面向开关柜局放检测的改进GCC-PHAT声源方位估计方法

卢红文[1] 龙波[2] 张辉[3] 黎华龙[1] 彭麟[4] 周骞[4]
1.贵州电网有限责任公司贵安供电局，中国·贵州 贵阳 550031
2.贵州电网有限责任公司贵阳供电局，中国·贵州 贵阳 550004
3.贵州电网有限责任公司安顺供电局，中国·贵州 安顺 561000
4.湖南大学 电气与信息工程学院，中国·湖南 长沙 410082

摘要：针对开关柜局部放电声学监测过程中环境噪声、混响及离散采样易造成声源方位估计波动的问题，本文提出一种改进 GCC-PHAT 声源方位估计方法。该方法采用带通滤波抑制频带外干扰，通过抛物线插值提高时延分辨率，并利用中位数绝对偏差剔除异常帧。实验结果表明，所提方法的平均绝对误差和均方根误差分别降低 78.06% 和 88.65%，10° 以内定位比例提高 14.03%。在 20 dB 和 10 dB 附加噪声条件下，改进方法仍具有一定性能优势。研究结果可为开关柜局部放电声纹检测中的异常声源方位判断提供方法参考。

关键词：开关柜；局部放电；声源定位；麦克风阵列；GCC-PHAT

Improved GCC-PHAT Sound Source Localization Method for Switchgear Partial Discharge Detection

Lu Hongwen[1], Long Bo[2], Zhang Hui[3], Li Hualong[1], Peng Lin[4], Zhou Qian[4]
1. Guizhou Power Grid Co., Ltd. Gui'an Power Supply Bureau, China Guizhou Guiyang 550031
2. Guizhou Power Grid Co., Ltd. Guiyang Power Supply Bureau, China Guizhou Guiyang 550004
3. Guizhou Power Grid Co., Ltd. Anshun Power Supply Bureau, China Guizhou Anshun 561000
4. Hunan University, School of Electrical and Information Engineering, China Hunan Changsha 410082

Abstract: To address the problem of fluctuations in sound source localization caused by environmental noise, reverberation, and discrete sampling during acoustic monitoring of switchgear partial discharges, this paper proposes an improved GCC-PHAT sound source localization method. The method uses band-pass filtering to suppress out-of-band interference, enhances time-delay resolution through parabolic interpolation, and removes abnormal frames using median absolute deviation. Experimental results show that the proposed method reduces the mean absolute error and root mean square error by 78.06% and 88.65%, respectively, and increases the proportion of localization within 10° by 14.03%. Under additional noise conditions of 20 dB and 10 dB, the improved method still shows certain performance advantages. The results can serve as a reference for judging abnormal sound source locations in switchgear partial discharge acoustic detection.

Keywords: Switchgear; Partial discharge; Sound source localization; Microphone array; GCC-PHAT

0 引言

开关柜长期运行过程中受绝缘老化、制造缺陷及环境因素影响，可能产生局部放电并逐渐导致绝缘性能劣化，因此及时检测并判断放电位置具有重要意义。

已有研究[1]表明，MEMS 麦克风阵列可用于电力设备局部放电声学检测与定位，利用麦克风阵列不同阵元之间的传播时延差可估计声源方向[2]。麦克风阵列声源定位主要包括波束形成、子空间分析和基于到达时间差（Time Difference of Arrival，TDOA）的方法，广义互相关相位变换（Generalized Cross-Correlation with Phase Transform，GCC-PHAT）是常用的 TDOA 估计方法，通过对互功率谱进行相位加权增强相关峰值。然而，在开关柜内部，金属柜体和器件反射易形成混响，机械振动和环境噪声也会造成相关峰误判，传统 GCC-PHAT 的分辨率受到采样周

期限制，部分帧容易出现较大的方位估计偏差。已有研究通过改进广义互相关[3]、掩蔽加权[4] 等方法提高复杂声学环境下的定位性能，神经广义互相关[5] 也已用于变压器局部放电定位，进一步表明基于时延信息的声学定位方法具有电力设备应用价值。

针对上述问题，本文在 GCC-PHAT 基础上加入带通滤波、抛物线峰值插值和中位数绝对偏差（Median Absolute Deviation，MAD）筛选，并采用 LOCATA Task 1 中 DICIT 阵列的 3 组静态声源数据验证其方位估计与抗噪性能，为后续开关柜局部放电声学定位提供算法参考。

