариант данной схемы использовал 1-битную модуляцию на частоте, в 64 раза превышающую удвоенную частоту Найквиста ($44,1 \text{ кГц} \cdot 64 = 2,8224 \text{ МГц}$).

Предлагается альтернативная существующим (как 1-битной DSD, так и классической PCM) методика цифровой звукозаписи: DMS-SDM (Direct Multibit Stream from Sigma-Delta Modulator — Прямой мультибитный поток с сигма-дельта модулятора). Суть предлагаемой технологии цифровой звукозаписи — использование «сырой» информации непосредственно с выхода многозарядного сигма-дельта модулятора. При этом частота дискретизации сохраняемого сигнала должна соответствовать частоте, на которой работает сигма-дельта модулятор. Данная технология имеет ряд преимуществ как перед классической PCM схемой, так и перед 1-битной DSD, и является весьма перспективной.

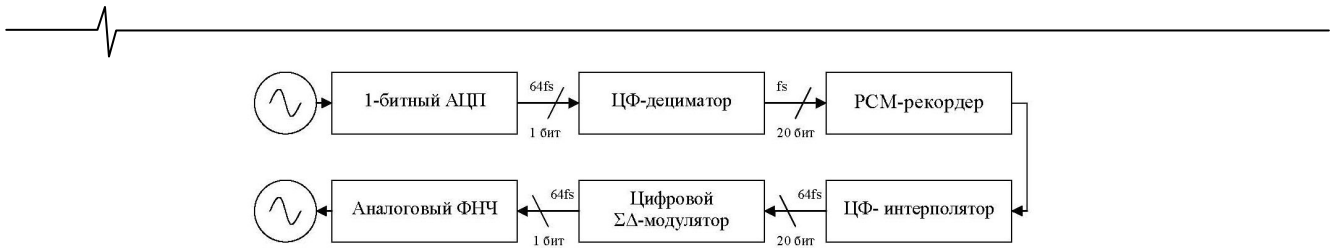
Недостатки существующих форматов звукозаписи

Появление новых оптических носителей (DVD), а также общее развитие отрасли звукозаписи привели к появлению новых форматов — DVD-Audio и SACD.

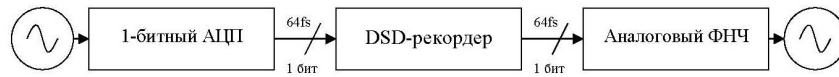
В формате DVD-Audio используется разрядность квантования 24 бит при допустимых частотах дискретизации 44,1 кГц, 48 кГц, 88,2 кГц, 96 кГц, 176,4 кГц и 192 кГц в зависимости от требований к качеству.

При записи SACD фирмы-разработчики Sony и Philips предложили использовать частоту 2,8224 МГц при 1-битном представлении сигнала. В отличие от традиционной импульсно-кодовой модуляции (ИКМ), такая форма сохранения сигнала может быть интерпретирована как цифровая широко-импульсная модуляция (ШИМ). В терминах Sony и Philips данный способ записи был назван прямым цифровым потоком DSD (Direct Stream Digital). Суть прямого кодирования по методу DSD заключается в следующем. В качестве отправной точки разработчиками была исследована схема «bitstream» кодирования сигнала в формат CD-DA (рис. 1,а). Как сказано в официальных материалах [5], исследования показали, что увеличение разрядности и частоты дискретизации в системах PCM-записи улучшают характеристики системы, но увеличение качества становится всё менее и менее заметно. Причина этого — фильтрация. Любая PCM-система использует заграждающие фильтры, которые на входе подавляют все составляющие сигнала выше частоты Найквиста. Более того, любое изменение частоты дискретизации (децимация, интерполяция) также сопровождается применением заграждающих фильтров, что не может не сказываться на качестве сигнала и проявляет себя в искажениях.

По результатам исследований компаниями Sony и Philips было предложено исключить из классической схемы звукозаписи фильтр-дециматор в АЦП и интерполятор с цифровым сигма-дельта модулятором в ЦАП (рис. 1,б). При этом отсутствие в схеме записи и воспроизведения блоков изменения частоты дискретизации и разрядности квантования было отражено в названии как «прямой цифровой поток» (DSD).



