

# Гибридный Реверберационный Алгоритм

Д.Д. Таранов

При создании фонограмм различного назначения, в особенности музыкальных, важной задачей является передача звучания в акустическом пространстве, которым может являться как большой концертный зал, так и маленькая звукозаписывающая студия. Как известно, субъективное ощущение пространства при прослушивании возникает лишь тогда, когда запись сигнала содержит реверберационную составляющую. Но высококачественная запись в реальных, незаглушенных помещениях – сложная, а иногда и невыполнимая задача. В технике широко используются ревербераторы – устройства или вычислительные комплексы, имитирующие реверберацию.

Как правило, задача большинства существующих ревербераторов, как вычислительных, так и выполненных в виде электронных устройств – не имитация конкретной акустической среды, а выполнение некоторых художественных задач при обработке акустических (например, музыкальных) сигналов, предварительно записанных в заглушенном помещении. Исключением является алгоритм свёрточной реверберации, представляющий собой свёртку импульсной характеристики конкретного помещения с исходным сигналом. Однако этот реверберационный алгоритм не обладает гибкостью, т.к. в принципе имитирует лишь отклик комнаты, заданный используемой импульсной характеристикой [1].

В данной статье предлагается алгоритм гибридного свёрточного ревербератора, позволяющего моделировать произвольное акустическое пространство при умеренных вычислительных затратах.

Любой реверберационный сигнал можно условно разделить на две составляющие: ранние и поздние отражения, фиксируемые относительно прямого сигнала. Условной границей между ними принято считать задержку, равную 100 мс. При этом поздние отражения – от 100 мс до полного затухания сигнала – представляют собой сумму большого числа диффузных отражений, имеющих различные траектории распространения. Как показывают экспертные оценки, именно поздние отражения в наибольшей степени характеризуют пространственные параметры помещения, в то время как ранние влияют на общую естественность воспроизведения сигнала [2].

В предлагаемом алгоритме процесс имитации реверберации разделяется на две части:

1. Имитация ранних отражений с помощью импульсных характеристик, записанных в реальных помещениях или сгенерированных при помощи приведённого ниже алгоритма.
2. Имитация поздних отражений с помощью массива гребенчатых фильтров.

Предполагается, что такой гибридный алгоритм позволит добавить сразу несколько степеней свободы управления реверберационным сигналом. Очевидно, что свёртка исходного сигнала с импульсной характеристикой данного помещения даст субъективно более реалистичный результат, чем использование, например, линии задержки с отводами (Алгоритм Мурера [3]). При этом данный алгоритм позволяет изменять характеристики моделируемого помещения посредством изменения параметров гребенчатого фильтра, регулирующих размер виртуального помещения, положение источника звукового сигнала в комнате, положение слушателя и т.д.

Данный метод целесообразно использовать и для снижения вычислительных затрат при выполнении свёртки, поскольку длительность импульсной характеристики может выбираться в пределах 100мс, так как она используется лишь для имитации ранних отражений [4].

Таким образом, реализация данного алгоритма производится следующим образом:

- для имитации ранних отражений выполняется свёртка исходного сигнала с импульсной характеристикой реального помещения или заранее сгенерированной импульсной характеристикой (для увеличения производительности алгоритма используется свёртка в частотной области)
- выполняется моделирование поздних отражений с помощью алгоритма, представляющего собой развитие ревербератора Шредера, построенного на основе гребенчатых фильтров. Чтобы учесть временные соотношения и повысить достоверность результирующего сигнала, на вход ревербератора Шредера подаётся сигнал, полученный в результате свёртки.

Второй этап алгоритма включает в себя следующие элементы:

- параллельные гребенчатые фильтры, за которыми располагаются ФНЧ первого порядка. Характеристики этих фильтров обеспечивают плавное нарастание спада высокочастотных составляющих сигнала с течением времени.
- фазовые фильтры для увеличения плотности реверберационного «хвоста».

