

УДК 551.501.8:621.396.96

https://doi.org/10.33619/2414-2948/55/03

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

©*Абдуллаев У. М., Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий, г. Ташкент, Узбекистан, nxajimurodov@bk.ru*

METHODS AND ALGORITHMS SOUND SIGNALS PROCESSING

©*Abdullayev U., Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, nxajimurodov@bk.ru*

Аннотация. В данной статье рассмотрены методы и алгоритмы обработки звуковых сигналов, назначение и классификация фильтров, базовые цифровые фильтры, фильтры низких и высоких частот 1 порядка для решения технических задач, в том числе согласования параметров сигнала с характеристиками электроакустического тракта.

Abstract. This article discusses methods and algorithms for processing sound signals, the purpose and classification of filters, basic digital filters, first-order low and high-pass filters for solving technical problems, including matching signal parameters with the characteristics of the electro-acoustic path.

Ключевые слова: динамика, механизмы, цифровые обработки, электроакустика, плагины, редакторы, звукозапись, акустика, микрофоны.

Keywords: dynamics, mechanisms, digital processing, electroacoustics, plugins, editors, sound recording, acoustics, microphones.

Под обработкой звукового сигнала понимается изменение его частотной или фазовой характеристики, сужение или расширение динамического диапазона, применение амплитудной, частотной или фазовой модуляции, удаление шумов, а также создание задержанных по времени затухающих копий этого сигнала. Целью обработки могут быть как чисто технические задачи, такие как согласование параметров сигнала с характеристиками электроакустического тракта, так и художественные, определяемые звукорежиссером, в частности, это могут различные звуковые эффекты (тремоло, вибрато, хор, эхо, реверберация и другие).

В настоящее время обработка звуковых сигналов производится преимущественно в цифровом виде с помощью звуковых процессоров. Если раньше звуковые и радио студии размещались на нескольких десятках квадратных метров, то теперь их может заменить хороший компьютер, который по возможностям превосходит десять таких студий вместе взятых, а по стоимости оказывается многократно дешевле одной студии. Это снимает многие финансовые барьеры и делает звукозапись более доступной и профессионалу и простому любителю.

Современное программное обеспечение позволяет осуществлять сколь угодно сложные преобразования звуковых сигналов и создавать самые невероятные звуковые эффекты. В аналоговой технике почти каждый отдельный звуковой эффект создается путем использования отдельного устройства, когда каждое такое устройство может стоить очень дорого. В цифровой технике качество обработки сигналов в них намного меньше зависит от



качества аппаратуры. Очень важно, что для различных манипуляций со звуком не требуется постоянная смена оборудования, достаточно изменить программное обеспечение. Именно поэтому цифровая техника уже сегодня почти полностью вытеснила из студий старую аналоговую аппаратуру.

Механизмы цифровой обработки звука реализуются как в программном, так и аппаратном исполнении. Наиболее часто обработка звука осуществляется с помощью звуковых карт профессионального и бытового назначения с использованием звуковых редакторов специального назначения. Наиболее широко применяется редактор Sound Forge, имеющий наиболее большой пакет звуковых плагинов, пользуются большой популярностью звуковые редакторы Cool Edit Pro и Steinberg WavLab [1].

Особо высокое качество обработки звука обеспечивает пакет плагинов Waves Platinum Native Bundle 4. Обработка звукового сигнала может осуществляться в реальном времени или применяться отношении уже записанной фонограммы. Обработка фонограмм применяется на стадии мастеринга или подготовки их к тиражированию, когда важна не быстрота, а скрупулезная проработка всех нюансов звучания.

Необходимость серьезной частотной коррекции звуковоспроизводящей аппаратуры наиболее часто обусловлена плохими акустическими характеристиками помещений, где проводится концерт или прослушивается звукозапись.

Если, например, в зале имеются ровные твердые поверхности сцены и пола, бетонные или кирпичные стены, жестяная крыша, то все это может начать гремять и дребезжать, а в лучшем случае вокалист и слушатели перестанут понимать слова из-за снижения разборчивости. Серьезные проблемы с качественным восприятием звука возникают и в салоне автомобиля. Аппаратура частотной коррекции звуковых сигналов является связывающим звеном между звучанием звуковоспроизводящей системы и откликом помещения, и она в значительной мере может такие проблемы решить [2].

