

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.017

基于随机矩阵的变电站多源异常声音信号的定向方法

张 瑶¹, 赵 斌², 彭 翔², 罗林根¹, 盛戈峰¹, 江秀臣¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 江苏省如高高压电器有限公司, 江苏 南通 226503)

摘要: 变电站的安全稳定运行至关重要,通过分析变电站中电力设备的可听声特征变化可以判断设备是否处于不正常运行状态,对异常声源进行主动定位可以快速确定故障区段,进而提高异常声音的检测效率。在实际应用中,由于准确性和实时性的要求常采用大阵列小快拍系统,造成当多个目标声源角度相近时,传统的声音定位方法不能对其有效分辨。根据随机矩阵理论提出基于均匀平面矩阵的声源定位方法,利用Stieltjes变换校正样本协方差矩阵的特征值和特征向量,然后通过空间谱的谱峰搜索对异常声源定位,可以有效提高分辨相邻声源的成功率。研究表明,所提方法可以使用更少的快拍数分辨相邻声源,且分辨成功率得到有效提升。

关键词: 变电站; 可听声; 随机矩阵; 多源定位; 相邻声源

Method of Locating Multi-source Abnormal Acoustic Signals of Substation Equipment Based on Random Matrix

ZHANG Yao¹, ZHAO Bin², PENG Xiang², LUO Lingen¹, SHENG Gehao¹, JIANG Xiuchen¹

(1. School of Electric Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Jiangsu Rugao High Voltage Electric Appliance Co., Ltd., Jiangsu Nantong 226503, China)

Abstract: The safe and stable operation of substation is very important. Whether the power equipment is at abnormal operation condition can be judged by way of analyzing the variation of the audible sound characteristics of the equipment in substation. The active location of abnormal sound source can quickly determine the fault section, and thus improve the detection efficiency of abnormal sound. In practical application, the small snapshot system with large array is often used due to the requirements of accuracy and real-time, which makes the traditional sound location methods not effectively distinguish multiple targets when the sound source angles are close. According to the random matrix theory, a sound source location method based on uniform plane matrix is proposed. The eigenvalues and eigenvectors of the sample covariance matrix are corrected by Stieltjes transform, and then the abnormal sound source is located through the spectral peak search of spatial spectrum, which can effectively improve the success rate of distinguishing adjacent sound sources. The research results show that the proposed method can use less snapshots to distinguish adjacent sound sources, and the resolution success rate is effectively improved.

Key words: substation; audible sound; random matrix; multi-source location; adjacent acoustic source

0 引言

随着经济的快速发展,对电力系统的安全性和可靠性提出更高的要求^[1-3]。变电站高压电气设备较多,它们的可靠性直接关系到电网能否安全、高

效地运行,担负着重要的使命^[4-7]。

电力设备在运行过程中由于机械振动会产生声音,这种正常运行下的声音有一定的规律性。当设备发生故障后,由于运行状态的改变,其所发出的声音也会随之改变。通过声音的特征变化可以

收稿日期:2024-02-21; 修回日期:2024-04-25

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1709701)。

Project Supported by National Key R&D Program of Chian(2020YFB1709701).

判断设备是否处于不正常运行状态,甚至可以判别故障的类型和严重程度^[8-10]。对电力设备的故障定位是故障隔离、排除、恢复供电的基础和前提,对变电站中的异常声源进行主动定位可以快速准确地确定故障区段,减小搜索范围,提高故障检测效率^[11-13]。利用声音传感器阵列的便携式装置可以实现这一功能,且与振动检测相比具有非接触式测量、定位范围广、检测方法简单等优势。

基于传感器阵列的波达方向(direction of arrival, DOA)估计近年来得到广泛关注^[14-16]。在变电站中声源定位为获得更好的定位效果通常需要采用大传感阵列,并且为了提高定位的实时效果,需要减少采样快拍数。而当变电站中存在相邻声源时,以往的定位方法如多信号分类(multiple signal classification algorithm, MUSIC)方法及其改进方法^[17]由于采样数较少,不能对其进行有效分辨。变电站实际工作环境中有时同时存在多个异常声源,若多个声源在变电站空间中距离较近,如长跨度或体积较大的电力设备中的不同部件出现异常时,以及两个距离较近的电力设备发生故障时,用传统的MUSIC方法,容易将多个异常声源判断为一个,造成对变电站电力设备故障的不完全检测。文[18]在仿真中发现其所研究的正交匹配追踪算法在多个相邻的声源环境下声源成像效果较差,由此对该算法进行了改进,采取新的原子筛选准则。文[19]针对变压器局部放电的多目标定位问题,对MUSIC算法的协方差矩阵进行了改进,测向结果有明显的改善。但上述方法均存在计算量大的问题,针对变电站中相邻声源分辨问题,文中提出利用基于随机矩阵的2D-GMUSIC方法,利用渐进区域内样本协方差矩阵的特征值和特征向量与经验协方差矩阵的特征值和特征向量的关系,通过Stieltjes变换对样本协方差矩阵特征值和特征向量进行校正,最后通过空间谱的谱峰搜索进行定位,可以在小快拍时有效分辨出相邻声源,在变电站声源定位中有重要的实际意义。

