

复杂噪声环境下牵引供电系统故障声源的信源数估计与 MUSIC 定位方法

徐望婷¹, 陈剑云¹, 华敏²

(1.华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013; 2.江西省机电职业技术学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对牵引供电系统多点并发故障声源定位中信源数估计困难、弱源易被掩盖的问题, 本文提出一种基于特征熵自适应估计的 MUSIC 定位方法, 采用螺旋阵列作为传感器结构。该方法通过特征谱全局分布构建特征熵模型, 并引入特征值平方增强技术, 实现了复杂背景下并发信源数的精准判定。仿真模拟牵引变电所色噪声与机械振动工况, 结果表明: 在低信噪比与小快拍下, 本文算法的估计准确度与收敛速度均优于传统 MDL 算法; 在弱源功率占比仅为 20% 的宽动态场景下, 该算法仍能准确估算信源数。经多轮蒙特卡洛仿真实验证实, 本文方法能显著提升多并故障声源的空间分辨率与定位精度, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 牵引供电系统; 故障声源; 螺旋阵列; 信源数估计; MUSIC 算法。

中图分类号: TB535;U223

文献标志码: A

Estimation of the Number of Sound Sources and MUSIC-Based Localization for Fault Sources in Traction Power Supply Systems under Complex Noise Environments

Abstract: To address the challenges of source number estimation and the susceptibility of weak sources to masking during multi-point concurrent fault acoustic source localization in traction power supply systems, this paper proposes a novel MUSIC-based localization method employing a spiral array and adaptive eigenspectrum entropy estimation. The proposed method formulates an entropy model based on the global distribution of the eigenspectrum and introduces an eigenvalue squaring enhancement mechanism, which facilitates the precise determination of concurrent source numbers under complex background noise conditions. Simulations replicating colored noise and mechanical vibration environments typical of traction substations demonstrate that the proposed algorithm significantly outperforms the traditional Minimum Description Length (MDL) criterion in both estimation accuracy and convergence speed, particularly under conditions of low signal-to-noise ratio (SNR) and limited snapshots. Furthermore, in wide-dynamic-range scenarios where the weak source constitutes merely 20% of the total signal power, the method maintains robust and accurate source estimation. Extensive Monte Carlo simulations corroborate that this approach substantially enhances the spatial resolution and localization accuracy for multiple concurrent fault acoustic sources, thereby exhibiting considerable potential for practical engineering applications.

Key words: traction power supply system; fault sound source; spiral array; number of sources estimation; MUSIC algorithm

牵引供电系统作为电气化铁路和城市轨道交通的重要组成部分, 其运行状态直接关系到列车运行的安全性与可靠性。在长期运行过程中, 受环境因素、设备老化及外界扰动等影响, 牵引供电系统易出现接触不良、电弧放电、绝缘劣化等多种故障形式^[1-3]。此类故障在发生初期通常伴有明显的声学特征, 其声学信号可作为故障判断的可靠依据, 基于声信号的故障检测与定位方法逐渐受到关注^[4-7]。声源定位技术是实现牵引供电系统故障声源诊断的关键环节, 基于阵列信号处理的子空间定位算法具有定位精度高、抗干扰能力强等优点^[8-10]。MUSIC (multiple signal classification) 算法作为一种经典的子空间类定位方法^[11-12], 在供电系统故障声源定位领域得到了广泛应用^[13-16]。然而, MUSIC 算法的先决条件是子空间与噪声空间的划分^[17], 对于多点并发声源故障, 子空间划分的核心挑战在于信源数的先验信息, 若信源数估计不准确, 将

收稿日期: 2026-04-09

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ22006660)

直接导致信号子空间与噪声子空间划分错误，从而引起定位精度下降甚至定位失败。因此，在声源定位之前对信源数量进行准确估计具有重要意义。

在实际牵引供电系统运行环境中，声学信号往往呈现出强背景噪声、非平稳性以及噪声相关性强等特点。此外，受传感器布置和采样条件限制，可获得的有效快拍数通常较少。在上述复杂噪声和小快拍条件下，传统基于信息论准则（如 AIC、MDL）的信源数估计方法容易出现性能退化^[18]，难以满足场景应用需求。因此，研究适用于复杂噪声环境下的源数估计方法，并将其与声源定位算法有效结合，具有重要的理论意义和工程价值。

