文章编号: 1000-3630(2002)03-0145-05

虚拟环境中声模拟关键技术研究

李晓红[1], 张新荣[1], 孙济洲[1], 冯志勇[1], 杨丹婕[2]

(1. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; 2. 内蒙古大学计算机系, 内蒙古 010051)

摘 要: 现代建筑对声光环境要求不断提高, 室内声学模拟已成为建筑虚拟现实的重要组成部分。本文在分析声模拟过程的基础上, 基于改进的辐射度算法, 考虑声音穿越障碍时的衍射行为, 研究了基于遮挡因子的声波衍射处理方法, 进而给出了声学传递特性仿真和真实感声音生成理论等声模拟过程中的关键技术。并以此为基础构造了相应的仿真算法, 从而为建筑厅堂声光虚拟环境的构建奠定了基础。为了验证本文方法的有效性, 搭建了一个声模拟试验平台, 对具有球形遮挡物的单声源室内声场进行模拟, 得到了室内声场的分布和各接收器的单位脉冲相应和声传递函数, 通过对模拟结果分析比对, 文中提出的声模拟算法是正确而有效的。

关键词: 声学模拟; 辐射度算法; 虚拟现实; 建筑声学。

中图分类号: TU112 文献标识码: A

The investigation of simulating technique of acoustics in visual reality

LI Xiao-hong[1], ZHANG Xin-rong[1], SUN Ji-zhou[1], FENG Zhi-yong[1], YANG Dan-jie[2]

(1. Department of Computer Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Department of Computer Science and Engineering, Inner Mongolia University, Neimonggu 010051, China)

Abstract: Along with the standing requirement to acoustic and optical environment in modern architecture, acoustic simulation has become more and more important in Virtual Reality of buildings. On the basis of acoustic simulation process analysis, the technology of acoustic simulation is developed based on update radiosity algorithm in this paper. The diffraction has been considered when barrier exist, and the key technology. Then acoustic simulation algorithm is developed to generate real like sound. An acoustic simulation testbed is established to verify the validity. The relibility of acoustic simulation theory and algorithm is showed by the simulation results.

Key words: acoustic simulation; radiosity algorithm; visual reality; architecture of acoustics

1 引 言

虚拟现实是利用计算机生成的一种模拟环境, 并通过附加的传感设备使用户进入到该环境中去, 实现用户与所模拟环境直接进行自然交互。在建筑虚拟环境中, 建筑师利用建筑设计虚拟现实系统所提供的建模工具完成建筑物的造型设计, 并将其设计方案展现在客户面前。客户可以进入该虚拟模型之中, 利用系统提供的浏览器, 对所建的虚拟场景进行身临其境般地考察, 将意见反馈给建筑师, 以便建筑师实时地修改。由于现代建筑对声光环境要求的不断提高, 室内声学模拟已成为建筑虚拟现实研究的重要组成部分。

有关厅堂声学模拟算法的研究, 主要是基于波动声学理论和几何声学原理。波动声学理论只能解决以刚体为边界的长方体等简单形体内的声场分布问题, 对于具有复杂边界条件的实际问题, 只能用数值方法计算厅堂内的声场分布[1], 该类方法计算量极大。因此, 国内外建筑声学的研究大多建立在几何声学原理上, 如声线法[2]、虚声源法及两者相结合的方法[3,4], 它们符合声传播的几何定律且能解决复杂边界条件问题, 但不适用考虑衍射、折射和干涉的低频声传播过程。文献[5]提出了运用人工神经网络的方法进行声学仿真, 但网络训练样本很难得到, 还需进一步深入研究。

有关屏障处理都是基于衍射的几何方法, 应用最为广泛的是 Maekawa[6] 方法, 它给出了一种基于衍射的有限屏障衰减因子的经验模型。随后又出现了许多方法来确定无限屏障衍射因子, 如 Pierce's 方法[7] 和 Kurze and Anderson's 方法[8]。文献[1]基于波动理论的方法, 给出了特定频率下更加精确的屏障衰减因子, 但计算量也很大, 且不适应具有宽带特性的声音模拟。

将声模拟算法得到的脉冲响应信号与干信号进行卷积, 输出的信号经扬声器发出就可听到真实感声音。实际计算中, 只能对声场中某些点进行模拟, 需通过声场拟合得到连续的声场分布, 以便用户确定巡游路线后生成声音文件, 完成同步巡游。有关此类研究鲜有文献报道。

