

МЕТОД СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СВЁРТКИ

Перелыгин С.В., к.т.н., доцент кафедры аудиовизуальных систем и технологий, доцент кафедры звукорежиссуры, Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, e-mail: sergey.perelygin@gmail.com

Киселёв С.Л., доцент кафедры звукорежиссуры, Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, e-mail: serg1135@yandex.ru

А METHOD FOR CREATING ARTIFICIAL REVERBERATION BASED ON THE USE OF DYNAMIC CONVOLUTION

Perelygin S.V., Kiselev S.L.

The article describes the problem of creating artificial reverberation methods with realistic sound. A comparison of convolutional reverberation algorithms and algorithms based on mathematical models of reverberation processes in the room is made. A method for obtaining artificial reverberation using dynamic convolution (the convolution of the original signal with a continuously changing impulse response of a real room) is considered. An artificial reverberation software device developed by the authors is presented, which implements the dynamic convolution procedure using algorithms for amplitude and frequency modulation of the processed signal.

Key words: artificial reverberation, algorithmic (modelling) and convolutional reverb, impulse response, dynamic convolution, Fourier transform, modulation, sound reflection.

Ключевые слова: искусственная реверберация, алгоритмический (моделирующий) и свёрточный ревербераторы, импульсная характеристика, динамическая свёртка, преобразование Фурье, модуляция, отражение звука.

Введение

Реверберация, или послезвучание – акустический процесс, который возникает в закрытом пространстве (в помещении) вследствие многочленных отражений звука от поверхностей и проявляется в виде продления звука после прекращения звучания источника, постепенно ослабевая по интенсивности [1-2]. Реверберационный отклик помещения даёт возможность слушателю получить представление о звуковом пространстве, в котором он находится, без использования зрения.

Современная технология звукозаписи предполагает в определённых случаях использование первичных фонограмм, записанных в специальных заглушённых помещениях с отсутствующей реверберацией. Также большинство систем синтеза звука формируют сигнал, лишённый какой-либо реверберационной окраски. В большинстве подобных случаев приходится создавать *искусственную реверберацию*. Это позволяет придать звуку диффузную окраску, которая присуща акустическим процессам в любом закрытом пространстве (помещении), и сформировать у слушателя субъективное ощущение непосредственного присутствия в этом пространстве.

В связи с увеличением производительности и, вместе с тем, возрастающей доступностью вычислительной техники, на сегодняшний день большинство устройств искусственной реверберации являются программными. Разработанные алгоритмы, используемые при создании

Статья посвящена проблеме создания методов искусственной реверберации, обладающей реалистичным звучанием. Произведено сравнение свёрточных алгоритмов реверберации и алгоритмов на основе математических моделей реверберационных процессов в помещении. Рассмотрен метод получения искусственной реверберации с применением динамической свёртки, т.е. свёртки исходного сигнала с непрерывно изменяющейся импульсной характеристикой реального помещения. Представлено разработанное авторами программное устройство искусственной реверберации, реализующее процедуру динамической свёртки при помощи алгоритмов амплитудной и частотной модуляции обрабатываемого сигнала.

искусственной реверберации, могут быть различными и основанными на разных представлениях об акустических процессах в помещениях.

Устройства искусственной реверберации, в основе которых лежит операция **свёртки** функций, являются одними из самых перспективных программных устройств искусственной реверберации, т.к. в них используются предварительно записанные образцы импульсных характеристик реальных помещений. Однако и такие устройства, разработанные и доступные на данный момент, не учитывают некоторых факторов при создании искусственной реверберации, которые непосредственно влияют на естественность звучания.

Принципы работы и проблемы построения алгоритмических цифровых ревербераторов

Цифровые ревербераторы обладают существенным преимуществом по сравнению с механическими и аналоговыми в виде возможности их реализации программным способом: это так называемые алгоритмические и свёрточные ревербераторы.

В основе работы алгоритмических, или моделирую-

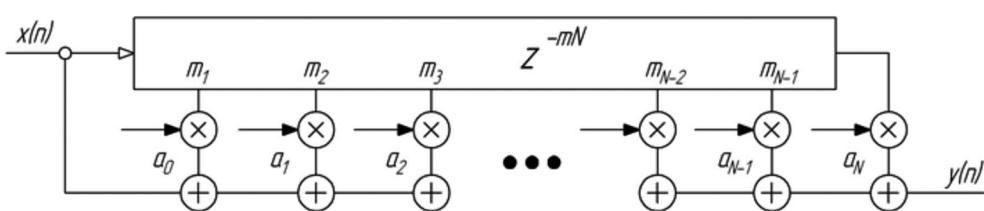


Рис. 1. Многоотводная линия задержки (КИХ-фильтр)

щих, ревербераторов лежит модель, учитывающая распространение звуковой волны в пространстве и её отражения от препятствий. Известно, что многоотводная линия задержки, или КИХ-фильтр [3-4], может достаточно точно сымитировать реверберацию окружающего пространства, т.к. реверберационный отклик действительно состоит из огромного числа сходящихся в точке приёма акустических лучей (рис. 1).