仿真和变电站现场实验表明,该方法可以用更少的快拍数分辨相邻声源,提高了变电站中异常声源定位的实时性,在相同条件下,文中所提方法有更高的分辨成功率,可以更好地对相邻目标声源进行分辨,且定向误差较小,可以实现对多声源准确定向。

1 阵列模型

本方法采用均匀平面阵列模型,阵列模型见图1,

该阵列由 $M \times M$ 个声音传感器组成, x 轴方向和 y 轴方向相邻阵元间距分别为 d_x 和 d_y , φ_i ($0 \leq \varphi_i < 360^\circ$, $i=1, 2, \dots, D$)和 θ_i ($0 \leq \theta_i < 90^\circ$, $i=1, 2, \dots, D$)分别表示第 i 个入射信号的方位角和俯仰角, D 表示入射声源个数,且各信号之间相互独立。

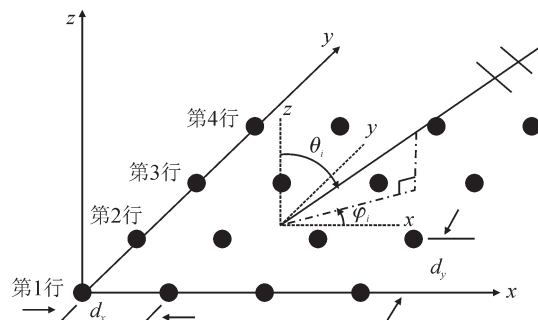


图1 均匀平面阵模型

Fig. 1 Uniform planar array model

假设传感器阵列接收到的声音信号矢量为 $Y(t)$, t 为采样点, $S(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T$ 为入射声音信号矢量, $N(t)$ 是阵列接收的加性高斯白噪声信号,则 $Y(t)$ 可以表示为

$$Y(t) = AS(t) + N(t) \quad (1)$$

式(1)中, A 为导向向量矩阵,与阵列分布和信号的方向有关。

由于均匀平面阵列可以看作 x 轴方向的均匀线阵沿 y 轴方向的扩展,用 A_x 表示 x 轴方向均匀线阵的导向向量矩阵

$$A_x(\theta, \varphi) = [a_x(\theta_1, \varphi_1), a_x(\theta_2, \varphi_2), \dots, a_x(\theta_D, \varphi_D)] \quad (2)$$

式(2)中, $a_x(q_i, j_i)$ 为第 i 个信号在 x 轴方向的导向向量,可表示为

$$a_x(\theta_i, \varphi_i) = [1, e^{-jk_1 d_x}, \dots, e^{-jk_1 (M-1)d_x}]^T \quad (3)$$

式(3)中: $i=1, 2, \dots, D$; $k_1 = \omega \sin \theta_i \cos \varphi_i / c$, c 为声速, $c=340$ m/s; T 表示转置。

如图1所示,均匀平面阵列由 M 行均匀线阵组成,第 i 个信号在与 x 轴方向平行的第 m ($m=1, 2, \dots, M$)行阵元的导向向量 $a_{x,m}(\theta_i, \varphi_i)$ 为

$$a_{x,m}(\theta_i, \varphi_i) = e^{-jk_2 (m-1)d_y} a_x(\theta_i, \varphi_i) \quad (4)$$

式(4)中, $k_2 = \omega \sin \theta_i \sin \varphi_i / c$ 。

因此平行于 x 轴的第 m 行阵元的导向向量矩阵 $A_{x,m}(\theta_i, \varphi_i)$ 可以表示为

$$A_{x,m}(\theta, \varphi) = [a_{x,m}(\theta_1, \varphi_1), a_{x,m}(\theta_2, \varphi_2), \dots, a_{x,m}(\theta_D, \varphi_D)] \quad (5)$$

于是,均匀平面阵导向向量矩阵 A 可写为

$$A(\theta, \varphi) = [A_{x,1}(\theta, \varphi), A_{x,2}(\theta, \varphi), \dots, A_{x,M}(\theta, \varphi)]^T \quad (6)$$

$A_{x,m}(\theta_i, \varphi_i)$ 为 $M \times D$ 维矩阵,因此 $A(\theta, \varphi)$ 是 $(M \times M) \times D$ 维矩阵。

