

# 基于房间冲激响应的声学模型的建立和仿真

武晓光<sup>1,2</sup>, 郭天文<sup>2</sup>

(1 南京航空航天大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210016; 2 南京工业大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 211816)

**摘 要:** 概要说明了几种用于房间混响环境仿真的方法, 具体阐述了在 MATLAB 中基于 IMAGE 原理, 采用冲击响应方法建立房间声学模型的具体步骤, 仿真结果表明该方法具有灵活控制反射阶数、房间维数和麦克风方向性等特点, 为房间混响模型的构建提供了一种切实可行的仿真方法。

**关键词:** 混响模型; 镜像法; 房间冲激响应; 定向麦克风

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2014)04-0056-04

## Model Construction and Simulation of Acoustics Based on Room Impulse Responses

WU Xiao-guang<sup>1,2</sup>, GUO Tian-wen<sup>2</sup>

(1 College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

(2 College of Electronic and Information, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** This article briefly introduces several uses in room environmental reverberation simulation method and expounded specific steps of using a method (IMAGE) to establish the room acoustics model. The simulation result shows that this method has flexible control reflective order, room dimension and microphone directional characteristics and has provided a feasible simulation method for building room reverberation model.

**Key words:** reverberation model; IMAGE method; room impulse response; directional microphone

### 1 引言

在声源定位、信号提取、增强和识别等语音信号处理算法中, 建立一个灵活、合理的房间声音混响模型对算法运行、评估具有很好的作用. Allen 和 Berkley 在文献[1]中提出的 IMAGE 方法是构建房间混响模型最常用的方法之一, 基于该方法在 MATLAB 中构建房间冲激响应(room impulse response, RIR), 并且能控制信号反射阶数、房间维数和麦克风方向性, 能够为诸多算法建立一个更加切合实际的室内声学环境。

### 2 房间声学环境仿真方法

可以将室内声学环境仿真方法分为基于波动方

程模型、基于射线模型和统计模型三种<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示. 其中基于波动方程模型的方法有 FEM(有限元方法)和 BEM(边界元方法), 这种方法在声音频率较高时要求分析的数据量很大, 运算复杂, 一般适用于低频、小空间范围的声学环境仿真; 另外一种方法是 FDTD 方法<sup>[3]</sup>(时域有限差分法), 与 FEM 和 BEM 方法相比更适用于视听化技术, 其突出的特点是能够直接模拟声场的分布, 精度比较高, 适应于一些声源位于房间角落或其他一些复杂场景. 基于波动方程的方法难点在于边界条件的界定和对象几何特征的描述<sup>[4-5]</sup>.

基于射线模型的方法主要有射线跟踪法和 IMAGE 方法<sup>[6]</sup>, 主要的区别在于计算反射路径的方法不同. 射线跟踪法用携带能量的有限条射线来描述声源

收稿日期: 2013-06-02; 修回日期: 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61001150)

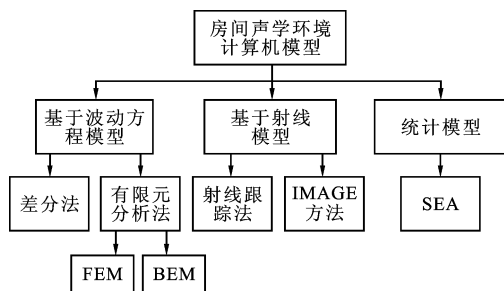


图1 Room Acoustics 仿真模型

能量的辐射,每条射线的能量在传播过程中由于墙面的反射和空气的吸收而衰减,在接收端记录每条声线的路径和到达时的能量,分类即可得到房间冲激响应,该方法与 IMAGE 方法相比不能穷尽所有的射线,能胜任复杂场景的计算,而 IMAGE 方法仅适用于具有规则几何特性的房间声学环境的仿真。

基于统计模型的 SEA(统计能量分析)方法是一种模化分析方法,运用能量流关系式对复合的、谐振的组装结构进行动力特性、振动响应和声辐射的理论评估,常应用于车船室内高频噪声分析和声学环境设计,一般不适用于普通室内声学模型<sup>[7]</sup>。

### 3 IMAGE 方法

如图2所示为实际的声学环境,假设在矩形封闭的房间,声源经过房间墙壁的若干次反射后到达麦克风的过程可以看作是房间对声源信号的滤波过程,对麦克风接收到的信号  $x(n)$  可以表示为

$$x(n) = h(n) * s(n) + b(n) \quad (1)$$

式中,  $h(n)$  为声源  $s(n)$  到达麦克风的房间冲激响应,  $b(n)$  为噪声。可以通过解声音传播的波动方程来得到冲激响应  $h(n)$ 。