Первые поиски методов и устройств искусственной реверберации с реалистичным звучанием [5-6] базировались на данном принципе. Однако значительное упрощение используемой модели реверберационного процесса приводило к неестественности звучания сигнала, прошедшего обработку в этих устройствах:

– были слышны отдельные повторы сигнала (флэттер), т.к. конечная импульсная характеристика (ИХ) фильтра не воспроизводила требуемую плотность отражений звука (min требуемое значение – 1000 в секунду [5]);

– существенно искажалась тембральная окраска звука, т.к. суммирование сигнала с его задержанной когерентной копией приводило к интерференции и, как следствие, к гребенчатой фильтрации (рис. 2).

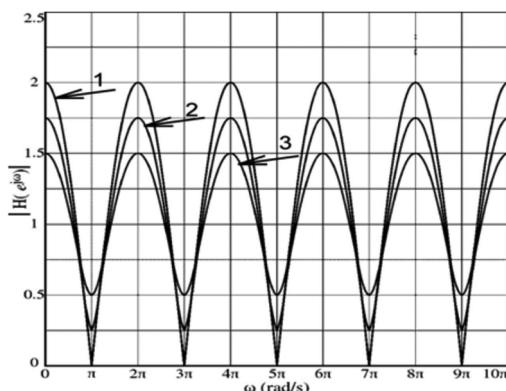


Рис. 2. АЧХ одноотводной линии задержки (гребенчатого КИХ-фильтра) при различных коэффициентах усиления G : 1) $G = 1$; 2) $G = 0,75$; 3) $G = 0,5$.

Приближение модели реверберации к реальному процессу в помещении подразумевает, прежде всего, учёт как можно большего количества отражений звуковых волн от поверхностей. Реализация такой модели в виде КИХ-фильтра значительно повышает его порядок (одно отражение – один отвод линии задержки), требуя большой объём оперативной памяти (RAM) и огромное количество операций умножения и сложения в секунду. При этом теоретически, какой бы точной и сложной ни была такая модель, она содержит импульсную характеристику только для одного положения источника и приёмника в помещении. Имитация перемещения источников акустических сигналов и слушателя в пространстве

дополнительно увеличивает это количество на порядки. Расчёты показывают, что, например, если мы захотим создать точную акустическую модель концертного зала $30 \times 15 \times 6$ м с частотой дискретизации 50 кГц всего для трёх источников и двух приёмников звука, нам понадобится делать более 10^{15} операций в секунду, что невозможно даже на данном этапе развития цифровой техники.

Однако ещё в эпоху создания механических и электронных (аналоговых) ревербераторов были выявлены некоторые аспекты восприятия реверберации, позволяющие упростить процесс вычисления точного реверберационного отклика. Например, импульсную характеристику помещения можно условно разделить на две части: кластер ранних отражений (Early Reflections) и позднюю, диффузную, стадию реверберации (Late Reverberation). Ранние отражения дают самое сильное впечатление о пространстве, в котором находится слушатель, поэтому данный участок реверберационного отклика необходимо воспроизводить особенно точно. Позднюю реверберацию можно заменить стохастическим процессом без потерь для слухового восприятия [5-10]. Такой технологический приём стал индустриальным стандартом в 60-80 годах XX века и на ином техническом уровне актуален и поныне.

Исследования акустиков, направленные на оптимизацию методов искусственной реверберации, привели к созданию алгоритмических ревербераторов с более сложной структурой. Стали применяться линии задержки, охваченные обратной связью (одноотводные и многоотводные цифровые БИХ-фильтры, рис. 3) [5, 11]. Для имитации временного возрастания плотности отражений звука было предложено использовать цифровые всеопускающие фильтры (All-Pass Filter, APF) [11] (рис. 4).