Частотные корректоры используются во всех студиях звукозаписи и звукового вещания. С их помощью обычно решаются чисто технические вопросы, такие как, ограничение полосы звукового тракта, подавление низкочастотных шумов и сетевых наводок, коррекция амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) микрофонов, громкоговорителей и помещений. В последнее время при сведении и мастеринге все более широко частотная коррекция применяется для решения творческих задач звукорежиссеров по созданию художественных звуковых эффектов и приданию звучанию новой окраски.

Это стало возможно при индивидуальной частотной обработке почти каждого музыкального инструмента и вокалиста.

В аудиотехнике частотная коррекция звуковых сигналов осуществляется с помощью следующих устройств и фильтров, которые могут быть в виде отдельной аппаратуры или программного продукта:

- фильтры ограничения полосы частот;
- фильтры плавного подъема и спада АЧХ;
- полосовые фильтры;
- фильтры «присутствия»;
- графические эквалайзеры;
- параметрические эквалайзеры;
- параграфические эквалайзеры;
- кроссоверы.

Фильтры, используемые при частотной коррекции, по принципу реализации, прежде всего, разделяются на аналоговые и цифровые. В свою очередь аналоговые фильтры могут

быть выполнены как на пассивных, так и на активных элементах. По принципу работы все фильтры разделяются на линейные и нелинейные. В зависимости от вида импульсной передаточной функции фильтры разделяются на рекурсивные (БИХ фильтры, с бесконечной импульсной характеристикой) и нерекурсивные (КИХ фильтры, с конечной импульсной характеристикой). Все аналоговые фильтры являются рекурсивными, цифровые фильтры могут быть как рекурсивными, так и нерекурсивными [3].

Среди множества рекурсивных фильтров *по виду передаточной функции* отдельно выделяют наиболее качественные фильтры:

–фильтры Бесселя — обладают наиболее гладкими АЧХ и ФЧХ (особенно в полосе пропускания), однако крутизна спада АЧХ у них наименьшая;

–фильтры Баттерворта — имеют более крутой спад АЧХ ($6N$ дБ/октаву, N — порядок фильтра) и менее линейную ФЧХ;

–фильтры Чебышева — имеет еще более крутой спад АЧХ, однако, их АЧХ не монотонна, а имеет осцилляции заданного уровня в полосе пропускания, либо в полосе подавления. ФЧХ фильтров Чебышева немонотонна и имеет пик вблизи частоты среза. При задании меньших пульсаций фильтра крутизна спада АЧХ уменьшается, и фильтр Чебышева превращается в фильтр Баттерворта;

–эллиптические фильтры — обладают наиболее крутым спад АЧХ, но имеют пульсации АЧХ как в полосе пропускания, так и в полосе подавления. ФЧХ.

–эллиптических фильтров — не монотонны. При повышении требований к пульсациям этот фильтр превращается в фильтр Чебышева.

По тому, *какие частоты фильтром пропускаются (задерживаются)*, фильтры, используемые при частотной коррекции, подразделяются на следующие группы.

–Фильтр низких частот (Lowpass — LP) выделяет нижние частоты до частоты среза f_c и подавляет частоты выше этой частоты.

–Фильтр высоких частот (Highpass — HP) выделяет частоты выше частоты среза и подавляет частоты ниже этой частоты [4].

Полосовой пропускающий фильтр (Bandpass — BP) выделяет частоты выше частоты среза f_{cl} и ниже частоты среза f_{ch} . Частоты ниже f_{cl} и выше f_{ch} подавляются. Полосовой режекторный фильтр (Bandreject — BR) выделяет частоты выше частоты среза f_{ch} и ниже частоты среза f_{cl} . Частоты ниже f_{ch} и выше f_{cl} подавляются. Узкополосный пропускающий фильтр (Resonator filter) пропускает частоты в узкой полосе вблизи частоты среза f_c . Узкополосный режекторный фильтр (Notch filter) подавляет частоты в узкой полосе вблизи частоты среза f_c .

В частотной коррекции наиболее часто используются 4 вида цифровых фильтров: фильтры плавного подъема/спада АЧХ на краях звукового диапазона (шelfовые фильтры НЧ и ВЧ), полосовые пропускающие/задерживающие пиковые фильтры и узкополосные пропускающие/задерживающие пиковые фильтры средних частот (ФСЧ).