1 基于 GCC-PHAT 的声源方位估计原理

1.1 GCC-PHAT 时延估计

GCC-PHAT 通过对互功率谱进行相位加权，削弱幅值谱影响，使互相关结果更加依赖通道间相位信息，从而突出真实时延附近的相关峰。设两路麦克风信号的傅里叶变换分别为 $X_i(f)$ 和 $X_j(f)$，其广义互相关函数为：

$$R_{ij}(\tau)=\mathcal{F}^{-1}\left[\Psi_{ij}(f)X_i(f)X_j^*(f)\right] \tag{1}$$

式中，F^{-1} 表示逆傅里叶变换，$X_j^*(f)$ 为共轭频谱，$\Psi_{ij}(f)$ 为频域加权函数。GCC-PHAT 采用相位变换权重：

$$\Psi_{ij}(f)=\frac{1}{|X_i(f)X_j^*(f)|+\varepsilon} \tag{2}$$

因此可得到：

$$R_{ij}^{\mathrm{PHAT}}(\tau)=\mathcal{F}^{-1}\left[\frac{X_i(f)X_j^*(f)}{|X_i(f)X_j^*(f)|+\varepsilon}\right] \tag{3}$$

其中，ε 是为防止分母为零而设置的微小常数。

1.2 多麦克风声源方位求解

本文采用 4 阵元线性子阵列，共形成 6 组麦克风对。并在候选方位内最小化 TDOA 匹配误差：

$$J(\theta)=\sum_{(i,j)}\left[\hat{\tau}_{ij}-\tau_{ij}(\theta)\right]^2 \tag{4}$$

最终声源方位估计结果为：

$$\hat{\theta}=\arg\min_{\theta}J(\theta) \tag{5}$$

线性子阵列存在前后模糊，因此仅在阵列前半空间搜索，范围为 −90° ～90° 。

2 改进 GCC-PHAT 声源方位估计方法

2.1 带通滤波预处理

开关柜现场可能存在机械振动、风机及背景环境声，这些干扰会降低相关峰判别稳定性。本文采用 4 阶 Butterworth 带通滤波器预处理，LOCATA 实验通带设为 300～6000 Hz，实际局放应用需结合传感器频响和局放声信号频谱调整。

2.2 抛物线峰值插值时延估计

标准 GCC-PHAT 的峰值受采样点限制，设互相关峰值位于第 k 个采样点，相邻幅值为：

$$R(k-1),\quad R(k),\quad R(k+1) \tag{6}$$

采用抛物线插值进行亚采样修正，峰值偏移量为：

$$\delta=\frac{R(k-1)-R(k+1)}{2[R(k-1)-2R(k)+R(k+1)]} \tag{7}$$

修正后的时延为：

$$\hat{\tau}_{ij}=\frac{k+\delta}{f_s} \tag{8}$$

式中，f_s 为采样频率。通过对离散相关峰进行局部插值，可减小整数采样造成的时延量化误差。

2.3 MAD 筛选及算法流程

对连续有效帧的方位估计先取中位数，再计算各帧与中位数之间绝对偏差的中位数，即 MAD。静态声源在短时间内方位基本不变，因此将偏离主体方向较大的结果判定为异常帧。当 MAD 小于 1° 时采用 5° 阈值，其余情况下采用 3 倍 MAD，最终以保留帧方位角的中位数作为声源方位估计结果，算法流程如图 1 所示。

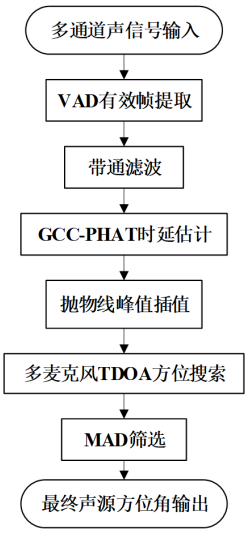


图 1 算法总体流程图

3 实验与结果分析

3.1 数据集及实验设置

实验采用 LOCATA Task 1 的 DICIT 阵列数据，选取 4 个阵元组成线性子阵列，采样率 48 kHz，帧长 2048 点，帧移 1024 点，由于线阵存在前后模糊，搜索范围限定为 −90° ～90° 。选取 3 组录音进行测试，真实方位分别为 57.972° 、−60.028° 和 −21.253° 。抗噪实验在原始录音上加入 20、10 和 0 dB 高斯白噪声。评价指标采用平均绝对误差（Mean Absolute Error，MAE）、均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）及 10° 内定位比例。

3.2 不同声源方位下的定位结果

3 组录音对应不同的声源方位，标准 GCC-PHAT 与改进方法的最终方位估计结果如表 1 所示。

表 1 不同声源方位下的定位结果

录音编号	真实方位 /°	标准 GCC-PHAT/°	改进方法 /°	标准误差 /°	改进误差 /°
1	57.972	54.8	55	3.172	2.972
2	−60.028	−58.1	−58.1	1.928	1.928
3	−21.253	−20.9	−21.1	0.353	0.153

