

# 基于麦克风阵列的三维声源定位算法及其实现

杨祥清, 汪增福

(中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027)

摘要: 从系统的角度对真实声场环境下基于到达时间差的声源定位算法进行了研究, 提出了一种改进的互功率谱相位(CSP)时延估计算法, 在此基础上, 提出了一种用于定位估计的基于球形差值(SI)的随机梯度下降(LMS)算法。为了验证算法的有效性, 实际构建了三维空间中的点声源定位系统。实验结果表明所提出的算法具有较高的定位精度。

关键词: 声源定位; 互功率谱相位; 球形差值; 随机梯度下降

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-02-0260-06

## 3D sound source localization algorithm and its implementation based on microphone array

YANG Xiang-qing, WANG Zeng-fu

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Sound source localization based on time difference of arrivals in the acoustic environment is discussed from the systematic perspective. A modified Crosspower-Spectrum Phase (CSP) method is presented for time delay estimation (TDE) while a least mean square (LMS) approach based on the Spherical Interpolation (SI) is followed to derive the source coordinates. To verify the algorithm, a real point source localization system in 3D space is established. Experimental results show that the algorithm gives high accuracy of the source location.

Key words: sound source localization; crosspower spectrum phase(CSP); spherical interpolation(SI); LMS

## 1 引 言

阵列信号处理<sup>[1]</sup>是数字信号处理领域的一大热点。基于麦克风阵列的声源定位是声学信号处理中的一个重要问题, 它在视频会议、智能机器人和语音增强等领域有着广泛的应用。在真实的声场环境下的点声源定位研究是一项具有挑战性的课题, 近年来受到越来越多的关注。

声源定位算法主要可分为 3 类<sup>[2]</sup>。第 1 类是基于波束形成的方法。该方法可以用于多声源的定位, 但存在着对初始值敏感和需要声源和背景噪声先验知识等缺点。第 2 类是基于高分辨率谱

估计的方法。该方法理论上能够对声源方向进行有效估计, 但计算量大, 且不适合处理人声等宽带信号。第 3 类是基于到达时间差的方法。由于该方法原理简单, 计算量小, 易于实现, 在声源定位中得到了广泛应用。

基于到达时间差的定位算法主要由两个部分组成。第 1 部分为时延估计<sup>[3]</sup>, 用于计算来自同一个声源的信号到达具有配对关系的两个麦克风的时间差; 第 2 部分为定位估计, 用于计算声源位置, 即根据所得到的时延估计, 利用麦克风阵元相互之间的几何位置关系确定声源位置。本文从系统的角度研究声源定位问题。采用互功率谱相位法(CSP)<sup>[4]</sup>进行时延估计; 为抑制弥漫在整个频谱空间中的噪声的影响, 采用了对互功率谱先白化后截断的处理策略, 提高了检测精度。此外, 在 SI<sup>[5,6]</sup>的基础上利用 LMS 算法通过迭代处理得到

收稿日期: 2007-03-26; 修回日期: 2007-06-24

基金项目: 杨祥清(1982-), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 主要研究方向为声源定位。

通讯作者: 汪增福, E-mail: zfwang@mail.ustc.edu.cn

定位估计的全局优化解; 这样做既解决了 SI 算法中存在的收敛不确定性问题, 也显著提高了定位精度。为了验证以上定位算法的有效性, 实际构建并实现了真实声场环境下的点声源定位系统, 进行了相关的定位实验, 并对实验结果进行了分析。实验结果表明, 该算法具有较高的定位精度。

