

Н. В. Богданова, И. В. Богданов, К. Д. Богатыренко, И. В. Швестко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ РЕВЕРБЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ШРЕДЕРА

Аннотация: В данной статье рассмотрено моделирование огибающей с помощью метода обратного интегрирования, который, в свою очередь, называют методом Шредера. Целью статьи является выявление преимуществ и недостатков данного метода с помощью которого описывают (моделируют) огибающую спада реверберационного процесса. Для этого было проведено математическое моделирование и установлена соответствующая оценка времени реверберации.

Ключовые слова: Реверберационный процесс, огибающая Шредера, время реверберации.

Введение

Одним из важных элементов пост-обработки звука является звуковое эхо. Оно создает впечатление присутствия слушателя в каком-то определенном типе помещения, звуковые волны в котором переотражаются, искажаются, частично поглощаются, и доходят до наблюдателя в виде вторичных и последующих звуков, даже после того как оригинальный звук прекратился [1].

Такое явление называется реверберацией, а время, которое необходимо для спада средней по пространству плотности звуковой энергии в ограниченном объеме на 60 дБ от первоначального уровня после включения источника излучения – временем реверберации. Измерение времени реверберации необходимо для акустической настройки залов, для оценки эквивалентной площади звукопоглощения при измерении звукоизоляции [2].

Постановка задачи

При измерении времени реверберации возникает проблема корректной оценки полученных данных. Алгоритмы обработки кривых спада базируются на выделении огибающей измеренного реверберационного процесса и ее аппроксимации.

Существует несколько математических моделей с помощью которых наилучшим образом можно описать огибающую спада, это метод обратного интегрирования, преобразование Гилберта и метод квадратичного детектирования.

В данной статье проведены анализ компьютерного моделирования математического алгоритма Шредера с целью выявления его преимуществ при обработке реверберационного процесса.

Метод обратного интегрирования

Данный метод был описан в работе [3] в 1964 г. Монотонную и сглаженную кривую спада можно получить путем обратной интеграции импульсного отклика $x(t)$ на интервале времени $[0, t]$. Для каждой частотной полосы создают кривую спада путем интегрирования в обратном направлении импульсного отклика, возведенного в квадрат. При отсутствии фонового шума интегрирование начинают с конца импульсного отклика ($t \rightarrow \infty$), возведенного в квадрат, и продолжают до его начала. Спад звукового давления в зависимости от времени определяют по формуле

$$E(t) = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau = \int_0^t p^2(\tau) d(-\tau),$$

где $E(t)$ – импульсный отклик, возведенный в квадрат и интегрированный в обратном направлении; $p(\tau)$ – звуковое давление импульсного отклика.

Для сведения к минимуму воздействие фонового шума на последнюю часть импульсного отклика применяют следующую процедуру.

Если уровень фонового шума известен, определяют начальную точку интегрирования t_1 как точку пересечения горизонтальной линии с фоновым шумом и линии наклона кривой спада с представительной частью кривой спада импульсного отклика, возведенного в квадрат. Интегрирование продолжают в обратном направлении до начала импульсного отклика и определяют кривую спада $E(t)$ по формуле

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C,$$

где $t < t_1$, C – возможная поправка импульсного отклика, возведенного в квадрат и интегрированного от t_1 до бесконечности.

Результат определения кривой спада может быть более точным, если значение C вычисляют с допущением об экспоненциальном затухании энергии с той же скоростью, что и полученная с помощью импульсного отклика, возведенного в квадрат, в интервале времени между t_0 и t_1 , где t_0 – время, соответствующее уровню звукового давления 10 дБ, превышающего уровень звукового давления в период времени t_1 .

Если C принимают равным нулю, то конечная – начальная точки интегрирования создают систематическую погрешность измерения времени ревербера-

ции. При максимально допустимой погрешности измерения времени реверберации, равной 5 %, интегрирование импульсного отклика в обратном направлении должно начинаться от уровня не ниже 15 дБ от максимального сигнала с сохранением динамического диапазона импульсного отклика, необходимого для определения времени реверберации t .

Оценка спада при наличии в помещении фонового шума

Ограничения по отношению сигнал-шум присутствуют практически во всех акустических измерениях, касающиеся верхнего предела времени спада при интегрировании методом Шредера.

Теоретически этот предел установлен на бесконечность, но в практических измерениях он, естественно ограничен длиной измеренных данных реверберационного отклика. На практике измеренный реверберационный отклик должен быть достаточно длинным чтобы вместить большой динамический диапазон или весь спад до уровня фонового шума.

Таким образом, измеренный реверберационный отклик, как правило, содержит не только анализируемую кривую спада, но и фоновый шум, который доминирует в конце отклика. Интегрирование методом Шредера этого шума наряду с экспоненциальной кривой спада приводит к ошибке.

При анализе импульсной характеристики необходимо найти уровень фонового шума и точки, в которой спад соответствует уровню фонового шума. Таким образом, можно эффективно усечь импульсную характеристику по уровню фонового шума, сводя к минимуму смещение энергии шума с фактическим спадом.