由表 1 可见，两种方法均能够估计 3 组静态声源的基本方位，改进方法在 1 号和 3 号录音中的最终误差分别降至 2.972° 和 0.153° ，2 号与标准方法保持一致，表明峰值插值能够在部分情况下进一步减小离散采样误差。为进一步观察连续帧定位稳定性，以 1 号录音为例绘制逐帧方位估计结果，如图 2 所示。

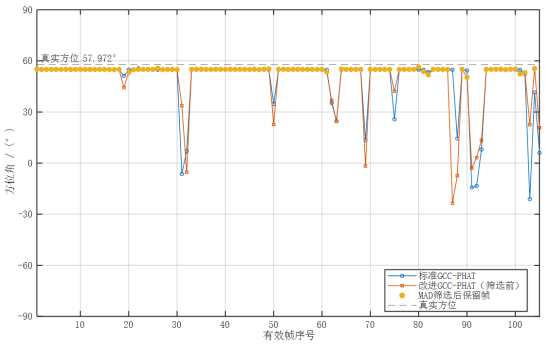


图 2 逐帧声源方位估计结果

由图 2 可见，多数帧集中在真实方位附近，少量帧出现明显跳变，MAD 筛选能够剔除这类异常结果。3 组录音的逐帧定位统计结果如表 2 所示。

表 2 不同声源定位方法的性能对比

方法	平均 MAE/°	平均 RMSE/°	10° 内定位比例 /%
标准 GCC-PHAT	8.175	17.518	85.97
改进 GCC-PHAT	1.794	1.988	100

改进方法的平均 MAE 和 RMSE 较标准 GCC-PHAT 分别降低 78.06% 和 88.65%，10° 内定位比例提高 14.03%。可以看出，改进方法在连续帧定位稳定性方面提升较为明显。

3.3 不同信噪比下的定位性能

为考察抗噪性，在 LOCATA 原始录音上分别加入 20、10 和 0 dB 高斯白噪声，3 组录音的平均结果见表 3。

表 3 不同信噪比条件下两种方法的定位结果

信噪比	标准 MAE/°	改进 MAE/°	标准 RMSE/°	改进 RMSE/°	标准 10° 内比例 /%	改进 10° 内比例 /%
原始	8.175	1.794	17.518	1.988	85.971	100
20 dB	25.53	22.543	33.763	29.395	41.843	55.823
10 dB	35.404	34.536	40.875	39.934	21.334	24.453
0 dB	43.316	43.719	46.814	46.572	10.07	9.744

随着信噪比降低，两种方法的定位误差均逐渐增大。在 20 dB 条件下，改进方法仍表现出较明显优势，当信噪比降至 10 dB 时，两种方法差距减小，说明所提方法对中等程度附加噪声具有一定抑制作用。

4 结语

针对开关柜局部放电声学定位过程中噪声、混响及离散采样造成的方位估计波动问题，提出一种改进 GCC-PHAT 声源方位估计方法，通过带通滤波、抛物线峰值插值和 MAD 筛选提高定位稳定性。

实验结果表明，与标准 GCC-PHAT 相比，所提方法的平均 MAE 和 RMSE 分别降低 78.06% 和 88.65%，10° 以内定位比例提高 14.03%；在 20 dB 和 10 dB 附加噪声条件下仍具有一定优势。表明该方法能够提高静态声源方位估计的准确性和稳定性，可为开关柜局部放电声纹定位提供算法参考。

参考文献：

[1] Yan J, Chen C, Wu Z, et al. An acoustic localization sensor based on MEMS microphone array for partial discharge[J]. Sensors, 2023, 23(3): 1077.

[2] Chelmiah E T, Madigan C D, Kavanagh D F. An acoustic sensor array approach for localising partial discharges in electric machines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 214: 111354.

[3] 陈海宏，易永利，韩钰等. 基于频率滑动广义互相关的电力噪声源定位算法[J]. 声学技术，2024, 43(4): 550-556.

[4] 史文旭，陈华伟. 融合共点声强特征的掩蔽加权声源定位方法[J]. 声学学报，2024, 49(6): 1244-1256.

[5] 刘扬，严天峰，郑礼等. 基于 TasNet 和 NGCC 的变压器局放声源定位[J]. 现代雷达，2025, 47(5): 52-58.

基金项目：2025 年中国南方电网有限责任公司科技项目“基于声光电融合特征光谱的开关柜局放可视化检测技术与应用”（项目编号：GZKJXM20240617）。