## 2 端点检测

在语音预处理中, 带噪语音的端点检测是一个关键环节。端点检测正确与否, 将直接影响到后续的定位处理。一般认为, 语音信号是非高斯的, 而环境噪声则近似服从高斯分布, 并且信号与噪声之间是统计独立的, 故引入基于高阶累积量的方法完成端点检测。这里, 利用了累积量的两个主要性质<sup>[7]</sup>: (1) 两个独立信号之和的累积量等于两个信号各自累积量之和; (2) 高阶累积量对高斯信号是盲的, 即高斯信号的高阶累积量为零。由此可知, 带噪语音的高阶累积量等价于纯净语音的累积量。实验中采用 4 阶累积量完成端点检测。实验结果表明, 有关语音和噪声信号的上述假设基本符合实际情况。这样, 利用上述语音端点检测技术可以在混响环境中, 实现对语音起始音的精确检测。因为在流语中, 起始音部分仅包含直达声和噪声, 没有受到回声的污染。

## 3 时延估计

### 3.1 信号传输模型

麦克风阵列各阵元接收的信号可表示为:

$$x_i(t) = h_i(t) * s(t) + n_{ii}(t) = \alpha_i(t - t_i) + n_{ii}(t) + n_{iR}(t) \quad (1)$$

其中, 符号 “\*” 为卷积算子,  $s(t)$  为源信号,  $i$  为麦克风序号,  $h_i(t)$  为声源到第  $i$  个麦克风的传输函数,  $t_i$  为声源直达声到第  $i$  个麦克风的传输时间,  $\alpha_i$  为直达通道的衰减因子。  $n_{ii}(t)$ ,  $n_{iR}(t)$  分别为第  $i$  个麦克风接收的环境加性噪声和混响噪声。

不失一般性, 考虑第 1, 2 两个麦克风信号的互相关函数:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t-\tau)] = \alpha_1\alpha_2R_{s_1s_2}(\tau - D_{12}) + N(\tau) \quad (2)$$

其中,  $D_{12} = t_1 - t_2$  为声源信号到达两个麦克风的时间差, 由式 (1)、(2) 可知,

$$N(\tau) = R_{n_{1n2}}(\tau) + E[\alpha_1s(t-t_1)n_2(t-\tau)] + E[\alpha_2s(t-t_2-\tau)n_1(t)] \quad (3)$$

这里,  $n_i(t)$  ( $i=1, 2$ ) 为相应的加性噪声和混响噪声

之和。在理想环境下,  $N(\tau)$  项为 0, 根据自相关函数的性质  $R(\tau) \leq R(0)$ , 在  $\tau = D_{12}$  处互相关函数出现最大峰值。在混响环境中, 由于多径效应和加性噪声的影响,  $N(\tau)$  会在  $D_{12}$  附近产生峰值。为了实现声源的高精度定位, 就要设法抑制回声和噪声的影响, 正确检测出  $N(\tau)$  的主峰值。

### 3.2 互功率谱相位(CSP)法

由定义知, 互功率谱密度函数为信号互相关函数的傅立叶变换, 即

$$G_{12}(\omega) = X_1(\omega)X_2^*(\omega) \quad (4)$$

其中, 符号 “\*” 表示共轭,  $X_1(\omega)$ ,  $X_2(\omega)$  分别为  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  的傅立叶频谱。

为了锐化互相关函数的峰值, CSP 法对互功率谱密度函数进行加权处理,

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{12}(\omega) X_1(\omega) X_2^*(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (5)$$

其中, 加权函数  $\varphi_{12}(\omega) = 1/|G_{12}(\omega)|$ 。

由式 (5) 知, CSP 法对功率谱函数进行白化(w-whitening)处理, 只保留信号的相位信息, 处理结果使得互相关函数的峰值更加尖锐。由于多径的衰减因子小于直达路径的衰减因子, 因此, 相对于直达声的主峰值而言由回声产生的峰值要小一些。在 CSP 法中, 由回声产生的峰值被进一步抑制, 故 CSP 法具有抑制中低混响的能力, 在各种声场环境下得到了有效的应用。