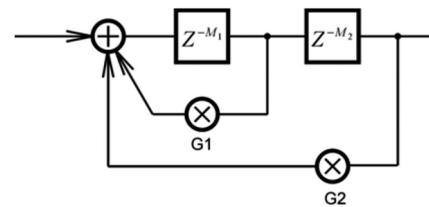


Рис. 3. Структурная схема цифровой линии задержки с двумя отводами (Multi-Tap), охваченными линиями обратной связи с общим сумматором

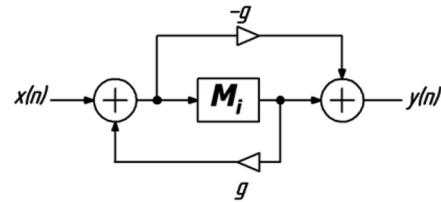


Рис. 4. Структурная схема цифрового всеопускающего фильтра (APF)

Важным усовершенствованием стал так называемый «вложенный» всепропускающий фильтр (Nested APF) (рис. 6). По сути это всепропускающий фильтр, один элемент линии задержки которого заменён ещё одним всепропускающим фильтром [12]. «Вложенный» всепропускающий фильтр позволил обеспечить близкое к реалистичному нарастание плотности имитируемых отражений, избегая при этом точно повторяющихся фрагментов задержек звука (рис. 5).

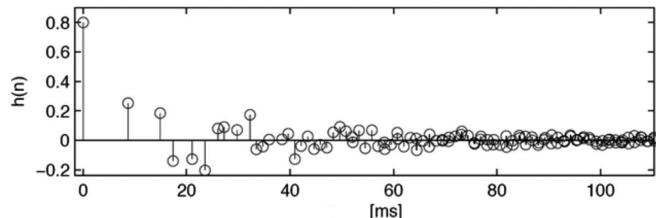


Рис. 5. ИХ «вложенного» всепропускающего фильтра

Наиболее «успешный» алгоритм реверберации [13-14] был применён в ревербераторе Lexicon 224 – прибор был выпущен в 1979 г. и многими экспертами считается непревзойдённым вплоть до настоящего времени. Для достижения диффузии звука применялись всепропускающие фильтры с задержками *непрерывно изменяющейся величины*, Modulated APF (рис. 7). Импульсная характеристика такого ревербератора *подвергается непрерывным изменениям*, что положительно сказывается на естественности звучания, т.к. достигается *совершенная декорреляция* сигналов на выходе с сигналами на входе, а также выходов левого и правого каналов между собой.

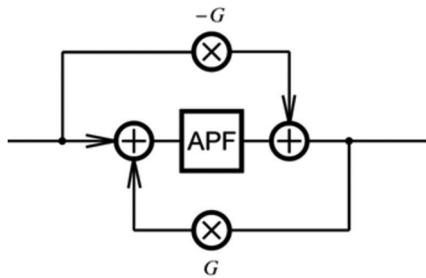


Рис. 6. Структурная схема «вложенного» всепропускающего фильтра (Nested APF)

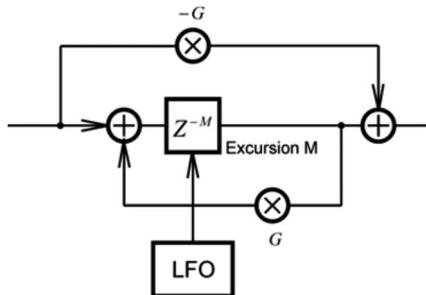


Рис. 7. Структурная схема всепропускающего фильтра с изменяемым временем задержки. Фильтр управляет LFO

Более подробный аналитический обзор, посвящённый совершенствованию алгоритмов искусственной реверберации, приведён в [15-16]. В данной же статье представляется целесообразным отметить следующие **закономерности** создания искусственной реверберации.

– Вычисление абсолютно точного реверберационного отклика с функцией перехода от точки к точке пространства до сих пор является дорогой с точки зрения вычислительных ресурсов операцией. Поэтому подавляющее большинство систем искусственной реверберации используют другие, более экономичные, методы для синтезирования реверберационного отклика, ориентированные, прежде всего, на особенности субъективного восприятия реверберации.

– Возможным упрощением в плане вычислительных затрат метода создания искусственной реверберации при сохранении реалистичности её звучания является **отказ** (!) от представления цифрового фильтра (а как следствие – и от модели помещения, которое имитирует фильтр) в виде стационарной, инвариантной системы (т.е. системы с неизменными во времени параметрами).

– Теоретические противоречия между статистической, геометрической и волновой теориями акустических процессов в помещении [1-2] можно «обойти», применяя иной принцип построения ревербератора – **свёрточного**, формирующего реверберационный отклик на основе свёртки входного сигнала и заранее измеренной (записанной) импульсной характеристики помещения.

Свёрточные ревербераторы и их особенности построения

Первый коммерческий свёрточный ревербератор выпустила на рынок компания SONY в 1999 году (рис. 8).



