

# 二维 MUSIC 近场被动定位方法

熊 鑫, 章新华, 卢海杰, 兰 英

(海军大连舰艇学院信号与信息技术研究中心, 辽宁大连 116018)

**摘要:** 介绍了一种高精度的近场被动定位方法——二维 MUSIC 被动定位方法。它是一种在距离和方位上进行二维联合搜索的高精度被动定位方法。将 MUSIC(多重信号分类)算法与近场聚焦波束形成方法相结合, 能大大提高对近场目标的定位精度。先推导了基于均匀线列阵的二维 MUSIC 近场被动定位方法的定位原理, 通过仿真比较了二维 MUSIC 被动定位方法与常规聚焦波束形成的定位性能, 仿真表明, 二维 MUSIC 被动定位方法的定位性能要明显高于常规的聚焦波束形成被动定位方法。并仿真了该方法在不同的阵元间距以及不同的目标距离时的定位性能, 验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 二维 MUSIC; 近场; 被动定位

**中图分类号:** TB56

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3630(2010)-05-0543-05

**DOI 编码:** 10.3969/j.issn1000-3630.2010.05.019

## Research on 2-D MUSIC near-field passive location method

XIONG Xin, ZHANG Xin-hua, LU Hai-jie, LAN Ying

(Research Center of Signal Information of Dalian Naval Academy, Dalian 116018, Liaoning, China)

**Abstract:** A high accuracy near field passive localization method based on 2-D MUSIC is introduced in this paper. This kind of passive location method searches the sound source in both range and bearing. The combination of the MUSIC algorithm with the near field focusing beamforming method can raise the location accuracy for the near field sound source. This paper firstly deduces the localization theory of 2-D MUSIC near-field passive localization method, and then compares the localization performance of it with the conventional focused beamforming method by simulation. The simulation result shows that the location performance of the 2-D MUSIC passive location method is better than the conventional one's. At the end, this paper simulates the localization performance of 2-D MUSIC method for different array element spacing and different target range. Computer simulation verifies the feasibility and the effectiveness of the method proposed in the paper.

**Key words:** 2-D MUSIC; near-field; passive location

## 1 引言

传统的水声近场被动定位方法由于定位精度不高, 已不能适应现代海战的要求。高精度的近场被动定位方法成为了研究热点, 很多新方法也相继被提出。聚焦波束形成方法就是其中的一种, 相对于传统的三元被动定位方法, 聚焦波束形成方法具有很好的定位精度和较远的定位距离, 是未来近场被动定位方法研究的新趋势。

二维 MUSIC 被动定位方法是近年新提出的一种高精度近场被动定位方法。它基于常规的聚焦波束形成思想, 所谓的二维是指目标的距离和方位。

它对聚焦波束形成输出应用 MUSIC 方法对谱峰进行搜索, 谱峰就对应着目标的位置。

本文先建立了近场均匀线列阵的接收信号模型, 推导了二维 MUSIC 被动定位方法的定位原理, 最后通过仿真比较了二维 MUSIC 被动定位方法与常规聚焦波束形成的定位性能, 以及二维 MUSIC 被动定位方法受部分参数的影响情况。

## 2 近场线列阵信号接收模型

信号处于远场时, 信号到达阵列时的波阵面可以近似看成平面波, 这时等间距线列阵相邻两个阵元接收到信号的时间延迟是个定值, 大小只跟信号的入射方位有关。而当信号源处于近场的情况时, 到达波不能看成平面波, 而应该是球面波。相邻阵元接收到信号的时间延迟是不同的, 时间延迟不仅与信号入射方位有关, 还与信源到阵列的距离有关。

收稿日期: 2009-05-06; 修回日期: 2009-09-03

作者简介: 熊鑫(1986-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 熊鑫: E-mail: xiongxin19860522@126.com