Риснок 1.а — Схема PCM-записи и воспроизведения



Риснок 1.б — Схема DSD-записи и воспроизведения

Рис. 1. Сравнение PCM и DSD схем звукозаписи и воспроизведения (по материалам Sony и Phillips)

Декларируемые преимущества формата — сокращение схемы звукозаписи и воспроизведения, отсутствие искажений сигнала, связанных с дополнительной обработкой сигнала (децимация, интерполяция, цифровая сигма-дельта модуляция при цифро-аналоговом преобразовании).

При практической реализации указанных соображений фирмы столкнулись с рядом проблем, главная из которых — невозможность цифровой обработки сигнала в формате DSD. Нетрудно сообразить, что любая обработка, даже такая простая, как регулировка уровня, не может быть осуществлена без преобразования сигнала в PCM. А это, в свою очередь, делает невозможным прямую запись (Direct Stream) звукозаписи с применением даже простейшего микширования сигналов нескольких источников, не говоря уже о наложении эффектов (реверберация, эхо, дисторшн и т.д.). Кроме того, возможны дополнительные проблемы с модуляцией шума квантования сигналом, предельными циклами и прочими особенностями одноразрядного представления сигнала [6–8].

Указанные в [6] положения о превосходстве над 1-битным форматом даже 8-битного представления с частотой дискретизации 176,4 кГц (при принятии соответствующих дополнительных мер — добавлении псевдослучайного сигнала и формировании шума), скорее всего, были проанализированы, в том числе и компаниями, внедрившими формат DSD.

В результате в 2004 году был введен формат DXD, позиционируемый в качестве формата подготовки (микширования, обработки и мастеринга) фонограмм для SACD [9]. Авторы формата — компания Digital Audio Denmark. Идею поддержали Sony и Philips. Как ни странно, этот формат использует обычную импульсно-кодировую модуляцию (PCM) с разрядностью 24 бита и

частотой дискретизации 352,8 кГц, что обеспечивает качество лучшее, чем DVD-A, но никак не согласуется с заявлениями о преимуществах кодирования DSD для реализации прямого тракта записи. После микширования, наложения эффектов и мастеринга, по мнению авторов формата DXD, может осуществляться конвертация материала в DSD и запись на SACD. При этом как будто бы преимущества формата DSD должны сохраняться при использовании мультибитных сигма-дельта АЦП и обработки в формате DXD.

Более того, даже при цифро-аналоговом преобразовании в наиболее дорогих и высококачественных SACD-плеерах используется перевод сначала из DSD в PCM, и лишь затем в аналоговый сигнал [10].

Таким образом, вместо рекламируемой схемы (рис. 1,б) записи и воспроизведения DSD-фонограмм, на практике используется схема, представленная на рис. 2.

Разрядность PCM потока M и коэффициент избыточности дискретизации K могут варьироваться в зависимости от требований к качеству получаемого сигнала. В частности, 5-битное преобразование с 128-кратной передискретизацией позволяет достигнуть динамического диапазона 120 дБ в области звукового диапазона частот [11]. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования на основе мультибитной сигма-дельта модуляции широко применяются при производстве микросхем АЦП и ЦАП [12–14]. В [6] теоретически, а в [15] на практике показано, что каждое преобразование из DSD в PCM и обратно приводят к деградации качества сигнала.

Таким образом, получается, что DSD не обеспечивает прямого потока следования звука от исполнителя к слушателю, и результирующий сигнал является продуктом многократных преобразований из одного формата в другой. Подобная схема не может называться прямой (Direct Stream).

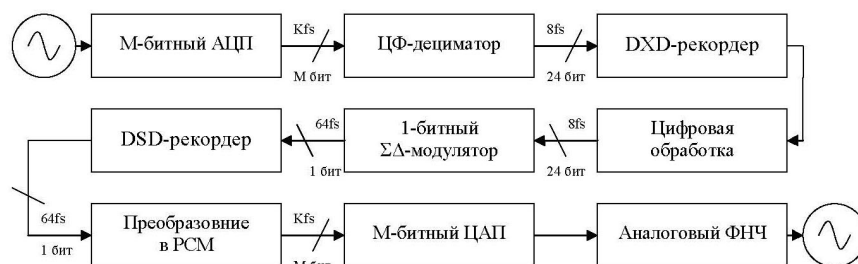


Рис. 2. Реальная схема записи и воспроизведения в формате DSD

Новая технология звукозаписи

Ошибка разработчиков DSD и SACD — подмена понятий. Преимущества формата по сравнению с обычным PCM, используемым в DVD-A, обусловлены не 1-битным квантованием, а избыточной частотой дискретизации, по сравнению с удвоенной частотой Найквиста. Использование одnorазрядного квантования — вынужденная компромиссная мера для возможности размещения информации с высокой частотой дискретизации на информационном носителе объемом 4,7 Гбайт (DVD). С появлением новых носителей информации стало возможным дальнейшее усовершенствование технологии звукозаписи.