本文基于计算机图形学原理和线性系统理论, 研究声学传递特性、屏障衰减、声场拟合以及真实感声音获取等关键技术, 旨在为建筑虚拟环境设计提供必要的方法。

2 声学模拟中的关键技术

如图 1 所示, 声模拟过程包括以下 4 部分: (1)

收稿日期: 2001-05-17; 修回日期: 2001-12-18

作者简介: 李晓红(1965-), 女, 河北省人, 讲师, 主要研究方向: 建筑声学、虚拟现实、多媒体通讯。

建立厅堂的计算机仿真模型。将厅堂内部反射面的几何属性及物理特性输入计算机, 建立厅堂的几何、物理模型; (2) 厅堂单位脉冲响应模拟; (3) 多道信号处理。将得到的单通道脉冲响应信号经过通道可听化模拟得到相应的多通道信号; (4) 卷积运算。把多通道处理后的脉冲响应与在无干扰下录制的"干"信号进行卷积, 得到获取真实感声音。

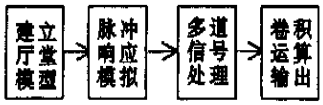


图 1　声模拟过程

2.1　基于辐射度算法的声模拟原理及衍射处理

辐射度算法可用于真实感图形的生成, 其主要原理是不依赖于视点, 且在封闭环境中能量守恒。它将环境表面划分为离散的面片, 每个面片既作为光源, 又作为反射表面, 接收其它面片传来的能量, 同时向空间辐射出部分能量。由于射线声学特性与光的传播特性有许多相似之处, 若考虑声波衰减的延迟特性, 引入时间变量, 则可使辐射度公式适用于声波能量交换的描述, 声能传递方程如下:

$$B_{jt} = E_{jt} + \rho_j \sum_{i \neq j} B_{it} F_{ji} \Phi_{ji} \qquad (1)$$

其中: B_{jt} 为时刻 t 面片 j 的总发射能量。E_{jt} 为时刻 T 面片 j 是声源时的自发能量, ρ 为 j 面片的反射率, Φ_{ji} 为声波在空气中衰减因子, 可表示为

$$\Phi_{ji} = e^{-mcT_{ji}}$$

$$T_{ji} = r_{ji} / c \qquad (2)$$

式中: m 为对应频率下的衰减系数, c 为声速, T_{ji} 为声波从面片 i 到面片 j 的传输时间, 与面片间的距离有关, r_{ji} 为面片 i 到面片 j 的距离。F_{ji} 为从 i 面片到 j 面片的几何形状因子, 它表示面片 i 发出的能量中到达面片 j 的比例, 可由下式计算

$$F_{ji} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\varphi_i \cos\varphi_j}{\pi r_{ji}} \mathrm{d}A_j \, \mathrm{d}A_i \qquad (3)$$

当声波被遮挡, 形成明显的衍射波时, 需对几何形状因子进行修正。则穿过屏障的能量为:

$$L_p = w\left(\frac{1}{\sqrt[10]{10^{\Delta L_p}}}\right) \qquad (4)$$

其中, ΔL_p 为遮挡因子

$$\Delta L_p = 20\lg\left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh\sqrt{2\pi N}}\right) + 5 \qquad (5)$$

式中 N 为菲涅耳(Fresnel)数

$$N = \frac{2}{\lambda}(A + B - D)$$

其中, λ为声波波长, A、B、D 见图 2。当屏障顶尖刚与声源和接收者之间视线相交或在视线之下, 则 N 值等于 0, 屏障离出视线之上越多, N 值越大。进一步分析式(4)可知: (1) 当 N 趋于 0 时(低频), ΔL_p 趋于 5dB; (2) 当 N 趋于无穷时, ΔL_p 趋于 24dB; (3) 一般情况下, 当 $N = 1 \sim 10$ 时, $\Delta L_p \approx 13 + 10 \times \lg(N)$。

