

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.06.016

面向声源定位的改进广义互相关时延估计方法

屈顺彪^{1,3}, 俞华², 芦竹茂², 申冲^{1,4}, 韩钰², 王晨光^{1,3}

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001;

3. 中北大学信息与通信工程学院, 太原 030051; 4. 中北大学仪器与电子学院, 太原 030051)

摘要:面向以数字微机电系统(MEMS)麦克风作为声传感器的声源定位阵列,完成了前端麦克风阵列的电路设计和以现场可编程逻辑门阵列(FPGA)为核心的数据采集系统的开发,并对麦克风输出的脉冲密度调制信号进行了降采样处理。针对传统的广义互相关算法在低信噪比下时延估计误差较大的问题,提出了一种改进PHAT加权函数的方法。在同等条件下对基于不同加权函数的广义互相关算法进行了MATLAB仿真验证,实验结果表明,在低信噪比条件下该方法相较于传统的广义互相关算法,时延估计误差更小且抗噪性能更强。

关键词:MEMS 麦克风;FPGA;广义互相关算法;时延估计;加权函数

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2021)06-0118-07

Improved Generalized Cross-Correlation Time Delay Estimation Method for Sound Source Localization

QU Shun-biao^{1,3}, YU Hua², LU Zhu-mao², SHEN Chong^{1,4}, HAN Yu², WANG Chen-guang^{1,3}

1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of China, North University of

China, Taiyuan 030051, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;

3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. School of Instrument and Electronic, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For the sound source localization array with digital MEMS microphone as the acoustic sensor, the circuit design of the front-end microphone array and the development of the data acquisition system with FPGA as the core are completed, and the down-sampling processing of the pulse density modulation signal output by the microphone is completed. Aiming at the problem that the traditional generalized cross-correlation algorithm has a large time delay estimation error under low signal-to-noise ratio, a method to improve the PHAT weighting function is proposed. Under the same conditions, the generalized cross-correlation algorithm based on different weighting functions is verified by MATLAB simulation. The experimental results show that compared with the traditional generalized cross-correlation algorithm, this method has smaller time delay estimation error and stronger anti-noise performance under low signal-to-noise ratio conditions.

Key words: MEMS microphone; FPGA; Generalized cross-correlation algorithm; Delay estimation; Weighting function

收稿日期: 2021-06-16; 修订日期: 2021-07-11

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(52053018000T)

作者简介: 屈顺彪(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事信号与信息处理方面的研究。

通信作者: 王晨光(1981-), 男, 副教授, 主要从事通信工程、光电信息处理与导航应用、物联网无线通信技术等方面的研究。

0 引言

随着现代信号处理技术的发展,当前基于麦克风阵列的声源定位方法采用麦克风阵列拾取声源信号,再经过一系列语音处理手段完成声源的定位操作,在无人机定位和工业设备故障监测方面都有着广泛的用途。因此,该技术越来越受到国内外相关企业、科研院所及高校的关注。文献[1]中提出了一种基于相位变换的广义互相关函数的声源定位算法。该算法采用 7 个麦克风接收声源信号,并对接收到的信号进行滤波、加窗、谱减和倒谱等预处理,得到纯语音信号,通过计算纯语音信号的广义互相关函数的相位变换,从而得到接收信号的时延估计值,再利用到达时间差算法和坐标旋转数字计算机算法计算方位角、俯仰角和距离以确定声源方位。文献[2]中提出了一种广义交叉功率谱算法来滤除卷积干扰,通过对采样信号进行白化处理,并根据信噪比变化调整交叉功率谱算法的加权值以提高抗噪和抗卷积性能,与传统的广义互功率谱算法相比,能够克服混响和噪声的卷积干扰,锐化峰值,从而准确估计出信号的时延。

当前基于麦克风阵列的声源定位主要通过三类算法模型实现,分别是高分辨率谱估计方法^[3]、可控波束形成方法^[4]和基于到达时间差的时延估计方法^[5]。其中高分辨率谱估计方法通过计算各个阵元的相关矩阵,获取不同参数下的子空间,进而求取声源的方位信息;可控波束形成方法通过对采集的信号计算加权和得到波束,然后改变麦克风阵列接收信号的方向并计算信号的功率,不断搜索得到输出功率最大的波束方向,该方向即为所求的声源方位;基于到达时间差的时延估计方法主要分为两步实现,首先是估算同一声源到达阵列中不同麦克风之间的时间差,其次再根据该差值求解声源

