

引用本文:梁家碧,邵剑,李群,等.一种用于声源定位的改进的广义互相关时延估计算法[J].光通信技术,2024,48(6):28-33.

一种用于声源定位的改进的广义互相关时延估计算法

梁家碧¹,邵剑¹,李群¹,吴鹏^{1*},林元棣¹,王同磊¹,李晓涵¹,刘进栋²

(1.国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院,南京 211103;2.上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200444)

摘要:针对广义互相关(GCC)算法在强噪声环境下定位精度较低的问题,提出了一种改进的GCC时延估计算法。该算法将最小均方(LMS)算法与二次互相关法结合起来,以此改进传统的GCC算法,从而有效地抑制了噪声的影响,并且通过使用样条插值技术,在二次峰值检测过程中显著提高了时延估计的准确性。仿真结果表明,该算法使得声源坐标位置的误差控制由传统GCC算法的17.7%降低至8.36%以内;而在实际应用测试中,声源坐标位置的误差也由传统GCC算法的42.2%大幅降低至15.4%。

关键词:光纤麦克风;改进时延估计;超声;声源定位;局部放电

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)06-0028-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved generalized cross-correlation time delay estimation algorithm for sound source localization

LIANG Jiabi¹, SHAO Jian¹, LI Qun¹, WU Peng^{1*}, LIN Yuanli¹, WANG Tonglei¹, LI Xiaohan¹, LIU Jindong²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: To address the issue of low localization accuracy of the generalized cross-correlation (GCC) algorithm in strong noise environments, an improved GCC time delay estimation algorithm is proposed. This algorithm combines the least mean squares (LMS) algorithm with the quadratic cross-correlation method to enhance the traditional GCC algorithm, effectively suppressing the impact of noise. Additionally, spline interpolation techniques are used to significantly improve the accuracy of time delay estimation during the secondary peak detection process. The simulation results show that this algorithm reduces the error in sound source coordinate positioning from 17.7% with the traditional GCC algorithm to within 8.36%. In practical application tests, the error in sound source coordinate positioning is also significantly reduced from 42.2% with the traditional GCC algorithm to 15.4%.

Key words: fiber optic microphone, improved delay estimation, ultrasonic, sound source localization, partial discharge

0 引言

由局部放电引发的电力设备运行故障是导致系统大面积停电的主要原因之一^[1],它不仅会加速设备的老化,甚至可能造成严重的安全隐患。局部放电通常伴随着超声波、电磁辐射以及气体泄漏等现象,这

使得超声检测技术成为保障电力设备安全运行的主要手段之一^[2]。该技术主要用于超声类型的识别和声源的实时定位。声源定位^[3]通常依赖于麦克风阵列系统,通过分析目标产生的声学信号来确定其位置,这项技术由于其隐蔽性、安全性和难以被探测等特点,已成为声学定位领域的研究热点^[4]。当前,大多数研究团队使用电子麦克风来接收声音信号,但是这类麦克风在电力系统环境中容易受到电磁干扰的影响,导致信号失真。相比之下,由无机材料制成的光纤法布里-珀罗(F-P)麦克风,因其结构灵活、灵敏度高、抗电磁干扰能力强及成本效益和安全性好等优点,已成为为了对抗电磁干扰场景的理想选择^[6-7],尤其是在电磁干扰严重的环境中^[8-9]。

收稿日期:2024-06-05。

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023093)资助。

作者简介:梁家碧(1993—),女,博士,工程师,现就职于国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,主要从事光纤传感技术、电力设备状态监测等研究工作。

*通信作者:吴鹏(1983—),男,博士,研究员,主要从事光纤传感技术、电力设备状态监测等研究工作。



基于麦克风阵列的声源定位技术,主要有3种方法:波束形成法^[10]、高分辨率谱估计法^[11]和基于到达时间差(TDOA)的方法^[12-13]。其中,波束形成法通过由多个固定空间位置的麦克风组成的阵列来收集声音信号,并利用相位加权求和的方式在一定范围内找到输出功率最大的区域^[14]。这种方法能够同时对多个声源进行定位,但由于其硬件成本高和计算复杂度大的特点^[15],近年来研究者们开始尝试使用神经网络来优化波束形成法的计算流程^[16]。尽管这样做可以提高处理速度,但要获得更高的精度仍需增加麦克风数量。因此,有些学者建议通过使用小型阵列进行多次测量以达到大型阵列的效果^[17-19]。虽然这种方法有助于降低成本,但为了提高定位精度,则需要频繁地移动麦克风阵列来进行信号采集,这对于如局部放电这样的瞬态信号并不适用。