阵列结构的设计同样对声源定位性能产生重要影响。与均匀线阵和圆阵相比，螺旋阵列具有阵元分布非均匀、空间孔径利用率高以及抗空间模糊能力强等优点，尤其适用于多声源、复杂声场条件下的高分辨率定位问题^[19]。将螺旋阵列与 MUSIC 算法相结合，可在一定程度上提升牵引供电系统故障声源定位的空间分辨能力^[20]。

基于上述分析，本文针对复杂噪声环境下牵引供电系统故障声源定位问题，研究了一种融合信源数估计与 MUSIC 算法的声源定位方法。在构建螺旋麦克风阵列模型的基础上，引入适用于复杂噪声和小快拍条件的信源数估计方法，实现对故障声源数量的高准确率估计，并在此基础上完成高精度声源定位。仿真结果表明，所提出的方法在复杂噪声环境下具有良好的信源数估计准确性和定位性能，为牵引供电系统多点故障声学诊断提供了一种有效的技术途径。

1 牵引供电系统故障声源定位模型

1.1 牵引供电系统故障声信号特性分析

牵引供电系统在运行过程中易产生接触不良、放电及电弧等典型故障形式，这类故障通常伴随着明显的声学辐射现象。其中，接触不良故障多表现为周期性或间歇性声辐射，声信号幅值随运行工况变化；放电与电弧故障则往往产生持续或突发的高能声辐射，具有较强的随机性和不确定性。不同故障类型在声学表现上存在一定差异，但在实际监测条件下，其声信号往往相互叠加，形成多声源混合的声学场景。

从时频特性上看，牵引供电系统故障声信号通常分布于较宽频段，且其统计特性随运行状态发生变化。相比理想实验环境，更为突出的特点在于实际声学监测环境的复杂性和干扰多源性。在列车运行过程中，阵列传感器除接收到故障声信号外，还会同时接收到列车运行噪声、轨道结构振动噪声及环境噪声等多种干扰声源，这些背景噪声在空间和时间上具有明显相关性，难以建模为理想白噪声，常表现为色噪声特性。

在上述复杂声场条件下，故障声源与背景干扰声源往往同时存在，且声源数量通常未知，导致阵列接收信号呈现出多源叠加、信噪比较低的特点。这不仅增加了声源分离与定位的难度，也对后续信源数估计和高分辨率声源定位算法的性能提出了更高要求。

1.2 声源阵列接收信号模型

在牵引供电系统故障声学监测场景中，阵列接收信号通常由多个声源叠加形成。一方面，可能同时存在多个故障声源；另一方面，故障声源与背景干扰声源往往并存，使得阵列接收信号呈现出多声源叠加的特点。因此，本文在建模时采用多声源信号模型对实际声学场景进行描述。

设螺旋阵列由 M 个阵元构成，空间中存在 k 个远场声源，其方位参数记为 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]$ 。在实际应用中，声源数量 k 通常事先未知，且可能随运行状态变化而发生改变。为避免对定位结果产生先验约束，本文不对信源数作预设假定，而是通过后续信源数估计算法对其数量进行自适应估计。在上述假设下，阵列在离散时刻 t 接收到的信号可表示为

$$x(t) = A(\theta) + n(t) \quad (1)$$

其中， $x(t) \in C^{M \times 1}$ 为阵列接收信号向量， $s(t) \in C^{K \times 1}$ 表示声源信号向量， $A(\theta)$ 为阵列导向矩阵，其结构由螺旋阵列几何分布及声波传播特性共同决定， $n(t)$ 为加性噪声向量。

与理想仿真条件不同，牵引供电系统实际声学监测环境中的噪声往往不满足独立同分布白噪声假设。受列车运行噪声、结构振动及环境声源等因素影响，噪声在空间和时间上通常具有一定相关性，其协方差矩阵不再是标量矩阵，呈现出明显的色噪声特性。在色噪声背景下，阵列协方差矩阵的特征值结构会发生变化，噪声子空间特征值不再集中分布，从而给 MUSIC 定位方法带来挑战。基于上述多声源、未知信源数及色噪声条件，本文在后续章节中将针对阵列协方差矩阵的特征结构进行分析，研究适用于复杂噪声环境的信源数估计方法，并在此基础上实现高分辨率的 MUSIC 声源定位。