Существует две взаимно противоположные тенденции развития современной звукозаписи, указанные в [16–19]. Первая тенденция — стремление к сокращению объема файлов для их мобильного переноса, в том числе передачи через Интернет. Вторая — использование большего объема информации, позволяющего как можно точнее передать форму исходного сигнала.

В результате анализа достоинств и недостатков существующих сегодня форматов, был сделан следующий вывод: все преимущества однобитного формата DSD можно обеспечить при использовании стандартной импульсно-кодовой модуляции PCM, в случае, если используется значительная избыточность по частоте дискретизации. При этом недостатки DSD формата будут устранены за счёт многоразрядности, форматов CD-DA, DVD-A и DXD — за счет значительной избыточности частоты дискретизации.

В результате исследований была разработана технология высококачественной цифровой звукозаписи DMS-SDM (Direct Multibit Stream from Sigma-Delta Modulator — Прямой мультибитный поток с сигма-дельта модулятора). Типичная схема записи и воспроизведения звука с использованием DMS-SDM изображена на рис. 3.

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.

Использование прямого мультибитного потока с выхода сигма-дельта модулятора позволяет обеспечить следующие преимущества по сравнению с традиционной схемой:

1). Возможность создания цифрового архива с качеством лучшим, чем в любом из существующих на сегодняшний день форматов (как традиционным PCM, так и 1-битным DSD). Эта методика может, кроме того, быть применена для оцифровки аналоговых мастер-лент. В отличие от сохранения в форматах с децимацией, которые постоянно совершенствуются, запись информации непосредственно с сигма-дельта модулятора АЦП позволяет полностью реализовать потенциал современных преобразователей. Во времена CD-DA считалось нормальным использование частоты дискретизации 44,1 кГц. В DVD-A прореживание осуществляется с меньшим коэффициентом. Только сохранение в формате DMS-SDM позволит конвертировать архивную запись в любой из вновь появившихся форматов с децимацией.

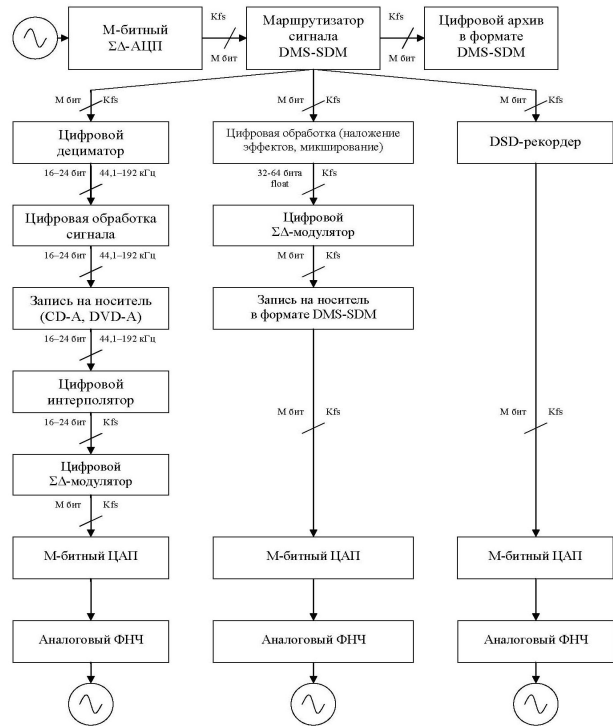


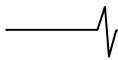
Рис. 3. Схема записи и воспроизведения DMS-SDM

2). Сохраненные в формате DMS-SDM записи могут быть сконvertированы в любой из существующих ныне форматов. Отказ от прореживания в реальном времени позволяет использовать сложные, в том числе мультипроходные алгоритмы цифровой фильтрации, необходимые для осуществления операции децимации.