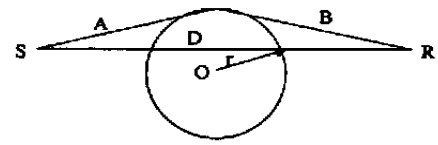


图 2　声源、接收点和遮挡物的相对位置

2.2　单位脉冲响应计算

应用辐射度算法, 给声源一个单位脉冲响应信号和建筑材料的吸声系数, 就能够得到所有接收器对应的单位脉冲响应。由于建筑材料的吸声系数随传递的声波频率而变化, 使用上述方法计算的脉冲响应, 与实际听到的音质有很大的误差, 其傅立叶变换也仅在对应频段是正确的, 故全频段建筑厅堂声学传递特性不能直接由上述方法获得。为此, 将频率分为若干个频段, 每一频段按中心频率选择材料的吸收系数。系统传递函数及单位脉冲响应的算法如下:

for ($i = 0, i < 6, i++$) //对每一中心频率循环

{选择该中心频率对应的材料吸收系数;

应用辐射度算法计算该中心频率所对应的单位脉冲响应;

对得到的单位脉冲响应进行 FFT 变换;

将对应频带的 FFT 变换值放入传递函数数组;}

将传递函数进行 FFT 反变换求得系统的单位脉冲响应;

2.3　真实感声音的生成

假设厅堂声音传递过程为线性的, 接收器的真实感声音信号可由单位脉冲响应与无回响声源干信号卷积得到:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau)\, s(t)\, \mathrm{d}t \qquad (7)$$

式中: $h(t)$、$s(t)$ 分别是由声源到接收器的单位脉冲响应和声源的干信号。

如果在厅堂内均匀地布置多个接收器, 由上述算法只能得到接收器处的响应, 为了获得厅堂内各点的声音, 需进行声场拟合。厅堂内任意点的声音信号可表示为如下多项式的形式:

$$f(t,x,y)=\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}\alpha_{ij}(t)(x-x)^{i}(y-y)^{j} \quad (8)$$

其中: m、n 为多项式的次数, $a_{ij}(t)$ 为系数, x、y 为平均值。如厅堂内第 r 个接收器的声音信号为 $f_r(t)$, 则系数 $a_{ij}(t)$ 可由最小二乘法求得。即求一系列 $aij(t)$, 使得取极小

$$R(t)=\sum_{r=1}^{p}[f_r(t)-\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}\alpha_{ij}(t)(x_r-x)^{i}(y_r-y)^{j}] \quad (9)$$

式中: p 为厅堂内布置的接收器总数。

3 计算实例

在我们搭建的声模拟实验平台上, 采用我们设计的基于辐射度模型的算法对一个 10×10×5 的室内声场进行模拟, 每个墙面对不同频率声波的吸收系数不同。阴影方框为声源, 其信号是一个单位脉冲激励信号, 用于产生室内声场的分布。声场中有一球心坐标为(2, 3, 2)、半径为 1 的球做为遮挡物。对场景内各表面进行正方形划分, 共生成了 1600 个面片, 各面的反射系数和吸声系数依据材料而定, 如表 1 所示。声源位于第 500 号面片的位置, 25 个声音接收器均匀地位于场景内, 接收器分布如图 3 所示。实际计算中采样频率为 8000Hz, 采样点数为 1024 点。

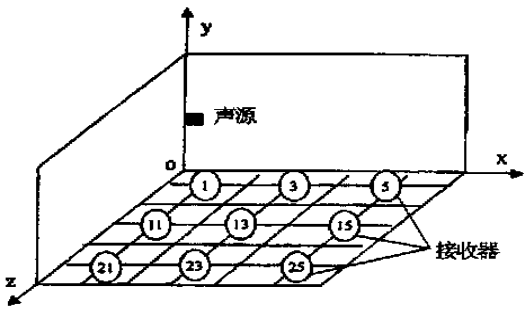


图 3 声源位置及接收器分布图

表 **1** 衰减系数表

	材 料	频率					
		125	250	500	1000	2000	4000
地 板	水磨石地面	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98
墙 壁	砖墙、拉毛水泥	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.95
顶 棚	聚胺脂泡沫塑料	0.80	0.68	0.30	0.38	0.32	0.35

