

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.008

基于特高频天线阵列的局部放电信号定位方法及影响因素分析

徐越峰¹, 任双赞², 朱明晓³, 吴昊², 刘晶², 李元³, 张冠军³

(1. 国网陕西省电力公司, 西安 710100; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 基于移动式特高频(UHF)天线阵列的敞开式变电站局部放电巡检与定位系统获得应用,但天线间距一般较小,使放电源距离定位准确度较低。文中提出了基于时差法的放电源波达方向估计方法,利用两对相交天线UHF信号入射角与方位角、俯仰角的几何关系,推导得到方位角与俯仰角的计算公式;为了分析时差误差对方位角及俯仰角估计误差的影响,建立了基于蒙特卡罗法的波达方向估计误差仿真模型,进而对放电源位置、阵列尺寸及天线阵列布置对方位角与俯仰角估计准确度的影响进行分析;实验测试了方位角与俯仰角的估计准确度,最后将其应用于现场220 kV变电站的局放检测。分析结果表明,随放电源俯仰角增大,方位角估计准确度降低,俯仰角估计准确度升高;阵列尺寸大于1 m×1 m时,可以获得较高的估计准确度;矩形阵列是波达方向估计的最优阵列型式。实验结果表明,对于尺寸为4 m×2 m的矩形与菱形天线阵,方位角估计误差均<4°,对于尺寸为0.7 m×0.7 m方阵,俯仰角大于20°时其估计误差<10°。

关键词: 敞开式变电站; 特高频; 天线阵列; 时差法; 定位

Localization of Partial Discharge Signals Based on Ultra-high-frequency Antenna Array and Analysis of Influence Factors

XU Yuefeng¹, REN Shuangzan², ZHU Mingxiao³, WU Hao², LIU Jing², LI Yuan³, ZHANG Guanjun³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Corporation, Xi'an 710100, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The movable ultra-high-frequency(UHF)antenna array has been applied to partial discharge(PD)monitoring and localization in air-insulated substation(AIS). Since the antenna array is arranged with small distance, the range of PD source is generally calculated with low-accuracy. This paper presents a direction-of-arrival(DOA)estimation method based on the time difference between antennas. The computation formula of azimuth and elevation angle are derived according to the geometrical relationships between incident angle of UHF signal and azimuth and elevation angles. A simulation model of DOA estimation error based on Monte Carlo method is built to quantify the influence of time difference error. Moreover, the influence of antenna pairs, PD position, distance between antennas and shape of antenna array on DOA accuracy are analyzed. The DOA estimation method is tested with experiments in laboratory. The results indicate that the accuracy of azimuth angle decreases while the accuracy of elevation angle increases when the height of PD source increase. The estimation error of both azimuth and elevation angles decrease when enlarge the distance between antennas. The rectangle array is the optimal configuration for DOA estimation. The estimation error of azimuth angle is less than 4° for rectangle and diamond antenna arrays with size of 4 m×2 m, and the error of elevation angle is less than 10° when it is greater than 20° for rectangle array with size of 0.7 m×0.7 m.

Key words: air-insulated substation; ultra-high-frequency; antenna array; time difference method; localization

0 引言

特高频法(ultra-high-frequency, UHF)在变压器及气体组合绝缘电器等电力设备局部放电(以下简称局放)检测中获得广泛应用^[1-4]。为了实现敞开式变电站全站设备的局放预警,相关学者建立了基于UHF天线阵列的变电站局放巡检与定位系统,利用较少的UHF天线耦合局放辐射的电磁波信号,通过各天线接收信号时间差实现放电源的定位^[5-8]。利用该系统已成功检测变压器及电压互感器等设备的多起放电故障^[7-8]。

通过求解时差方程获得放电源坐标是最直接的定位方法,但时差方程为非线性超定方程组,难以获得显式解,通常采用牛顿拉夫逊迭代法^[5-7]、搜格法及粒子群优化算法等方法求解^[9-16],相关方法计算效率较低。此外,考虑到巡检系统的便携性及可移动性,天线间距一般较小,微小的时差估计误差产生较大的距离计算误差。鉴于此,在假定入射信号为平面波的基础上,Moore P. J.等提出利用干涉仪原理计算入射方位角的方法,进而通过多个位置方位角的交叉获得放电源的位置^[8]。由于该方法无法求得放电源的俯仰角,文[17]利用两对垂直天线的时差估计方位角与俯仰角,但两对天线不垂直时该方法不可用,且未对影响估计准确度的因素进行分析。

文中针对任意布置的四通道天线阵列的波达方向估计方法开展研究,提出了方位角与俯仰角的计算方法;对天线阵列布置、天线间距、天线对的选择及放电源位置等影响估计准确度的因素进行分析;最后实验测试了估计方法的准确度。