3). Возможность применения к одной записи разных алгоритмов обработки. Традиционная схема звукозаписи предполагает априорную известность формата, в котором запись будет тиражироваться. Типичный пример: в случае, если планируется выпуск CD-DA, при подготовке часто используют дискретизацию с частотой 88,2 кГц, если же формат готового продукта — DVD-A, используются частоты дискретизации 96 или 192 кГц. Оцифровывая в формат DMS-SDM, звукоинженер получает возможность выбора произвольного коэффициента децимации после того, как запись уже сделана. При этом за счёт минимальности обработки на стадии записи, негативные эффекты от обработки также будут сведены к минимуму. Кроме того, появляется возможность с минимальными искажениями выпускать конечный продукт в различных форматах.

4). Возможность обработки алгоритмами, которые будут внедрены в будущем. Один раз сохраненный архив в формате DMS-SDM, может быть в последующем обработан алгоритмами, которые сейчас по каким либо причинам нереализуемы, например, из-за требуемых больших вычислительных мощностей или применения сложного математического аппарата.

5). Возможность наложения цифровых эффектов с качеством лучшим, чем обеспечивается в рамках современных форматов. Учитывая высокую частоту дискретизации, сигнал в формате DMS-SDM может быть обработан алгоритмами, использующими высокоточное представление сигнала (например, 32 бита с плавающей запятой, 64 бита с плавающей запятой) на



частоте дискретизации сигма-дельта модулятора! Учитывая, что для современных преобразователей типичная частота сигма-дельта модулятора может быть равна 6,144 МГц, обработка будет производиться в формате 64 бита с плавающей запятой, 6,144 МГц. По сравнению с современными форматами 24 бит 96-192 кГц, такая обработка будет обладать большей точностью, а результат будет более близок к аналоговому оригиналу.

6). В случае, если данный формат, ввиду необходимости большого объема для хранения информации, окажется неудобным в какой-либо ситуации, в любой момент, на любом этапе от предлагаемой схемы звукозаписи можно перейти к классической, причем без потерь. Поскольку децимация при аналого-цифровом преобразовании, а интерполяция и цифровая сигма-дельта модуляция при преобразовании цифро-аналоговом, всё равно осуществляются, то не имеет значения, осуществлены ли они в реальном времени с использованием микросхем АЦП или ЦАП, или же они, возможно даже с большей точностью, осуществлены с использованием алгоритма, реализованного в DSP или в качестве программы для компьютера.

7). В случае отсутствия цифровой обработки и микширования, только формат DMS-SDM обеспечивает истинно прямой поток информации от исполнителя к слушателю. На сегодняшний день сложилась следующая ситуация: потенциал преобразователей таков, что сигнал с мультибитного АЦП, оцифрованный на высокой частоте дискретизации с глубиной квантования 5 или более бит, либо подвергается децимации и конвертируется в формат DVD-Audio, либо децимация не производится, но осуществляется понижение разрядности до 1 бита, в результате чего записывается DSD сигнал. Таким образом, ни один из существующих форматов в полной мере не реализует потенциал современных преобразователей. Сохранение в любой из форматов (DVD-Audio, DSD или DXD) осуществляется только с помощью обработки для уменьшения потока информации и не может называться прямым (direct). DSD мог считаться форматом прямого потока на момент массового использования 1-битных преобразователей, но сегодня, когда мультибитные преобразователи используются даже в потребительских устройствах, говорить об использовании 1-битного преобразования для профессиональных целей не приходится.

8). Упрощение схем АЦП (за счёт исключения из схемы дециматора) и ЦАП (за счёт исключения из схемы интерполятора и сигма-дельта модулятора).

Моделирование записи сигнала в новом формате

Основа нового формата записи — применение сигма-дельта модуляции. Под сигма-дельта модулятором может пониматься как наиболее общая схема [20] (рис. 4), так и рассматриваемые в данной статье две её разновидности (рис. 5–6). Во всех схемах под Q подразумевается блок квантования, U и V соответственно входной и выходной сигналы модулятора, Y — квантуемый сигнал, а L_0 , L_1 и L — соответствующие передаточные характеристики фильтров в z -области.