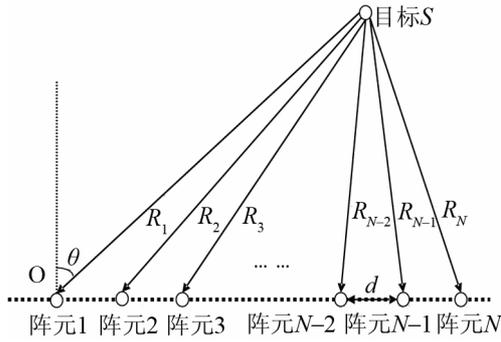


图 1 近场环境下线列阵模型

Fig.1 The model of line array in near-field environment

如图 1 所示，声源  $S$  位于由  $N$  个阵元组成的线列阵的近场，阵元间距为  $d$ 。声源  $S$  与第一个阵元的连线与阵法线的夹角为  $\theta$ ，以法线正方向为零度，顺时针方向为正，逆时针方向为负，距离为  $R_1$ 。声源  $S$  到第  $i$  个 ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 阵元的距离为  $R_i$ 。那么第  $i$  个阵元与第一个阵元接收信号的时延差为：

$$\tau_i = \frac{R_i - R_1}{c} \quad (1)$$

由图 1 中的几何关系，运用三角形的余弦定理很容易可以求出：

$$R_i = \sqrt{R_1^2 - 2(i-1)R_1d\sin\theta + (i-1)^2d^2} \quad (2)$$

以第一个阵元为基准，则第  $i$  个阵元接收信号可表示为：

$$x_i(t) = s(t) * e^{-2\pi j t \tau_i} + n_i(t) \quad (3)$$

所以，

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{a}(R_i, \theta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (4)$$

式中， $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$  表示阵列接收信号矩阵，信号方向向量为：

$$\mathbf{a}(R_i, \theta) = [1, e^{-j2\pi \frac{\sqrt{R_1^2 - 2R_1d\sin\theta + d^2} - R_1}{\lambda}}, \dots, e^{-j2\pi \frac{\sqrt{R_1^2 - 2(N-1)R_1d\sin\theta + (N-1)^2d^2} - R_1}{\lambda}}]^T$$

$s(t)$  为信源信号， $\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$  为噪声干扰矩阵。由公式(4)可看到方向矢量是距离和角度的二维函数，这与远场阵列模型有着明显的差别。

### 3 二维 MUSIC 被动定位原理

#### 3.1 聚焦波束形成

波束形成实际上就是对每个传感器上的信号加以一定的加权，线性组合所有传感器上的信号，以检验从某个特定角度到达的信号的过程。当声源位于近场时，不仅要对其方位进行扫描，还要对其距离进行扫描。聚焦波束形成技术就是通过将扫

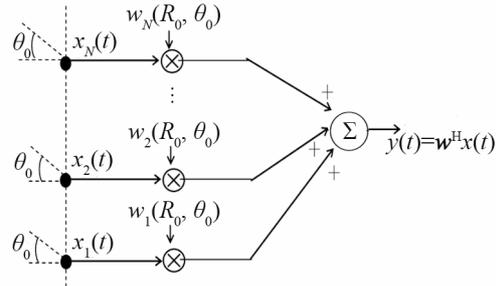


图 2 窄带聚焦波束形成原理

Fig.2 The principle of narrowband focused beamformer

描点的方位和距离信息加入到加权中<sup>[1,2]</sup>，并对声源进行定位。

图 2 是窄带聚焦波束形成的原理图， $\mathbf{w}$  为加权向量。常规的聚焦波束形成对声场  $(R_0, \theta_0)$  点进行扫描， $R_0$  为扫描点到第一个阵元的距离， $\theta_0$  为扫描点到第一个阵元的夹角。对接收信号进行球面补偿，在没有干扰的情况下聚焦波束形成的输出为：

$$y(t) = \sum_{i=1}^N x_i \left( t + \frac{R_{0i} - R_0}{c} \right) \quad (5)$$

$$R_{0i} = \sqrt{R_0^2 - 2(i-1)R_0d\sin\theta_0 + (i-1)^2d^2} \quad (6)$$

$R_{0i}$  为扫描点  $(R_0, \theta_0)$  到第  $i$  个阵元的距离。

所以输出可写成：

$$y(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t) e^{2\pi j t \frac{R_{0i} - R_0}{c}} = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \quad (7)$$