假设声源信号具有零均值,有 N 次观测样本

$Y(1), Y(2), \dots, Y(N)$, 阵列接收信号的样本协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{R}} = E[Y(t) \cdot Y(t)^H] = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Y(t) \cdot Y(t)^H \quad (7)$$

2 2D-GMUSIC 方法原理

多重信号分类方法(multiple signal classification algorithm, MUSIC)假设快拍数足够大, 统计协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 可以用样本协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 来近似, 可以对两个及两个以上的多目标源进行定位。而实际中采样数有限, 当声音传感器阵列阵元数较大, 同时需要快速处理时, 采样快拍数不足以满足需求, 样本协方差矩阵不能直接代替统计协方差矩阵进行估计, 尤其是当快拍数与阵元个数处于相同数量级时, MUSIC 方法失效, 因此 Mestre 提出引用 G 估计方法用于均匀线阵的 DOA 估计^[20-21]。文中将该算法引入均匀平面阵列, 应用于变电站环境中的声源信号定位。

随机矩阵理论是统计学的一个分支, 用于研究随机矩阵模型的特征值和特征向量在矩阵的行数和列数以相同速率无限制地增加时的渐变行为。G 估计理论以 Girko 的 G-估计器公式命名^[22], 其核心思想是利用渐进区域内样本协方差矩阵的特征值和特征向量与经验协方差矩阵的特征值和特征向量的关系, 并通过 Stieltjes 变换产生与传统的 L -一致估计器不同的 (M, L) -一致估计器, M 为阵元数, L 为快拍数。考虑当阵元个数 M 固定时协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 的特征值的经验谱分布函数, 即^[23]

$$F^{(M)}(\lambda) = \frac{1}{M} \# \{1 \leq m \leq M: \hat{\lambda}_m \leq \lambda\} \quad (8)$$

式(8)中: $\#(\cdot)$ 表示满足某条件集合的元素个数; λ 为特征值, $\hat{\lambda}_m$ 表示第 m 个特征值, $1 \leq m \leq M$; $F^{(M)}(\lambda)$ 是一个特征值计数函数, 返回协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 中特征值小于或等于 λ 的比例。

无论快拍数 L 如何变化, 都有

$$\left| F^{(M)}(\lambda) - \hat{F}^{(M)}(\lambda) \right| \rightarrow 0 \quad (9)$$

式(9)中, $\hat{F}^{(M)}(\lambda)$ 为样本协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 的经验谱分布函数, 是确定性函数, 描述了 $\hat{\mathbf{R}}$ 特征值的渐进特性。因此, 当 M, L 以相同速率 $(M/L \rightarrow c, 0 < c < \infty)$ 趋近于无穷时, $\hat{\mathbf{R}}$ 的特征值趋向于汇聚到 $\mathbf{R}$ 的特征值周围, 形成簇。

当声源信号角度邻近, 即波达角之差在 $M, L \rightarrow \infty$ 时为一小量 $o(L^{-1})$ 时, 相邻簇可能会合并, 一个簇包含多个渐进特征值, 使相邻声源信号不容易分辨^[24], 此时 MUSIC 方法失效。

由于基于子空间的 MUSIC 方法利用协方差矩

阵的特征值来分离噪声子空间和信号子空间, 因此可以通过校正特征值和相应特征向量来提高 DOA 估计性能, GMUSIC 方法通过 Stieltjes 变换实现校正, 其谱函数为

$$P_{\text{GMUSIC}}(\theta, \varphi) = a(\theta, \varphi)^H \left(\sum_{i=1}^M \phi(i) \hat{e}_i \hat{e}_i^H \right) a(\theta, \varphi) \quad (10)$$

式(10)中: θ, φ 分别为待求声源信号的俯仰角和方位角; $\hat{e}_i$ 是样本协方差矩阵的特征向量; $\phi(i)$ 即为校正系数, 定义为

$$\phi(i) = \begin{cases} 1 + \sum_{k=M-D+1}^M \left(\frac{\hat{\lambda}_k}{\hat{\lambda}_i - \hat{\lambda}_k} - \frac{\hat{\mu}_k}{\hat{\lambda}_i - \hat{\mu}_k} \right) & i \leq M-D \\ - \sum_{k=1}^{M-D} \left(\frac{\hat{\lambda}_k}{\hat{\lambda}_i - \hat{\lambda}_k} - \frac{\hat{\mu}_k}{\hat{\lambda}_i - \hat{\mu}_k} \right) & i > M-D \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: D 是声源信号个数; $\hat{\lambda}_1 \geq \hat{\lambda}_2 \geq \dots \geq \hat{\lambda}_M$ 是样本协方差矩阵的特征值; $\hat{\mu}_k$ 是式(12)由大到小排列的实数解, 其中, $r = M/L$ 。