到达各个麦克风之间的距离,最后再利用求解几何的方法确定声源的方位^[6-8]。相较于前两种方法,该方法计算量较小,实时性较高,在麦克风声源定位系统中被广泛采用。

在传统的麦克风声源定位系统中大多采用模拟麦克风作为声传感器,为保证信号的稳定可靠,需要设计复杂的信号调理电路^[7],以完成信号的滤波及放大等预处理,这都将增加系统的复杂度。因此本文采用数字微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)麦克风作为声传感器,由于该型传感器直接输出数字量的脉冲密度调制(Pulse Density Modulation, PDM)信号,因此具有很强的抗干扰性,且不需要再设计外围信号调理电路。对于时延估计过程中环境噪声干扰导致时延估计误差增大的问题,本文在传统的广义互相关方法的基础上,通过改进 PHAT 加权函数进一步提高其抗噪能力,从而提高时延估计的精度,最后再通过实验验证了该方法的可靠性^[9-10]。

1 麦克风阵列定位系统设计

1.1 麦克风阵列电路的设计

本设计中采用钰太科技推出的型号为 ZTS6032 的数字 MEMS 麦克风,该型传感器输出数据为 1bit 的 PDM 信号,具有很强的抗干扰能力,工作电压范围为 2.4~3.3V,工作电流为 500 μ A,其麦克风阵列的电路设计如图 1 所示。将现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的 IO 端口分别和麦克风的时钟引脚以及数据引脚相连, FPGA 提供给 4 路麦克风正常工作所需要的 4 路同步时钟信号,保证输出的 PDM 数据和输入的时钟信号同步, FPGA 将采集到的 4 路麦克风数据在先进先出(First Input First Output, FIFO)模块中进行简单的处理后,等待写入 DDR3 SDRAM 中缓存。

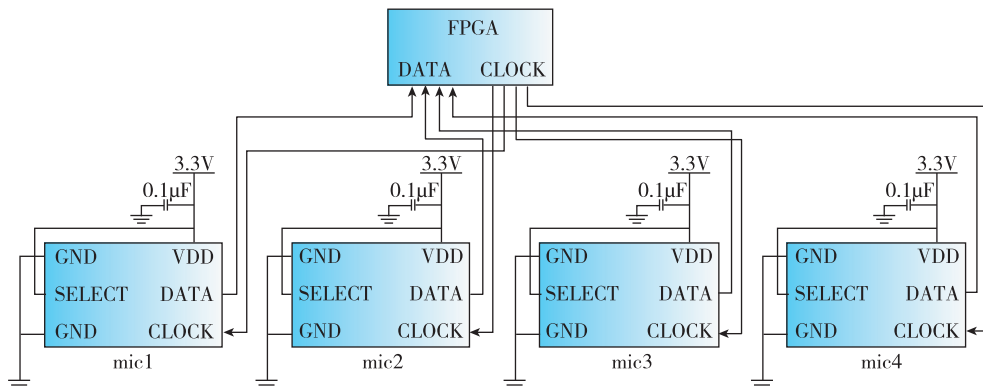


图 1 麦克风阵列电路工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microphone array circuit

1.2 麦克风数据采集系统的设计

在电路工作过程中, FPGA 同步控制 4 路 MEMS 麦克风进行声源信号的同步采集, 设置一帧信号的采集时长为 10s, 即一帧数据的数据量为 2.86MB。采集的大量数据先经由 FPGA 进行缓存处理, 由于 MEMS 数字麦克风的工作时钟和 DDR3

SDRAM 的工作时钟不一致, 因此分别设置 2 个 FIFO 用作数据的中间缓冲。FIFO 的数据位宽设置为 128bit, 深度为 512, 将每个麦克风输出的 1bit PDM 数据联合组成一个 16 字节的数据, 再通过写 FIFO 模块写入 DDR3 SDRAM 中缓存等待以太网的发送, 数据采集系统的整体架构如图 2 所示。

