

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003674

基于改进 MUSIC 的声源定位方法

李蜀丰¹ 徐永绍¹ 刘秉政¹ 李鹏威² 李宜鑫² 尚浩天²

(1. 中核检修有限公司深圳分公司 深圳 518116; 2. 东北电力大学自动化工程学院 吉林 132012)

摘要:为设计更有效的声源定位方法,深入研究了传统 MUSIC 算法,并针对其分辨率低且在麦克风数目较少时波达方向(direction of arrival, DOA)估计精度较差等问题,对传统 MUSIC 算法进行了优化,利用广义互相关算法估计出声源信号到达各麦克风之间的时间差,并据此构建出对应的矢量信号,最后通过计算谱函数确定 DOA 估计值。仿真和实验结果表明,优化后的 MUSIC 算法可以得到更加尖锐的指向性波束,更低的旁瓣,并且能使方位角的定位精度达到 $\pm 4^\circ$,俯仰角的定位精度达到 $\pm 5^\circ$ 。

关键词:声源定位; MUSIC 算法; 广义互相关算法; 均匀圆阵

中图分类号: TN912.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Sound source localization method based on improved MUSIC

Li Shufeng¹ Xu Yongshao¹ Liu Bingzheng¹ Li Pengwei² Li Yixin² Shang Haotian²

(1. CNNC maintenance Co., Ltd Shenzhen Branch, Shenzhen 518116, China;

2. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to solve the problem of low resolution and poor estimation accuracy of direction of arrival (DOA) when the number of microphones is small, so that designing an effective sound source localization system, this paper deeply studies and optimizes the MUSIC algorithm. The generalized cross-correlation is used to estimate the time difference between the sound source signals reaching each microphone, and building the corresponding vector signal. Finally, the DOA estimation value is determined by calculating the spectral function. The simulation and experimental results show that the optimized MUSIC algorithm can get sharper directional beam, lower sidelobe, and the positioning accuracy of azimuth angle can reach $\pm 4^\circ$ and elevation angle can reach $\pm 5^\circ$ respectively.

Keywords: sound source localization; MUSIC algorithm; generalized cross-correlation algorithm; uniform circular array

0 引言

基于麦克风阵列的声源定位技术在工业检测、智能会议室、军事探测等领域都有广泛的应用^[1-2]。声源定位的基本原理是将一组麦克风按照一定的空间几何结构排列,接收到声源信号后,用特定算法确定声源在麦克风坐标系中的方位角和俯仰角,即声源信号的波达方向(direction of arrival, DOA)^[3]。基于麦克风阵列的声源定位问题中,麦克风阵列阵型设计和声源定位算法研究一直是研究重点^[4-5]。

文献[6]以线阵作为研究对象,解决了当转向远离正常的波到达方向时会减少空间中可用带宽的问题。文

献[7]对6个传感器和3个地标及声源位置进行联合优化,提出了一种线性传感器阵列,解决了三维映射的问题。文献[8]建立了四元阵列模型,提出一种声源全方位定位算法,解决了声源方位计算所产生盲区的问题。该方法在进行声源定位时坐标和水平偏角误差率约为5%,仰角误差率约为10%。文献[9]提出了一种基于广义互相关(GCC)的声源定位方法,该方法采用相位变换(PHAT)加权,用于智能机器人平台,在一定程度上降低了系统的定位误差。文献[10]提出双五元十字阵被动声定位融合算法,提高了被动声测量的准确度并解决了声源目标空间方位模糊的问题。文献[11]提出一种基于波束形成的DU(diagonal unloading)变换方法,降低了计算的复杂度。

传统的 MUSIC 算法依赖于对阵列模型的先验知识,需要预知各阵元的确切位置,构建谱函数以寻求波峰估计 DOA 值。本文结合 MUSIC 算法理论,提出改进 MUSIC 算法,并通过仿真和硬件实验平台验证算法的可实施性。改进的 MUSIC 算法融合时延求和思想,利用广义互相关法估计出波达时间差,重构阵列的导向向量,弥补实际实验与理论中导向向量不一致造成的定位精度问题。通过对近场声源定位的仿真和实验室测试,结果表明,本改进算法具有定位精度高、稳定性强、有效抑制双峰问题等特点。

1 麦克风阵列模型

根据声源与麦克风阵列距离,信号传播模型可分为近场模型和远场模型。判断近场的公式为:

$$L \leq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

式中: L 为麦克风阵列中心与声源位置的直线距离; D 为阵列孔径; λ 为信号波长。声源位于远场时采用平面波模型要比传统近场球面波模型更加易于计算,且计算准确度较高。故本文所述方法均基于远场波模型。