### 3.3 互功率谱相位法的分析及改进

经白化处理后, 互功率谱函数每个频率点对互相关函数的能量贡献是一样的, 处理结果仅依赖于

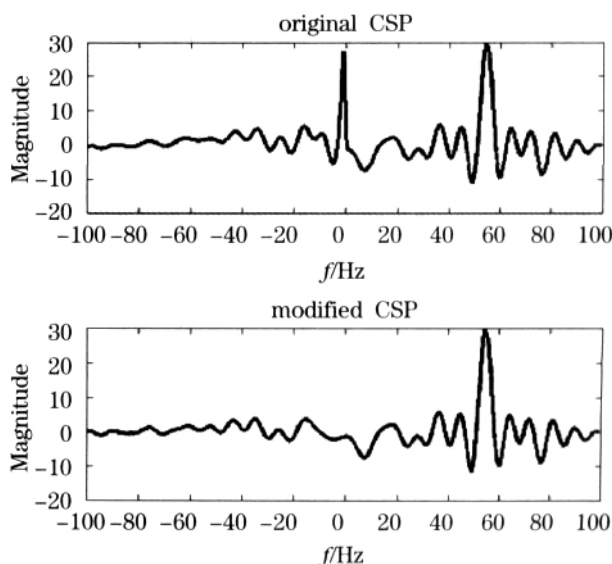


图 1 改进 CSP 算法抑制了零时延处错误的尖峰  
Fig.1 Modified CSP method suppressing the false peak at zero time-delay

相位信息。众所周知,语音是有限带宽的,只有在该带宽范围内语音相位才占主导地位,在该范围之外的有效相位信息被噪声的随机相位信息所淹没。为了抑制噪声的不良影响、提高互相关函数峰值的检测精度,就对白化后的互功率谱密度函数进行带通滤波以截断语音带宽范围之外的低频和低频部分。这样做取得了很好的效果。如图 1 所示,在实际语音采集系统中,由于设备引入了同步噪声,在零时延处出现了非期望的峰值,甚至超过了实际的主峰值,滤波处理后,错误的零时延峰值被抑制。由于并没有削减语音的有效信息,所以该改进方法总体性能上较 CSP 法为优。

### 4 定位估计

#### 4.1 定位模型

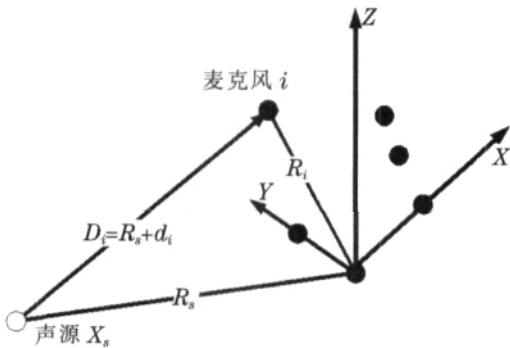


图 2 麦克风阵列与声源几何关系及表示

Fig.2 Configuration of microphone array and sound source

由 N 个麦克风组成的阵列与声源的相互位置关系如图 2 所示。不失一般性,取第一个麦克风为三维坐标系的原点,用  $x_s$  和  $x_i$  分别表示声源和第  $i$  个麦克风的坐标向量,  $R_s$  表示声源到原点的距离,  $D_i$  表示声源到第  $i$  个麦克风的距离,  $R_i$  表示第  $i$  个麦克风到原点的距离。  $d_{ij}=D_i- D_j$ 。在理想的情况下,有

$$(R_s+d_{ij})^2 - (R_i^2 - 2x_i^T x_s + R_s^2) = 1$$

$$R_i^2 - d_{ij}^2 - 2R_s d_{ij} - 2x_i^T x_s = 0 \tag{6}$$

这里,  $i, j=1, 2, \dots, N$ 。由于时延估计误差的存在,导致式(6)在实际中并不严格成立。令  $j=1$ ,由式(6),可得到如下的误差方程组

$$\varepsilon_i = R_i^2 - d_{i1}^2 - 2R_s d_{i1} - 2x_i^T x_s \quad i=2, \dots, N \tag{7}$$

表示成矩阵形式,有

$$\varepsilon = \delta - 2R_s d - 2Sx_s \tag{8}$$

其中,

$$\delta = \begin{bmatrix} R_2^2 - d_{21}^2 \\ R_3^2 - d_{31}^2 \\ \vdots \\ R_N^2 - d_{N1}^2 \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{31} \\ \vdots \\ d_{N1} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N \end{bmatrix}$$