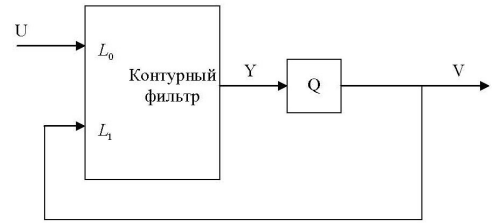


Рис. 4. Наиболее общая топология сигма-дельта модулятора

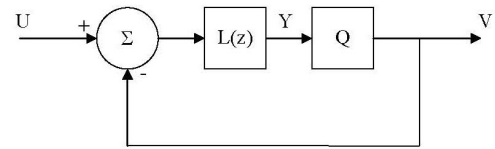


Рис. 5. Топология с фильтрацией в прямом тракте

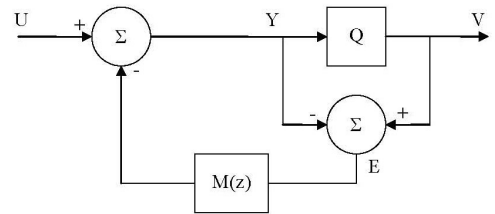


Рис. 6. Топология с фильтрацией в тракте обратной связи по ошибке

Очевидно, что наиболее общая схема рис. 4 может быть описана в z -области следующим уравнением:

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

При этом сигнал на выходе блока квантования может быть в случае линейной модели представлен суперпозицией сигналов до и после квантователя:

$$V(z) = Y(z) + E(z). \quad (2)$$

Выразив $Y(z)$ из (2) и подставив полученное выражение в (1), после несложных преобразований можно привести уравнение, описывающее модулятор, к виду:

$$V(z) = \frac{L_0(z)}{1-L_1(z)} \cdot U(z) + \frac{1}{1-L_1(z)} \cdot E(z) = STF(z) \cdot U(z) + NTF(z) \cdot E(z), \quad (3)$$

где

$$STF(z) = \frac{L_0(z)}{1-L_1(z)}, \quad (4)$$

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

Здесь $STF(z)$ и $NTF(z)$, соответственно, передаточные функции относительно преобразования сигнала и шума модулятора. Соотношения для $STF(z)$ и $NTF(z)$ также могут быть получены для схем на рис. 5 и 6.

В частности, для схемы с фильтрацией в прямом тракте получаются следующие выражения:

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

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

Для схемы с фильтрацией в тракте обратной связи по ошибке квантования получается:

$$\begin{aligned} STF(z) &= 1, \\ NTF(z) &= 1 - M(z). \end{aligned} \quad (6)$$

Из формул видно, что в случае использования схемы с фильтрацией в прямом тракте можно добиться, чтобы шум квантования был сосредоточен в высокочастотной области, в то время как полезный сигнал претерпевал бы преобразования, аналогичные прохождению через ФНЧ. При этом примерные графики АЧХ для STF и NTF могут выглядеть, как на рис. 7.

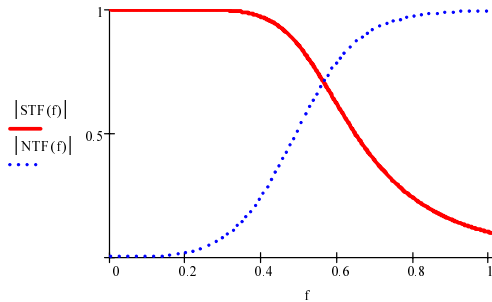


Рис. 7. АЧХ фильтров полезного сигнала и шума квантования при схеме с фильтрацией в прямом тракте

При использовании топологии с фильтрацией в тракте обратной связи по ошибке, будет фильтроваться только шум (рис. 8).

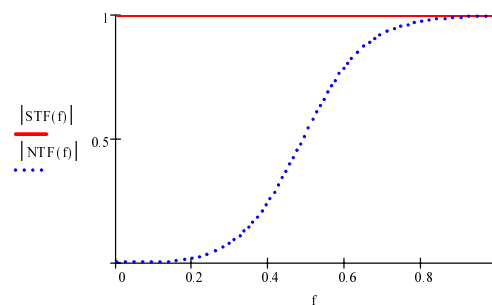


Рис. 8. АЧХ фильтров полезного сигнала и шума квантования при схеме с фильтрацией в тракте обратной связи

Видно, что при использовании схемы с фильтрацией в тракте обратной связи, фильтрация полезного сигнала не осуществляется. Полезный сигнал подвергается фильтрации непосредственно только в процессе децимации, поэтому изучение влияния на качество сигнала именно алгоритма децимации имеет высокую важность с прикладной точки зрения.