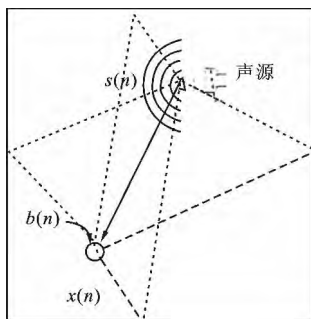


图2 房间声学模型

#### 3.1 IMAGE 模型

声音信号在自由空间中传输的方程为

$$P(\omega, X, X') = \exp[i\omega(R/c - t)]/4\pi R \quad (2)$$

式中,  $P$  为声压,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为频率,  $t$  为时间,  $R = |X - X'|$ ,  $X$  为声源位置  $(x, y, z)$ ,  $X'$  为麦克风位

置  $(x', y', z')$ ,  $c$  为声音传播速度。

假设如图3(a)所示信号经过一面刚性墙体反射后到达接收端,可以看做是关于该墙面有一镜像声源直接到接收端,那么麦克风接收处的声音传播方程则为<sup>[1]</sup>

$$P(\omega, X, X') = \left[ \frac{\exp[i(\omega/c)R_+]}{4\pi R_+} + \frac{\exp[i(\omega/c)R_-]}{4\pi R_-} \right] \exp(-i\omega t) \quad (3)$$

式中,  $R_-$  和  $R_+$  分别为麦克风到声源和镜像声源的距离。

$$R_-^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 \quad (4)$$

$$R_+^2 = (x + x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 \quad (5)$$

在此基础上进行扩展如图3(b)为两次反射模型,矩形房间6面墙均有镜像声源,而镜像声源又有镜像,所以麦克风接收信号变的更加复杂,将式(3)写成

$$P(\omega, X, X') = \sum_{p=1}^8 \sum_{r=-N}^N \frac{\exp[i\omega\tau]}{4\pi d} \exp(-i\omega t) \quad (6)$$

式中,  $d = |R_p + R_r|$  表示声源或其任意镜像距麦克风的距离,  $\tau = d/c$  为对应的延迟时间。  $R_p = (x - x' + 2qx', y - y' + 2jy', z - z' + 2kz')$   $p$  表示集合  $\{(q, j, k): q, j, k \in \{0, 1\}\}$  取值的8种可能,  $R_r = 2(m_x L_x, m_y L_y, m_z L_z)$ ,  $(L_x, L_y, L_z)$  为房间的长、宽和高,  $m = (m_x, m_y, m_z)$  的每一个元素取值范围从  $-N$  到  $+N$ , 因此对于给定反射阶数  $N$  时则有  $(2N+1)^3$  种不同路径<sup>[8]</sup>。如当  $q, j, k, m_x, m_y, m_z$  均为0时  $d$  为声源直接到麦克风的距离。式(6)进行反傅里叶变换得到房间冲激响应的 Green's 等式<sup>[9]</sup>:

$$h(t, X, X') = \sum_{p=1}^8 \sum_{r=-N}^N \delta[t - \tau]/4\pi d \quad (7)$$

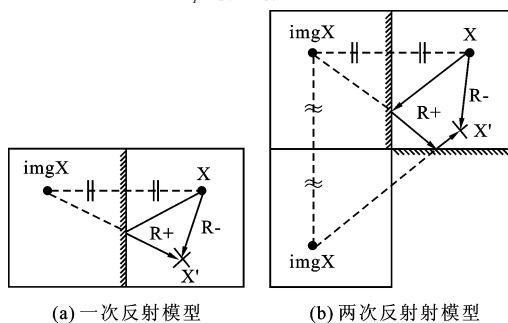


图3 房间声源镜像模型

#### 3.2 模型仿真

在进行计算机仿真时需要假设六面墙的反射系

数为  $\beta_{x1}, \beta_{x2}, \beta_{y1}, \beta_{y2}, \beta_{z1}, \beta_{z2}$ , 延时时间  $\tau$  不总是落在采样点上, 可以将式(7) 改写为<sup>[1]</sup>

$$h(n, X, X') = \sum_{p=1}^8 \sum_{r=-N}^N \beta_{x1}^{m_x+q} \beta_{x2}^{m_x} \beta_{y1}^{m_y+j} \beta_{y2}^{m_y} \beta_{z1}^{m_z+k} \beta_{z2}^{m_z} \cdot \frac{LPF\{\delta[n-\tau f_s]\}}{4\pi d} \quad (8)$$

式中,  $f_s$  为采样频率,  $LPF\{\cdot\}$  为截止频率为  $f_s/2$  的理想低通滤波器. 按照文献[1] 所述可以将延时近似到  $f_s$  的整数倍:

$$LPF\{\delta[n-\tau f_s]\} = \delta(n - \text{round}\{\tau f_s\}) \quad (9)$$

本文 MATLAB 仿真采用式(10)Hanning 窗低通滤波器来代替理想低通滤波器:

$$\delta_{LPF}[n-\tau] = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 + \cos\left(\frac{2\pi(t-\tau)}{T_w}\right) \text{sinc}(2\pi f_c(t-\tau)) \right) & t \in [0, T_w] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $t = [0:1/f_s:T_w]$ ,  $f_c = f_s/2$

在许多应用场合下由此引起的误差如图 4 所示可以忽略不计, 而在利用麦克风阵列进行声源定位时对麦克风之间的相位误差比较敏感, 在这种情况下我们可以通过提高抽样频率来减小误差.