Рис. 8. Свёрточный ревербератор SONY DRE-S777
(<https://www.sony.com/en/>)

Данные ревербераторы строятся на основе цифровых КИХ-фильтров и отличаются крайне реалистичным звучанием. Это достигается, благодаря использованию предварительно записанных образцов импульсной характеристики реальных помещений.

Дискретная свёртка описывается формулой [3-4]:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} g(k)x(n-k),$$

где $x(n)$ и $y(n)$ – входной и выходной сигналы, $g(k)$ – импульсная характеристика, M – размер импульсной характеристики (порядок КИХ-фильтра).

Современные вычислительные средства позволяют производить эту процедуру с большой точностью. Основной проблемой, как уже отмечалось ранее, является большое количество операций умножения и сложения. Выходом из ситуации является переход из временной области в частотную область с помощью какой-либо разновидности ортогонального преобразования: быстрое преобразование Фурье (Fast Fourier Transform, FFT), поблочное преобразование Фурье (Short-Time Fast Fourier Transform, STFFT) [17-18], а также более эффективные: вейвлет- (Wavelet Transform) и чирплет-преобразования (Chirplet Transform) [19-22].

Традиционный алгоритм быстрой свёртки сводится к

использованию теоремы свёртки, которая формулируется так: «свёртка двух дискретных последовательностей эквивалентна перемножению их спектров» [3-4]:

$$y(n) = g(n) * x(n) \xrightarrow[\text{ОДПФ}]{\text{ДПФ}} G(m) \cdot X(m) = Y(m),$$

где $G(m)$, $X(m)$ и $Y(m)$ – преобразования Фурье от импульсной характеристики, входного и выходного сигналов фильтра соответственно.

Тогда алгоритм работы свёрточного ревербератора приобретает следующий вид (рис. 9) [23]. Эффективность подобных алгоритмов обеспечила их широкое распространение в ревербераторах, реализованных в виде подключаемых программных модулей (Plug-In). Известные примеры: Waves IR-1, Audio Ease Altiverb, SIR и многие др.

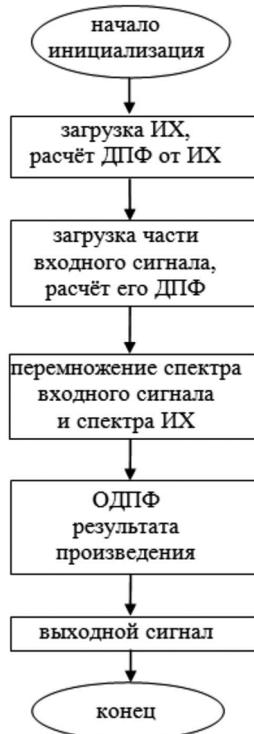


Рис. 9. Структура алгоритма свёрточного ревербератора с традиционной свёрткой

Динамическая свёртка и её интерпретация

Использование импульсных характеристик реальных помещений в качестве коэффициентов КИХ-фильтра в свёрточном ревербераторе является, безусловно, его достоинством. Однако на выходе такого прибора будет *инвариантная* во времени *стационарная* реверберация. Строго говоря, такой сигнал не соответствует реальным реверберационным процессам и не обладает абсолютной реалистичностью звучания.

Известно [7], что естественное звучание реверберации в помещении вызвано влиянием таких факторов, как перемещение воздушных масс, быстрые изменения их температуры, влажности и т.п. Данные факторы непрерывно меняют импульсную характеристику помещения. Реверберационная модель помещения в этом случае будет рассматриваться, как *нестационарная*, а свёртка входного сигнала ревербератора с изменяю-

щейся во времени ИХ помещения является, таким образом, *динамической*.

Обратим внимание, что вопрос модуляции параметров цифровых фильтров уже был затронут в контексте построения *алгоритмических (моделирующих)* ревербераторов с использованием *всепропускающих фильтров с модулированным временем задержки*, а способы реализации такой модуляции описаны в литературе [13-14]. Однако, хотя в основе построения и алгоритмических, и свёрточных ревербераторов лежит теория цифровых фильтров, и проблема сокращения вычислительных затрат при сохранении реалистичности звучания в равной степени относится к *обоим* типам ревербераторов, в литературе практически не освещены вопросы совершенствования работы свёрточных ревербераторов. Возможно, именно этим объясняется тот факт, что, несмотря на техническое совершенство и устойчивый теоретический «фундамент», на сегодняшний день свёрточные ревербераторы не смогли преодолеть и вытеснить с рынка алгоритмические. Известны даже попытки объединения элементов алгоритмических и свёрточных ревербераторов в так называемых гибридных схемах [24-27]. Поэтому можно утверждать, что динамическая свёртка, как способ имитации нестационарности акустического пространства свёрточным ревербератором, а также практические аспекты реализации динамической свёртки, рассматриваются **впервые**.