高分辨率谱估计法则利用时域谱分析与空间滤波技术,通过计算麦克风之间信号的相关矩阵来推断声源的位置,不过这种方法更适合窄带信号^[20],而且要求声源信号与背景噪声都稳定不变,对于像局部放电这种宽带非稳态信号,其定位效果较差。相比之下,TDOA方法^[21]因为其实现简单且具有较好的实时性^[22]而被广泛采纳。该算法依据麦克风阵列接收到的声源信号的时间延迟,结合声速以及麦克风之间的相对位置来估算声源的坐标。但是,该算法在实际应用中容易受到环境噪声和回声的影响,从而影响定位精度。YANG X K等人^[23]提出了一种名为LaSNet的端到端神经网络模型来解决多声源定位与分离的问题,尽管相比于传统技术有所改进,但仍需大量的数据训练,而对于种类多样且强度较弱的局部放电信号来说,构建合适的数据集是一项挑战。针对如何应对环境中的噪声问题,CUI X W等人^[24]开发了一种结合级联最小均方(LMS)滤波器的时延估计算法,通过迭代降噪的方式来改善LMS滤波算法的表现,但这种方法主要用于处理低频情况,并且增加了计算复杂度,降低了实时性。

鉴于上述声源定位中存在的问题,本文提出一种改进的广义互相关(GCC)时延估计算法(下文简称改进时延估计算法),用于光纤F-P麦克风阵列的声源定位任务。

1 声源定位原理

TDOA方法可以通过搜索法或几何法^[25]来估计声源的位置。搜索法是在预设范围内逐一比较模拟的时

间延迟与实际测量得到的时间延迟,找到误差最小的那个位置作为声源的位置。但是,这种做法的计算量巨大,不利于实现实时定位。相反,几何法则利用各个麦克风间的几何配置及其接收到的时间差来直接确定声源的位置,因此具有更好的实时性。一维麦克风阵列仅能提供声源的方向信息^[26],而不能确定具体的距离;二维平面阵列则能提供更完整的信息,适合进行平面上的精确定位。对于三维空间内的声源定位,则需要借助三维麦克风阵列或者体积型阵列来完成。然而,三维阵列的设计较为复杂,所需麦克风的数量更多,相应的算法也比二维阵列复杂,导致计算量增大,同样不利于实时应用。因此,本研究采用几何法结合二维平面阵列的方式来实现声源的三维定位,以平衡定位精度与实时性的需求。

本文构建了四元十字阵列,其结构示意图如图1所示。该阵列由4个麦克风 M_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 组成,对称分布在 x 轴、 y 轴。假设麦克风到坐标原点距离为 d ,则4个麦克风在空间直角坐标系中的坐标分别为 $(d, 0, 0)$ 、 $(0, d, 0)$ 、 $(-d, 0, 0)$ 、 $(0, -d, 0)$;假设声源到坐标原点的距离为 r ,坐标为 (x, y, z) ,4个麦克风到声源的距离分别为 r_0 、 r_1 、 r_2 、 r_3 ,便可以列出如下方程组:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ (x-d)^2 + y^2 + z^2 = r_0^2 \\ x^2 + (y-d)^2 + z^2 = r_1^2 \\ (x+d)^2 + y^2 + z^2 = r_2^2 \\ x^2 + (y+d)^2 + z^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} r_3 - r_0 = \tau_{30} c \\ r_2 - r_0 = \tau_{20} c \\ r_1 - r_0 = \tau_{10} c \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