通过对均匀线阵、均匀圆阵、L 型阵、十字阵和任意阵等几种常见麦克风阵列模型拓扑结构^[12]的综合对比,均匀圆阵易于排布且具有较好的定位效果,故本文采用均匀圆阵为声源定位麦克风阵列模型^[13-14]。

将 M 个完全相同的麦克风均匀分布在平面 X - Y 一个半径为 R 的圆周上,为了计算方便,在圆心处加一个参考阵元。以整个阵列模的中心位置,即参考阵元为空间坐标系原点,坐标系 X 轴为参考阵元与第一阵元之间的连线,建立图 1 所示的声源定位圆阵模型。图 1 中 $\varphi(0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ)$ 和 $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ 分别表示声源信号的方位角和俯仰角。阵列模型的半径一般选取 0.15 ~ 0.4 m,麦克风的个数为 6~20^[15]。

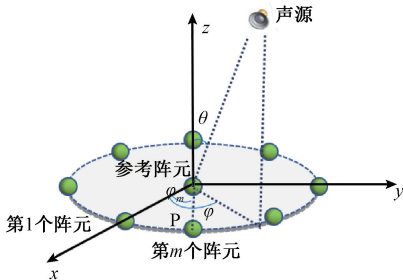


图 1 均匀圆阵模型

Fig. 1 Uniform circular array

第 m 个阵元与 X 轴之间的夹角 φ_m 表示为:

$$\varphi_m = 2\pi m/M \quad m = 0, 1, 2, \dots, M - 1 \quad (2)$$

第 m 个阵元的位置在空间坐标系中可表示为:

$$\vec{p}_m = (R\cos\varphi, R\sin\varphi, 0) \quad (3)$$

远场中入射声源的单位向量可表示为:

$$\vec{r} = (\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi, \cos\theta) \quad (4)$$

因此第 m 个阵元与参考阵元之间的延时 τ_m 可表示为:

$$\tau_m = \frac{\langle \vec{p}_m, \vec{r} \rangle}{c} = \frac{R\sin\theta\cos(\phi - \phi_m)}{c} \quad (5)$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积; c 为声速。声源的方向矩阵可表示为:

$$\mathbf{A}(\omega, \boldsymbol{\tau}) = [e^{j\omega\tau_1}, e^{j\omega\tau_2}, \dots, e^{j\omega\tau_M}]^T \quad (6)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为载频,且信号的波长可表示为 $\lambda = c/f$ 。将式(5)代入式(6)可得方向矩阵 $\mathbf{A}(\theta, \varphi)$:

$$\mathbf{A}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} e^{j2\pi r\sin\theta\cos(\varphi - \varphi_1)/\lambda} \\ e^{j2\pi r\sin\theta\cos(\varphi - \varphi_2)/\lambda} \\ \vdots \\ e^{j2\pi r\sin\theta\cos(\varphi - \varphi_M)/\lambda} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2 传统 MUSIC 算法

传统 MUSIC 算法的原理是通过麦克风接收信号得到协方差矩阵,利用子空间的正交性对协方差矩阵进行特征值或奇异值分解得到信号子空间和噪声子空间,并进行参数估计^[16]。

在实际信号处理中,定位算法通常得到的数据是在有限时间范围内的有限快拍数。在这段时间内假定声源方向不发生变化,或者空间源包络虽然发生变化,但通常认为它是平稳随机过程,其统计特性不随时间变化^[17]。这样就可以定义阵列信号 $\mathbf{X}_{M \times N}(n)$,其中 N 为数据快拍数, M 为阵元个数,采样协方差矩阵 \mathbf{R} 为:

$$\mathbf{R} = (\mathbf{X}_{M \times N}(n)\mathbf{X}_{M \times N}^H(n))/N \quad (8)$$

对协方差矩阵 \mathbf{R} 进行特征值分解,并将特征值进行升序排列。把与声源信号个数 K 相等的最大特征值和对应的特征向量 \mathbf{U}_S 张成的空间看作信号子空间,它与声源有关。把剩下的 $M-K$ 个特征值对应的特征向量 \mathbf{U}_N 张成的空间看作噪声子空间,该空间受噪声影响。因此,可将 \mathbf{R} 划分为两个空间:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_S \Sigma \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \Sigma \mathbf{U}_N^H \quad (9)$$

其中, $\mathbf{U}_S^H, \mathbf{U}_N^H$ 表示 $\mathbf{U}_S, \mathbf{U}_N$ 的共轭转置, ΣS 为 K 个较大特征值构成的对角矩阵,而 ΣN 为 $M-K$ 个较小特征值构成的对角矩阵,得到阵列空间谱函数为:

$$P_{\text{MUSIC}} = 1/(\mathbf{A}(\theta, \varphi)^H \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{A}(\theta, \varphi)) \quad (10)$$