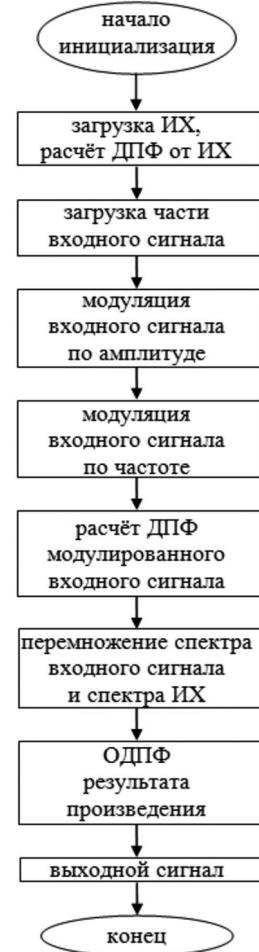


Рис. 10. Структура алгоритма свёрточного ревербератора с динамической свёрткой

Сложность имитации изменения импульсной характеристики во времени заключается в том, что, по сути, нужно реализовать модуляцию, которая будет применена в таких пределах и по таким законам, что она не будет восприниматься как модуляция, а будет лишь добавлять естественность звучания обработанному ревербератором сигналу. Дополнительной сложностью вновь является затратность в вычислительном плане непрерывной обработки ИХ: обычно БПФ от ИХ просчитывается **единожды**, при загрузке записи импульсной характеристики, что делает невозможной её непрерывную модуляцию.

Авторами статьи предлагается алгоритм создания такой модуляции при помощи непрерывной обработки **не ИХ** фильтра, а *самого обрабатываемого сигнала*. При этом в процессе обработки сигнал подвергается **амплитудной и частотной модуляциям**, которые в установленных пользователем незначительных пределах изменяют мгновенный размах и мгновенную частоту сигнала соответственно (рис. 10).

Программная реализация свёрточного ревербератора на основе динамической свёртки

Созданный авторами ревербератор представляет собой программу в графической среде программирования **Pure Data (PD)** [28]. Выбор данной среды программирования обусловлен такими факторами, как свободное распространение (PD не является коммерческим продуктом) и особенности её интерфейса. Традиционно программист работает с кодом, в то время как в PD элементы кода заменены визуальными объектами, соединяя которые, можно реализовывать различные алгоритмы. Одним из главных преимуществ PD является её возможность работать в «реальном времени»: применение изменений программы происходит непосредственно при редактировании кода.

На рис. 11 показан графический вид основной программы свёрточного ревербератора в PD. Вначале пользователю предлагается выбрать ИХ из имеющихся. Далее выбирается вариант входных данных, которыми могут быть: уже имеющиеся в программе тестовые образцы музыкальных сигналов (*open piano*, *open vocal*) или внешний аудиофайл (*openpanel*). Кроме того, ревербератор может обрабатывать сигнал напрямую с микрофона, что реализовано функцией *adc~* (analog/digital converter).

В главном окне есть органы управления количеством «сухого» и обработанного (прошедшего процедуру искусственной реверберации) сигнала (*dry*, *wet*) и степенью их микширования на выходе ревербератора, а также частотой (скоростью) и глубиной модуляции (*modulation speed*, *modulation depth*). Пределы значений частоты и глубины модуляции специально выставлены таким образом, чтобы при критических настройках модуляцию саму по себе можно было обнаружить. Блоки модуляции скрыты в сабпэтах (подпрограммах) *pd am* и *pd ps* (**Pure Data amplitude modulation** и **Pure Data pitch shift**) для амплитудной и частотной модуляции соответственно. Процедура свёртки отображена на рис. 11 объектом *convolve~*. Он осуществляет поблочную свёртку

последовательности прошедших модуляцию по амплитуде и частоте звуковых отсчётов со *стационарной*, выбранной заранее, импульсной характеристикой.