Сигма-дельта модуляция определяет такие фундаментальные характеристики системы, как спектр и мощность шума квантования, динамический диапазон системы. В случае предположения об оцифровке сигнала с использованием одного и того же сигма-дельта АЦП с последующим сохранением в различные форматы (с децимацией и без), можно получить результаты, присущие конкретному алгоритму прореживания, свойственному каждому из форматов.

В качестве тестового сигнала для демонстрации возможностей формата был использован меандр (15 кГц), показывающий одновременно и способность системы обрабатывать быстрые фронты сигнала, и возможность передачи высоких частот (т.к. спектр меандра бесконечен) и искажения, вносимые системой.

Такой же тип сигналов был выбран в качестве тестового при демонстрации преимуществ DSD над CD-DA. Результаты моделирования систем с различной частотой дискретизации — 48 кГц, 96 кГц, 192 кГц (DVD-Audio), 352,8 кГц (DXD), 2,8224 МГц (DSD) и 6,144 кГц (DMS-SDM, 128-кратный оверсемплинг) представлены на рис. 9.

По результатам моделирования видно, что преобразование аналогового сигнала меандра в цифровой формат с наилучшим качеством обеспечивает именно новый формат DMS-SDM. Конечный продукт, который в последствии будет воспроизведен потребителем, может быть в любом из представленных форматов. Но только сохранение материала в формате DMS-SDM позволяет путём конвертации получать различные варианты одной и той же записи. При этом выбор конечного формата может быть обусловлен характером музыкального материала.

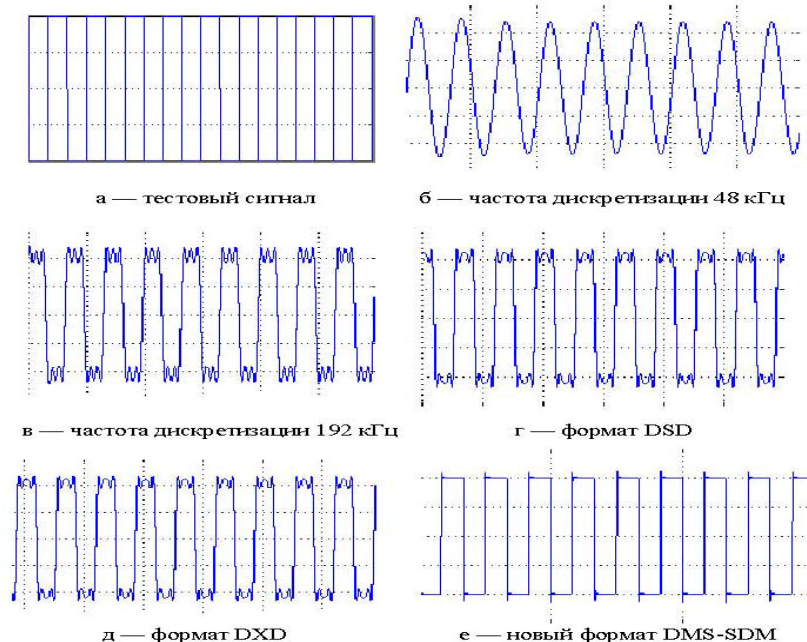
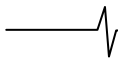


Рис. 9. Моделирование записи сигнала в существующих и в новом форматах



Например, при наличии в записи резких ударных звуков с крутыми фронтами может быть выбран меньший коэффициент децимации, чем при конвертации записи с достаточно узким динамическим диапазоном (современная электронная танцевальная музыка). Кроме того, при децимации могут быть использованы различные типы фильтров (с линейной фазой, минимально-фазовые), так же применяемые индивидуально в зависимости от характера музыкального материала, с возможностью контрольного прослушивания и выбора наилучшего результата.

Перспективы системы

Как уже было сказано выше, и подчеркнуто в [17–19], тенденции современной звукозаписи таковы, что одни технологии направлены на сокращение размера файла, пусть и с ущербом для качества, а другие за счёт использования большего объёма информации позволяют качество улучшить.

В любом случае, формат записи — это всегда компромисс между качеством, объёмом информации и удобством её обработки. С точки зрения соотношения объёма информации к качеству звучания предлагаемый формат DMS-SDM не является оптимальным решением. Но когда требуется бескомпромиссное качество и важно сохранить мельчайшие нюансы музыкального произведения, а объём записываемой информации не так важен, DMS-SDM может стать форматом будущего, так как полностью реализует потенциал современных преобразователей и может быть впоследствии переконвертирован в любой из существующих или вновь введённых форматов с минимальными потерями.