4 仿真结果分析

图 4 为脉冲响应特性曲线, 反映了频率为 125Hz 的低频声波, 在不同接收器点的脉冲响应曲线。由图可见, 直达声到达接收器的延迟时间与接收器到声源的距离成正比, 除第 3 个接收器因遮挡直达声的强度较小之外, 其它接收器直达声的强度随距离的增加而减小, 直达声后有几个清晰的呈衰减趋势的近次反射声, 之后, 多次反射声相互混杂形成混响声, 近似呈指数规律衰减。图 5 为传递函数, 反映第 13 个接收器(声场中心) 在不同频率下的传递函数。在反射系数表中选用了不同频率的不同材质的反射系数, 从反射系数表看, 对应不同中心频率, 地板与墙壁的反射系数差别不大, 而顶棚的反射系数取值相差较大, 由图可见, 幅值随着声音频率的增大略有变化, 它与反射系数随频率的变化规律有关, 随系数增大幅值增加。图 6 为全频域传递函数, 表示分布于不同位置的接收器在全频域的传递函数, 是不同频域声波特性曲线拟合的结果, 显然, 各接收器点的频谱特性曲线不同, 也说明各接收器点获得的声能不同。因遮挡的影响, 第 3 个接收器在某些频率附近的响应很小, 且这些频率成倍数关系。图 7 为传递函数的傅立叶逆变换即单位脉冲响应, 表示由声源发出信号, 进行声场模拟得到的单位脉冲响应, 显然, 它随时间延迟而衰减。

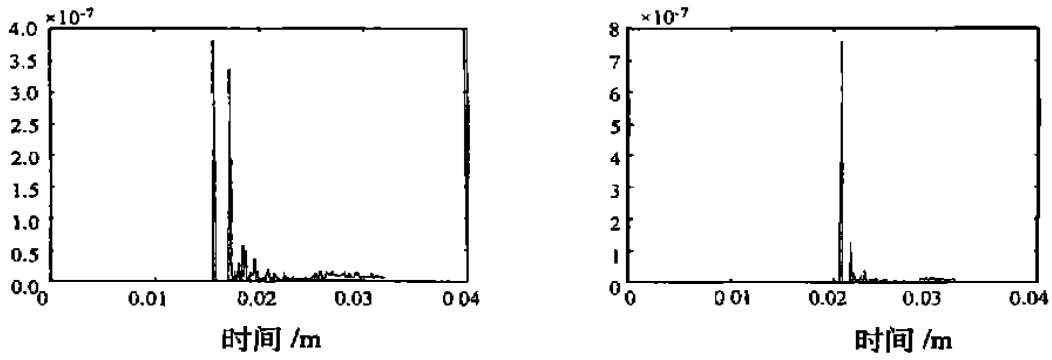
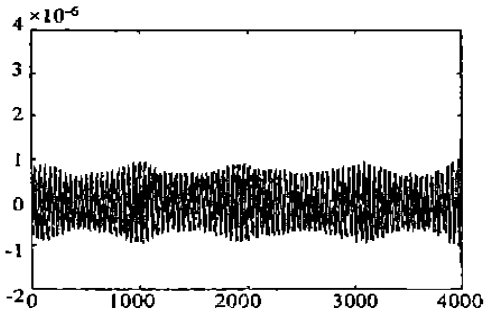
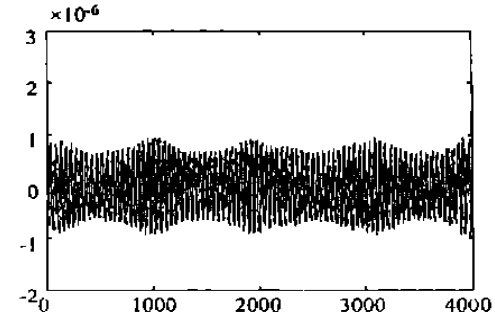