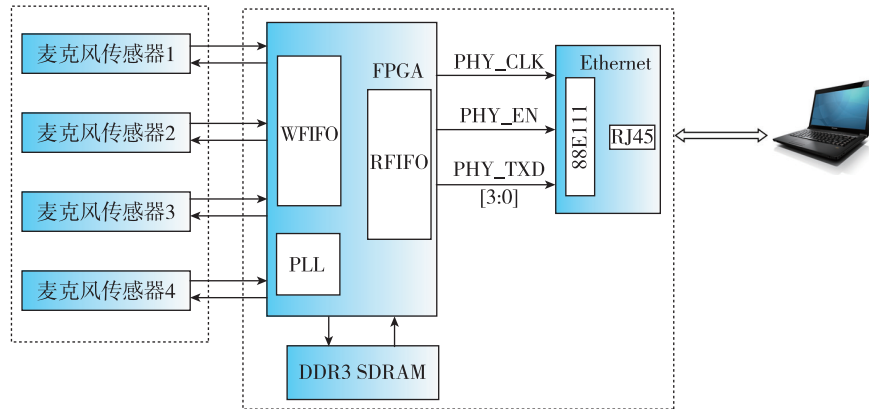


图 2 多通道麦克风阵列数据采集系统

Fig. 2 Multi-channel microphone array data acquisition system

使用 Xilinx 的 Vivado 软件开发平台自带的内部逻辑分析仪可实时抓取到 FPGA 同步采集的 4 路麦克风输出的 PDM 数据, 其结果如图 3 所示。

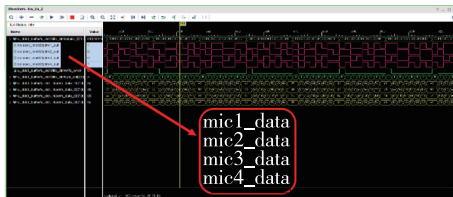


图 3 同步采集 4 路麦克风输出的 PDM 数据

Fig. 3 Simultaneous collection of PDM data from four microphones

2 麦克风输出的 PDM 信号解码

2.1 CIC 抽取滤波器的设计

ZTS6032 型数字 MEMS 麦克风输出信号采用 PDM 信号编码, 传感器输出信号的幅值由多个脉冲的平均值决定。由于输出的 PDM 信号采用过采样技术, 因此在数据解码过程中首先需要降低信号的采样频率以降低硬件系统的功耗, 这里选择使用 Q 级 CIC(Cascade Integrator Comb)滤波器级联的方式降低系统的采样频率。CIC 滤波器由积分器和微分器共同组成, 积分器是单极点的 IIR(Infinite Im-

pulse Response)滤波器, 微分器是对称的 FIR(Finite Impulse Response)滤波器, 其各自的传递函数和 CIC 滤波器的传递函数分别为式(1)和式(2)

$$H_1 = \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} \right)^Q, H_c = (1 - z^{-D})^Q \quad (1)$$

$$|H(z)| = H_1(z)^Q H_c(z)^Q \quad (2)$$

将 $z = e^{j\omega}$ 代入系统函数 $H(z)$, 最终可得

$$|H(e^{j\omega})| = \left| \frac{\sin(\omega D/2)}{\sin(\omega/2)} \right|^Q \quad (3)$$

其中, D 为降采样倍数, Q 为滤波器级联级数, CIC 滤波器的系统函数由 D 和 Q 唯一确定。图 4 所示为 CIC 滤波器的幅频响应曲线, 抽取倍数 D 越大, 通带内降幅越大, 第一旁瓣抑制比随着 Q 的增大而增加, Q 级 CIC 滤波器级联的旁瓣抑制比为 $13.46Q$, 该参数直接关系到后续的抽取是否会发生频谱混叠现象。