给定  $R_s$ , 根据最小二乘法得到,

$$x_s = \frac{1}{2} S_W^* (\delta - 2R_s d) \tag{9}$$

其中,

$$S_W^* = (S^T W S)^{-1} S^T W \tag{10}$$

是最小化  $S^T W S$  的解,  $W$  是对称正定的权矩阵,它的取值将在稍后作进一步的讨论。在实际  $R_s$  未知的情况下,由  $R_s = \|x_s\|$  的关系知,这是一个非线性求解问题,上述方法是行不通的。

#### 4.2 球形差值(SI)

为了求解上述非线性问题,SI 法提出利用正交投影变换进行问题的求解。为此,定义  $(N-1) \times (N-1)$  的对称矩阵:

$$P_s \triangleq S S_W^* = S (S^T W S)^{-1} S^T W$$

$$P_s \triangleq I - P_s \tag{11}$$

其中,  $P_s$  为  $S$  的投影矩阵,  $P_s$  为  $S$  的正交投影矩阵,  $P_s$  具有对称幂等性。

将原误差向量  $\varepsilon$  对  $S$  正交投影,并略去  $Sx_s$  项,有

$$\varepsilon = P_s \varepsilon = P_s (\delta - 2R_s d) \tag{12}$$

定义相应的误差度量函数为

$$J = \varepsilon^T W \varepsilon = (\delta - 2R_s d)^T P_s W P_s (\delta - 2R_s d) \tag{13}$$

最小化  $J$ , 得到:

$$R_s = \frac{d^T P_s W P_s \delta}{2d^T P_s W P_s d} \tag{14}$$

将式(14)代入式(9)得到声源位置估计:

$$x_s = \frac{1}{2} S_W^* (\delta - 2R_s d)$$

$$= \frac{1}{2} (S^T W S)^{-1} S^T W (I - \frac{d d^T P_s W P_s}{d^T P_s W P_s d}) \tag{15}$$

如果定义  $d$  的正交投影矩阵及相应误差度量函数

$$P_d \triangleq I - d d^T / (d^T d) \tag{16}$$

$$J = \varepsilon^T P_d W P_d \varepsilon \tag{17}$$

则可以得到相应的声源估计<sup>[5]</sup>

$$x_s = \frac{1}{2} (S^T P_d W P_d S)^{-1} S^T P_d W P_d \delta \tag{18}$$

该结果与式(15)是等价的。

在得到当前定位估计的基础上, SI 算法更新加权矩阵  $W$ , 迭代得到更优的解。但是, SI 算法存在两个问题: 一是该迭代不能保证一定是收敛的, 收敛条件需要提前判断<sup>[7]</sup>, 这无疑影响了算法的适用性; 二是 SI 的误差度量函数不是最优的。所以本文提出了基于 SI 的 LMS 算法(以下简称为 SI-LMS 算法)。下面具体分析 SI-LMS 算法是如何解决以上两个问题的。

### 4.3 SI-LMS 算法及其分析

在声源的实际位置未知的条件下, 最优的误差度量函数可以表述为:

$$\min_{x_s} \|\varepsilon^*\| \|\Delta\| |d - \hat{d}(x_s)| \quad (19)$$

其中,  $\hat{d}(x_s)$  为根据估计得到的声源  $x_s$ , 利用阵列几何信息推算的传输距离延迟。其目标就是使定位前估计的传输距离延迟与定位后得到的相应的传输距离延迟之间的误差最小化。由式(7), 经进一步推算可得<sup>[7]</sup>:

$$\varepsilon_i = 2(R_s + \hat{d}_{i1})(d_{i1} - \hat{d}_{i1}) = 2\hat{D}_i(d_{i1} - \hat{d}_{i1}) \quad (20)$$