Кроме того, уже сейчас формат DMS-SDM подходит для серьёзной студийной звукозаписи с последующей конвертацией в один из потребительских форматов, при этом после записи для отдельных композиций (или даже партий отдельных инструментов) всегда возможен прецизионный подбор параметров децимации, контролируемый в том числе и непосредственным прослушиванием.

Применимость формата в качестве потребительского может быть определена следующим образом. Если принять разрядность квантования равной 5 бит и частоту дискретизации 6,144 МГц, получаемый битрейт составит 30,72 Мбит/с. По сравнению с типичным битрейтом современных форматов, это, безусловно, много. Тем не менее, уже существуют оптические носители большой вместимости (например, Blu-Ray), которые на сегодняшний день используются в основном для записи видео высокой чёткости. Эти же носители можно использовать для записи аудиоинформации в формате DMS-SDM. В частности, на диск Blu-ray вместимостью 100 Гбайт может быть записана 6-канальная фонограмма в формате DMS-SDM. Соответственно, для сохранения двухканальной фонограммы потребуется около 35 Гбайт. Следует также учитывать возможность применения существующих методик сжатия без потерь, что может обеспечить, например, возможность записи DMS-SDM сигнала на Blu-Ray диск вместимостью 25 Гбайт. Возможны разные комбинации методики сжатия и выбора носителя, но, так или иначе, есть все предпосылки к тому, чтобы формат DMS-SDM был реализован на практике, как в профессиональной сфере (студийная звукозапись), так и в качестве потребительского формата.

Литература

1. Аналого-цифровое преобразование / Под ред. Уолта Кестера. — Техносфера. — М., 2007.

2. C.C.Cutler. Transmission Systems Employing Quantization. U.S.Patent 2, 927, 962, filed april 26, 1954, issued March 8, 1960.
3. D.J.Goodman. The Application of Delta Modulation of Analog-to-PCM Encoding. Bell System Technical Journal, Vol. 48, February 1969, pp. 321-343. Reprinted in N.S.Janant, Waveform Quantization and Coding, IEEE Press and John Wiley, 1976, ISBN 0-471-01970-4.
4. Никамин В.А. Цифровая звукозапись. Технологии и стандарты. — СПб: Наука и техника, 2002.
5. "Super Audio Compact Disc: A Technical Proposal", Philips/Sony white paper, 12 pp. (1997).
6. 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.)
7. 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. (This reference should be considered superseded by the present paper.)
8. 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.)
9. The advantages of DXD for SACD. White paper
10. 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>
11. Ichiro Fujimori, Akihiko Nogi, Tetsuro Sugimoto. A Multibit Delta-Sigma Audio DAC with 120-dB Dynamic Range // IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 35, NO. 8, AUGUST 2000
12. CS4398: 120 dB, 192 kHz Multi-Bit DAC with Volume Control. Cirrus Logic, Inc. 2005
13. DSD1702: Enhanced multiformat, delta-sigma, audio digital-to-analog converter. Texas Instruments Incorporated, 2002.
14. DSD1792: 24-bit, 192-kHz sampling, advanced segment, audio stereo digital-to-analog converter. Texas Instruments Incorporated, 2003.
15. 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>
16. И.Г.Чуфаров. Современная звукозапись. Нестандартный подход: адаптивное аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов звукового диапазона. — Материалы международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – 2007», 2007.
17. И.Г.Чуфаров. Адаптивное аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов звукового диапазона. — Публикация в сборнике трудов кыштымского филиала ЮУрГУ, 2007.
18. И.Г.Чуфаров. Компенсация эффектов, связанных с уменьшением разрядности квантования при сжатии объёма данных аудиосигналов. — Публикация в сборнике трудов кыштымского филиала ЮУрГУ, 2008.
19. А.Ю.Светлов, И.Г.Чуфаров. Компенсация эффектов, связанных со сжатием объёма данных аудиосигналов. — Материалы 16-ой международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии», 21 - 23 октября 2008 года.
20. Richard Schreier, Gabor C. Temes. Understanding Delta-Sigma Data Converters. New York, NY: IEEE Press, 2004.