由图 4 可知, 随着滤波器级联级数的增加, 阻带衰减增大, 当滤波器的级联级数为 5 时, 阻带最小衰减能达到 67.3dB, 基本能满足实际的应用需求。

2.2 CIC 补偿滤波器的设计

由 CIC 滤波器的特性可知, 增加滤波器的级联级数虽然能够增大阻带衰减, 但是同时也会带来通带衰减。当信号通带频率为 2kHz, 以 2.4MHz 作

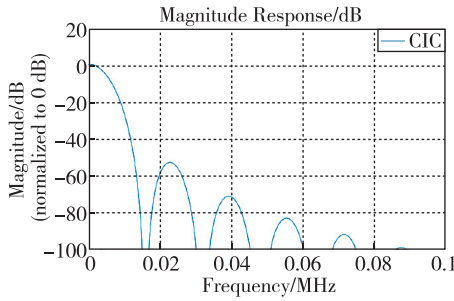


图 4 CIC 幅频图

Fig. 4 CIC amplitude frequency diagram

为信号的采样频率,采用 5 级 CIC 滤波器级联以 150 倍抽取时,CIC 滤波器的频率响应如图 5 所示。在通带内信号幅值有将近 3.57dB 的衰减,当信号通过时会出现比较严重失真的情况,因此需要设计一个补偿滤波器以改善 CIC 滤波器的通带衰减问题,CIC 补偿滤波器的幅频响应曲线如图 5 所示。

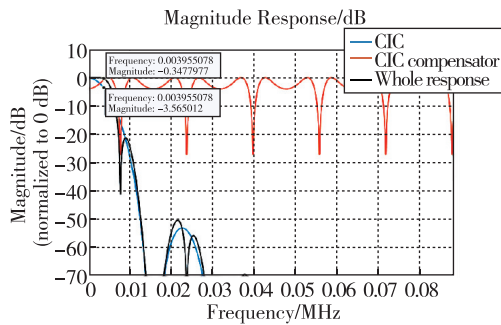


图 5 CIC 补偿滤波器的幅频响应

Fig. 5 Amplitude frequency response of CIC compensation filter

由图 5CIC 补偿滤波器的幅频响应曲线可知,经过 CIC 的补偿之后,通带内的幅值衰减下降到 0.35dB,因此该滤波器能达到补偿 CIC 滤波器通带内幅值衰减的目的。

3 声源定位模型的建立

3.1 麦克风阵列结构的设计

麦克风阵列的设计对声源信号的成功定位起着关键作用,在对空间信号进行定位时至少需要 4 个麦克风传感器放在不同的方位。理论上声传感器越多能获得的定位结果越精确,但同时也会带来阵列冗余和计算量加大的问题,对时延估值造成一定的影响。因此,本文综合考虑各方面因素,选择基于四元麦克风阵列的声源定位模型。

以 O 为原点建立如图 6 所示的空间坐标系,声

源 S 到原点 O 的距离为 l ,其在平面的投影与 X 正半轴的夹角为 φ ,与 Z 正半轴的夹角为 θ ,声传感器依次放置在图 6 所示的位置,其中 $S_1(d,0,0)$, $S_2(0,d,0)$, $S_3(-d,0,0)$, $S_4(0,-d,0)$ 分别表示 4 个声传感器的坐标位置。在近场模式下声信号以球面波的形式传播,以 τ_{ij} 表示声源到传感器 S_i 与 S_j 之间的时间延迟, v 表示声音在空气中的传播速度,声源 S 到达各个传感器的距离分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 。

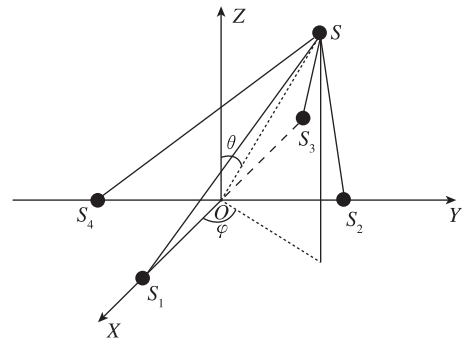


图 6 麦克风阵列原理图

Fig. 6 Schematic diagram of microphone array

根据以上条件可得

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + z^2 &= l^2 \\ (x - d)^2 + y^2 + z^2 &= l_1^2 \\ x^2 + (y - d)^2 + z^2 &= l_2^2 \\ (x + d)^2 + y^2 + z^2 &= l_3^2 \\ x^2 + (y + d)^2 + z^2 &= l_4^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} l_2 - l_1 &= v\tau_{21} \\ l_3 - l_1 &= v\tau_{31} \\ l_4 - l_1 &= v\tau_{41} \end{aligned} \quad (5)$$