Коэффициент передачи этих фильтров определяется в логарифмической шкале и может быть выше и ниже 0 дБ. Типовые частотные характеристики этих фильтров приведены на Рисунке 1 [5]. Достаточно часто используются и обрезающие фильтры НЧ и ВЧ, ограничивающие частотный диапазон. Большинство этих фильтров являются рекурсивными, проектируются они на основе базовых фильтров — ФНЧ, ФВЧ и все пропускающих фильтров (ФВП).

Если проектирование аналоговых фильтров осуществляется на основе использования преобразований Лапласа, то расчет цифровых фильтров производится с использованием Z-преобразований. Это связано с тем, что в первом случае мы имеем исходные сигналы в виде

непрерывной функции времени, а во втором — звуковые сигналы являются дискретными функциями времени [6].



Рисунок 1. Частотные характеристики фильтров, применяемых в аудиотехнике.

Цифровые фильтры реализуются на основе всего трех элементов: задержка на один такт с передаточной функцией z^{-1} , двоичный сумматор и двоичный умножитель. При построении фильтров на этих элементах используются прямые и обратные связи, коэффициенты этих связей обозначаются, соответственно, как b_n и a_n . Математически работа таких фильтров описывается разностным уравнением (уравнение в конечных разностях), как зависимость входного $x(n)$ и выходного $y(n)$ сигналов в функции времени задержки, коэффициентов фильтра и дискретного времени nT , где n — номер выборки, $T = 1/f_s$, f_s — частота дискретизации.

Передаточная функция фильтра $H(z)$ определяется как отношение функции $Y(z)$ — образов выходного сигнала и входного $X(z)$ сигналов. Модуль передаточной является фазовая характеристика частотной характеристикой фильтра (АЧХ), определяется аргументом этой функции (ФЧХ). Цифровые фильтры могут работать в режиме усиления (*boost*), когда $H(z) > 1$ и в режиме ослабления (*cut*), когда $H(z) < 1$. Число нулей фильтра M на единицу больше числа коэффициентов прямой связи разностного уравнения, а число полюсов N равно числу коэффициентов обратной связи этого уравнения. Порядок фильтра определяется наибольшим из значений M и N , он также равен порядку полинома разностного уравнения.

Сложные фильтры 2 и более высоких порядков строятся на основе звеньев меньшего порядка. Звенья 1 и 2 порядков могут включаться последовательно, параллельно или комбинированно. При последовательном соединении звеньев их передаточные характеристики перемножаются, а при параллельном — суммируются [7].

Простейшая схема фильтра ФНЧ 1 порядка с одним нулем на основе одного элемента задержки и сумматора приведена на Рисунке 1.

В этой схеме используется прямая связь, с помощью которой суммируются прямой и задержанный сигналы. Работа такого фильтра описывается разностным уравнением $y(n) = x(n) + x(n-1)$.

Порядок этого уравнения определяет порядок фильтра. Передаточная функция фильтра в форме Z-преобразования имеет вид $H(z) = 1 + z^{-1}$, $h \in 0,5$,

Реализация такой вычислительной процедуры сталкивается с двумя проблемами. При частоте дискретизации 44100 Гц для выполнения операции свертки по имитации ранних отражений, запаздывающих на время до 100 мс, требуется 4410 элементный фильтр. Для имитации поздних отражений, длительность которых достигает 2 с, требуется 88200

элементный фильтр на каждый звуковой канал (Рисунок 2). Технически это не реализуемо [8].

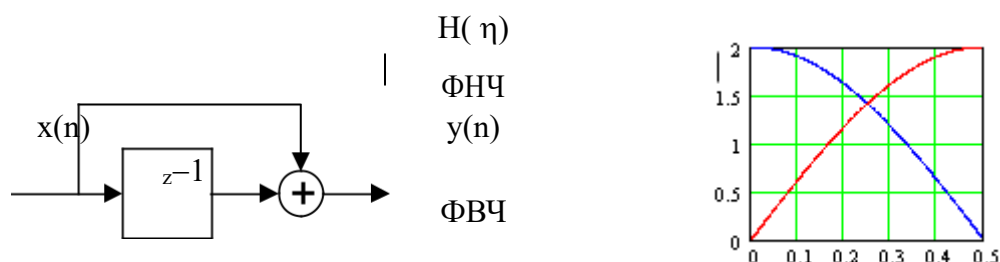


Рисунок 2. Фильтр ФНЧ с одним нулем и его АЧХ.