Рассмотрим подробнее алгоритм генерирования импульсных характеристик заданного помещения [5].

Введём следующие величины:

$x_s$  –  $x$ -координата источника звукового сигнала

$x_r$  – линейный размер комнаты по оси  $x$

$x_m$  – координата точки приема сигнала

тогда можно написать выражение для длины траектории отраженного сигнала, принятого в точке  $x_m$ .

$$x_i = (-1)^i x_s + \left[ i + \frac{1 - (-1)^i}{2} \right] x_r - x_m \quad (1)$$

Аналогично будут выглядеть выражения для длин траекторий этого сигнала по  $y$  и  $z$ -осям.

$$y_i = (-1)^j y_s + \left[ j + \frac{1 - (-1)^j}{2} \right] y_r - y_m \quad (2)$$

$$z_i = (-1)^k z_s + \left[ k + \frac{1 - (-1)^k}{2} \right] z_r - z_m \quad (3)$$

Полная длина траектории в трехмерном пространстве будет рассчитываться следующим образом:

$$d_{i,j,k} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4)$$

Таким образом, время прихода отражённого сигнала в точку приёма будет рассчитываться по следующей формуле:

$$t'_{i,j,k} = t - \frac{d_{i,j,k}}{c} \quad (5)$$

Далее необходимо учесть степень ослабления сигнала.

Введём коэффициент ослабления по расстоянию:

$$k_{i,j,k}^r \propto \frac{1}{d_{i,j,k}} \quad (6)$$

Если принимать коэффициенты отражений от каждой из стен помещения равными, то можно ввести коэффициент отражения  $k_w$ , возведенный в степень  $n$ , где  $n = |i| + |j| + |k|$  - общее количество отражений. Введем понятие полного коэффициента отражений  $k_{i,j,k} = k_w^{|i|+|j|+|k|}$  [6].

В том случае если каждая из стен имеет различный коэффициент отражения, ситуация несколько усложняется. В этой связи в рамках данной статьи ее рассмотрение не является целесообразным.

Представим полный алгоритм ревербератора в виде блок-схемы (Рис. 1)