2 螺旋阵列结构与 MUSIC 声源定位算法

2.1 螺旋阵列结构设计

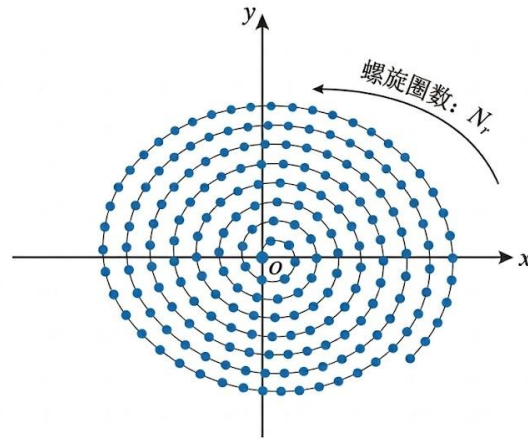
阵列几何结构对声源定位性能具有重要影响，尤其在多声源、复杂噪声环境下，其空间采样特性直接关系到定位分辨率与抗空间模糊能力。针对牵引供电系统故障声源数量未知、声场结构复杂以及背景干扰强等特点，本文选用 128 阵元 annular 螺旋阵列作为声学传感器布置结构，以提升多声源条件下的定位可靠性。

annular 螺旋阵列是一种典型的非均匀平面阵列，其阵元沿多环螺旋轨迹分布于二维平面内。该阵列通过在径向和角向同时引入非均匀性，在有限阵元数条件下有效扩展阵列等效孔径，同时避免均匀阵列所固有的周期性空间采样特性。相比均匀线阵和均匀圆阵，annular 螺旋阵列采用非等间距、非对称的阵元分布方式，能够有效抑制由阵列周期性结构引起的空间模糊和谱峰混叠问题，更适用于多声源及声源方位分布密集的应用场景。

本文所采用的 annular 螺旋阵列由多个同心环状螺旋构成，其第 m 个阵元在平面直角坐标系中的位置如式 (2) 所示：

$$\begin{cases} r_m = r_0 + \alpha_m, m = 1, 2, \dots, 128 \\ \theta_m = \beta_m \end{cases} \quad (2)$$

其中， r_m 和 θ_m 分别表示第 m 个阵元的径向距离和极角， r_0 为初始半径， α 为径向增长系数， β 为角向增长系数。通过合理选取参数 r_0 、 α 和 β ，可使阵元沿多环螺旋轨迹均匀分布于平面区域内，从而在保证阵列覆盖范围的同时增强空间采样的非周期性特征。相应的阵列几何结构示意图如图 1 所示。



128阵元环形螺旋阵列

图 1 128 位 annular 螺旋阵列示意图

Fig.1 Schematic diagram of 128-bit annular spiral array

此外, annular 螺旋阵列在保持较大空间孔径的同时具备良好的平面覆盖能力, 结合高分辨率子空间算法, 可在复杂噪声环境下形成更加清晰、稳定的空间谱峰。基于上述优势, 本文将 128 阵元 annular 螺旋阵列与 MUSIC 算法相结合, 用于牵引供电系统故障声源的高精度定位。

2.2 基于 MUSIC 的声源定位原理

在牵引供电系统故障声源定位中, 常同时存在多个声源, 且声源方位间隔较小、背景噪声复杂, 对定位算法的空间分辨能力提出了较高要求。相比传统波束形成类方法, MUSIC (Multiple Signal Classification) 算法基于子空间分解原理, 能够在有限阵元条件下实现高分辨率方位估计, 具有良好的多声源分辨能力和较强的抗空间模糊性能。因此, 本文选用 MUSIC 算法并结合 128 阵元 annular 螺旋阵列, 对牵引供电系统故障声源进行定位研究。

设阵列接收信号向量为 $\mathbf{x}(t)$, 在多声源条件下, 其协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_x = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} \quad (3)$$