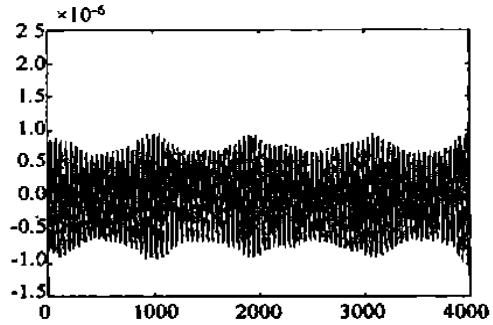
图 4 按 125Hz 时的吸声系数计算的单位脉冲响应



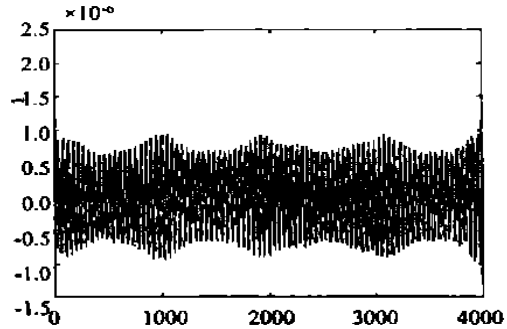
频率/Hz
(a) 中心频率 125Hz



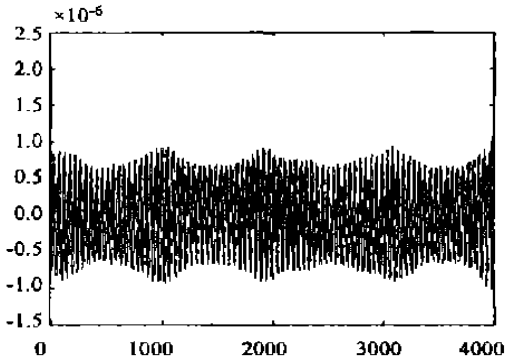
频率/Hz
(b) 中心频率 250Hz



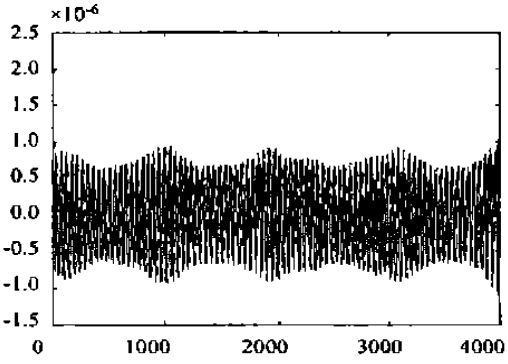
频率/Hz
(c) 中心频率 500Hz



频率/Hz
(d) 中心频率 1000Hz

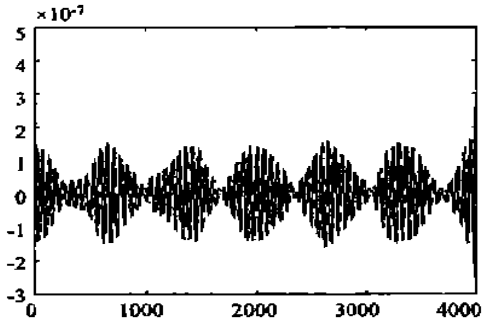


频率/Hz
(e) 中心频率 200Hz

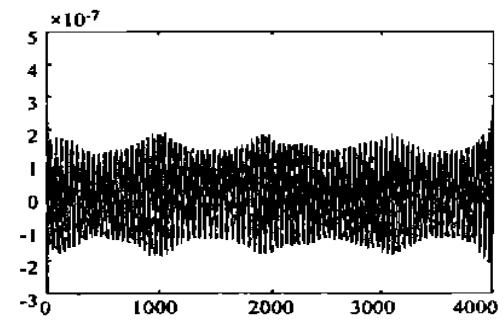


频率/Hz
(f) 中心频率 400Hz

图 5　第 13 个接收器对应不同频率吸声系数的传递函数

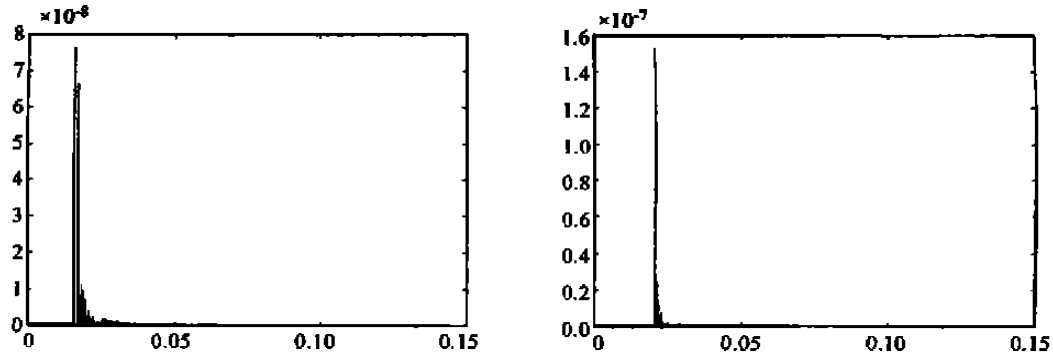


频率/Hz
(a) 第 3 个接收器



频率/Hz
(b) 第 13 个接收器

图 6　全频域传递函数



(a) 第 3 个接收器　　(b) 第 13 个接收器

图 7　全频域单位脉冲响应

5　结　论

本文在改进辐射度算法的基础上, 将传统声波衍射模型与改进辐射度算法相结合, 针对有屏障遮挡的声波衍射处理、声学传递过程模拟、整个频率范围的传递函数及单位脉冲响应获取、连续室内声场拟合以及真实感声音获取等技术问题进行了探讨。在此基础上, 给出一个室内声场仿真算例, 从仿真结果看, 不同频率的声波, 经过不同吸声系数的表面多次反射后, 接收器接收到的声波能量大小不同, 反映出来的频谱特性也不同, 最终得到的脉冲响应特性曲线反映了室内声场中声波的传递过程与特性。这些均表明了本文理论的正确性和算法的有效性。

参考文献

[1] Cremers L, Fyfe K R. On the use of variable order infinite wave envelope elements for acoustic radiation and scattering[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(4): 2028-2040.

[2] 贺加添. 音质设计手段的新进展[J]. 声学技术, 1996, 15(3): 146-151.

[3] 蒋国荣, 王季卿. 厅堂音质的可听化计算机模拟[J]. 电声技术, 1996, 20(6): 9-12.