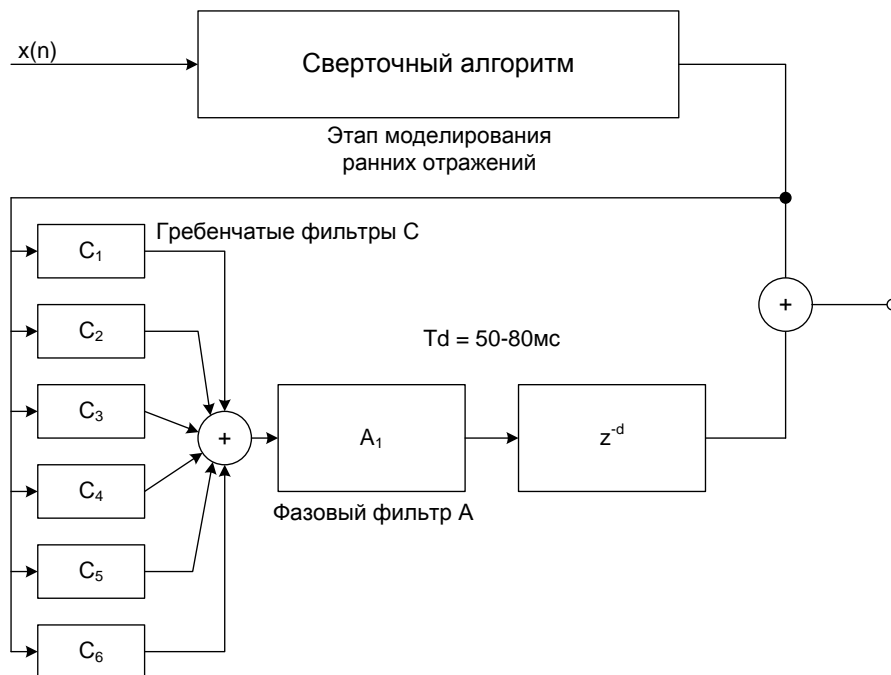


Рис. 1. – Блок-схема предлагаемого алгоритма

Рассмотрим более подробно первый этап: имитацию ранних отражений с помощью свёртки. Данная задача является чисто вычислительной. Как правило, используемая вычислительная мощность существенно возрастает с увеличением длины исходного сигнала, что значительно усложняет использование такого алгоритма в реальном времени [7]. Поэтому предлагается применить несколько более сложный сверточный алгоритм, основанный на разделении сигнала во временной области на более короткие составляющие и перемножение их в частотной области с последующим переходом во временную область. При этом выходной сигнал можно представить следующим образом:

$$y(n) = IFFT\{FFT\{h(n)\} \cdot FFT\{x(n)\}\}, \quad (7)$$

где:  $x(n)$  – входной сигнал во временной области,  
 $y(n)$  – выходной сигнал во временной области,

Исходный сигнал делится на части, каждая из которых сворачивается с  $h(n)$ . Пусть  $x(n)$  содержит  $N_x$  отсчётов, а  $h(n)$  -  $N_h = N+1$  отсчётов ( $N_x > N_h$ ). Тогда процедура выглядит следующим образом:

- $h(n)$  дополняется нулями до длины  $2N = 2(N_h-1)$ .
- выполняется БПФ дополненного нулями фильтра, в результате получаем  $H(k)$ , где  $k = 0, 1, 2 \dots N-1$ ,

- исходный сигнал  $x(n)$  разделяется на сегменты  $x_i(n)$ , имеющие длину  $N$ . Каждый из этих сегментов дополняется нулями до длины  $2N$ .
- выполняется БПФ каждого дополненного нулями сегмента. В итоге получаем  $X_i(k)$ , где  $k = 0, 1, 2 \dots 2N - 1$ .
- производится перемножение в частотной области:

$$Y_i(k) = X_i(k)H(k) \quad (8)$$

- производится ОБПФ каждого  $Y_i(k)$
- результаты свёртки складываются. В результате получаем выходной сигнал  $y(n)$ , длина которого составляет  $N_x + N_h - 1$ .

Оценим количество операций, выполняемых при этих преобразованиях. Будем учитывать только операции умножения, как наиболее громоздкие в вычислительном отношении. Количество операций БПФ для выборки длиной  $n$ , где  $n=2^m$ ,  $m$  – целое число:  $2n \log_2 n$

Учитывая разбиение входного сигнала на  $M$  частей по  $N$  отсчётов, и рассматривая общее выражение для выходного сигнала, можно записать общее количество операций умножения, необходимое для получения результата:

$$M(n \log_2 N + N \log_2 N + N + N \log_2 N) = MN(1 + 3 \log_2 N) \quad (9)$$

При этом перемножение нулевых отсчётов не учитывалось, поскольку операция умножения на ноль практически не требует вычислительных затрат [8].

Рассмотрим более подробно второй этап: имитацию поздних отражений с помощью алгоритма реверберации поздних отражений, включающего в себя набор параллельных гребенчатых фильтров с последующими фазовыми фильтрами и ФНЧ.

Ранние отражения, полученные на первом этапе, далее поступают в массив параллельных гребенчатых фильтров.

Параллельные гребенчатые фильтры с обратной связью увеличивают плотность отдельных копий сигнала, полученных из линии задержки, имитируя увеличение количества отдельных отражений.