由式(10)可知,使方位角 θ 、俯仰角 φ 变化,通过寻找波峰来估计 DOA 值。

3 改进 MUSIC 算法

由于多通道数据采集获得的声源信号为多组数字信号,直接对所得的声源信号求协方差矩阵,计算空间谱函数并进行峰值搜索时会出现双峰现象,定位系统分辨率也较低。针对以上缺陷,本文提出利用所得信号求阵列信号的方向矩阵,并构建各阵元接收对应的矢量信号,通过谱函数计算结果寻求峰值,再确定 DOA 估计值的方法。

方法。

改进 MUSIC 算法的声源定位分为两个步骤:1)时延估计,用于计算各个阵元与参考阵元之间的时间差,根据时间差构建方向矩阵;2)声源信号的 DOA 估计,首先利用阵列的方向矩阵与参考阵元输出信号求得各阵元对应的矢量信号,并以此构建阵列的协方差矩阵,再划分信号子空间与噪声子空间得出谱函数,最后求得 DOA 估计值。其流程框图如图 2 所示。

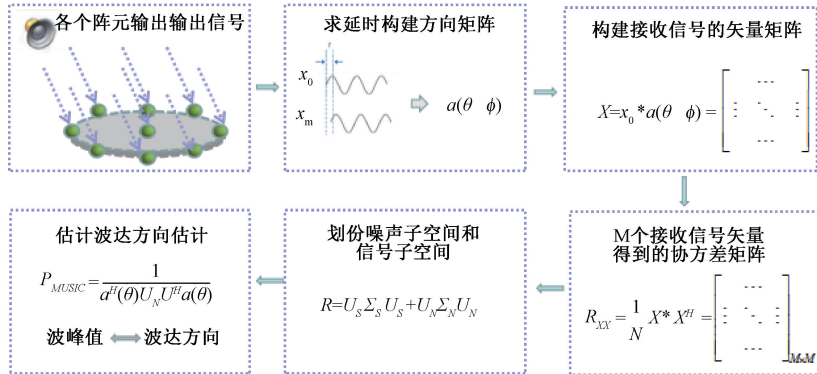


图 2 改进 MUSIC 算法的流程框图

Fig. 2 System block diagram of improved MUSIC algorithm

3.1 广义互相关方法求延时

广义互相关法是通过求两信号之间的互功率谱,并在频域内给予一定的加权来抑制噪声和反射的影响,再反变换到时域,从而得到两个信号之间的互相关函数,该互相关函数的峰值位置为两个信号之间的相对时迟^[18-19]。

假设麦克风接收的信号表达式如下:

$$x_1(n) = a_1 S(n - \tau_1) + w_1(n) \quad (11)$$

$$x_2(n) = a_2 S(n - \tau_2) + w_2(n) \quad (12)$$

式中: a_1 、 a_2 为声波从声源到麦克风之间的传播衰减系数,取值范围为 0~1; $S(n)$ 表示声源信号; $S(n - \tau)$ 表示理想状态下声源信号; τ_1 、 τ_2 分别代表声源与麦克风 1 (参考阵元) 和麦克风 2 (圆周上任意一个麦克风) 之间的传播时间; $w_1(n)$ 、 $w_2(n)$ 分别代表麦克风 1 和 2 接收信号中的高斯白噪声,且声源信号 $S(n)$ 与噪声信号 $w_1(n)$ 、 $w_2(n)$ 两者之间互不相关。

利用阵列麦克风 1 和 2 的接收信号间互相关函数求广义互相关函数,则两路信号间延时位于互相关函数峰值处^[20]。首先使用 FIR 带通滤波器滤除噪声信号,互相关函数如下:

$$R_{12}(\tau) = E \{ x_1(n) x_2(n - \tau) \} \quad (13)$$

将式(11)和(12)代入式(13)得:

$$R_{12}(\tau) = a_1 a_2 E \{ S(n - \tau_1) S(n - \tau_2 - \tau) \} +$$

$$a_1 E \{ S(n - \tau_1) w_2(n - \tau) \} + a_2 E \{ S(n - \tau_2 - \tau) w_1(n) \} + E \{ w_1(n) w_2(n - \tau) \} \quad (14)$$

式中: $w_1(n)$ 、 $w_2(n)$ 是互不相关的噪声信号,且 $S(n)$ 与 $w_1(n)$ 、 $w_2(n)$ 也互不相关。因此可将式(14)化简如下:

$$R_{12}(\tau) = a_1 a_2 E \{ S(n - \tau_1) S(n - \tau_2 - \tau) \} = a_1 a_2 R_s(\tau - (\tau_1 - \tau_2)) \quad (15)$$