实际应用中, $\mathbf{R}_x$ 通常由有限快拍数据进行估计。对协方差矩阵进行特征值分解可得

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}_n^H \quad (4)$$

其中, $\mathbf{U}_s$ 和 $\mathbf{U}_n$ 分别表示信号子空间和噪声子空间对应的特征向量矩阵。

MUSIC 算法利用阵列导向向量与噪声子空间正交的特性构造空间谱函数。对于扫描方向 θ , 其 MUSIC 空间谱定义为

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (5)$$

向与真实声源方向一致时, 空间谱函数取得峰值, 由此可实现声源方位的估计。

MUSIC 算法对信号子空间维数高度敏感, 信源数的估计结果直接决定信号子空间与噪声子空间的维数划分。当信源数欠估计时, 部分真实声源将被误划入噪声子空间, 导致谱峰削弱或漏检; 当信源数过估计时, 噪声分量被引入信号子空间, 易在空间谱中产生伪峰, 降低定位精度。

在牵引供电系统复杂声场环境下, 故障声源数量通常难以事先确定, 固定信源数假设难以适应不同运行工况。因此, 在 MUSIC 定位之前引入有效的信源数估计方法, 对保证子空间构造的准确性和定位结果的稳定性具有重要意义, 相关方法将在下一章节中进行详细介绍。

3 复杂噪声环境下的信源数估计方法

3.1 复杂噪声条件下信源数估计难点

在理想条件下, 噪声常被假设为独立同分布的白噪声, 此时协方差矩阵的特征值结构清晰, 信号子空间与噪声子空间易于区分。然而, 在牵引供电系统故障声学监测场景中, 实际噪声环境往往偏离理想假设, 给信源数估计带来较大困难。

一方面, 列车运行噪声、结构振动噪声及环境噪声在时间和空间上具有相关性, 使噪声呈现明显的色噪声特征, 导致噪声特征值分布扩展, 信号与噪声特征值之间的分界变得模糊, 传统基于阈值或信息准则的方法稳定性下降。另一方面, 多种故障声源与干扰声源可能同时存在, 且信源数量和能量分布随工况变化, 当部分声源信噪比较低时, 其特征值易被噪声淹没, 进一步增加信源数判定的不确定性。

此外, 受非均匀阵列结构和有限快拍条件影响, 协方差矩阵特征值估计不可避免地存在偏差, 在复杂噪声环境下更易放大估计误差。综上, 在牵引供电系统复杂声场条件下, 有必要构建对噪声特性不敏感、对多声源场景具有良好适应性的信源数估计方法, 为后续 MUSIC 声源定位提供可靠的子空间划分依据。

3.2 基于特征增强与噪声抑制的信源数估计

在牵引供电系统声学监测中，精准估计信源数面临严峻挑战。受变压器局放、接触网电弧及设备作业震动交织影响，麦克风阵列信号呈现高强度、非平稳的空间色噪声特征。同时，多点故障声源叠加与实时监测下的短时小样本（低快拍）约束，阵列协方差矩阵的严重畸变打破了特征值的分布规律，使得信号与噪声子空间的过渡区域趋于平滑，导致 MDL、AIC 等传统统计准则因特征边界模糊而频繁失效，产生严重的估计偏差。

针对子空间边界交叠导致的子空间划分难题，本文构建了一套涵盖矩阵预处理、特征信息增强与熵判决准则的信源数估计算法。该算法通过协方差矩阵秩重构与特征空间分布强化的消除信号子空间与噪声子空间的模糊边界，实现信源数的自适应精准判定，旨在精准划分信号子空间与噪声子空间。其具体实现步骤见 4.1。

3.3 信源数估计算法实现步骤

1) 协方差矩阵预处理

首先，根据阵列观测数据构造样本协方差矩阵

$$R_x = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L x(t)x^H(t) \quad (6)$$

其中 L 为快拍数。针对变电站内的空间色噪声与机械振动干扰，本文通过对角加载技术增强矩阵的数值稳定性，并利用特征空间映射减弱噪声相关性，使信号特征分量在复杂的背景噪声中更具辨识度。

2) 特征值处理与特征增强

对预处理后的协方差矩阵进行特征值分解：

$$R_x = U\Lambda U^H \quad (7)$$

得到按降序排列的特征值序列：

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_M \quad (8)$$

对协方差矩阵进行特征值分解，得到按降序排列的特征值序列。为进一步扩大信号子空间与噪声子空间的区分度，本文引入非线性增强算子，对特征值进行平方处理：

$$\lambda_i = \lambda_i^2, i=1,2,\dots,M \quad (9)$$

该操作能显著拉大信号分量与小特征值（噪声）之间的比例关系，特别是在低信噪比工况下，有助于抑制由于噪声波动导致的特征值边界模糊现象，在信号子空间与噪声子空间交界处，该比值出现明显跃变。