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\hat{\lambda}_i}{\hat{\lambda}_i - \hat{\mu}} = \frac{1}{r} \quad (12)$$

通过对式(10)进行谱峰搜索, D 个谱峰对应的 D 个角度即为多源入射声源信号的方向角。由于该方法是对 MUSIC 方法的改进, 因此其可以实现对两个及两个以上的多目标声源进行定位, 且可以更好的分辨相邻声源。

3 仿真实验

3.1 仿真实验条件和步骤

为了验证文中提出用于均匀平面阵列的 2D-GMUSIC 方法的有效性, 基于 MATLAB 进行声源定向仿真实验, 实验步骤如下。

1) 声源信号构造。声音传感器阵列采用 10×10 均匀平面阵列, 阵元间距为半波长, 采样快拍数为 200, 噪声为复高斯白噪声, 信噪比设定为 10 dB。信噪比的计算公式为

$$R_{\text{SNR}} = 20 \lg \left(\frac{A_s}{A_n} \right) \quad (13)$$

式(13)中: A_s 为声音传感器接收到的声音信号的有效值; A_n 为噪声信号有效值。

为验证文中所提方法在方位分辨上的有效性, 两个声音信号的入射方位角相同, 均为 80° , 俯仰角分别为 $70^\circ, 65^\circ$, 入射声音信号的速度为 340 m/s, 频率设为 2 kHz。

2) 空间谱函数构造。依照式(6)构造阵列的导向向量矩阵, 按照式(7)进行特征向量和特征值的求取, 最后根据式(10)-(12)构造 2D-GMUSIC 方法的空

间谱函数并进行绘图、谱峰搜索。

3.2 空间分辨能力仿真实验

为验证两种方法的分辨能力,对上述两个相邻声源信号定向,分别用2D-GMUSIC和MUSIC方法进行仿真实验,实验结果见图2。

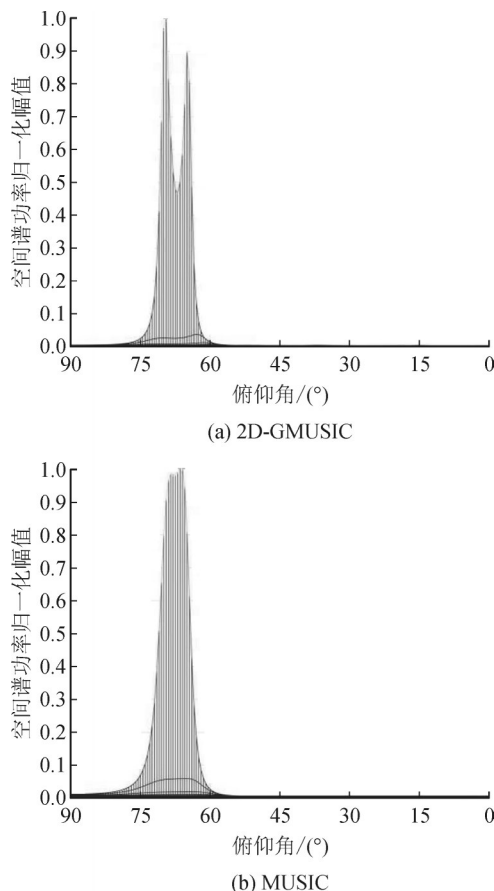


图2 两种方法定向结果

Fig. 2 Positioning results of the two methods

从图2中可以看出,由于传感器阵元较多,而快拍数较少,对于两个入射角度相差 5° 的相邻目标声源信号,MUSIC方法的两个谱峰分辨不明显,即不能正确分辨,而文中提出的2D-GMUSIC方法有明显的两个谱峰,因此可以将其正确分辨,且分辨结果明显,验证了该方法在面对相邻声源时具有更好的空间分辨能力。

3.3 空间分辨性能比较

空间分辨性能受声音传感器阵列阵元个数、快拍数和信噪比的影响,为验证文中所提方法的性能,采用控制变量法进行实验,对2D-GMUSIC方法和MUSIC方法分别进行多次实验,除所控制的变量,其余参数如3.1部分设置,记录每种实验条件下的成功率,此处成功率是指角度分辨成功的次数占实验总次数的比例。

当快拍数为200时,分别改变信噪比和阵元个数,两种方法在不同阵元数的阵列中成功率随信噪

比改变的变化趋势见图3。从图3中可以看出,阵列的阵元数越多,算法的成功率越高,这是因为阵元个数越多,传感器阵列接收到的信息越多,分辨能力越强。另外,图3表明在相同条件下,文中提出的2D-GMUSIC方法的分辨成功率高于传统MUSIC方法,空间分辨性能得到明显提升,证明了文中所提方法在性能上的优越性。