Самый простой способ получить оценку фонового шума это усреднение выбранной части хвоста импульсного отклика или подбор к нему линии регрессии. Уровень, при этом, будет переоценен, если уровень шума не достаточный, но это не всегда проблематично, в отличие от его недооценки. Другой метод заключается в оценке фонового шума до начала основного отклика. Это работает, если есть достаточная начальная задержка в отклике при исследовании.

Помимо определения отклика от начальной точки, важно найти, где конечная точка кривой спада пересекает уровень фонового шума, для усечения шума в конце отклика. Рис. 1 [4] иллюстрирует эффект ограничения интервала по методу интегрирования Шредера. Если интервал слишком мал, как показано на кривой (e), кривая смещена вниз. Кривая (f) показывает случай, когда смещение из-за шума минимизировано из-за рассмотрения спада только до 10 дБ выше уровня шума.

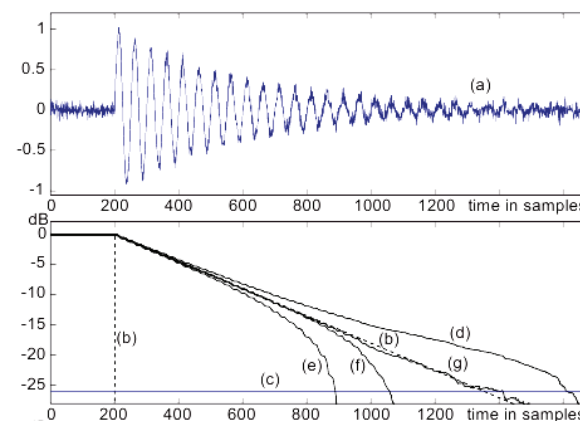


Рис. 1. Результат интегрирования Шредера применяемые к режиму спада шума:

(a) кривая измеренный отклик, включающий начальную задержку; (b) кривая спада в бесшумном режиме (пунктирная прямая линия); (c) кривая шума (26 дБ); (d) огибающая интегрирования Шредера на общем интервале измерения; (e) кривая интегрирования по коротким интервалом (0, 900 мс); (f) кривая интегрирования по интервалу (0, 1100 мс); (g) кривая интегрирования после вычитания шума от энерго-временной кривой

Нет стандартизированных точных методов определения ограничений методов интегрирования Шредера.

Есть несколько рекомендаций для борьбы с шумом. Например, в соответствии с ISO 3382 [5] для определения реверберации в помещении, уровень шума должен быть на 10 дБ ниже самого низкого уровня спада, который используется для расчета наклона спада.

Модельный эксперимент

Для удобства дальнейшего анализа представим выражение для кривой спада в виде адекватной математической модели:

$$y(t) = 10 \lg[x^2(t)], \quad (1)$$

где $x(t)$ – измерительный в полосе частот реверберационный процесс.

Для этого создадим в MatLab файл-функцию расчета третьоктавного фильтра

```
function [B,A]=oct3dsg(Fc,Fs,N);
if (nargin > 3) || (nargin < 2)
    error('Invalid number of arguments.');
```

end

```
if (nargin == 2)
    N = 3;
end
if (Fc > 0.88*(Fs/2))
    error('Design not possible. Check frequencies.');
```

end

```
pi = 3.14159265358979;
f1 = Fc/(2^(1/6));
f2 = Fc*(2^(1/6));
Qr = Fc/(f2-f1);
Qd = (pi/2/N)/(sin(pi/2/N))*Qr;
alpha = (1 + sqrt(1+4*Qd^2))/2/Qd;
W1 = Fc/(Fs/2)/alpha;
W2 = Fc/(Fs/2)*alpha;
[B,A] = butter(N,[W1,W2]);
```

В рабочей области задаем параметры спадающего реверберационного процесса используя формулу (1)

```
Fs=8000;
t=0:1/Fs:1.2-1/Fs;
A=1;
alfa=8;
y1=A*exp(-alfa*t);
y2=20*log10(y1);
h=randn(1,length(t)).*y1;% процесс реверберации
len_h = length(h);
```

Вызываем файл-функцию для выделения трехоктавной полосы из широкополосного процесса и строим график (рис 2)

```
[B,A] = oct3dsg(1000,Fs,3);% вызов функции трехоктавного фильтра.
h2=filter(B,A,h);% Процесс после трехоктавного фильтра
figure(1)
h2m=max(h2);
h2n=h2/h2m;
plot(t,h2n);
grid on
title('Reverb tail');
xlabel('t, sec');
ylabel('Norm_magnituda');
axis([ 0, 1, -1, 1 ])
```

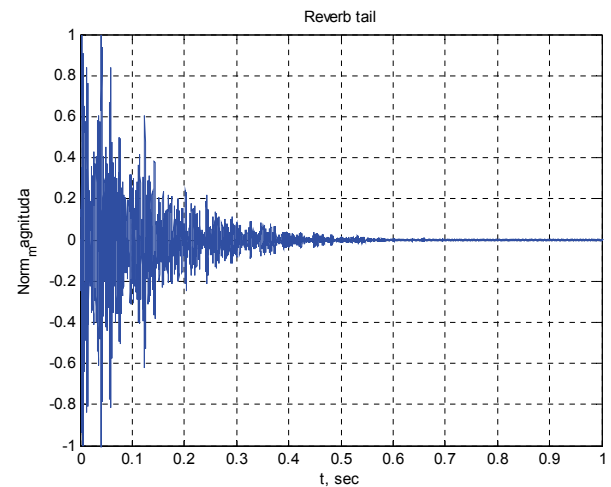


Рис. 2. Изображение модели реверберационного процесса

Представление (1) можно использовать [6] и для метода интегрирования Шредера.