3) 基于特征值熵的判决准则

为实现信源数的自适应估计，引入信息熵作为统计判据。首先构造第 k 个局部特征值的概率分布函数 $P(k)$ ：

$$p(i|k)_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^M \lambda_j}, i=k, \dots, M \quad (10)$$

定义前 k 个特征值对应的局部熵为：

$$H(k) = -\sum_{i=k}^M p(i|k) \log p(i|k) \quad (11)$$

当滑动搜索索引 k 跨越至噪声子空间时，特征值的分布特性会发生本质性改变：由极度不均的“显著特征值”过渡为趋于各向同性的“密集噪声分量”。这一过程诱发了局部特征熵 $H(k)$ 从低位向高位的剧烈跃变。通过捕捉熵曲线一阶差分的最大值位置，即可精准锁定信源与噪声的分界点，实现信源数的自适应估计，得到信源估计数 K ：

$$K = \arg \max |H(k+1)| - |H(k)| \quad (12)$$

该方法对噪声模型的依赖程度较低，能够在空间相关色噪声背景下保持较好的稳定性与适应性；同时无需预先设定噪声功率或经验阈值，降低了对先验信息的依赖程度。在小快拍条件下仍能保持较高的估计精度，并能够适应信源数量随运行工况变化而动态改变的实际应用需求。因此，该信源数估计方法能够为复杂噪声环境下的 MUSIC 声源定位提供稳定、可靠的子空间维数判定依据，从而提升整体定位算法的性能。

4 信源数估计与 MUSIC 联合定位算法

4.1 联合算法整体流程

图 2 所示为本文提出的信源数估计与 MUSIC 联合定位算法整体流程。首先通过螺旋麦克风阵列采集牵引供电系统运行过程中的故障声信号，并构造样本协方差矩阵；随后对协方差矩阵进行特征分解，结合特征增强与统计判据实现信源数的自适应估计；在此基础上完成信号子空间与噪声子空间的划分，并利用噪声子空间与阵列导向向量之间的正交特性构造 MUSIC 空间谱；最后通过谱峰搜索获得声源方位估计结果，实现故障声源定位。该流程实现了信源数估计与高分辨率定位算法的有效融合，提高了复杂噪声环境下定位结果的稳定性与可靠性。

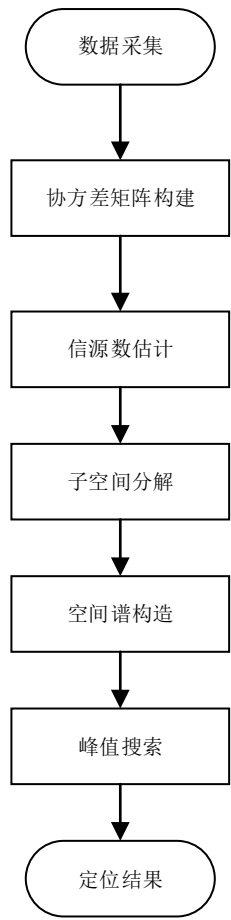


图 2 联合算法流程图

Fig.2 Flowchart of the joint algorithm

4.2 算法复杂度对比

在变电站大规模超声阵列的在线监测系统中，算法的实时响应能力是核心考量指标之一。基于子空间的空间谱定位算法流程主要包含三个阶段：协方差与特征分解阶段、信源数自适应估计阶段、以及空间谱全域搜索阶段。假设阵元个数为 M 。单个处理周期的快拍数为 L ，空间谱二维扫描的点数为 N ，设计算复杂度为计算复杂度 O 为 (M^2) 。本文方法与两种对比算法的理论计算复杂度（以复数乘加运算量级衡量）统计如表 1 所示。

表 1 算法复杂度对比

Tab.1 Comparison of Algorithm Complexity

算法处理阶段	MDL+MUSIC	本文方法
基础协方差与 EVD	$O(M^2L+M^3)$	$O(M^2L+M^3)$
空间谱全域扫描	$O(NM^2)$	$O(NM^2)$
整体系统复杂度	$O(M^3+M^2L+NM^2)$	$O(M^3+M^2L+NM^2)$