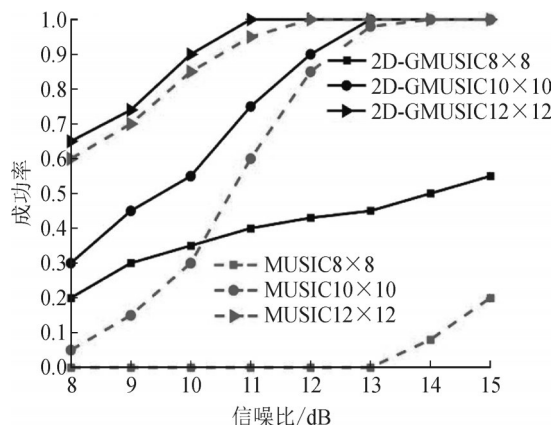


图3 阵元个数与信噪比对两种方法性能的影响

Fig. 3 Influence of the number of array elements and SNR on the performance of the two methods

固定声音传感器个数和信噪比,比较快拍数对两种算法的影响。文中该仿真实验采用 10×10 声音传感器阵列,当信噪比为12时,改变快拍数,结果见图4。

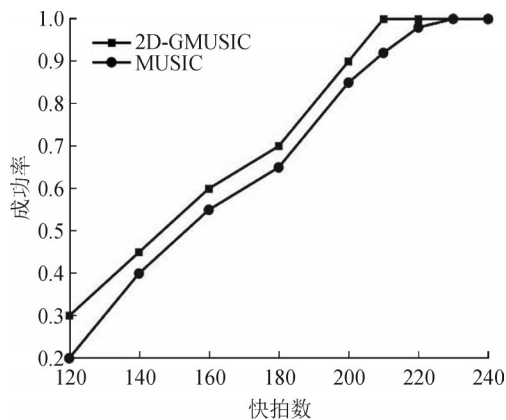


图4 快拍数对两种方法性能的影响

Fig. 4 Influence of snapshot number on the performance of the two methods

从图4中可以看出,在满足同样成功率的要求下,文中提出的2D-GMUSIC方法相比MUSIC方法可以用更少的快拍数对相邻目标声源的进行分辨,从而减少算法运行时间,有利于在变电站中实现对相邻异常声源的实时定位。

3.4 定位精度比较

为验证文中所提方法的可行性,需要对该方法的定位精度进行实验。比较相同条件下两种方法

的定位精度,采用10×10传感器阵列,由于在快拍数为200时,MUSIC方法无法正确分辨两相邻声源,因此采用快拍数为600,改变信噪比,分别用2D-GMUSIC方法和MUSIC方法进行多次实验,选取分辨成功的实验定位结果并记录,计算定位结果的均方根误差,均方根误差的计算公式见式(14),定向结果见图5。

$$e = \sqrt{\frac{1}{X} \sum_{i=1}^X \frac{1}{2} [(\theta_i - \theta_0)^2 + (\varphi_i - \varphi_0)^2]} \quad (14)$$

式(14)中: X 为运行次数; θ_i 和 φ_i 为方位角和俯仰角估计值; θ_0 和 φ_0 为方位角和俯仰角的实际值。

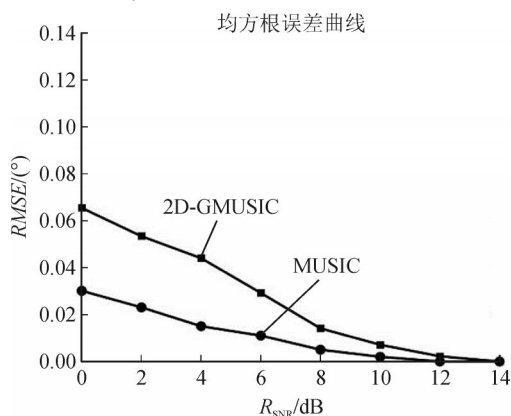


图5 两种方法的均方根误差曲线

Fig. 5 Root mean square error curves of the two methods

从图5中可以看出,文中提出的2D-GMUSIC方法相对MUSIC方法定位精度较差,但相差较小,且在仿真实验中文中所提方法的均方根误差均保持在0.1°以内,是可接受范围,另外,由于文中的重点在于算法在面对多相邻目标声源时的分辨能力,因此与分辨能力相比,算法定位精度的弱势可以忽略。

4 现场实验测试

4.1 实验测试条件

为了进一步测试文中所提出的声源定位方法的性能,在变电站现场环境下搭建声源定向系统,该系统由声音传感器阵列、预处理单元、多通道高速同步采集系统及计算机4部分组成,见图6。系统中使用的声源传感器是TDK提供的ICS-41352 MEMS声学传感器。它的典型频率响应是100 Hz到15 kHz,为可听声范围。在标准模式下,灵敏度为-26 dB,信噪比为64 dBA,总谐波失真度(THD)为0.2%。所有16通道采样单元的采样频率设置为44.1 kHz。