再将直角坐标系转化为球面坐标系可得

$$\begin{aligned} x &= r \sin\theta \cos\varphi \\ y &= r \sin\theta \sin\varphi \\ z &= r \cos\theta \end{aligned} \quad (6)$$

联立以上方程组化简可得

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \frac{\tau_{41} - \tau_{21}}{\tau_{31}} \\ \theta &= \arcsin \frac{v \sqrt{\tau_{31}^2 + (\tau_{41} - \tau_{21})^2}}{2d} \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(4)、式(5)、式(6)和式(7)即可求得声源到达各个传感器之间的时延值和其方位角与俯仰角,从而确定声源的方位^[11-13]。

3.2 广义互相关时延估计算法

在麦克风阵列的声源定位系统中,采用基本互相关算法进行时延估计时,由于环境中噪声的影响导致所求得的互相关函数峰值难以和噪声等干扰形成的伪峰值明显区分开,进而影响到时延估计和方位估计的精度。为了抑制噪声提高信噪比^[14],在基本互相关算法的基础上采用频域加权的方式对信号的互功率谱进行处理,锐化信号的峰值。将处理后的信号通过傅里叶逆变换到到域,进一步求解信号到达相邻2个麦克风的时延值,基于加权函数的广义互相关函数 $R_{x_1x_2}(\tau)$ 表达式为

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_0^{\pi} \psi(\omega) G_{x_1x_2}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (8)$$

其中, $\psi(\omega)$ 为加权函数; $G_{x_1x_2}(\omega)$ 为信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互功率谱; 当互相关函数 $R_{x_1x_2}(\tau)$ 取得最大值时所对应的 τ 值即为所求的时延估计值。在不同的环境下选择不同的加权函数对整个系统有着不同的影响,通过选择合适的加权函数可以极大地增强系统抗环境干扰的能力,从而提高时延估计精度。传统的加权函数有 ROTH 加权函数、SCOT 加权函数和 PHAT 加权函数^[15], PHAT 加权函数的表达式为

$$PHAT = \frac{1}{|G_{x_1x_2}(\omega)|} \quad (9)$$

3.3 改进后的广义互相关时延估计算法

在低信噪比时,基于 PHAT 的加权函数在同等条件下相较于前两者有着更好的表现,但是随着信噪比的降低,其时延估计精度也随之下落,因此在实际应用中如何提高时延估计精度是当前基于麦克风阵列声源定位系统研究的重点。本文充分考虑在 PHAT 加权函数的基础上进一步优化,提出了一种改进的 PHAT 加权函数,通过给 PHAT 加权函数增加权重的方式提高其在低信噪比条件下抑制伪峰值的能力,降低噪声对时延估值的影响。将改进后的 PHAT 加权函数定义为 PHAT- σ 加权函数,其表达式为

$$\psi_{PHAT-\sigma}(\omega) = \frac{1}{|G_{x_1x_2}(\omega)|^\sigma} \quad (0 < \sigma < 1) \quad (10)$$

加权因子 σ 的取值通过在不同信噪比条件下多次实验估计出最优值,根据经验选择合适的加权因子 σ 以降低 PHAT 加权函数在低信噪比下的时延估计误差和提升抗噪能力,从而达到锐化信号峰值和提高时延估计准确性的目的。改进后的广义

互相关函数表达式为

$$R_{x_1x_2PHAT-\sigma}(\tau) = \int_0^{\pi} \psi_{PHAT-\sigma}(\omega) G_{x_1x_2}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (11)$$