[4] 戴根华, 李沛滋等. 室内声场简正波法的数值计算方法和混响场中声强测量的误差[J]. 声学学报, 1998, 23(1): 9-18.

[5] 张 琼, 石教英. 声学仿真中的人工神经网络方法[J]. 软件学报, 1998, 9(1): 7-13.

[6] Maekawa Z. Noise reduction by screens[J]. Applied Acoustics, 1968, 1(2): 157-173.

[7] Pierce A D. Diffraction of sound around corners and over wide barriers[J]. Journal of the Acoustics Society of America, 1974, 55(5): 941-955.

[8] Kurze U J, Anderson G S. Sound attenuation by barriers[J]. Applied Acoustics, 1971, 4(1): 35-53.

(上接第 133 页)

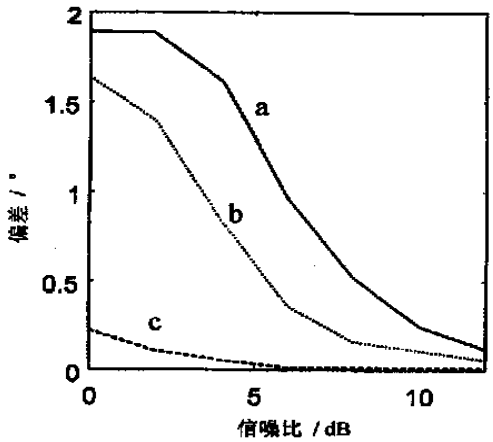


图 3　偏差与信噪比的关系

从理论分析和仿真结果可以得出以下结论:

(1) 在信号源互不相关时, 均匀线列阵的自相关矩阵为 Hermitian 的 Toeplitz 矩阵, 因而可以利用时空平均的方法来修正采样自相关矩阵, 而运算量几乎不增加;

(2) 用修正的采样自相关矩阵可以改善 DOA 估计性能, 尤其是在低信噪比或低样本数的条件下可以较大地提高估计性能;

(3) 虽然仿真时使用的是 MUSIC 算法, 但修正采样自相关矩阵法可以容易地推广到特征结构类的 ESPRIT 法、WSF 法等其它方法中去。

参考文献

[1] R. O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagat. 1986, 34(3): 276-280.

[2] R. Roy and T. Kailath. ESPRIT-Estimation of Signal Parameter Via Rotational Invariance Techniques [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.

[3] 孙超, 李斌. 加权子空间拟合算法理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.

[4] 斯德谊, 乐强, 沈士团. 利用 Toeplitz 特性改善来波方向估计性能[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(3): 267-269.