从表 1 可以看出，MDL+MUSIC 方法和本文方法复杂度一致。

5 仿真实验与结果分析

本实验通过构建 128 阵元螺旋阵列仿真平台，在 1MHz 采样率下模拟变电站复杂工况，并设置三个方位角随机分布的一强两弱并发局放源以保证结论的普适性。仿真环境进一步叠加了空间色噪声与变压器低频机械振动干扰，通过 500 次蒙特卡洛统计实验，在不同信噪比、快拍数及信号强度配比工况下，对比分析了特征熵算法、MDL 算法的定位均方根误差（RMSE），旨在全面验证所提算法在多源环境下的稳健性与弱源识别能力。

5.1 信噪比（SNR）对算法性能的影响

信噪比（SNR）是衡量信号质量的关键指标，直接决定了算法的性能极限与稳健性。为评估所提算法在变电站强电磁干扰环境下的适用性，本节在快拍数固定为 300 的条件下，分析了 SNR 从 -10dB 至 10dB 变化时各算法的性能表现，如图 3 所示。

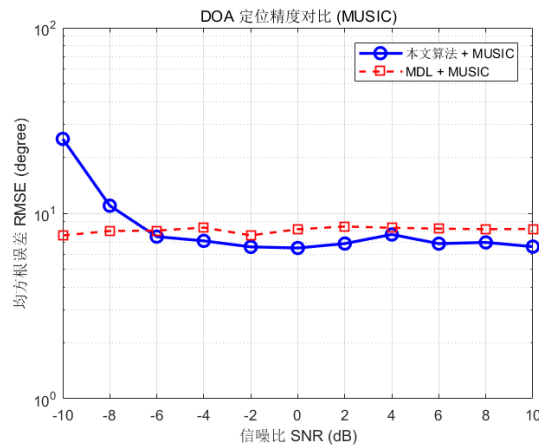


图 3 SNR 对算法性能影响

Fig.3 Influence of SNR on Algorithm Performance

结果表明，随 SNR 提升，各算法定位精度均有所改善。但在低信噪比（ $SNR < -5dB$ ）环境下，算法表现差异显著：传统 MDL 算法受色噪声及机械振动干扰严重，易产生“伪信号”误判，导致估计准度大幅跌落。相比之下，本文特征熵算法利用特征谱全局信息进行判定，具有更强的抗噪性能，在极低 SNR 条件下仍能保持高识别率。得益于子空间的精准划分，后续 MUSIC 算法维持了高分辨率指向性能，在强干扰背景下展现出最优的定位稳健性。

5.2 快拍数对算法性能的影响

快拍数是影响协方差矩阵统计稳定性的核心要素，直接关系到算法的收敛速度与实时监测能力。为验证所提算法在处理瞬态局放信号时的性能，本节在 $SNR=0$ 条件下，分析了快拍数 20 至 500 变化时算法的性能表现，如图 4 所示。

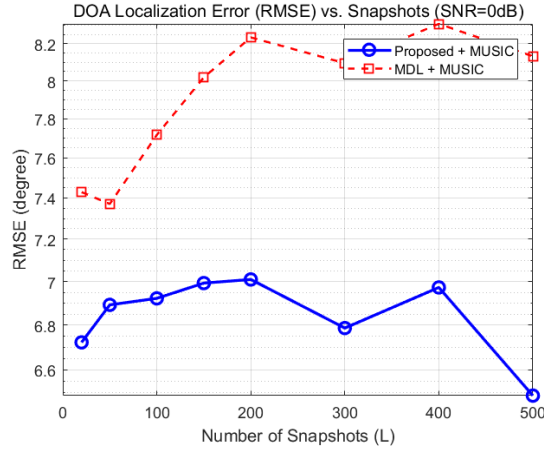


图 4 快拍数对算法性能影响

Fig.4 Influence of Snap Number on Algorithm Performance

图 4 结果表明本文算法在全区间内的 RMSE 均显著低于传统 MDL 算法，尤其在小快拍 ($L < 100$) 工况下展现出更优的收敛特性与样本利用效率；曲线在 $L=150$ 等点位出现的局部极小值，揭示了特征熵判决准则在特征值平方增强下达到了最优分离的临界效应，同时也反映了色噪声在特定采样窗口内对信号子空间干扰降至最低的统计非平稳性，证明了本文算法能有效规避 MDL 对噪声分布的敏感性，在复杂干扰环境下具备更高的定位可靠性。