4 仿真与实验验证

采用 2kHz 的余弦信号模拟声源信号,在信噪比为 -5dB 的条件下采用两种不同加权函数的广义互相关算法进行时延估计,其结果如图 7 所示。通过比较两图可以发现,在低信噪比情况下直接使用 PHAT 加权函数计算的信号互功率谱伪峰值较为严重,极值不太明显;而采用改进后的 PHAT- σ 加权函数处理后的信号互功率谱伪峰值得到了明显的抑制,其抗噪性能更强。

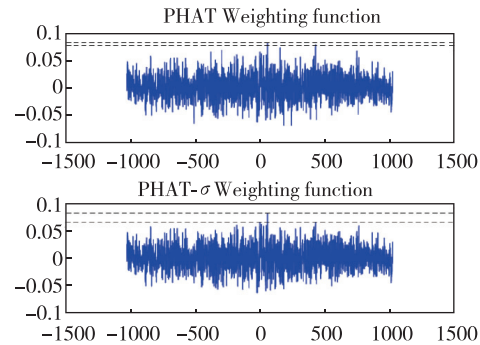


图7 不同加权函数下的互功率谱

Fig. 7 Cross power spectrum under different weighting functions

通过图 7 可以发现,在信噪比较低的环境下,PHAT 加权函数对噪声的抑制能力相对较弱,信号的伪峰值较明显,而改进的 PHAT- σ 加权函数表现更为良好,能起到很好地锐化信号峰值的作用。因此在信噪比为 -5dB 条件下,对同一声源 S 采用 PHAT 加权函数算法和 PHAT- σ 加权函数算法进行实验测试。将 4 路麦克风 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 放置成均匀线阵,相邻 2 路麦克风传感器的间距为 0.07m,麦克风阵列的参考阵元 S_1 与声源的方位角为 120° ,声源处于远场模型,设定声速为 340m/s,信号到达相邻 2 路传感器之间的理论延迟应为 0.1029ms,取 10 次实验结果进行误差分析,测试结果如表 1 所示。

根据表 1 可知,基于 PHAT 加权函数的时延估计相对误差为 4.22%,角度估计相对误差为 1.16%;基于 PHAT- σ 加权函数的时延估计相对误差为 1.46%,角度估计误差为 0.39%。综上,在低信噪比条件下,对比两种加权函数处理后的结果

可知,经过改进后的加权函数算法抗噪性能得到了加强,并且时延估计误差和角度估计误差都有了不同程度的降低,在声源定位系统中能够更加有效地确定声源所在方位。

表 1 采用两种不同算法进行时延估计的测试结果

Tab. 1 Test results of time delay estimation using two different algorithms

| PHAT 时延 估计值 | PHAT 角度 估计值 | PHAT- σ 时延 估计值 | PHAT- σ 角度 估计值 |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0.1060 | 120.9841 | 0.1035 | 120.1788 |
| 0.1065 | 121.1446 | 0.1031 | 120.0463 |
| 0.1051 | 120.6905 | 0.1058 | 120.9173 |
| 0.1057 | 120.8906 | 0.1063 | 121.0844 |
| 0.1076 | 121.5068 | 0.1038 | 120.2783 |
| 0.1072 | 121.3725 | 0.1052 | 120.7238 |
| 0.1084 | 121.7693 | 0.1044 | 120.4709 |
| 0.1080 | 121.6346 | 0.1041 | 120.3712 |
| 0.1091 | 121.9987 | 0.1032 | 120.0860 |
| 0.1088 | 121.8974 | 0.1046 | 120.5374 |

5 结论与展望

本文设计的声源定位系统中,使用数字 MEMS 麦克风传感器采集声源信号,采用 FPGA 作为核心控制系统完成多通道声源信号的同步采集和数据传输,并且针对传统广义互相关算法的加权函数在信噪比较低的环境下时延估计误差较大的问题,提出了一种改进 PHAT 加权函数的方法,实验结果表明:

1)在相同的环境下采用改进后的 PHAT- σ 加权函数进行时延估计时,误差将进一步降低,且其抗噪能力更强。

2)本文提出的改进广义互相关加权函数算法未充分考虑室内回声对麦克风阵列接收到的信号的干扰,在麦克风阵列接收到的信号较弱时,加权函数可能会出现较大的偏差导致定位误差变大,因此在未来的研究中需要进一步加强这一方面的研究。

参考文献

[1] Guo Y C, Gong K K S, Zhang N. Sound source localization algorithm based on seven-microphone array and PHAT-GCC method[C]// Proceedings of Inter-

national Conference on Advanced Control, Automation and Robotics, 2014: 568-575.