其中, c 、 θ 、 φ 分别为声速、俯仰角和相位角, τ_{30} 、 τ_{20} 和

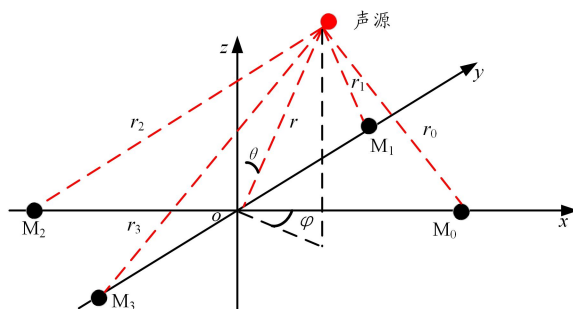


图1 四元十字阵列结构示意图

梁家碧,邵剑,李群,等:一种用于声源定位的改进的广义互相关时延估计算法

τ_{10} 分别表示 M_3 、 M_2 和 M_1 与 M_0 之间的时间差。将方程组(1)~方程组(3)联立,可以推导出

$$\begin{cases} r_0 = \frac{c(\tau_{10}^2 + \tau_{30}^2 - \tau_{20}^2)}{2(\tau_{20} - \tau_{10} - \tau_{30})} \\ \tan \varphi = \frac{\tau_3^2 - \tau_1^2}{\tau_2^2 - \tau_0^2} \\ \sin \theta = \frac{c\sqrt{\tau_{20}^2 - (\tau_{30}^2 - \tau_{10}^2)}}{2d} \\ r = \sqrt{r_0^2 + dx - d^2/4} \end{cases} \quad (4)$$

将方程组(4)代入方程组(3)中,便可以计算出声源坐标。因此,从方程组(4)可以看出,在几何声源定位方法中,时延估计的精度会影响最终的定位精度。

2 改进时延估计算法

GCC 算法广泛应用于时延估计领域,其原理为利用同一声源所发出信号之间的相关性,通过分析不同麦克风信号之间的互相关函数,可以估计出声源到各个麦克风之间的时间差。然而,在电力设备局部放电环境中,由于相干噪声等因素的存在,会导致一定程度的误差干扰,影响算法对时延估计的准确性^[20]。为此,本文对 GCC 算法进行了改进,旨在优化算法的性能,提高其在复杂环境中的使用可靠性。

假设 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 分别为 M_1 、 M_2 所采集的声音信号, $s(n)$ 为声源信号, $w_1(n)$ 、 $w_2(n)$ 分别为环境中相互独立的高斯白噪声。声音到达 M_1 与 M_2 的时长分别为 τ_1 、 τ_2 , 因此,2 个麦克风接收信号的时间差可以表示为 $\tau_{12} = \tau_1 - \tau_2$ 。假设在整个系统中,声源信号与噪声均为随机平稳信号,并且两者互不相关,由此可得

$$\begin{cases} x_1(n) = s(n - \tau_1) + w_1(n) \\ x_2(n) = s(n - \tau_2) + w_2(n) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 的互相关函数为

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= E\{x_1(n)x_2(n-\tau)\} = E\{s(n-\tau_1)s(n-\tau_2-\tau)\} + \\ &E\{s(n-\tau_1)w_2(n-\tau)\} + E\{w_1(n)s(n-\tau_2-\tau)\} + \\ &E\{w_1(n)w_2(n-\tau)\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $E(\cdot)$ 表示期望运算。

由于声源信号与高斯白噪声信号之间互不相关,可将式(6)化简为

$$R_{12}(\tau) = R_{ss}(\tau + \tau_{12}) \quad (7)$$

其中, R_{ss} 表示信号 $s(t)$ 和 $s(t+\tau)$ 的互相关度。

当 $\tau + \tau_{12}$ 为 0 时,所得到的互相关函数取最大值,其对应值为 2 个麦克风之间的时延。此时,对互功率谱进行加权和反傅里叶变换,从而可以得到 GCC 函数的表达式为

$$R_{12}(\tau) = \int_0^\pi \psi_{12}(\omega) G_{x_1 x_2}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (8)$$

其中, ω 为角频率, $G_{x_1 x_2}(\omega)$ 为互功率谱, $\psi_{12}(\omega)$ 为加权函数。

通常情况下,由于环境噪声的影响,传感器接收到的信号会在原信号基础上叠加部分干扰信号,导致相关函数的峰值被扩展,从而使求得的时延值产生较大误差。因此,本文在 GCC 算法的基础上,首先采用最小均方(LMS)算法对声源信号进行滤波处理。接着,引入二次相关法对算法进行改进,以增强其抵御噪声的能力。在检测到二次互相关函数的峰值后,选择峰值点附近的数据来构建三次样条函数,并在局部范围内进行三次样条插值和二次峰值检测,从而获得更精确的时延估计结果。改进时延估计算法流程如图 2 所示。