加权向量为：

$$\mathbf{w} = [1, e^{2\pi j t \frac{R_{02} - R_0}{c}}, \dots, e^{2\pi j t \frac{R_{0N} - R_0}{c}}]^T \quad (8)$$

输出功率为：

$$\bar{y}^2(t) = \overline{[\mathbf{w}^H \mathbf{x}(t)]^2} \quad (9)$$

当扫描点与目标所在位置吻合时，来自目标的信号形成同相叠加，此时输出功率最大，在声图上形成最大输出。

#### 3.2 二维 MUSIC 被动定位

MUSIC(多重信号分类)算法是 Schmidt R O 等人在 1979 年提出的。它的基本思想是将任意阵列输出数据的协方差矩阵进行特征分解，从而得到与信号分量相对应的信号子空间和与信号分量相正交的噪声子空间，利用这两个子空间的正交性来估计信号的参数。

窄带远场信号的数学模型为：

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta) \mathbf{s}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (10)$$

阵列数据的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (11)$$

由于信号与噪声相互独立，数据协方差矩阵可分解为与信号、噪声相关的两部分，其中  $\mathbf{R}_s$  是信号的协方差矩阵。

对  $\mathbf{R}$  进行特征分解有:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_S \boldsymbol{\Sigma}_S \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \boldsymbol{\Sigma}_N \mathbf{U}_N^H \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{U}_S$  是由大特征值对应的特征矢量张成的子空间也即信号子空间, 而  $\mathbf{U}_N$  是由小特征值对应的特征矢量张成的子空间也即噪声子空间。

理想条件下数据空间中的信号子空间和噪声子空间是相互正交的, 即信号子空间中的导向矢量也与噪声子空间正交:

$$\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_N = 0 \quad (13)$$

由于噪声的存在,  $\mathbf{a}^H(\theta)$  与  $\mathbf{U}_N$  并不能完全正交, 也就是说上式并不成立。因此, 实际上求 DOA 是以最小优化搜索实现的, 即:

$$\theta_{MUSIC} = \arg_{\theta} \min \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{a}(\theta) \quad (14)$$

所以, MUSIC 算法的谱估计公式为:

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (15)$$

上面是对远场 DOA 估计时的分析, 当目标位于近场时<sup>[3-7]</sup>, 只要把方向矢量  $\mathbf{a}(\theta)$  改成适合于近场的方向矢量  $\mathbf{a}(R, \theta)$ 。

二维 MUSIC 被动定位算法的谱估计公式为:

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(R, \theta) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{a}(R, \theta)} \quad (16)$$

对目标  $(R, \theta)$  进行二维谱峰搜索, 得到被动定位声图, 谱峰就对应着目标的位置。

## 4 仿真检验与分析

仿真条件: 静止声源目标位于  $(0^\circ, 60\text{m})$  位置, 仿真信号为 CW 信号, 阵元数  $M=24$ , 声速  $c=1500\text{m/s}$ , 距离扫描范围为  $1\sim 100\text{m}$ , 步长为  $1\text{m}$ , 方位扫描范围  $(-20^\circ, 20^\circ)$ , 步长  $0.1^\circ$ , 快拍数  $K=1024$ , 信号采样频率  $f_s=48\text{kHz}$ , 阵元间距  $d=2\text{m}$ , 信号频率  $f_c=1500\text{Hz}$ ,  $SNR=3\text{dB}$ , 噪声为高斯白噪声。

### 4.1 与常规聚焦波束形成方法的比较

图 3 是常规聚焦波束形成声图结果, 横纵轴分别表示距离和方位。由图 3 可以看出, 常规聚焦波束形成被动定位声图存在很强且不平滑的背景, 另外还具有较高的旁瓣级, 定位性能不好。

图 4 是相同仿真条件下的二维 MUSIC 被动定位声图, 对比图 3 我们可以明显发现二维 MUSIC 被动定位方法能够很好地降低噪声的干扰, 消除“混叠”现象, 大大提高了定位分辨率。