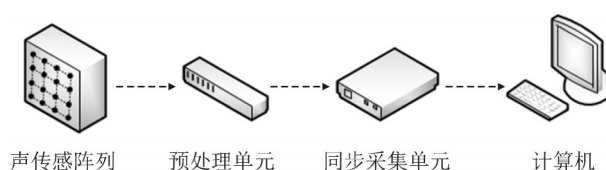


图6 现场声源定位测试系统

Fig. 6 On-site acoustic source location test system

4.2 实验方法

现场实验步骤与第3节仿真实验步骤相似,区别在于声音信号的获取,在变电站现场中声音信号获取的方法如下。

在变电站中进行多声源定向实验,径向距离设置为3 m,分别在不同方位角、俯仰角的坐标处同时用两个手持式静电枪模拟异常声源,为验证本方法的有效性,两个声源角度相近。进行两组实验,两组声音信号的入射方位角和俯仰角见表1中实际方向,其时域图和频谱图分别见图7。声音传感器阵列采用4×4均匀平面阵列,阵元间距为半波长,采样快拍数为400。

表1 实际实验定向结果

Table 1 Orientation result of actual signal

定向方法	序号	声源定向		定向误差/(°)
		实际方向(φ, θ)/(°)	定向结果(φ, θ)/(°)	
2D-GMUSIC	1	(100.00, 45.00)	(97.32, 43.75)	2.091 0
		(90.00, 40.00)	(93.52, 42.48)	3.044 7
	2	(40.00, 30.00)	(42.66, 31.43)	2.135 5
		(50.00, 40.00)	(51.93, 41.87)	1.900 2
MUSIC	1	(100.00, 45.00)	定向失败	—
		(90.00, 40.00)	定向失败	—
	2	(40.00, 30.00)	定向失败	—
		(50.00, 40.00)	定向失败	—

从图7中可知,静电枪的声音频率在2 000 Hz左右,同时变电站中存在设备运行背景噪声和风扇噪声干扰,人说话的声音以及汽车鸣笛声等。按照

式(13)计算得信噪比为5 dB。

4.3 实验结果对比分析

用文中提出的2D-GMUSIC方法和MUSIC方法

对两个声源进行定向,定向结果见图8。

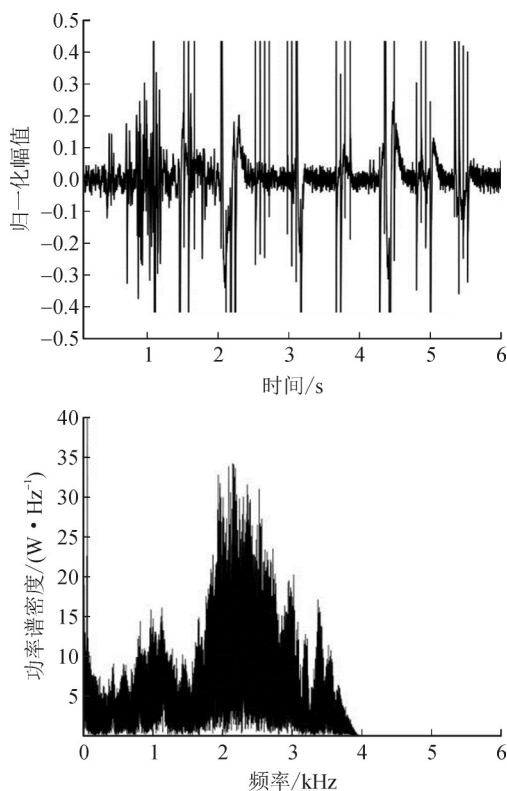
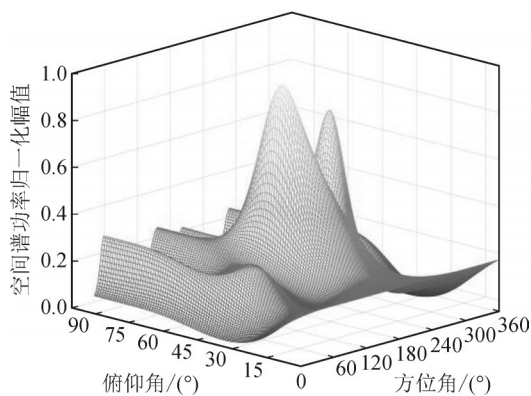
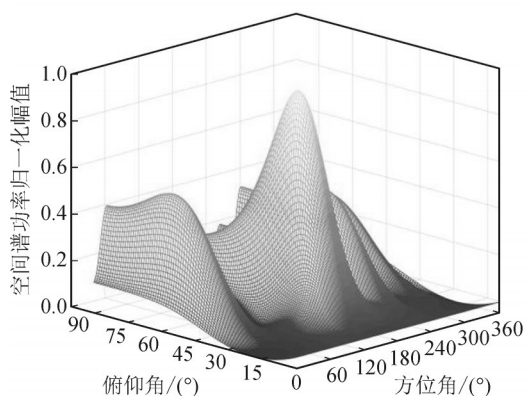