Гребенчатые фильтры с обратной связью характеризуются следующим разностным уравнением:

$$y(n) = cx(n) - gy(n - M), \quad (10)$$

где  $c$  – коэффициент усиления сигнала  
 $g$  – коэффициент отрицательной обратной связи  
 $M$  – длительность (количество отсчётов) задержки

Как правило,  $c = 1$ . Тогда передаточная функция гребенчатого фильтра будет выглядеть следующим образом:

$$H(z) = \frac{1}{1 - gz^{-M}} \quad (11)$$

Соответственно, его АЧХ будет выглядеть следующим образом:

$$G(\omega) = |H(e^{j\omega})| = \frac{1}{|1 - ge^{-j\omega M}|} \quad (12)$$

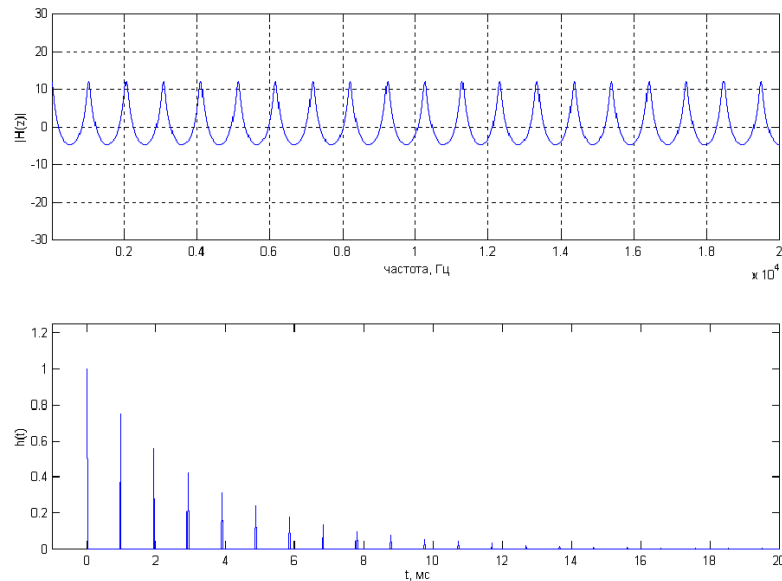


Рис. 2. – АЧХ и импульсная характеристика гребенчатого фильтра, используемого в алгоритме

Как показано на Рисунке 1, за массивом гребенчатых фильтров расположены фазовые фильтры. Их назначение – также повысить «плотность» отражённого сигнала при имитации поздних отражений [9].

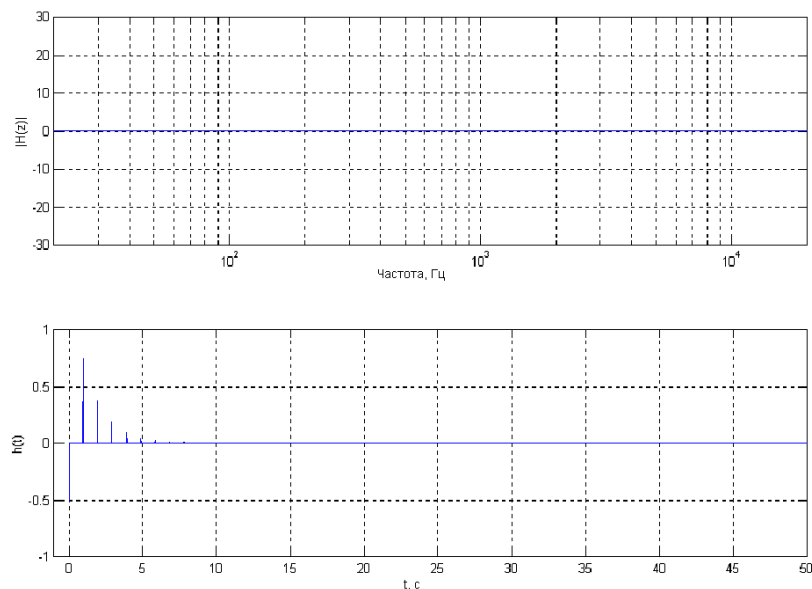


Рис. 3. – АЧХ и импульсная характеристика фазового фильтра при  $g=0,5$  и  $M=1$

ФНЧ осуществляют плавный частотный спад реверберационного сигнала, что придаёт дополнительную окраску сигналу [10]. Параметры алгоритма подбирались вручную экспериментальным путём.