### 4.2 阵元间距对定位性能的影响

分别仿真阵元间距为  $0.5\lambda$ 、 $\lambda$ 、 $2\lambda$  时的定位情

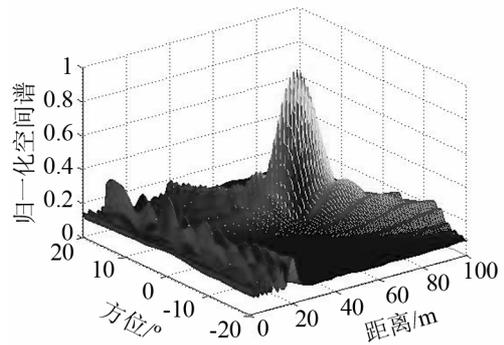


图 3 常规聚焦波束形成被动定位声图  
Fig.3 The passive ranging performance of the conventional focused beamformer method

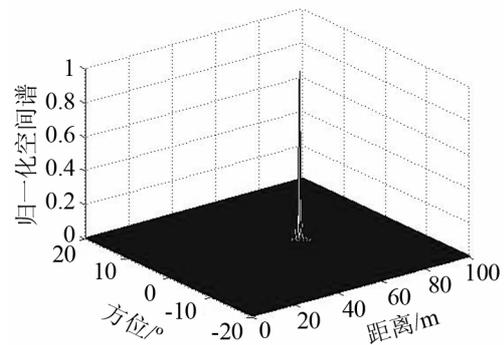


图 4 二维 MUSIC 被动定位声图  
Fig.4 The passive ranging performance of the 2-D MUSIC method

况, 其定位声图如图 5 所示。

由图 5 可以看到, 当阵元间距为半波长时, 在方位上具有一定的分辨率, 但是距离分辨率不高, 定位效果不明显。随着阵元间距的加大, 波束峰值越来越尖锐, 方位和距离的分辨率都很高, 定位精度高。这是由于, 当阵元间距太小时, 基阵接收到的信号的时延差就小, 对目标距离的精确估计就越困难。

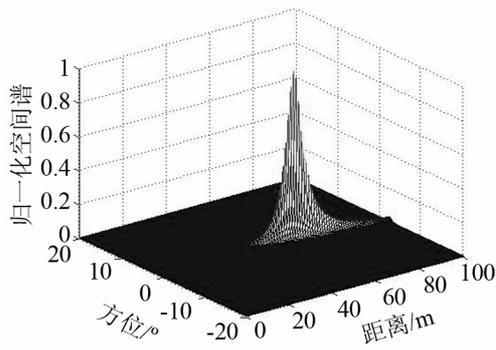
### 4.3 不同距离上的定位性能

定位距离是考察一种被动定位方法的重要技术指标, 下面仿真了二维 MUSIC 被动定位方法在不同的定位距离上的定位情况。

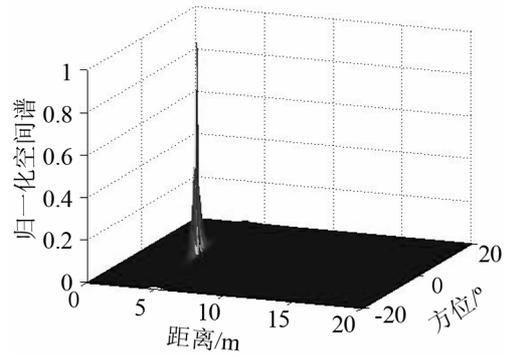
图 6 分别是目标距离为  $4\text{m}$ 、 $80\text{m}$  和  $250\text{m}$  时的仿真图, 由图 6 可以明显看到, 当距离非常近的时候, 定位声图的距离分辨率很高, 而方位分辨率很低。而当目标位于较远的距离时, 定位声图的方位分辨率变得很高, 距离分辨率却明显降低。