利用麦克风 1 和 2 的互相关函数可以确定当 $\tau = \tau_1 - \tau_2$ 时, $R_{12}(\tau)$ 达到最大值,因此 $R_{12}(\tau)$ 的峰值处对应的 τ 值即为两个麦克风之间的时迟。在短时间内的信号处理中, $R_{12}(\tau)$ 的峰值可能不够突出,导致所求麦克风之间时迟 τ 值的精度下降。因此可用对滤波之后的信号进行加权处理来防止噪声信号以及混响等不利因素影响^[21-22]。对 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 进行快速傅里叶变换 (FFT) 可得 $X_1(\omega)$ 和 $X_2(\omega)$, 则两路输入信号广义互相关函数^[23] 为:

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{12}(\omega) X_1(\omega) X_2^*(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (16)$$

式中: $\psi_{12}(\omega)$ 是广义互相关加权函数; $X_2^*(\omega)$ 为麦克风 2 接收的声源信号 FFT 变换的共轭。选择不同的加权函数可得到不同的延时算法,常用加权函数如表 1 所示^[24]。

表 1 中, $G_{x_1 x_1}(\omega)$ 和 $G_{x_2 x_2}(\omega)$ 分别是通道 1 和 2 信号的自功率谱密度, $G_{x_1 x_2}(\omega)$ 是通道 1 和 2 信号的互功率谱密度。根据 MATLAB 仿真数据可以得出 PHAT 在噪声环境下具有良好的估计结果,故本文选择 PHAT 方法为

加权函数求时迟。

表 1 常用的广义加权函数

Table 1 Commonly used generalize weighted functions

名称	广义相关加权函数 $\psi_{12}(\omega)$
基本互相关	$\psi_{12}(\omega) = 1$
平滑相关变换 (SCOT)	$\psi_{12} = \frac{1}{\sqrt{G_{x_1 x_1}(\omega) G_{x_2 x_2}(\omega)}}$
PHAT	$\psi_{12} = \frac{1}{ G_{x_1 x_2}(\omega) }$

3.2 定位估计

麦克风参考阵元接收信号可表示为 $\mathbf{x}_0(n)$, 其余各阵元接收信号可表示为 $\mathbf{x}_1(n), \mathbf{x}_2(n), \dots, \mathbf{x}_M(n)$ 。利用上述方法分别求出各阵元与参考阵元的时迟 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M$, 接下来按照传统 MUSIC 算法的形式对接受数据协方差矩阵进行特征值分解, 并将特征值按升序排列。把与声源信号个数 K 相等的最大特征值和对应的特征向量 \mathbf{U}_S 张成的空间看作信号子空间, 它与声源有关。把剩下的 $M-K$ 个特征值对应的特征向量 \mathbf{U}_N 张成的空间看作噪声子空间, 该空间受噪声影响, 则有:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_S \Sigma_S \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \Sigma_N \mathbf{U}_N^H \quad (17)$$

扫描 $\theta (0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ 和 $\varphi (0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ)$ 求得谱函数值:

$$P_{\text{MUSIC}} = 1 / (\mathbf{A}(\theta, \varphi)^H \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{A}(\theta, \varphi)) \quad (18)$$

满足峰值 P_{max} 条件所对应的 θ 和 φ 值即为声源的在空间坐标系中的俯仰角和方位角。

4 声源定位方法仿真

4.1 窄带信号仿真

假设均匀圆阵半径为 $r=0.15 \text{ m}$, 阵元个数为 $M=9$, 快拍数 $N=1024$, 采样频率为 $f_s=5000$, 信噪比为 20 dB, 声源信号为 $S(t) = \sin 2\pi ft$, 信号频率为 $f=2000 \text{ Hz}$, 信号源数为 $P=1$, 声源的空间坐标为 $(1.24 \text{ m}, 3.41 \text{ m}, 7.1 \text{ m})$, 方位角和仰角分别为 $\varphi=70^\circ, \theta=27^\circ$, 模拟构建参考阵元输出的信号 $\mathbf{x}_0(n)$, 其余各阵元输出的信号为 $\mathbf{x}_1(n), \mathbf{x}_2(n), \dots, \mathbf{x}_8(n)$, 由式 (17) 求得协方差矩阵并进行特征值分解构建信号子空间和噪声子空间, 由式 (18) 求得空间坐标系中的俯仰角 θ 和方位角 φ , 其仿真结果如图 3 所示, 不同方位的 DOA 估计结果如表 2 所示。本文表示误差均为绝对误差, 即标定入射角与算法测试结果之间差值的绝对值。表中标定入射角、MUSIC 算法测量结果及优化后的 MUSIC 算法的俯仰角和方位角分别用 $(\varphi_1, \theta_1), (\varphi_2, \theta_2)$ 及 (φ_3, θ_3) 表示, MUSIC 算法的测量