3 仿真分析

为验证改进时延估计算法在声源三维定位方面的有效性,本文利用搭建的四元十字阵列对其进行了仿真测试。仿真实验环境设置在三维空间中,其中 z 坐标大于 0, 采样率为 96 kHz。每个麦克风到原点的距离为 10 cm, 4 个麦克风的坐标分别为 (10 cm, 0)、(0, 10 cm)、(-10 cm, 0)、(0, -10 cm)。仿真声源发出的是正弦信号,并且在此基础上添加了信噪比为 -15 dB 的高斯白噪声和模拟的回响噪声。

随机选择 6 个声源位置,并对每个位置进行多次仿真测量,得到结果如图 3 和表 1 所示。可以看出,2 种算法的预测坐标与设定的声源坐标非常接近,这表明

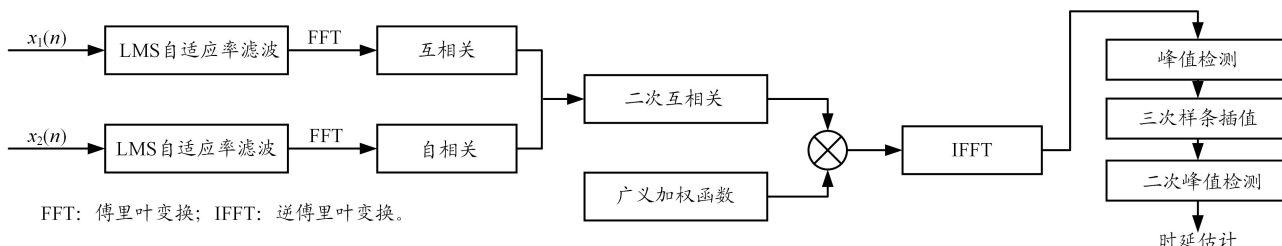


图 2 改进时延估计算法流程图

表 1 仿真结果

声源坐标/cm	GCC 算法		改进时延估计算法	
	预测坐标/cm	坐标偏差/%	预测坐标/cm	坐标偏差/%
(11,2,28)	(10.56,1.92,26.75)	(3.9,3.53,4.43)	(10.08,1.96,27.43)	(8.36,1.99,2.01)
(16,14,10)	(15.58,13.64,9.61)	(2.95,2.56,3.85)	(15.82,13.84,9.81)	(1.07,1.09,1.86)
(32,6,16)	(32.04,6.00,16.02)	(0.1,0.1,0.001)	(32.00,6.00,15.97)	(0.21,0.06,0.17)
(6,33,2)	(6.02,33.08,2.35)	(0.38,0.25,17.7)	(6.00,32.98,2.03)	(0.08,0.05,2.71)
(15,5,14)	(15.04,5.02,14.05)	(0.27,0.526,0.37)	(15.01,5.00,13.99)	(0.07,0.13,0.02)
(2,26,38)	(1.96,25.55,37.32)	(1.7,1.71,1.77)	(2.04,26.36,38.55)	(2.49,1.41,1.46)

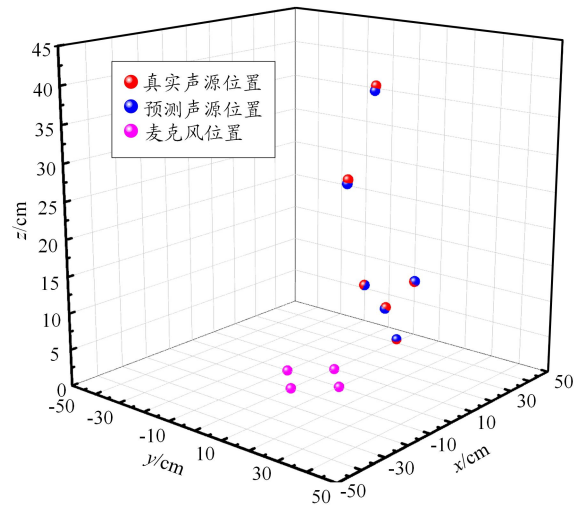


图 3 定位仿真结果

所提出的算法在定位方面是有效的。在坐标偏差方面,GCC 算法坐标偏差主要集中在 1%~5% 内,最大坐标偏差为 17.7%;而改进时延估计算法大多数坐标偏差低于 3%,最大坐标偏差仅为 8.36%。与改进前的 GCC 算法相比,本文所提改进算法的坐标偏差平均下降了约 2%。