这里, 符号“ $\wedge$ ”表示定位后的推算值。结合(8)、(19)和(20), 定义如下的优化误差度量函数

$$J_w = \varepsilon^T W \varepsilon \quad (21)$$

其中的加权矩阵为:

$$W = (\text{diag}[\hat{D}_i] R_d \text{diag}[\hat{D}_i])^{-1} \quad (22)$$

这里,  $\text{diag}[x]$  表示由向量  $x$  转换成的对角矩阵,  $R_d$  为麦克风对传输延迟的相关矩阵。计算优化误差度量函数关于  $x_s$  的梯度:

$$\begin{aligned} \nabla_{x_s}(\varepsilon^T W \varepsilon) &= 2 \nabla_{x_s}(\varepsilon) W \varepsilon = \\ &- 4(S^T + \frac{X_s}{\|x_s\|} d^T) W (\delta - 2\|x_s\|d - 2Sx_s) \end{aligned} \quad (23)$$

显然, 无法从  $\nabla(\varepsilon^T W \varepsilon) = 0$  直接求解  $x_s$ , 为解决此问题引入了 LMS 算法。其迭代公式如下:

$$\begin{aligned} x_s(n+1) &= x_s(n) - u \nabla(\varepsilon^T W \varepsilon) = \\ &[I - 4u(2S^T W S + \frac{2d^T W d - d^T W \delta}{\|x_s\|})] x_s(n) + P \end{aligned} \quad (24)$$

其中,  $I$  为单位矩阵,  $u$  为迭代步长,  $P$  为与  $x_s$  无关的项。下面分析该算法的收敛性。为此, 定义

$$A = 2S^T W S + \frac{2d^T W d - d^T W \delta}{\|x_s\|} I \quad (25)$$

这里,  $A$  为实对称矩阵, 可经过正交旋转变换实现对角化。为保证迭代收敛, 必须满足:

$$|1 - 4u\lambda_i| < 1 \quad \forall i \quad (26)$$

为  $A$  的特征值, 故迭代收敛条件为:

$$u < \frac{1}{2\lambda_{\max}} \quad (27)$$

由于矩阵的迹等于所有特征值之和, 为方便迭代计算, 把步长进一步限制为:

$$u < \frac{1}{2\text{Tr}[A]} \quad (28)$$

$\text{Tr}[A]$  为矩阵  $A$  的迹。为加快收敛速度, 可以给步长乘以一个指数因子, 在迭代初期步长适当放大, 迭代中后期趋于收敛条件。

SI-LMS 算法流程描述如下:

(1) 初始化权重矩阵  $W$  为单位矩阵, 利用 SI 算法得到声源的初始估计  $x_{s0}$ 。

(2) 利用得到的  $x_s(n)$  更新权重矩阵  $W(n)$  和步长  $u(n)$ 。

(3) 按下式进行迭代计算,

$$x_s(n+1) = x_s(n) - u(n) \nabla(\varepsilon^T W(n) \varepsilon)$$

完成后, 转步骤(2)。

利用所定义的优化误差度量函数, 可保证 SI-LMS 算法是收敛的, 即通过有限次的迭代运算趋于全局极小值点。定位精度相比 SI 算法有较大提高。

## 5 定位实验

为了验证算法的有效性, 就实际构建了一个三维声源定位系统。如图 3 所示, 考虑到实现声源的三维空间定位至少需要 4 个不共面的麦克风, 为增加冗余度, 就开发了一个基于 6 通道同步语音采集装置的 6 麦克风阵列声源定位系统。

传声器阵列的分布及坐标系定义如图 4 所示。前排 4 个麦克风水平等间距排列, 后排 2 个垂直排列。在办公室环境中进行了相关的定位实验。采集 12 组同步数据, 用于验证系统对不同位置声源的定位功能。声源位置相对阵列中心分为近场和中远场, 方位为正前方, 左前方, 右前方, 正下方, 左下方, 右下方。每段语音长度为 3s 左右, 采样率为 48k, 精度为 16 比特。