## 5 总结

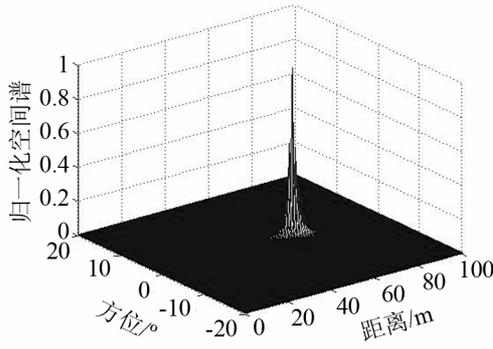
二维 MUSIC 被动定位方法是一种新兴的水声近场被动定位方法, 本文首先在建立了近场接收信



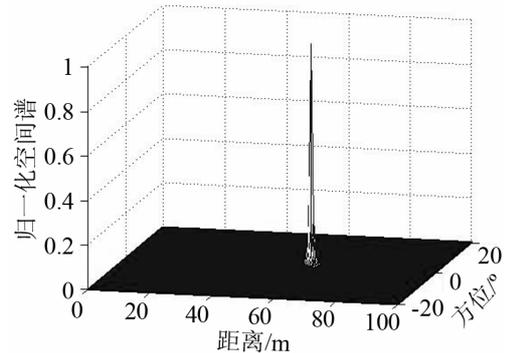
(a)  $d=0.5\lambda$



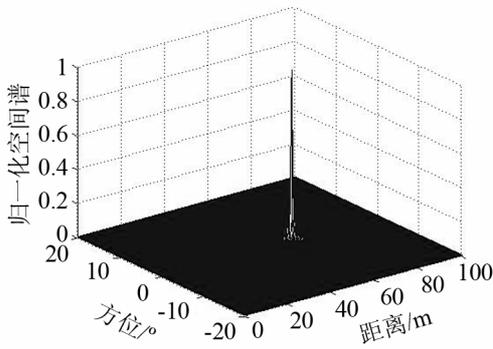
(a)  $R=4m$



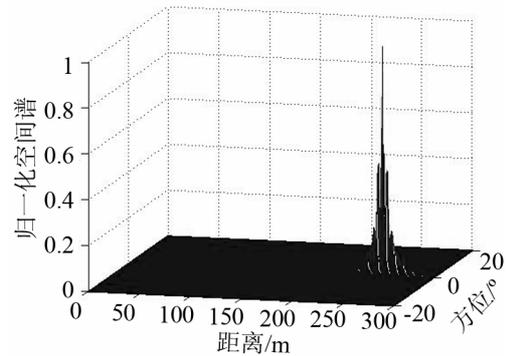
(b)  $d=\lambda$



(b)  $R=60m$



(c)  $d=2\lambda$



(c)  $R=250m$

图 5 不同阵元间距时的声图

Fig.5 The passive ranging performance for different array element spacing

号模型的基础上推导了二维 MUSIC 被动定位方法的定位原理。然后通过仿真比较了该方法与常规的聚焦波束形成方法的定位性能, 仿真结果发现, 二维 MUSIC 被动定位方法能够明显提高定位声图的分辨率。同时还仿真了该方法在不同的阵元间距以及不同的定位距离时的定位效果, 发现当阵元间距较小时, 目标距离估计的分辨率不是很高, 随着阵元间距的增大, 定位效果也越来越好。这是由于当阵元间距太小, 基阵接收到的信号的时延差就小, 对目标距离的精确估计就越困难。另外, 当目标位于较近的位置时, 定位声图的距离分辨率会很高, 而方位分辨率很低。当目标位于较远的位置时则相

图 6 不同距离上的定位声图

Fig.6 The passive ranging performance for different target range

反, 定位声图的距离分辨率会降低, 但是方位分辨率很高。

参 考 文 献

[1] 时洁. 基于 MVDR 聚焦波束形成的辐射噪声源近场定位方法[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(3): 55-58.  
SHI Jie. Radiated noise sources near-field location based on MVDR focused beamforming[J]. Dalian Maritime University Journal, 2008, 34(3): 55-58.