4 测试方案与结果

本文使用自制的光纤 F-P 麦克风搭建了一个四元十字阵列,实验系统的框图如图 4 所示。在该系统

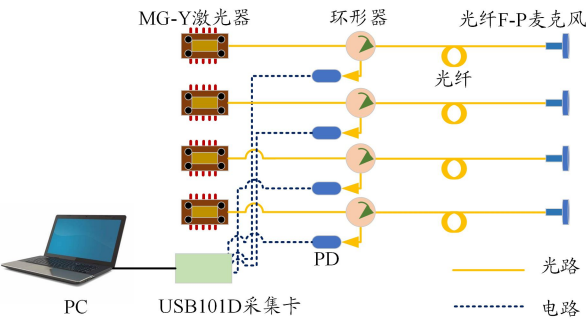
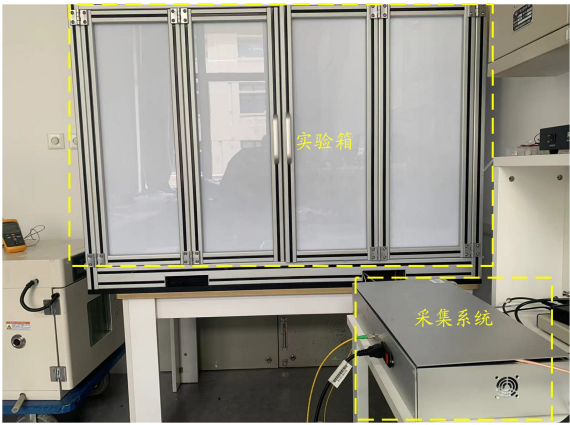


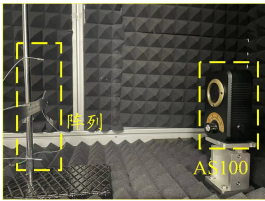
图 4 系统框图

中,MG-Y 激光器产生波长为 1 550 nm 的激光,这些激光分别进入环形器后传输至光纤 F-P 麦克风。光纤 F-P 麦克风的端面反射声信号调制的光再次经过环形器输出到光电探测器(PD),将光信号转换成电信号。然后,采用 USB101D 采集卡同时采集这 4 路信号,并传输至计算机(PC)。

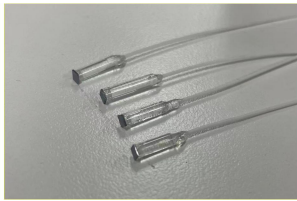
实验中使用 AS100 声源发出局放信号进行测试。整个实验环境位于一个尺寸为 1.4 m×0.8 m×1.0 m 的实验箱内。实验环境如图 5(a) 所示,麦克风阵列与声源的分布图如图 5(b) 所示,4 个光纤 F-P 麦克风如图 5(c) 所示。利用采集卡对数据进行采集并实时保存,采集信号的时域图和实时三维测试结果如图 6 所示。图 6(a) 显示了 4 个光纤 F-P 麦克风在同一时间采集的信号时域图。可以看出,4 个麦克风采集的信