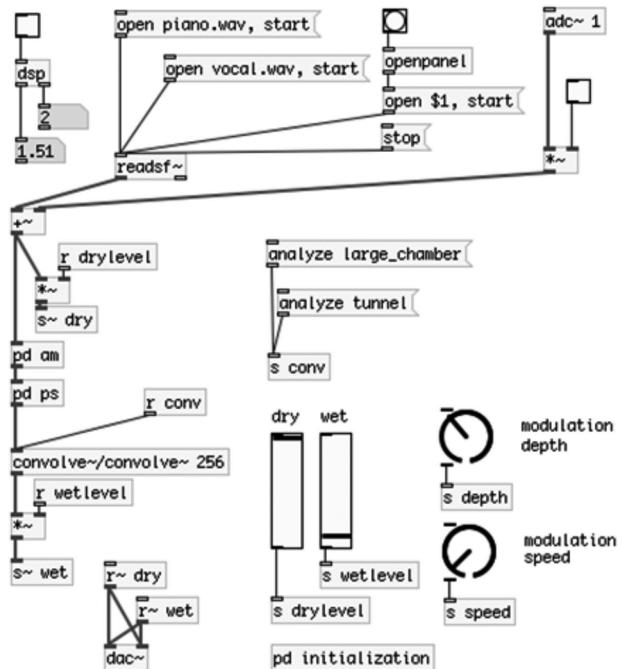


Рис. 11. Главное окно программы свёрточного ревербератора в графической среде программирования Pure Data (скриншот)

Процедуры модуляции

Рассмотрим подробнее реализацию процедур модуляции входного сигнала по амплитуде и частоте.

Структура блока **амплитудной модуляции** представлена на рис. 12. Сигнал, поступающий в блок амплитудной модуляции, подвергается умножению на постоянно изменяющийся коэффициент, значение которого определяют два объекта на рисунке 12:

– генератор случайных чисел из заданного диапазона с равномерным распределением. Задание крайних значений диапазона позволяет определить максимальный шаг изменения случайного числа относительно предыдущего случайного числа, что даёт возможность избежать резких изменений уровня сигнала, могущих привести к появлению щелчков;

– генератор непрерывного кусочно линейного сигнала. Он экстраполирует линейной функцией каждую пару ранее сгенерированных соседних случайных чисел в пределах интервала времени между ними. Длительность каждого линейного участка сигнала синхронизирована с частотой появления случайных чисел.



Рис. 12. Структура блока амплитудной модуляции в составе свёрточного ревербератора

Мгновенное значение кусочно линейного сигнала – это и есть тот изменяющийся коэффициент, который модулирует входной сигнал по амплитуде (размаху). Изменение *частоты* модуляции в главном окне (рис. 11) приводит к изменению временного *интервала* между соседними сгенерированными случайными числами, а изменение *глубины* модуляции – к изменению *диапазона* значений этих чисел (как следствие – к большему/меньшему влиянию на входной сигнал). Экспериментальным путём установленные пределы данных значений составляют: для глубины модуляции – **±25 %** от размаха сигнала, для интервала генерирования случайных чисел (частоты модуляции) – от **10** до **2000 мс**. При выходе за пределы данных значений модуляция становится заметна на слух, а звук начинает восприниматься неестественно.

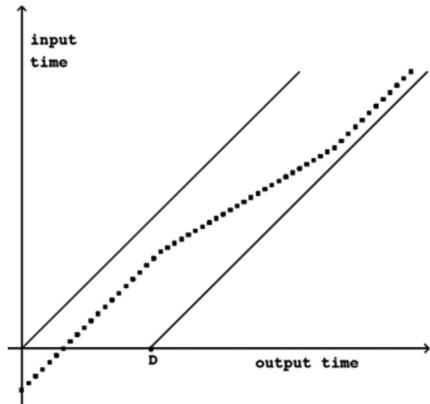


Рис. 13. Линия задержки переменной длины.

Моменты появления выходных отсчетов располагаются между моментами появления входных отсчетов и допустимым временем задержки D . Угол наклона образованной совокупностью отсчетов кривой в конкретный момент времени определяет мгновенное значение транспозиции (изменения высоты звука)

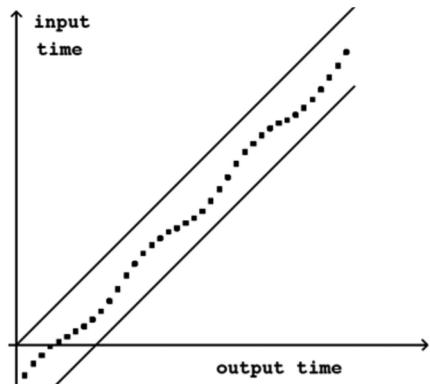


Рис. 14. Эффект вибрата, реализованный с помощью линии задержки переменной длины

Изменение *частоты* входного сигнала может быть реализовано при помощи линии задержки переменной длины (рис. 13), в основе этого явления лежит эффект Доплера [4, 29]. В простейшем случае можно изменять время задержки, то увеличивая, то уменьшая его значение, при этом оставаясь в допустимой временной полосе, т.е. не изменяя длительность звучания обработанного сигнала. В частном случае, изменяя время задержки по периодическому закону,

можно получить эффект вибрата (рис. 14).