Для этого представим смоделированный процесс в логарифмическом масштабе

$$h22=h2n.^2; h3=10*log10(h22);$$

На рис. 3 красным цветом представлена огибающая полученная интегрированием по методу Шредера.

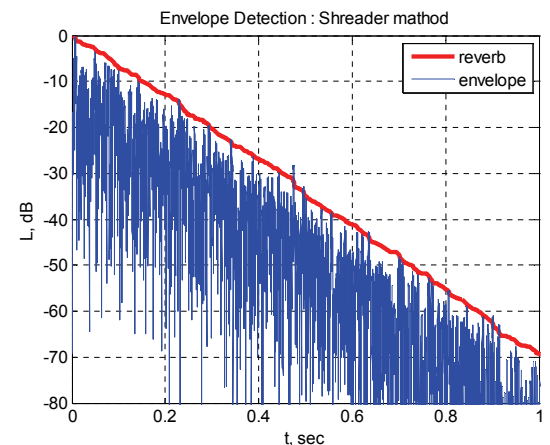


Рис. 3. Формирование огибающей по методу интегрирования Шредера

Оценим качество огибающей сигнала, полученного методом интегрирования Шредера, относительно заданного экспоненциального спада (рис. 4).

```
%Сравнение полученную огибающую с заданной экспонентой
plot(t,y2,'b--',t,R1,'r');
title('Envelope Detection'); grid on;
xlabel('t, sec');
ylabel('L, dB');
axis([ 0, 1, -60, 0 ])
legend('exp','Shreader');
```

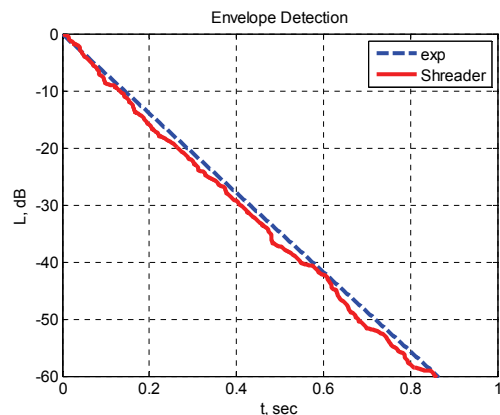


Рис. 4. Исходный экспоненциальный спад и огибающие спада полученные методом Шредера

Определим среднеквадратическое отклонение от заданной экспоненты

```
er3= std((R1(1:7000)-y2(1:7000))^2/7001); %Огибающая Шредера
```

Таким образом, значение времени реверберационного процесса за методом Шредера составляет 0,86 секунд, которое совпадает со стандартным временем реверберации заданной функции экспоненциального спада. При этом среднеквадратическое отклонение значения огибающей полученное методом Шредера составляет 0,6 дБ.

Выводы

В данной статье были проанализированы методы исследования реверберации в помещениях, построение огибающей кривой реверберационного процесса, способы оценки кривизны огибающей и оценки времени реверберации. На сегодняшний день самыми перспективными является метод выделения огибающей реверберационного процесса основанные на обратном интегрировании (Шредера).

Применяя математические алгоритмы измерения времени реверберации в помещении были построены виртуальные модели измерительных стендов в программной среде MatLab.

По результатам проведенных исследований установлено, что кривая огибающей реверберации, построенные по методу обратного интегрирования, имеет минимальное значение среднеквадратического отклонения от заданного экспоненциального спада, а это значит, что используя его можно получить более точное значения времени реверберации.

Список используемой литературы

- [Электронный ресурс]. Режим доступа к материалу: http://www.gamedev.ru/community/rt_proc_sound/articles/rt_softsynth_basics?page=3
- Дідковський В. С. , Луньова С. А. , Богданов О. В. Архітектурна акустика : навч. посіб. / В. С. Дідковський, С. А. Луньова, О. В. Богданов; за заг. ред. В. С. Дідковського. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 384 с. : іл. – Бібліогр. : с. 379–383.
- Schroeder M. R New Method of Measuring Reverberation Time // J. Acoust. Soc. Am. – 1965. – V. 37. – Issue 6. – p. 1187–1188.
- Karjalainen M. Estimation of Modal Decay Parameters from Noisy Response Measurements / M. Karjalainen, P. Ansalo, A. Mäkivirta, T. Peltonen, V. Välimäki // JAES. – 2002. – V. 50. – p. 867–878.
- ISO 3382-2-2008 Акустика. Измерение акустических параметров в помещениях. Часть 2. Время реверберации в обычных помещениях.
- ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.