(a) 实验环境

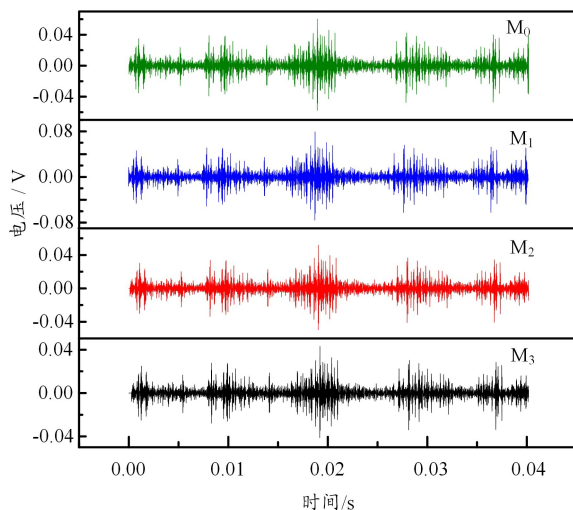


(b) 麦克风阵列与声源

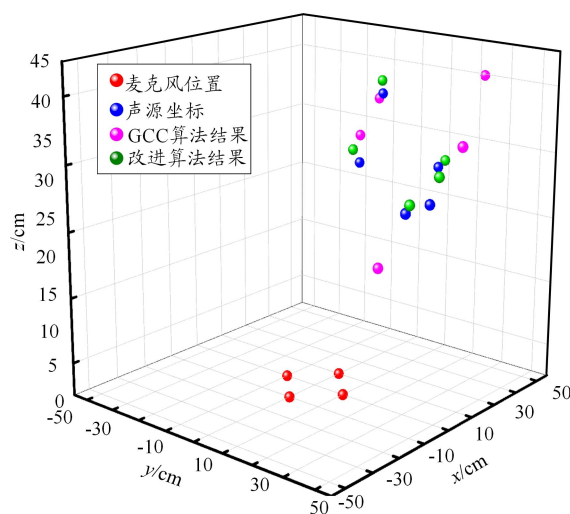


(c) 光纤 F-P 麦克风

图 5 实验装置



(a) 4路光纤 F-P 麦克风采集信号图



(b) 实时三维

图 6 实验测量结果

表 2 实验结果

声源坐标/cm	GCC 算法		改进时延估计算法	
	测试坐标/cm	坐标偏差/%	测试坐标/cm	坐标偏差/%
(10, 30, 30)	(13.97, 55.58, 43.27)	(39.7, 38.95, 44.2)	(10.67, 42.27, 30.87)	(6.7, 5.68, 2.9)
(30, 20, 30)	(21.4, 15.4, 21.01)	(28.6, 23.0, 29.9)	(31.24, 22.84, 31.35)	(4.13, 14.2, 4.5)
(30, 10, 30)	(38.30, 12.14, 38.96)	(27.6, 21.4, 29.86)	(31.83, 11.31, 34.07)	(9.17, 13.7, 9.1)
(-10, 30, 30)	(-11.32, 31.83, 34.07)	(13.2, 6.1, 13.57)	(-8.53, 25.38, 32.73)	(14.7, 15.4, 9.1)
(-10, 40, 40)	(-11.15, 39.85, 39.17)	(11.5, 0.38, 2.77)	(-10.76, 40.63, 41.97)	(7.6, 1.58, 4.9)

号在时间和幅值上存在差异。图 6(b) 为实时的三维测试结果。可以看出, GCC 算法预测的声源位置存在较大的偏差, 而改进时延估计算法的偏差较小, 位置更接近真实声源。

通过移动声源的位置进行多次测量, 并记录数据。5 次测量实验的数据如表 2 所示。对比表 2 与表 1 中的坐标偏差, 可以观察到实际测试结果的坐标偏差明显增大, 尤其是 GCC 算法。从表 2 可以看出, 对于局部放电源的定位, GCC 算法存在较大的坐标偏差, 而改进时延估计算法虽然也有一定的增大, 但最大坐标偏差在 15.4% 之内(坐标偏差约 3.91 cm)。这表明改进时延估计算法具有良好的适应能力, 在仿真和实际测试中均表现出了较好的性能。

5 结束语

本文针对噪声对延时估计的影响, 采用 LMS 算法、二次互相关法和三次样条插值等方法对 GCC 时延估计进行了改进。结合光纤 F-P 麦克风, 本文搭建了一个四元十字麦克风阵列, 用于局放信号的研究。通

过对 6 次仿真实验和 5 次实时数据的对比分析, 可以看出, 改进时延估计算法定位精度明显高于传统 GCC 算法。计算结果显示, 坐标偏差在 15.4% 之内(坐标偏差约 3.91 cm), 满足了一般的定位需求。

参考文献:

- [1] 刘顺成, 向加佳, 陈剑, 等. 局部放电特高频检测校准影响因素研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 128-134.
- [2] 唐伟登. 电力设备声学成像和声源定位技术的研究与系统实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [3] XU B L. Sound source localization based on microphone array[J]. Audio Engineering, 2004.
- [4] TIETE J, DOMI N F, SILVA B D, et al. Sound compass: a distributed MEMS microphone array-based sensor for sound source localization[J]. Sensors, 2014, 14(2): 1918-1949.
- [5] DESPONINA P, GRIFFIN A, MATTHIEU P, et al. Real-time multiple sound source localization and counting using a circular microphone array[J]. IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process, 2013, 21(10): 2193-2206.
- [6] 张丽娜, 黄桢, 汪良杰, 等. 高灵敏硅凹槽膜片型光纤 F-P 局部放电超声传感器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 2-9.
- [7] 胡程勇, 王廷云, 黄桢, 等. 基于改进经验小波变换的局部放电荧光

信号去噪[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 63–69.