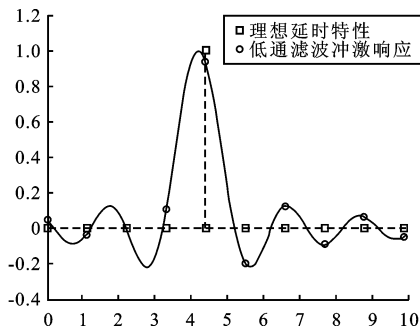


图 4 理想延时特性与低通滤波冲激响应  
在 MATLAB 中按照以下步骤进行仿真:

Step1. 初始化  $(L_x, L_y, L_z), \beta, X, X', c, f_c, f_s, t, N$  等参数

Step2. for  $p = 1:8$ ;

(1) 得到  $R_p(p, 3)$ ;

(2) for  $m_x = -N:N$

for  $m_y = -N:N$

for  $m_z = -N:N$

(a) 计算  $d = |R_p + R_r|$  及  $\tau$

(b) 计算每条路径衰减系数

(c) 计算  $\delta_{LPF}[n-\tau]$

(d) 求得响应函数

Step3. 读取原始信号与冲激响应函数卷积, 得

到麦克风接收信号

### 3.3 仿真结果

分别对长宽高为  $[5, 6, 3]$  的房间, 声源位置  $X = [0, 0, 0]$ , 麦克风接收位置  $X' = [2.9, 2, 2]$ ,  $f_s = 12\,000$  Hz,  $c = 342$  m/s 反射阶数  $N = 10$ , 6 面墙反射系数  $\beta = 0.4$  的房间冲激响应, 分别对  $N = 10$ ,  $\beta = 0.6$  和  $N = 5, \beta = 0.6$  时的房间冲激响应进行实验和比较.

从仿真结果可验证如下结论:

(1)  $N$  越大, 房间冲激响应越强, 混响越强;

(2)  $\beta$  越大, 房间冲激响应的拖尾越长;

(3) 与  $N, \beta$  无关冲激响应的最大值都出现在第 143 点, 即为声源直接到达麦克风的时延  $143 * 1/f_s = 11.9$  ms; 实际声源距麦克风距离为  $d = 4.050\,9$  m, 所需时间为  $d/c = 11.9$  ms, 仿真结果与实际计算结果相同;

(4) 可验证房间混响时间  $T_{60} \approx 137$  ms 与 Sabin-Franklin's 公式 (11)<sup>[9]</sup> 理论计算结果一致, 其中  $V$  为房间体积,  $S$  为墙体的面积,  $\beta$  为墙体发射系数.

$$RT_{60} = \frac{24 \ln(10) V}{c \sum_{i=1}^6 S_i (1 - \beta_i^2)} \quad (11)$$

采用冲激响应与声源原始信号进行卷积运算可以得到麦克风接收的混响信号, 为相关语音算法的仿真开发提供了原始的室内混响信号.

## 4 麦克风的方向性

具有方向性的麦克风能够提高接收信号的信噪比, 改善噪声环境下的语言清晰度, 其方向性模式可分为固定式和自适应模式. 固定式是根据典型的使用环境定义的, 主要有 3 种, 分别为心型、超心型和双心型, 假设  $A(\theta)$  为信号衰减强度可以表示为

$$A(\theta) = P + G \cos(\theta) \quad (12)$$

式中,  $\theta$  为声音到达角度, 当  $P, G$  取不同的值时麦克风具有如表 1 所示的指向性, 如图 5 所示为其方向图.