图7 变电站环境下声音信号时域图及频谱图

Fig. 7 Time domain diagram and frequency spectrum diagram of acoustic signals in substation environment



(a) 2D-GMUSIC两源定向空间谱图



(b) MUSIC两源定向空间谱图

图8 实际信号的定向结果

Fig. 8 Orientation result of actual signal

从图8中可以看出利用 MUSIC 方法仅有一个谱峰,因此无法分辨相邻的两个声源,定位结果较差,利用文中提出的 2D-GMUSIC 方法有两个谱峰,可以实现两个相邻声源的定向。该结果同时表明了 2D-GMUSIC 方法可以在更少的快拍数下实现相邻声源分辨功能。两种方法的定向结果见表1。

从表1中可以看出,2D-GMUSIC 方法定向误差控制在 4° 以下,实现相邻声源分辨的同时定向精度较小。对比分析图7的仿真结果和表1中的数据,可以看出两种方法的仿真结果误差相对较小,这是因为仿真实验为较为理想的实验,没考虑到变电站中各种电磁干扰以及其他的噪声干扰,仅加入高斯白噪声作为背景噪声,因此定向结果精度较高。

5 结论

1)针对变电站中大阵元小快拍时的相邻声源分辨问题,文中提出利用基于随机矩阵的 2D-GMUSIC 方法,仿真和实际测试结果表明文中所提出的方法具有更强的空间分辨能力,可以实现对相邻目标声源的正确分辨。

2)对 2D-GMUSIC 方法和 MUSIC 方法的相邻声源分辨成功率进行实验,结果显示文中所提方法具有更好的分辨性能,且在满足同样成功率的要求下,2D-GMUSIC 方法需要更少的快拍数,提高了变电站声源的实时定位性能。

3)实际测试结果表明,2D-GMUSIC 方法的定向误差控制在 4° 以下,可实现在变电站中对多声源的准确定向。

4)实际变电站现场环境中声音情况更为复杂,且变电站中噪声众多,将是后续工作特别是变电站现场测试中的重点研究问题。

参考文献:

- [1] 江秀臣,盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1041-1050.
JIANG Xiuchen, SHENG Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1041-1050.
- [2] 张林林,胡熊伟,李 鹏,等. 基于极限学习机的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(6): 749-756.
ZHANG Linlin, HU Xiongwei, LI Peng, et al. Power system transient stability assessment based on extreme learning machine[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(6): 749-756.
- [3] 何启远,潘德泰,李贵亮,等. 融合 SE-Attention 图像识别