[2] 梅继丹, 惠俊英, 惠娟. 聚焦波束形成声图近场被动定位技术仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1328-1333.  
MEI Jidan, HUI Junying, HUI Juan. Research on simulation of near field passive ranging with underwater acoustic image by focused beam-forming[J]. System Simulation Journal, 2008, 20(5): 1328-1333.

- [3] Russell Jeffers, Kristine L. Bell, Harry L. Van Trees. Broadband passive range estimation using MUSIC[J]. Proc. ICASSP, 2002, 3(4): III2921-III2924.
- [4] Zineb Saidi, Salah Bourennane, Laurent Guillon, Patrick Sanchez. Bearing and range estimation using wide-band MUSIC method[C]. 13<sup>th</sup> EUSIPCO Antalya, Turkey, 2005, 33(4): 564-570.
- [5] Russell Jeffers, Kristine L. Bell. Broadband signal subspace processing for range estimation[J]. IEEE, 2002, 23(3): 495-498.
- [6] 张成, 陈克安. 声场分解的均匀圆阵实值 MUSIC 算法[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 428-432.
- ZHANG Cheng, CHEN Kean. Unitary MUSIC algorithm based on sound field decomposition for UCA[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3): 428-432.
- [7] 张揽月, 许继友. 矢量线阵 MUSIC 算法抗空间混叠性能研究[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 741-745.
- ZHANG Lanyue, XU Jiyu. Research on the performance of suppressing grating lobes of MUSIC algorithm for uniformly linear vector hydrophone array[J]. 2008, 27(5): 741-745.

## 上海市声学学会庆贺成立三十年

上海市声学学会庆贺成立三十年大会及第七次会员代表大会于 2010 年 9 月 24 日在上海科学会堂举行。

出席会议的有学会历届正副理事长王季卿、周永昌、冯绍松、赵松龄、徐智章、姚蓝、陈思忠、钱梦騷、胡兵、孟昭文及会员代表 100 余人, 香港声学学会前会长陈炳祥也莅临大会。

会议由孟昭文副理事长主持, 并宣读了声学界知名人士和兄弟学会的贺词。他们是应崇福院士、王威琪院士、中国声学学会理事长田静、中国无损检测学会副理事长沈建中、南京大学声学所、陕西师范大学应用声学研究所、西安声学学会林书玉。我会历届正副理事长王季卿、赵松龄、向大威、徐智章等题词。

钱梦騷理事长在会上首先作了“学会三十年回顾”的报告, 第三届理事长王季卿代表历届理事长致辞, 对学会第一、二届理事长魏墨盒的开创性工作进行了深情回顾, 还对上世纪 60 年代学会前身-上海市声学工作委员会主任金绍珠(市科委老干部)的卓识远见, 表达了缅怀之意, 正是吃水不忘掘井人。

大会还表彰了对学会工作卓有贡献的老专家、老领导, 对学会工作热心勤奋、卓有成绩的中坚骨干, 分别授予荣誉奖、贡献奖, 也表彰了在学术、咨询、技术推介等方面做出显著成绩的专业委员会。

### 1. 学会荣誉奖:

王季卿, 冯绍松, 周永昌, 赵松龄, 徐智章, 向大威, 钱梦騷。

### 2. 学会贡献奖:

陈思忠, 姚 蓝, 胡 兵, 孟昭文, 顾亚平, 阎玉舜, 蒋济良, 潘玉玺, 章奎生, 吕玉恒, 胡长青, 龚农斌, 高克诚, 寿文德, 范静平, 梁 华, 严 雷, 何还珠, 杜选民, 汪鸿振, 张明发, 朱家安, 丁玉薇, 王鸿樟, 张叔英, 叶亦坤, 黄杏宝。

### 3. 优秀学术活动奖:

医学超声专业委员会, 建声噪声专业委员会, 工业超声专业委员会

### 4. 优秀技术推介奖:

电声专业委员会

### 5. 优秀技术咨询奖:

建声噪声专业委员会, 同济大学声学研究所

### 6. 优秀学会工作奖:

学会办公室