Для получения «плавающего» изменения высоты звука в ревербераторе авторами использован рассмотренный ранее генератор кусочно линейного сигнала из блока амплитудной модуляции. Выходной сигнал генератора в этом случае управляет изменением времени прохождения звукового сигнала через линию задержки переменной длины. Блок частотной модуляции методом изменения временного сдвига был реализован в PD согласно схеме, представленной на рис. 15.

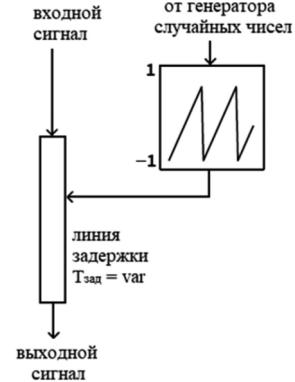


Рис. 15. Схема, поясняющая принцип частотной модуляции звука («плавающее» изменение его высоты) путём изменения времени его прохождения через управляемую линию задержки переменной длины

Изменение высоты звука возможно только в те интервалы времени, когда время задержки *изменяется*. Например, при уменьшении времени задержки звуковые отсчёты на выходе блока ЧМ следуют более часто относительно входных, как бы стремясь их «догнать» – возникает эффект увеличения высоты звука. И наоборот, при увеличении времени задержки выходные звуковые отсчёты начинают сильнее отставать от входных – высота звука понижается.

С целью упрощения построения свёрточного ревербератора генератор случайных чисел и генератор кусочно линейной функции являются общими элементами для блоков амплитудной и частотной модуляций, а значит, обе модуляции выполняются синхронно. Следует отметить, что синхронизация между амплитудной и частотной модуляцией выполнена таким образом, что при увеличении размаха сигнала высота изменяется в положительном направлении, а при уменьшении размаха – в отрицательном. Экспериментальным путём были установлены предельные параметры модуляции: предел изменения частоты – **± полтона** относительно высоты исходного сигнала, что соответствует изменению скорости следования отсчётов звука в диапазоне от **0,944** до **1,059** относительно исходной.

Заключение

Анализ методов точной имитации естественной реверберации и связанных с ними значительных вычислительных затрат объясняет переход к использованию более экономичных алгоритмов, которые учитывают особенности субъективного восприятия реверберации. Примером тому являются всепропускающие фильтры с модулированным временем задержки, применяемые в алгоритмическом ревербераторе Lexicon 224. Переход к использованию нестационарных цифровых фильтров позволяет

создать устройство, которое формирует реверберационный отклик, обладающий лучшей реалистичностью. Модуляция (по псевдослучайному закону) параметров передаточной функции и ИХ цифрового фильтра в составе ревербератора, по сути, является моделью непрерывного изменения импульсной характеристики помещения под воздействием хаотического перемещения воздушных масс, изменения температуры, влажности воздуха и прочих естественных процессов.

Проблема создания программного устройства, в алгоритмах работы которого было бы учтено непрерывное изменение импульсной характеристики помещения, происходящее в реальных условиях, является одной из самых перспективных и, на данный момент, недостаточно изученных. В частности, применение именно динамической свёртки в устройствах искусственной реверберации исследовано очень слабо.

Авторами статьи было разработано и реализовано программное устройство искусственной реверберации с применением динамической свёртки. Предложенная авторами методика применения динамической свёртки подразумевает обработку самого сигнала последовательно соединенными блоками модуляции амплитуды и частоты, а затем – его свёртку со стационарной импульсной характеристикой. Управление блоками амплитудной и частотной модуляций осуществляется при помощи генератора случайных чисел в пределах, заданных пользователем. Установленные экспериментальным путём предельные значения параметров модуляции составили:

- по амплитуде: **±25 %** от размаха сигнала;
- по частоте: от **0,944** до **1,059** относительно исходной скорости следования звуковых отсчётов, что даёт отклонение ± полтона от исходной высоты звука;
- по частоте модулирующей функции (интервала генерирования случайных чисел): от **100** до **0,5 Гц** (от **10** до **2000 мс**).

При превышении данных значений модуляция становится заметна на слух, а звук начинает восприниматься неестественно.