误差及优化后 MUSIC 算法的测量误差分别用 $(\Delta\varphi_1, \Delta\theta_1)$ 及 $(\Delta\varphi_2, \Delta\theta_2)$ 表示。

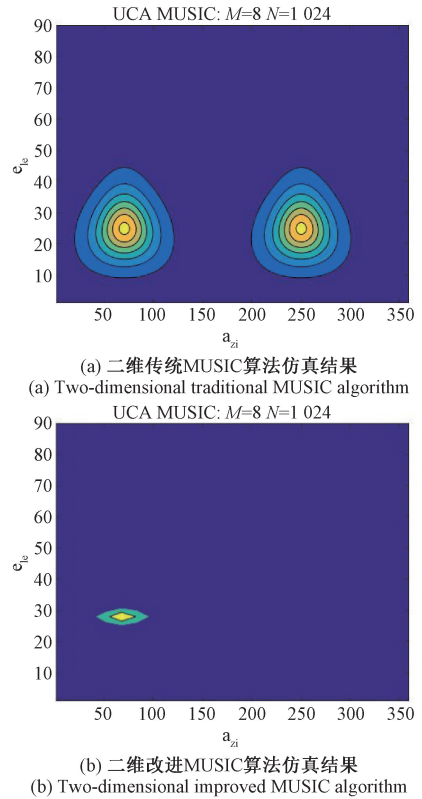


图 3 方位角为 $\varphi=70^\circ$, 仰角为 $\theta=27^\circ$ 的仿真结果
Fig. 3 Simulation results with azimuth angle $\varphi=70^\circ$ and pitch angle $\theta=27^\circ$

4.2 宽带信号仿真

假设均匀圆阵的半径为 $r=0.15 \text{ m}$, 阵元个数为 $M=9$, 快拍数 $N=1024$, 采样频率为 $f_s=5000$, 在信噪比为 20 dB, 信号频率为 $f=1000 \sim 2000 \text{ Hz}$, 生成线性调频信号作为声源信号, 信号源数为 $P=1$, 声源的空间坐标为 $(-2.8 \text{ m}, 6.7 \text{ m}, 5.7 \text{ m})$, 方位角和仰角分别为 $\varphi=113^\circ, \theta=24^\circ$, 模拟构建参考阵元输出的信号 $x_0(n)$, 其余各阵元输出的信号为 $x_1(n), x_2(n), \dots, x_8(n)$, 由式 (18) 求得空间坐标系中的俯仰角 θ 和方位角 φ , 其仿真结果如图 4 所示, 不同方位的 DOA 估计结果误差对比如表 3 所示。

通过数据仿真结果可知, 使用传统的二维 MUSIC 谱估计算法时会出现对称双峰现象。且抑制旁瓣效果极差, 定位结果出现虚源, 同时在极端位置无法得到较好的测量结果, 主要原因是阵元数目较少。改进后的 MUSIC 算法, 首先在波达方向的仰角范围 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内可以有效识别出真实的仰角, 并且在所有位置上计算绝对误差均小于传统 MUSIC 算法的绝对误差, 提高了定位精度, 同时也有效的解决了双峰问题。

表 2 不同方位的 DOA 仿真结果

Table 2 DOA simulation results in different directions

(°)

标定入射角 (φ_1, θ_1)	MUSIC 算法测 量结果(φ_2, θ_2)	MUSIC 算法测量 误差 ($\Delta\varphi_1, \Delta\theta_1$)	优化算法测量结果 (φ_3, θ_3)	优化算法测量误差 ($\Delta\varphi_2, \Delta\theta_2$)
(45.00, 20.81)	(45, 24)	(0.00, 3.82)	(45, 21)	(0.00, 0.19)
(70.34, 26.62)	(70, 25)	(0.34, 0.38)	(70, 27)	(0.34, 0.38)
(133.01, 48.95)	(133, 49)	(0.01, 0.05)	(135, 49)	(0.01, 0.05)
(170.01, 59.97)	(170, 53)	(0, 6.97)	(170, 60)	(0, 0.03)
(225.56, 69.41)	(226, 90)	(0.44, 20.59)	(226, 72)	(0.44, 2.59)
(272.87, 77.89)	(273, 90)	(0.13, 12.11)	(273, 83)	(0.13, 5.11)
(335.87, 86.56)	(336, 90)	(0.13, 3.44)	(336, 90)	(0.13, 3.44)