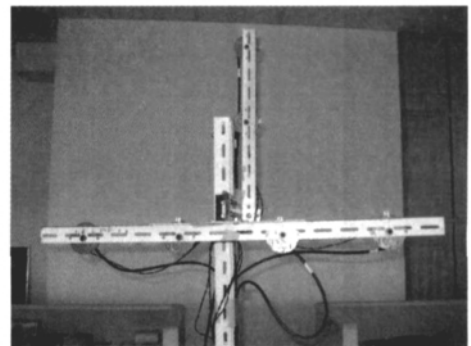


图 3 6 麦克风阵列声源定位系统

Fig.3 Six-microphone array sound source localization system

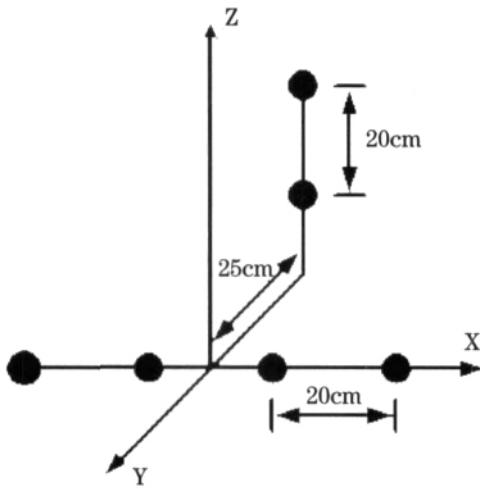


图4 麦克风阵列的具体参数及坐标系定义

Fig.4 Definition of the microphone array parameters and coordinate system

下面根据实际的定位结果,对SI算法和本文提出的SI-LMS算法的性能进行比较和分析。

表1给出了基于SI算法和SI-LMS算法的定位结果和相应的各项误差指标。为使定位结果的误差具有可比性,这里统一使用式(21)的误差度量函数。同时,如下定义方位角和方位角误差度量:

$$\Omega_s \triangleq \frac{X_s}{R_s} = \frac{X_s}{\|X_s\|}$$

$$\theta_s - \hat{\theta}_s \triangleq \frac{180}{\pi} \cos^{-1}(\hat{\Omega}_s^T \Omega_s) \quad (29)$$

表中,1~3组为近场声源,与阵列中心的距离在1m以内,4~9组为中场声源,距阵列中心2m~3m,10~12组为远场声源,距阵列中心4m以上。测量结果表明,在近场,SI和SI-LMS算法都有较好的定位精度,尤其是SI-LMS算法的定位误差均在5cm以内。在中场,SI-LMS算法也有较好的表现,定位误差基本在

表1 SI算法和SI-LMS算法声源定位结果比较

(长度单位:厘米/cm,角度单位:度/°)

Table 1 Comparison of localization results between SI method and SI SINRLMS method (length: cm, angle: degree)