Разработанное устройство может быть пригодно для получения эффекта реверберации и, что важнее – для исследования и дальнейшего усовершенствования алгоритмов динамической свёртки. В частности, предлагается получить более качественный алгоритм модуляции временного сдвига за счёт предварительного разбиения сигнала на частотные полосы.

Литература

1. Давыдов В.В. Акустика помещений. СПб.: С.-Петербургский институт кино и телевидения, 1995.
2. Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Щевьев Ю.П. Акустика: Учебник для вузов М.: Горячая линия-Телеком, 2009.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2007. 751 с.
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Перевод с англ. М.: ООО «Бином Пресс», 2007. 656 с.
5. Schroeder M.R., Logan B.F.; 'Colorless' Artificial Reverberation. Journal AES, vol. 9 (3), pp. 192-197. (1961)
6. Schroeder M.R.; Natural Sounding Artificial Reverberation. Journal AES, vol.10 (3), pp. 219-233. (1962)
7. Julius O. Signal Processing Methods in Musical Acoustics. Stanford's Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), 2009.
8. J.P. Jullien, E. Kahle, M. Marin, O. Warusfel, G. Bloch, and J.-M. Jot, "Spatializer: A perceptual approach," AES 94th Convention, vol. Preprint 3465 (B1-5), pp. 1-13, Mar. 16-19 1993.
9. J.-M. Jot and A. Chaigne, "Digital delay networks for design

- ing artificial reverberators," Audio Engineering Society Convention, Feb. 1991. M. R.
10. J. A. Moorer, "About this reverberation business, " Computer Music Journal, vol. 3, no. 2, pp. 13-18, 1979.
11. Axon P.E., Gilford C.L.S., Shorter D.E.L.; Artificial Reverberation. Proceedings of the IEEE, 102B 5, pp. 624-42 (1955).
12. Gardner W.G.; Reverberation Algorithms. Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. Kluwer Academic Publishers, pp. 85-131. (1998).
13. Dattorro J. Effects Design Part 1. Journal AES, vol. 45 (9), pp. 660-684. (1997)
14. Griesinger D.; Practical Processors and Programs for Digital Reverberation. Lexicon, 100 Beaver St. Waltham, MA. (1989).
15. Киселёв С.Л. Тенденции развития алгоритмов искусственной реверберации. Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 26-28 октября 2016 г.). СПб.: СПбГИКИТ, 2017. С. 134-141.
16. Киселёв С.Л., Кунков Д. О совершенствовании алгоритмов искусственной реверберации. Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 21-22 ноября 2023 г.). СПб.: СПбГИКИТ, 2024. С. 82-95.
17. William J. Gardner. Efficient convolution without input-output delay. J. Audio Eng. Soc. 1995, vol. 43, no. 3, pp. 127-135.
18. Eric Battenberg, Rimas Avizienis. Implementing real-time partitioned convolution algorithms on conventional operating systems. Proc. of the 14th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-11). 2011. С. 1-7
19. Рогозинский Г.Г. Перцепционное сжатие звука с использованием вейвлетных пакетов [Текст] дис. ... канд. техн. наук: 05.11.18: Приборы и методы преоб-разования изображений и звука. СПб., 2010. 118 с.
20. Mann S., Haykin S. «The Chirplet Transform: A Generalization of Gabor's Logon Transform». URL: www.wear-cam.org/chirplet/vi91/index.html (дата обращения: 07.11.2022).
21. Тульский И. Повышение эффективности передачи мультимедийной информации методом чирплет-преобразования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск. 2012.
22. Glotin H., Balestrieri R., Ricard J. «Fast Chirplet Transform Injects Priors in Deep Learning of Animal Calls and Speech». ICLR, 2017.
23. Киселёв С.Л. Разработка свёрточного ревербератора. Проблемы развития кинематографа и телевидения: сборник научных трудов. Выпуск 23. СПб.: СПбГУКИТ, 2011 г. С. 33-39
24. Frenett J. Reducing artificial reverberation requirements using time-variant feedback delay networks. Master's Thesis, University of Miami, FL. 2000.
25. Browne S. Hybrid reverberation algorithm using truncated impulse response convolution and recursive filtering. University of Miami, 2001.
26. Stewart R. Hybrid convolution and filterbank artificial reverberation algorithm using statistical analysis and synthesis. Final Project Report Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Music Technology. The University of York, 2006.
27. Таранов Д.Д. Гибридный реверберационный алгоритм. Инженерный вестник Дона, 2013, №3.
28. Официальный сайт графической среды программирования Pure Data. URL: <https://puredata.info/> (дата обращения: 3.08.2024)
29. Puckett M. The Theory and Technique of Electronic Music. 2007.