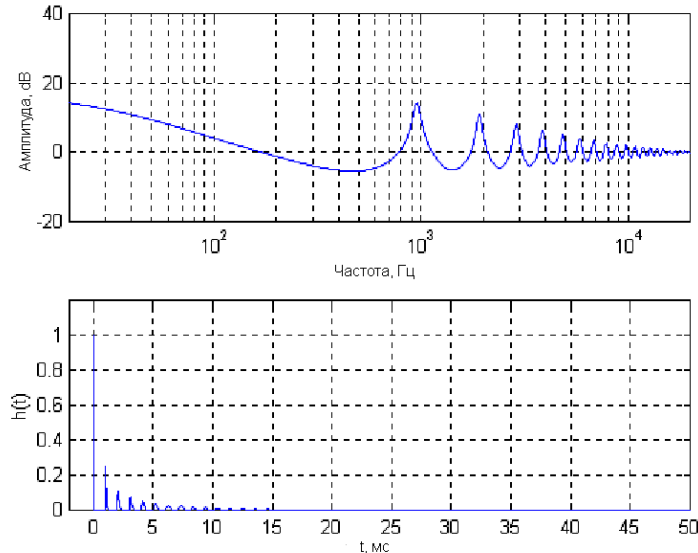


Рис. 4. – АЧХ и импульсная характеристика гребенчатого фильтра с последовательно подключенным ФНЧ первого порядка.

Описанный в статье гибридный реверберационный алгоритм опирается на известные вычислительные процедуры, и требует относительно небольших вычислительных затрат. Помимо этого, он обладает гибкостью при имитации отклика различных помещений и, как ожидается, естественностью передачи исходного сигнала. Таким образом, данный алгоритм может быть применён в звукозаписывающей практике с целью повышения достоверности сигнала, воспринимаемого слушателем, а также для достижения различных художественных эффектов.

## Литература:

1. И.А. Кириченко, И.Б. Старченко. Принцип адаптивного подхода к управлению характеристиками акустических систем [электронный ресурс] // – «Инженерный вестник Дона», 2011, №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/553> – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Zölzer U. DAFX // John Wiley & Sons. West Sussex. – 2002. – 554 p.
3. Toma, N., Topa, M.D., Popescu, V., Szopos, E. Comparative Performance Analysis of Artificial Reverberation Algorithms // IEEE Automation, Quality and Testing, Robotics. – 2006. – Vol. 1. – P. 138–142.
4. Toma, N., Topa, M., Szopos, E. Aspects of reverberation algorithms // ISSCS International Symposium on Signals, Circuits and Systems. – 2005. – Vol. 2. – P. 577–580.
5. Campbell, D. RoomSim acoustic toolbox for MatLab // IEEE CS Tech. Com. On Computer Generated Music. – 2007. – Vol.1. – P.120–126.
6. McGovern, Stephen G. A Model for Room Acoustics [электронный ресурс] // – University of Victoria, 2004. – Режим доступа: <http://www.sgm-audio.com> – Загл. с экрана. – Яз. англ.
7. Smith, W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing [электронный ресурс] // 2007. – Режим доступа: <http://www.dspguide.com> – Загл. с экрана. – Яз. англ.
8. А.Г. Тимошенко, Ю.В. Круглов, К.М. Ломовская, Е.О. Белоусов, А.В. Солодков. Особенности проектирования схем для исследования интегральных антенн [электронный ресурс] // – «Инженерный вестник Дона», 2011, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/476> – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Smith, J. Spectral Audio Signal Processing // Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA). Stanford, California. – 2010. – 235 p.
10. W. G. Gardner. 3D Audio and Acoustic Environment Modeling //



Wave Arts, Inc. – 1999. – 109 p.