[2] Li C Z, Shao F Q, Kan Z, et al. The generalized cross-power spectrum method for estimation of time delay in acoustic pyrometer[C]// Proceedings of International Conference on Computer-Aided Design, Manufacturing, Modeling and Simulation (CDMMS), 2011: 615-620.

[3] Su X X, Li J B, Wang Y S. A postprocessing method based on high-resolution spectral estimation for FDTD calculation of phononic band structures[J]. Physica B Physics of Condensed Matter, 2010, 405(10): 2444-2449.

[4] Shi W L, Li Y S, Zhao L Y, et al. Controllable sparse antenna array for adaptive beamforming [J]. IEEE Access, 2019, 7: 6412-6423.

[5] 石钦, 赵思浩, 崔晓伟, 等. 无线时间同步的 TDOA 室内定位系统[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(3): 53-58.

Shi Qin, Zhao Sihao, Cui Xiaowei, et al. TDOA indoor positioning system based on wireless time synchronization[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(3): 53-58(in Chinese).

[6] Wang J R, Zhang J, Wei J G, et al. Sound source localization based on microphone uniform linear array[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2493(1496): 634-639.

[7] Zhang Y, Meng S J. Sound source localization algorithm based on a helmet-mounted microphone array [C]// Proceedings of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Programming, 2014: 183-186.

[8] Zhang Y, Shen B B, Yin F L. Sound source localization algorithm for low-frequency signal's diffraction path based on a head-worn microphone array[J]. Journal of Information & Computational Science, 2015, 12(18): 6709-6716.

[9] 韩文革, 苏淑靖, 薛彦杰. 基于麦克风阵列的声源被动定位系统设计[J]. 电子技术应, 2017, 43(12): 61-64.

Han Wenge, Su Shujing, Xue Yanjie. Design of sound source passive location system based on microphone array [J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(12): 61-64(in Chinese).

[10] Sun H M, Jia R S, Du Q Q, et al. Cross-correlation analysis and time delay estimation of a homologous microseismic signal based on the Hilbert Huang transform[J]. Computers & Geosciences, 2016, 91(6): 98-104.

- [11] 李保伟, 张兴敢. 基于广义互相关改进的麦克风阵列声源定位方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, 56(6): 917-922.
Li Baowei, Zhang Xinggan. Improved microphone array sound source localization method based on generalized cross-correlation[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2020, 56(6): 917-922(in Chinese).
- [12] 张晓光, 吕海峰, 吕传茂, 等. 四元十字麦克风阵声源定位算法研究[J]. 中国测试, 2020, 46(2): 96-102.
Zhang Xiaoguang, Lyu Haifeng, Lyu Chuanmao, et al. Research on sound source localization algorithm of quad cross microphone array[J]. China Measurement & Testing Technology, 2020, 46(2): 96-102(in Chinese).
- [13] 孙建红, 张涛, 焦琛. 麦克风数量与阵型对声源定位性能的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 14-21.
Sun Jianhong, Zhang Tao, Jiao Chen. Influence of the number of microphones and array on the performance of sound source localization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 14-21(in Chinese).
- [14] 刘敏, 曾毓敏, 张铭, 等. 基于二次相关的语音信号时延估计改进算法[J]. 应用声学, 2016, 35(3): 255-264.
Liu Min, Zeng Yumin, Zhang Ming, et al. An improved speech signal delay estimation algorithm based on quadratic correlation [J]. Applied Acoustics, 2016, 35(3): 255-264(in Chinese).
- [15] 万梦时, 吴小培, 张超. 改进的互功率谱时延估计算法[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(8): 247-253.
Wan Mengshi, Wu Xiaopei, Zhang Chao. Improved cross-power spectrum delay estimation algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(8): 247-253(in Chinese).

(编辑:孟彬)