分组声源定位		$\hat{x}_s - x_s$	$\hat{y}_s - y_s$	$\hat{z}_s - z_s$	$\hat{R}_s - R_s$	$\hat{\theta}_s - \theta_s$	$J_w$
第1组	SI	1.6	-0.4	-2.7	-0.1	2.2046	0.0930
(0 82 -6)	SI-LMS	1.5	0.5	-1.7	0.6	1.5465	0.0056
第2组	SI	10.0	5.3	2.5	-11.1	2.5424	0.0334
(-60 52 -6)	SI-LMS	1.4	3.2	-0.4	1.1	2.3778	0.0448
第3组	SI	4.8	-0.1	-5.3	4.1	4.0795	0.1872
(60 52 -6)	SI-LMS	4.1	2.0	-4.0	4.7	2.6076	0.0142
第4组	SI	2.2	12.9	-10.2	13.5	3.0849	0.9111
(0 172 -6)	SI-LMS	2.0	8.4	-2	8.4	0.8341	0.0824
第5组	SI	8.7	2.1	0.4	-3.0	2.3129	0.0005
(-120 172 -6)	SI-LMS	10.8	-1.1	2.2	-6.9	2.3922	0.0021
第6组	SI	20.4	8.2	-21.3	20.2	5.9886	2.2865
(120 172 -6)	SI-LMS	8.4	7.5	-5.5	11.1	1.5036	0.2425
第7组	SI	0.4	11.8	16.5	0.2	8.0869	0.5307
(0 112 -90)	SI-LMS	0.4	8.5	10.9	0.5	5.4792	0.0334
第8组	SI	-5.6	18.9	-9.7	21.3	1.7698	0.2716
(-60 112 -96)	SI-LMS	3.8	21.7	-2.4	18.5	4.1043	0.0803
第9组	SI	5.6	1.6	-4.9	6.2	1.5815	1.0871
(60 112 -91)	SI-LMS	3.3	7.7	3.7	4.8	2.8110	0.0584
第10组	SI	4.6	18.7	9.0	-18.7	1.4466	0.4920
(0 412 -6)	SI-LMS	4.9	15.7	-1.0	-15.6	0.7302	0.0680
第11组	SI	89.5	-132	14.4	-159.0	4.2127	0.3272
(-180 292 -6)	SI-LMS	5.1	11.4	4.9	7.1	1.8786	0.0973
第12组	SI	476.3	1213.4	33.9	1302	3.9714	0.5166
(-240 472 -6)	SI-LMS	48.1	-40.1	0.9	-56.9	2.9958	0.1529

在 10cm 以内。而 SI 算法的定位精度则有较明显的波动。在远场, 两种算法的定位误差均较大, 且呈现随距离增大而增大的趋势。但是, SI-LMS 算法的误差表现明显比 SI 算法要好很多; 而两者的方位误差与中近场相比没有太大变化, 且都很准确。这说明两种算法在声源定向方面具有优良表现。从所得到的结果来看, SI-LMS 算法误差度量函数的值明显比 SI 算法要小, 角度和位移偏差的幅度也比 SI 算法小, 说明 SI-LMS 算法具有在最小二乘意义下的鲁棒特性。另外, 除了定位模型固有的误差外, 麦克风阵列几何位置和采集声源位置标定的误差以及时延估计误差的引入, 都会对定位结果产生影响。

## 6 结 论

本文从系统的角度对基于到达时间差的声源定位算法进行了研究。在 CSP 的基础上提出了改进的时延估计算法; 在 SI 的基础上提出了 SI-LMS 定位算法, 解决了 SI 算法中存在的度量函数优化和收敛性问题。虽然该算法付出了迭代空间搜索的代价, 但是 SI 算法初始提供了定位解析解, 只需一步计算

完成, 实际定位的计算量仍然可以接受。实验结果表明所提出的算法具有较高的定位精度。

### 参 考 文 献

- [1] Karim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research[J]. IEEE Signal Processing Mag., 1996, 13(4): 67-94.
- [2] Brandstein M S, Silverman H F. A practical methodology for speech source localization with microphone arrays[J]. Computer, Speech and Language, 1997, 11(2): 91-126.
- [3] Knapp C H, Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans. Acoust. Sp-eech Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [4] Omologo M, Svaizer P. Acoustic event location using a crosspower-spectrum phase based technique[A]. Proc. of IEEE ICASSP[C]. Adelaide, Australia: IEEE Computer Press. 1994. 273-276.
- [5] Abel J S, Smith J O. The spherical interpolation method for closed-form passive source localization using range difference measurements[A]. Proc. of IEEE ICASSP[C]. Dallas, Texas: IEEE Computer Press. 1987. 471-474.
- [6] Smith J, Abel J. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements[J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1987, 35(12): 1661-1669.
- [7] Mendel J M. Tutorial on higher-order statistics (spectra) in signal processing and system theory: theoretical results and some applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(3): 278-305.

# 欢迎订阅 欢迎投稿

本刊编辑部地址: 上海市小木桥路 456 号 邮编: 200032

电话: (021) 64048159- 222 传真: (021) 64174105