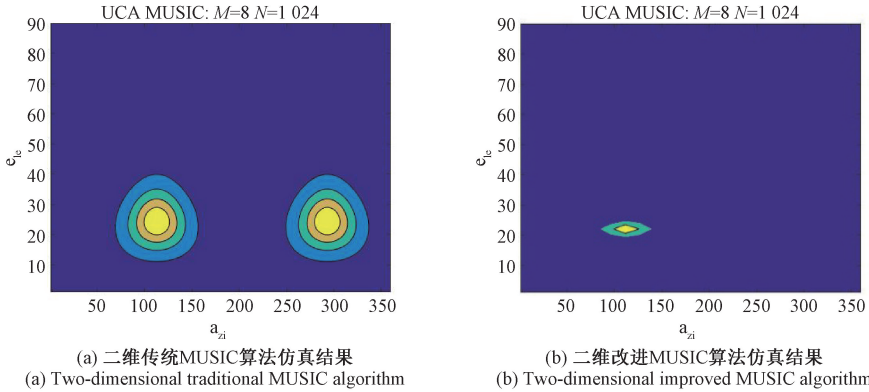


图 4 方位角为 $\varphi = 113^\circ$, 仰角为 $\theta = 22^\circ$ 的仿真结果

Fig. 4 Simulation results with azimuth angle $\varphi = 113^\circ$ and pitch angle $\theta = 24^\circ$

表 3 不同方位的 DOA 仿真结果

Table 3 DOA simulation results in different directions

(°)

标定入射角 (φ_1, θ_1)	MUSIC 算法测量结果 (φ_2, θ_2)	MUSIC 算法测量误差 ($\Delta\varphi_1, \Delta\theta_1$)	优化算法测量结果 (φ_3, θ_3)	优化算法测量误差 ($\Delta\varphi_2, \Delta\theta_2$)
(45.00, 20.81)	(45, 23)	(0, 2.9)	(45, 21)	(0, 0.19)
(70.34, 26.62)	(70, 25)	(0.34, 1.62)	(70, 27)	(0.34, 0.38)
(133.01, 48.95)	(133, 49)	(0.01, 0.05)	(133, 49)	(0.01, 0.05)
(170.01, 59.97)	(170, 51)	(0.01, 8.97)	(171, 61)	(0.01, 1.03)
(225.56, 69.41)	(225, 90)	(0.56, 20.59)	(225, 72)	(0, 2.59)
(272.87, 77.89)	(273, 90)	(0.13, 12.11)	(273, 83)	(0.13, 5.11)
(335.87, 86.56)	(336, 90)	(0.13, 3.44)	(336, 90)	(0.13, 3.44)

通过对优化前和优化后 MUSIC 算法的仿真云图对比发现,优化后 MUSIC 算法谱峰更加陡峭,表明 DOA 估计的分辨力得到进一步提升。从均匀圆形阵列的建模仿真数据对比分析可知,优化后 MUSIC 算法的 DOA 估计精度得到了很大的提高。

构成(PCI-6221)。数据采集卡采样频率为 250 KS/s,采样精度可达到 16 位。

5 实验验证

5.1 实验系统

实验系统由阵列结构与数据采集装置组成。阵列结构选取 9 个 MAX9814 型的驻极体咪头麦克风和半径为 15 cm 的均匀圆阵搭建声源定位系统,如图 5 所示。数据采集装置由计算机、LabVIEW 上位机程序、数据采集卡

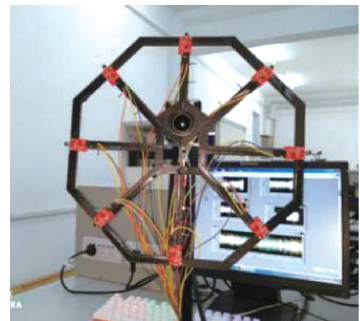


图 5 基于麦克风阵列的声源源定位的系统

Fig. 5 Source localization system based on microphone array

5.2 实验测试

为了验证改进 MUSIC 算法在声源定位应用中的有效性,利用实验系统对 2 kHz 的单频信号进行一系列的声源定位测试实验,扬声器放置在声源定位系统前方 3.5 m 处。声源的方位角和仰角分别为 $\varphi=45^\circ$ 、 $\theta=12^\circ$ 的实验测量结果如图 6 所示,声源的方位角和仰角分别为 $\varphi=184^\circ$ 、 $\theta=48^\circ$ 实验测量的结果如图 7 所示,单频信号的全部方位的 DOA 估计如表 4 所示。