[8] 韩世杰, 吕泽钦, 隋浩冉, 等. 基于 EFPI 传感器的 GIS 局部放电模式识别研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 149–155.

[9] JILONG W, QIAOYUN W, CHONGYUE Y, et al. High-sensitivity narrow band T-shaped cantilever Fabry-perot acoustic sensor for photo-acoustic spectroscopy[J]. Photoacoustics 2024, 38: 100626-1–100626-12.

[10] HAYBER S, KESER S. 3D sound source localization with fiber optic sensor array based on genetic algorithm[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57(7): 102229-1–102229-8.

[11] CHEN L, CHOY Y, WANG T G, et al. Fault detection of wheel in wheel/rail system using kurtosis beamforming method[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(2): 495–509.

[12] CHEN L, SUN W Z, HUANG L, et al. Broadband sound source localization via non-synchronous measurements for service robots: A tensor completion approach[J]. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022, 7(4): 12193–12200.

[13] XUNXUE C, XIAOHUI L, KEGEN Y. A systematic solution to 3D anchorless direction estimation using TDOA measurements[J]. Signal Processing 2024, 218: 109363-1–109363-15.

[14] HWANG J H, SEON S, PARK C S. Position estimation of sound source using three optical mach-zehnder acoustic sensor array[J]. Current Optics and Photonics, 2017, 1(6): 573–578.

[15] ZHAO Y, CHEN M Q. In-fiber rectangular air fabry-perot strain sensor based on high-precision fiber cutting platform[J]. Optics Communications, 2017, 384: 107–110.

[16] GE Z, LIN G, FENG X, et al. A dynamic convolution-transformer neural network for multiple sound source localization based on functional beamforming [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 211: 111272-1–111272-26.

[17] LIN C, YOUHONG X, LIANG Y, et al. Algorithms with randomization-based acceleration strategies for sound source localization by non-

synchronous measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2023, 188: 109996-1–109996-18.

[18] HONGJIE H, FANGLI N, WENXUN L, et al. Hybrid deconvolution separation methods based on matrix completion for multi-motion modes sound sources[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 208: 110976-1–110976-14.

[19] LIN C, YOUHONG X, LIANG Y, et al. Fast identification of coherent sound sources with the covariance matrix fitting method based on nonsynchronous measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2024, 213: 111341-1–111341-22.

[20] LU W, JIANG WK, YUAN G Q, et al. A gearbox fault diagnosis scheme based on near-field acoustic holography and spatial distribution features of sound field[J]. Journal of sound and vibration, 2013, 332(10): 2593–2610.

[21] HAO H K, LIANG H M, LIU Y W. Particle methods for real-time sound source localization based on the Multiple Signal Classification algorithm[C] //International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid 2014, April 23–25, 2014, Taipei, China. Taipei: IEEE, 2014: 1–5.

[22] CONG L, ZHUANG W H. Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(3): 439–447.

[23] YANG X K, HONGCHENG Z, YUFEI L, et al. LaSNet: an end-to-end network based on steering vector filter for sound source localization and separation[J]. Applied Acoustics 2023, 212: 109562-1–109562-7.

[24] CUI X W, YAN G, YIFAN M, et al. Time delay estimation using cascaded LMS filters fused by correlation coefficient for pipeline leak localization[J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2023, 199: 110500-1–110500-20.

[25] 李佳泽, 刘浩. 五元十字麦克风阵列声源定位算法研究[J]. 信息技术与信息化, 2021, (9): 42–46.

[26] 张晓光, 吕海峰, 吕传茂, 等. 四元十字麦克风阵列声源定位算法研究[J]. 中国测试, 2020, 46(2): 96–102.