5.3 信号强度对比对算法性能的影响

在牵引变电所多点局放场景下，强源掩盖弱源的现象严重制约了监测系统的动态范围。为评估所提算法对微弱目标的提取能力，本节固定 $\text{SNR}=0 \text{ dB}$ 、 $L=200$ ，分析了弱源功率占比从 0.1 增至 1.0 时各算法的性能表现，如图 5 所示。

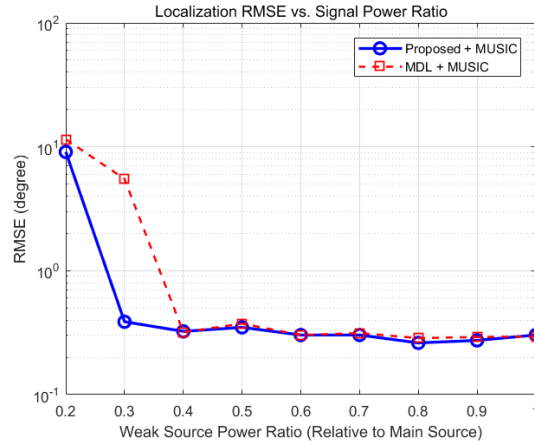


图 5 信号强度对算法性能的影响

Fig.5 Influence of Signal Intensity on Algorithm Performance

结果表明，随着弱源能量的增强，各算法对多信源的分辨能力均稳步提升。但在强弱源能量悬殊（占比 < 0.3 ）的严苛条件下，传统 MDL 算法往往将弱信号特征值误判为噪声分量，导致漏检率显著升高，RMSE 曲线因漏检产生的偏差而处于高位。相比之下，本文特征熵算法利用特征值平方增强技术拉大了信号与噪声的区分度，在弱源能量较低时仍能准确识别信源数量，有效扩展了系统的检测动态范围与弱信号捕获精度。

6 结论

本文提出了一种基于特征熵的自适应信源数估计方法，并将其应用于变电站多并发局部放电源定位问题。仿真与统计结果表明：

- 1) 该方法通过挖掘特征谱的全局结构信息,在复杂干扰条件下能够有效抑制色噪声及机械振动干扰;
- 2) 在低信噪比($\text{SNR} < -5 \text{ dB}$)及小样本($L < 100$)条件下,相较于传统 MDL 方法,所提算法在信源数估计精度及收敛性能方面具有明显优势;
- 3) 得益于特征增强机制,在宽动态范围场景(弱源功率占比低至 20%)下仍可实现稳定识别,显著降低了固定信源数假设带来的模型失配风险,提高了定位算法的鲁棒性。

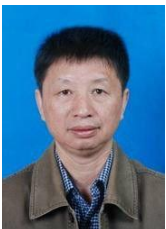
参考文献:

- [1] 靳松,王继来,吴波.牵引变电所高压设备故障智能预测技术[J].电气化铁道,2025,36(增刊1):45-50,57.
Jin Song, Wang Jilai, Wu Bo. Intelligent prediction technology for high-voltage equipment faults in traction substations [J]. Electric Railway, 2025, 36 (S1): 45-50, 57.
- [2] 张斌.牵引变电所电气设施故障风险评估技术研究及应用[J].电气时代,2025(10):132-135.
Zhang Bin. Research and application of fault risk assessment technology for electrical facilities in traction substation [J]. Electric Age, 2025 (10): 132-135.
- [3] 高永超,马禹奇,何柏杉,等.接触网绝缘子局部放电随机阵列延时求和定位装置研发[J].电气化铁道,2025,36(4):32-36.
Gao Yongchao, Ma Yuqi, He Baishan, et al. Research and development of random array delay summation positioning device for OCS insulator partial discharging [J]. Electric Railway, 2025, 36 (4): 32-36.
- [4] 杨长亮,于培培,逯哲,等.基于声纹分析的牵引变压器局部放电近超声 PRPD 识别[J].电气化铁道,2024,35(5):81-86.
Yang Changliang, Yu Peipei, Lu Zhe, et al. Near-ultrasonic PRPD identification of partial discharge in traction transformer based on voiceprint analysis [J]. Electric Railway, 2024, 35 (5): 81-86.
- [5] 李业鑫.声纹识别技术在新型电力设备中的应用与发展[J].电声技术,2024,48(3):154-156.
Li Yexin. Application and development of voiceprint recognition technology in new power equipment [J]. Audio Engineering, 2024, 48 (3): 154-156.
- [6] Zheng Quanfu, Luo Ling, Song Hui, et al. A RSSI-AOA-based UHF partial discharge localization method using MUSIC algorithm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9002309.
- [7] 张雪梅,章勇,熊伟华,等.基于深度学习的多源局部放电模式识别[J].计量与测试技术,2025,51(12):49-53,57.
Zhang Xuemei, Zhang Yong, Xiong Weihua, et al. Deep learning-based multi-source partial discharge pattern recognition [J]. Metrology & Measurement Technique, 2025, 51 (12): 49-53, 57.
- [8] 杨新乐,刘家宇.基于声源定位技术的输电设备局部放电运维巡检系统研究[J].电声技术,2025,49(12):151-153.
Yang Xinle, Liu Jiayu. Research on operation and maintenance inspection system of local discharge of transmission equipment based on sound source localization technology [J]. Audio Engineering, 2025, 49 (12): 151-153.
- [9] 罗红,孙艳花.变电站继电保护设备故障声源定位技术研究[J].电声技术,2025,49(6):175-177.
Luo Hong, Sun Yanhua. Research on fault sound source location technology of substation relay protection equipment [J]. Audio Engineering, 2025, 49 (6): 175-177.
- [10] Cai Zhichao, Wang Jianfen, Lu Zhengshi, et al. Research on a composite detection method of pantograph-catenary arc fault based on the fusion of acoustic imaging [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2026: 1-28.
- [11] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34 (3): 276-280.

- [12] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13 (4): 67-94.
- [13] Elbouchikhi E, Choqueuse V, Benbouzid M. Induction machine bearing faults detection based on a multi-dimensional MUSIC algorithm and maximum likelihood estimation [J]. ISA Transactions, 2016, 63: 413-424.
- [14] 曹腾宇. 基于 MUSIC-LSTM 算法的柔性直流输电接地故障定位研究 [J]. 电气开关, 2025, 63 (5): 28-33, 37.
Cao Tengyu. Fault location of flexible DC transmission based on MUSIC-LSTM algorithm [J]. Electric Switcher, 2025, 63 (5): 28-33, 37.
- [15] 王昱彤, 罗日成, 陈裕田, 等. 基于 PSO-MUSIC 的变压器内多局部放电源方位估计方法研究 [J]. 变压器, 2024, 61 (11): 36-43.
Wang Yutong, Luo Richeng, Chen Yutian, et al. Research on azimuth estimation method of multiple partial discharge sources in transformer based on PSO-MUSIC [J]. Transformer, 2024, 61 (11): 36-43.
- [16] 谢庆, 张建涛, 陈艺丹, 等. 基于 RD-MUSIC 算法的局放超声阵列检测方法仿真研究 [J]. 高压电器, 2019, 55 (12): 1-6.
Xie Qing, Zhang Jiantao, Chen Yidan, et al. Simulation study on detection method of partial discharge ultrasonic array based on RD-MUSIC algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55 (12): 1-6.
- [17] 张小飞, 李建峰, 徐大专, 等. 阵列信号处理及 MATLAB 实现 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2020: 464.
Zhang Xiaofei, Li Jianfeng, Xu Dazhuan, et al. Array signal processing and MATLAB implementation [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020: 464.
- [18] Wax M, Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985, 33 (2): 387-392.
- [19] Chen Jin, Guan Sheng, Tong Ying, et al. Two-dimensional direction of arrival estimation for improved Archimedean spiral array with MUSIC algorithm [J]. IEEE Access, 2018, 6: 49740-49745.
- [20] Chen Jin, Guan Sheng, Tong Ying, et al. Two-dimensional direction of arrival estimation for improved Archimedean spiral array with MUSIC algorithm [J]. IEEE Access, 2018, 6: 49740-49745.



第一作者: 徐望婷 (1989—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统故障监测。



通信作者: 陈剑云 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 享受国务院特殊津贴专家, 研究方向为电力系统监控及自动化。