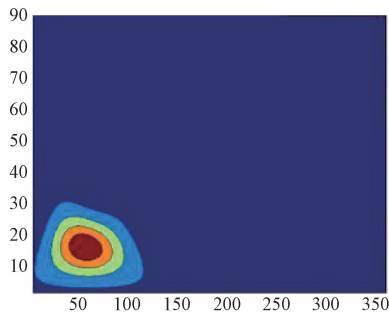


图 6 方位角为 $\varphi=45^\circ$ 、仰角为 $\theta=12^\circ$ 的实验测量结果
Fig. 6 Experimental measurement results with the azimuth angle $\varphi=45^\circ$ and pitch angle $\theta=12^\circ$

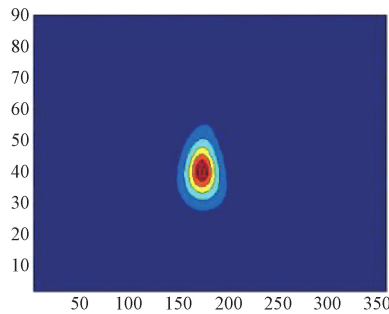


图 7 方位角为 $\varphi=184^\circ$ 、仰角为 $\theta=45^\circ$ 的实验测量结果
Fig. 7 Experimental measurement results with the azimuth angle $\varphi=184^\circ$ and pitch angle $\theta=45^\circ$

表 4 单频信号的不同方位的 DOA 估计

Table 4 DOA estimates based on single-frequency signals in various directions (°)

标定角度 (φ_1, θ_1)	优化算法的测量结果 (φ_3, θ_3)	优化算法的测量误差 ($\Delta\varphi_2, \Delta\theta_2$)
(47.05, 18.14)	(49, 17)	(1.95, 2.14)
(74.34, 26.62)	(72, 28)	(2.34, 1.34)
(129.27, 45.81)	(132, 43)	(2.73, 2.81)
(175.24, 55.61)	(177, 58)	(1.76, 2.39)
(231.47, 67.43)	(229, 65)	(2.47, 2.43)
(272.36, 76.92)	(276, 75)	(3.64, 1.92)
(328.47, 85.58)	(331, 90)	(2.53, 4.42)

5.3 实验分析

根据实验测量数据可知,信号波达方向在两个极端

位置($0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ 和 $80^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) 时所测量结果的误差比较大,主要误差在于声源的仰角,误差在 5° 左右,仰角在 $32^\circ \leq \theta \leq 72^\circ$ 范围内时,仰角测量结果比较稳定,误差在 2° 左右。声源波方位角的误差较为稳定,最大误差为 4° ,在方位角为 180° 左右时,误差较小。根据定位系统的测量结果可知,改进的 MUSIC 算法可以有效的解决双峰问题,同时提高了系统的稳定性,使测量结果更加准确。

6 结 论

本文介绍了改进 MUSIC 算法的声源定位方法,重点阐述了改进的 MUSIC 估计算法的重要步骤和优化方法,利用各个阵元与参考阵元之间的时迟求得对应矢量信号并进行 DOA 估计。在不同入射角条件下,对优化前和优化后的算法性能进行对比分析,可以看出,改进的 MUSIC 算法效果。算法不仅可以有效的解决对称双峰问题,并且能够得到更加尖锐的波束,抑制旁瓣,使在阵元数目较少的情况下也可以得到较为精确的测量结果。

系统仿真和实际数据测量实验表明,均匀圆阵的方位角测量范围为 $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$, 仰角的测量范围为 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 。使用改进后的 MUSIC 算法实现了基于麦克风阵列的声源定位的稳定性和实时性,提高了系统的定位精度。

参考文献

[1] PAVLIDI D, GRIFFIN A, PUIGT M. Real-time multiple sound source localization and counting using a circular microphone array [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2013, 21(10) : 2193-2206.

[2] FAYAD Y, WANG C, CAO Q. Temporal-spatial subspaces modern combination method for 2D-DOA estimation in MIMO radar [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(4) : 697-702.

[3] ALI R L, KHAN S A, ALI A. A robust least mean square algorithm for adaptive array signal processing [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 68 (4) : 1449-1461.

[4] SILVA B D, AN B, STEENHAUT K, et al. Design considerations when accelerating an FPGA-based digital microphone array for sound-source localization [J]. Journal of Sensors, 2017(4) : 1-20.

[5] 温俊杰,杨殿阁,苗丰,等.声场可视化系统中声像阵列空间关系标定研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6) : 1540-1546.