- 模型的电力设备监测系统[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(4):71-76.
- HE Qiyuan, PAN Detai, LI Guiliang, et al. A power equipment monitoring system based on SE-Attention image recognition model[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2021, 35(4):71-76.
- [4] 翁东雷, 王露民, 莫建国, 等. 基于云计算关联分析的电力设备故障识别模型[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 38-44.
- WENG Donglei, WANG Lumin, MO Jianguo, et al. A power equipment fault identification model based on cloud computing association analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(10):38-44.
- [5] 黄小琼, 沈曙明, 李晨, 等. 基于RFID的电力设备全寿命周期故障预测[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11):80-85.
- HUANG Xiaoqiong, SHEN Shuming, LI Chen, et al. The full life cycle fault prediction of power equipment based on RFID[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 80-85.
- [6] 谢国财, 温锐, 陈琛. 基于模糊神经网络的高压电力设备故障预测模型[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 120-125.
- XIE Guocai, WEN Rui, CHEN Chen. A fault prediction model of high-voltage power equipment based on fuzzy neural network[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9):120-125.
- [7] 谭贵生, 曹生现, 赵波, 等. 基于关联规则与变权重系数的变压器状态综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1):88-95.
- TAN Guisheng, CAO Shengxian, ZHAO Bo, et al. An assessment of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1):88-95.
- [8] 刘通, 腾云, 杨景刚, 等. 基于可听声的GIL设备交流耐压击穿放电定位研究[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 26-32.
- LIU Tong, TENG Yun, YANG Jinggang, et al. Study on AC withstand voltage breakdown discharge location of GIL equipment based on audible-signal[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1):26-32.
- [9] 游溢, 张维宁, 杨柱石, 等. 基于声振一体化的变压器感知系统在故障诊断中的应用研究[J]. 变压器, 2022, 59(4):29-34.
- YOU Yi, ZHANG Weining, YANG Zhushi, et al. Research on transformer operation state sensing system based on sound-vibration integration[J]. Transformer, 2022, 59(4): 29-34.
- [10] 杨代勇, 刘赫, 林海丹, 等. 电力设备外绝缘放电声—光协同检测及诊断技术[J]. 电瓷避雷器, 2023(6):209-218.
- YANG Daiyong, LIU He, LIN Haidan, et al. Acoustic-optical collaborative detection and diagnosis technology for external insulation discharge of power equipment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6):209-218.
- [11] 肖舒严, 王强钢, 周念成. 基于稳健加权总体最小二乘的变压器局部放电定位[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8):203-209.
- XIAO Shuyan, WANG Qianggang, ZHOU Niancheng. Partial discharge location of transformer based on robust weighted total least square[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):203-209.
- [12] 陈敬德, 吴继健, 徐友刚, 等. 变电站全站设备故障声学成像检测系统的研制[J]. 电气自动化, 2020, 42(5): 90-91.
- CHEN Jingde, WU Jijian, XU Yougang, et al. Development of an acoustic imaging system for fault detection of all the equipment of a substation[J]. Electrical Automation, 2020, 42(5):90-91.
- [13] 李秀广, 吴旭涛, 师愉航, 等. 基于声学成像的GIS机械故障带电检测系统[J]. 高压电器, 2019, 55(5):42-46.
- LI Xiuguang, WU Xutao, SHI Yuhang, et al. Charged detection system of GIS mechanical fault based on the acoustical imaging[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5):42-46.
- [14] 罗传仙, 张民, 程林, 等. 基于声电联合传感阵列的变压器局部放电诊断技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9):81-90.
- LUO Chuanxian, ZHANG Min, CHENG Lin, et al. Research on transformer partial discharge diagnosis technology based on combined acoustic and electrical sensing array[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9):81-90.
- [15] 贺谦, 韩凯, 冯建民, 等. 任意构型传声器阵列声源定位方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4):186-192.
- HE Qian, HAN Kai, FENG Jianmin, et al. A sound source localization method for microphone array with arbitrary configuration[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4):186-192.
- [16] 牛勃, 丁培, 马飞越, 等. 粒子群优化算法在电气设备特高频局部放电源定位中的应用[J]. 智慧电力, 2018, 46(9):95-102.
- NIU Bo, DING Pei, MA Feiyue, et al. Application of particle swarm optimization algorithm in electrical equipment UHF PD source positioning[J]. Smart Power, 2018, 46(9):95-102.
- [17] 同非, 郭磊, 连豪. 基于MUSIC及其改进算法的空间信号到达方向估计方法研究[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(2):58-62.
- TONG Fei, GUO Lei, LIAN Hao. Study on DOA estimation based on MUSIC algorithm and improved algorithm[J]. Fire Control Radar Technology, 2018, 47(2):58-62.
- [18] 尚俊超. 基于压缩感知的噪声源识别方法研究[D]. 合肥:

- 合肥工业大学,2019.
- SHANG Junchao.Noise source identification based on compressed sensing method study[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2019.
- [19] 左兴喜. 变压器局部放电多目标定位方法的研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2020.
- ZUO Xingxi.Study on multi-object localization method of partial discharge in transformer[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology,2020.
- [20] MESTRE X,LAGUNAS M Á. Modified subspace algorithms for DoA estimation with large arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2008,56(2):598-614.
- [21] MESTRE X. Improved estimation of eigenvalues and eigenvectors of covariance matrices using their sample estimates [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54 (11):5113-5129.
- [22] GIRKO V L. Theory of random determinants[M]. Netherlands:Kluwer Academic Publishers,2012.
- [23] 郭 拓,王英民. 小快拍高分辨目标方位估计算法 GMUSIC的性能分析[J]. 应用声学,2018,37(5):781-786.
- GUO Tuo, WANG Yingmin.Performance analysis of GMUSIC algorithm for high resolution target bearing estimation in small snapshots[J]. Applied Acoustics,2018, 37(5):781-786.
- [24] COUILLET R, DEBBAH M. Signal processing in large systems: A new paradigm[J]. IEEE Signal Processing Magazine,2013,30(1):24-39.
- 张 瑶(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力设备状态评估。
- 罗林根(1982—),男,博士,副研究员,主要研究方向为电力设备状态评估及智能化(E-mail:llg523@sjtu.edu.cn)。
- 盛戈皞(1974—),男,博士,研究员,主要研究方向为电力设备状态评估、人工智能与大数据。
- 江秀臣(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为电力设备状态评估。