Длина импульсных откликов помещений зависит от их времени реверберации. На восприятие реверберации наиболее сильно влияет затухание реверберации от максимального значения до уровня -15 дБ. Можно считать, что затухание ниже уровня -60 дБ практически не влияет на восприятие. Длина импульсов отклика помещений до их затухания до уровня -60 дБ может исчисляться несколькими секундами, т. е. длина импульсного отклика M может составлять десятки и даже сотни тысяч цифровых отсчетов.

Если длительность звукового сигнала составляет N выборок, а длина импульса отклика — M выборок, то необходимо за это время произвести $M + N$ операций умножения и сложения. При длительности музыкального отрывка 1 мин и длительности импульсного отклика 3 с — требуется за это время выполнить около 350 триллионов операций сложения и умножения. Поэтому прямое вычисление свертки в реальном времени по вышеприведенной формуле невозможно на современных персональных компьютерах в силу слишком высокой вычислительной сложности. Однако вычислять свертку можно с помощью быстрого преобразования Фурье, которое уменьшает число умножений на отсчет.

Список литературы:

1. Watkinson J. The art of digital audio. Taylor & Francis, 2001.
2. Pohlmann K. C. Principles of digital audio. McGraw-Hill, Inc., 1995.
3. Zölzer U. Digital audio signal processing. New York: Wiley, 2008. V. 9.
4. Zölzer U. (ed.). DAF X: digital audio effects. John Wiley & Sons, 2011.
5. Temirkhanova M. Z. Ways to improve the accounting for liabilities in the travel agency // European journal of economics and management sciences. 2017. №2. P. 3-6. <https://doi.org/10.20534/EJEMS-17-2-3-6>
6. Езиев Г. Л., Темирханова М. Ж. Развитие бухгалтерского учета в условиях модернизации экономики Республики Узбекистан // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №3. С. 224-231.
7. Темирханова М. Ж. Особенности совершенствования учетной политики в туристических компаниях и национальной экономике // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №2. С. 332-341.
8. Гайибназаров Ш. Г., Темирханова М. Д. Теоретические основы учета и анализа объектов интеллектуальной собственности при переходе к инновационному развитию // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №9. С. 290-297. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/46/37>

References:

1. Watkinson, J. (2001). The art of digital audio. Taylor & Francis.

2. Pohlmann, K. C. (1995). Principles of digital audio. McGraw-Hill, Inc.
3. Zölzer, U. (2008). *Digital audio signal processing* (Vol. 9). New York: Wiley.
4. Zölzer, U. (Ed.). (2011). DAFX: digital audio effects. John Wiley & Sons.
5. Temirkhanova M. Z. (2017). Ways to improve the accounting for liabilities in the travel agency. *European journal of economics and management sciences*, (2), 3-6. <https://doi.org/10.20534/EJEMS-17-2-3-6>
6. Yoziyev, G., & Temirkhanova, M. (2018). Accounting development under the modernization of the Republic of Uzbekistan economy. *Bulletin of Science and Practice*, 4, (3), 224-231.
7. Temirkhanova, M. (2018). Features of improving accounting policies in touristic companies and national economy. *Bulletin of Science and Practice*, 4, (2), 332-341
8. Gayibnazarov, Sh., & Temirkhanova, M. (2019). Theoretical Bases of Accounting and Analysis of Objects Intellectual Property at Transition to Innovation Development. *Bulletin of Science and Practice*, 5(9), 290-297. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/46/37>

Работа поступила
в редакцию 20.05.2020 г.

Принята к публикации
24.05.2020 г.

Ссылка для цитирования:

Абдуллаев У. М. Методы и алгоритмы обработки звуковых сигналов // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6. №6. С. 25-30. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/55/03>

Cite as (APA):

Abdullayev, U. (2020). Methods and Algorithms Sound Signals Processing. *Bulletin of Science and Practice*, 6(6), 25-30. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/55/03>