WEN J J, YANG D G, MIAO F, et al. Research on spatial relationship calibration technique for microphone array and camera in sound field visualization system [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1540-1546.
- [6] FLANAGAN J L. Bandwidth design for speech-seeking microphone arrays [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985: 732-735.
- [7] SU D, VIDAL-CALLEJA T, MIRO J V. Towards real-time 3D sound sources mapping with linear microphone arrays [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017: 1662-1668.
- [8] 行鸿彦, 杨旭, 张金玉. 基于四元传声器阵列的声源全方位定位算法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 43-50.
XING H Y, YANG X, ZHANG J Y. Sound source omnidirectional location algorithm based on four-element microphone array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 43-50.
- [9] KIM U H, NAKADAI K, OKUNO H G. Improved sound source localization and front-back disambiguation for humanoid robots with two ears [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 7906: 282-291.
- [10] 路敬祎, 叶东, 陈刚, 等. 双五元十字阵被动声定位融合算法及性能分析 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 827-833.
LU J Y, YE D, CHEN G, et al. Passive acoustic localization fusion algorithm and performance analysis of double five element cross array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 827-833.
- [11] SALVATI D, DRIOLI C, FORESTI G L. A low complexity robust beamforming using diagonal unloading for acoustic source localization [J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2018, 26(3): 609-622.
- [12] 班琦. 基于麦克风阵列的远场声源目标定位技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017.
BAN Q. Research on the far source target localization based on microphone array technology [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2017.
- [13] 刘哲, 陈日林, 罗伦楷, 等. 探测距离对声源定位精度的影响 [C]. 全国会员代表大会暨学术会议, 2010: 414-415.
LIU ZH, CHEN R L, LUO K L, et al. Research of how the variation of detection distance will affect the accuracy of location [C]. National Congress and Academic Conference of Acoustic Society of China, 2010: 414-415.
- [14] 郑进吉. 基于麦克风阵列的声源定位系统设计与研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
ZHENG J J. Design and research of sound source location system based on microphone array [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2018.
- [15] 郭剑锋. 基于 MEMS 数字麦克风阵列的声源定位系统 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
GUO J F. Research on sound source location system based on MEMS digital microphone array [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [16] LUO Z, LIU W, WANG Z, et al. Monitoring of laser welding using source localization and tracking processing by microphone array [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1-4): 21-28.
- [17] 齐添添, 陈尧, 李昕, 等. 基于时间反转的玻璃钢复合板材声发射源定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 1580-1585.
QI T T, CHEN X, LI X, et al. Singular value decomposition beamforming method for sound source identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 1580-1585.
- [18] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation method for estimation of time delay [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [19] MATOUSEK Z, BABJAK M, OCHODNICKY J. Correlation-based TDOA algorithm for the target localization at low signal to noise ratio [C]. International Conference on New Trends in Signal Processing, 2016: 65-69.
- [20] ZHE D, MING Y. Research on TDOA based microphone array acoustic localization [C]. 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2015: 1077-1081.
- [21] 梁音, 张华, 陈利民, 等. 基于 GCC-PHAT 的改进近场声源定位算法 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 2016, 40(6): 557-562.
LIANG Y, ZHANG H, CHEN L M, et al. Improved acoustic source localization algorithm based on GCC-PHAT in near-field situation [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2016, 40(6): 557-562.
- [22] 窦慧晶, 王千龙, 张雪. 基于二次相关的广义互相关时差估计算法 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(2): 197-202.
DOU H J, WANG Q L, ZHANG X. Generalized cross-correlation algorithm based on secondary relation [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(2): 197-202.
- [23] 姚欢, 朱梦尧, 朱晓强. 基于时延估计的麦克风阵列一致性分析 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2017, 56(2):

175-181.

YAO H, ZHU M Y, ZHU X Q. Analysis on microphone array consistency based on time delay [J]. Journal of Fudan University(Natural Science), 2017, 56(2): 175-181.

- [24] DUFF A L, HAMDI S E, PLANTIER G, et al. Time delay estimation for acoustic source location by means of short-time cross-correlation [C]. Proceedings of IEEE Sensors, 2011: 1885-1888.

作者简介



李蜀丰, 2007 年于南华大学获得学士学位, 现为中核检修有限公司深圳分公司技术部经理, 主要研究方向为核电厂仪表新型设备应用。

Email: shufeng_li@163.com

Li Shufeng received his B. Sc. degree in

2007 from University of South China. Now he is the manager of Technology Department of Shenzhen Branch of China Nuclear Power Maintenance Co., Ltd. His main research interest includes application of new instrument equipment in nuclear power plant.



刘秉政, 2017 年于东北电力大学大学获得学士学位, 现工作于中核检修有限公司深圳分公司技术部, 主要研究方向为核电厂仪表新型设备应用。

E-mail: bingzheng_liu@163.com

Liu Bingzheng received his B. Sc. degree in 2017 from Northeast Electric Power University. Now he is working in Technology Department of Shenzhen Branch of China Nuclear Power Maintenance Co., Ltd. His main research interest includes application of new instrument equipment in nuclear power plant.