表 1 根据  $P, G$  不同的指向性

方向模式	$P$	$G$
全向型	1	0
心型	0.5	0.5
超心型	0.25	0.75
双心型	0	1

将具有指向性的麦克风应用到实际房间声学

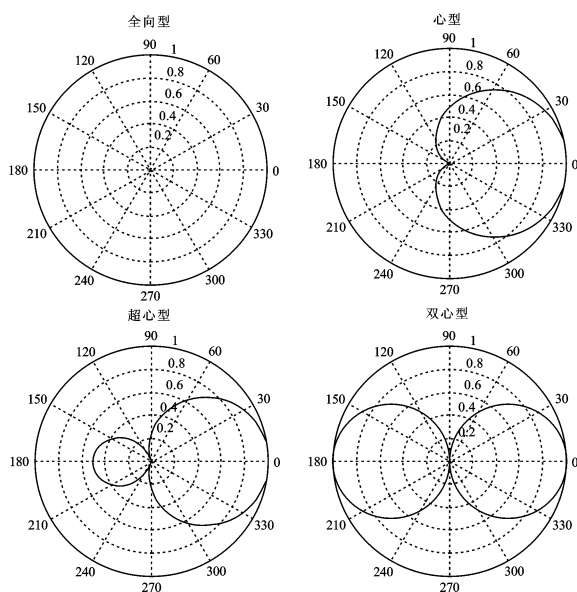
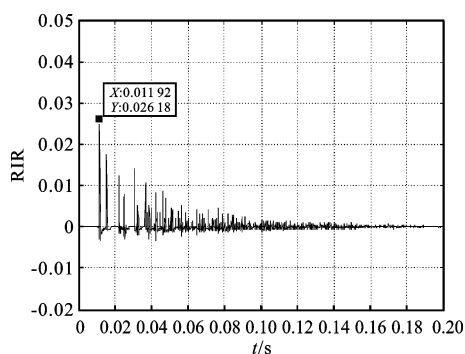


图5 麦克风方向图

模型中,各镜像声源点到麦克风接收的信号衰减强度为

$$A = P + G * \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right) * \sin(\theta) * \cos(\phi_0 - \varphi) + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right) * \cos(\theta) \right] \quad (13)$$

式中  $\theta = a \cos\left(\frac{|z - z'|}{|X - X'|}\right)$ ,  $\varphi = a \tan\left(\frac{|y - y'|}{|x - x'|}\right)$  为声源或各镜像点与麦克风之间的仰角和方位角  $\phi_1$ 、 $\phi_0$  为对应接收声波的仰角和方位角。将式(8)对每条路径冲激响应与该路径麦克风接收信号强度  $A$  相乘后进行叠加,则可得到指向性麦克风在某一入射角位置下的冲激响应。图6所示为在  $N = 10, \beta = 0.4$  与以上相同仿真条件下,采用具有超心型的麦克风在  $\phi_1 = 0, \phi_0 = \pi/2$  处接收信号的冲激响应,与其方向图表述一致,在  $t = 11.9 \text{ ms}$  时冲激响应  $h(t) = 0.1198$  减小为  $h(t) = 0.02618$ ,故麦克风接收的信号会有较大幅度的衰减。

图6 超心型麦克风  $\phi_0 = \frac{\pi}{2}$  处的冲激响应

## 5 结束语

本文简单介绍了构建房间声学模型的三种基本方法,比较说明了它们各自的特点;从中选择基于射线模型中的 IMAGE 方法详细论述了其原理,给出了采用冲激响应构建房间混响环境模型在 MATLAB 中实现的具体步骤和仿真结果;在此基础上讨论了具有指向性的麦克风在特定角度上接收信号时的房间冲激响应。结果表明本文所述的仿真方法能够根据不同情况,设置声音反射阶数、墙面反射系数、房间维数、声音收发端位置和麦克风的指向性,为房间声学环境的建立提供了一种灵活可靠的仿真方法。

## 参考文献:

- [1] Allen J, Berkley D. Image method for efficiently simulating small room acoustics [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 65(4): 943-950.
- [2] Savioja L, Huopaniemi J, Lokki T, et al. Creating interactive virtual acoustic environments [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1999, 47(9): 675-705.
- [3] Botteldoorn D. Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 98(6): 3302-3308.
- [4] 曾向阳. 室内声场建模方法最新发展[J]. 音频工程, 2004, 2: 12-15.
- [5] 张怡芳,毛礼松. 室内声场的计算机仿真[J]. 计算机工程与应用, 2002, 2: 229-231.
- [6] Kulowski A. Algorithmic representation of the ray tracing technique[J]. Applied Acoustics, 1985, 18(6): 449-469.
- [7] 闵运东,洪家娣. 基于 Auto SEA 的客车室内声场仿真[J]. 噪声与振动控制, 2008, 8: 98-100.
- [8] McGovern S G. Fast image method for impulse response calculations of box-shaped rooms [J]. Journal of the Applied Acoustics, 2009, 70(1): 82-189.
- [9] Lehmann E A, Johansson A M. Diffuse reverberation model for efficient image-source simulation of room impulse responses [J]. Audio, Speech, and Language Processing, 2010, 18(6): 1429-1439.

## 作者简介:

武晓光 男, (1978—), 博士研究生, 讲师. 研究方向为阵列信号处理.

郭天文 女, (1982—), 博士研究生, 实验师. 研究方向为无线通信技术.