1 波达方向估计方法

与求解时差方程的定位方法类似,波达方向估计包括确定各天线信号之间的时差与方位角、俯仰角计算两步。

1.1 插值互相关法确定时差

文中采用插值互相关法计算天线信号间的时差,首先以2倍噪声水平的阈值近似确定信号起始时刻及时差 ta_{12} ,提取各通道信号起始时刻前后各3 ns的信号,将其作为直线传播的部分信号。之后对该部分信号计算互相关函数,以其最大值对应的时延作为直线传播信号的时差 td_{12} ,对 ta_{12} 及 td_{12} 求和

得到最终时差。当采用的检测设备采样率较低时,采用三次样条法对互相关函数进行插值,可进一步提高时差精度^[14]。

1.2 方位角与俯仰角估计方法

利用一对天线 i, j 估计入射角的示意图见图1,当放电源与天线阵列距离远大于天线间距 D_{ij} 时,入射电磁波可近似为平面波,则入射角 θ_{ij} 可计算为^[8]

$$\theta_{ij} = \arccos\left(\frac{ct_{ij}}{D_{ij}}\right) \quad (1)$$

式(1)中: t_{ij} 为天线 i, j 的时差, $t_{ij}=t_i-t_j$, t_i 为天线 i 的信号到达时刻; c 为电磁波传播速度,即光速。

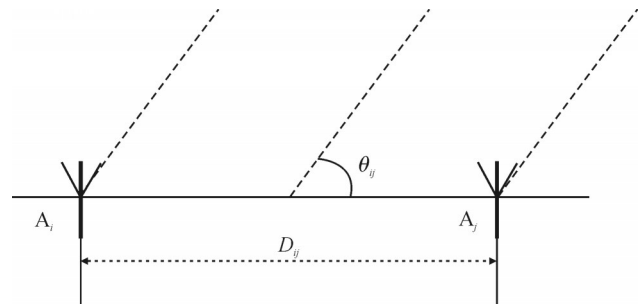
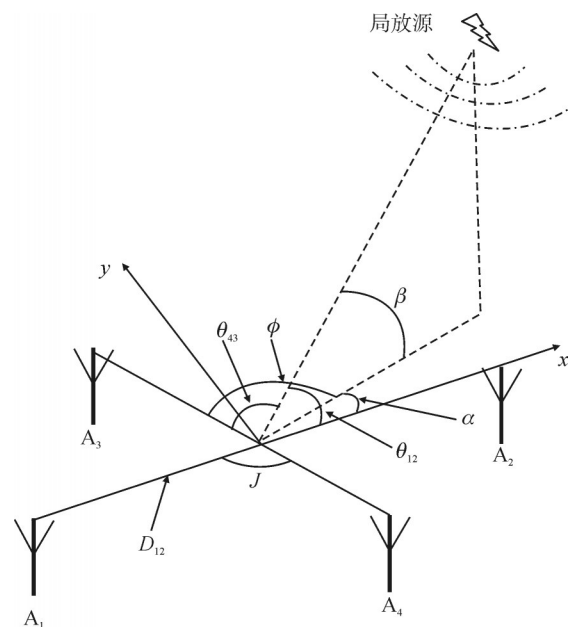


图1 一对天线估计入射角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of incident angle estimation for one pair of antenna

若天线阵列中共采用4个天线,两对天线的夹角为 J ,见图2。



A_k —天线 $k, k=1, 2, 3, 4$ 。

图2 放电源与天线阵列相对位置示意图

Fig. 2 The configuration of antennas and PD source

入射电磁波与天线对1/2及3/4的入射角 θ_{12}, θ_{34} 可由式(2)、(3)表示:

$$\cos \theta_{12} = \frac{ct_{12}}{D_{12}} \quad (2)$$

$$\cos \theta_{43} = \frac{ct_{43}}{D_{43}} \quad (3)$$

根据投影几何关系, 放电源相对 x 轴的方位角 α 及俯仰角 β 满足式(4)

$$\begin{cases} \cos \theta_{12} = \cos \beta \cos \alpha \\ \cos \theta_{43} = \cos \beta \cos \phi = \cos \beta \cos(J - \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

将式(2)、(3)代入式(4)推导可得

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \left[\frac{(D_{12}t_{43}) / (D_{43}t_{12}) - \cos J}{\sin J} \right] \\ \beta = \arccos \left\{ c \sqrt{\frac{[t_{43}/D_{43} - (t_{12} \cos J)/D_{12}]^2}{\sin^2 J} + \left(\frac{t_{12}}{D_{12}}\right)^2} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

特别地, 当两对天线互相垂直时, 方位角与俯仰角可按式(6)计算

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \left(\frac{D_{12}t_{43}}{D_{43}t_{12}} \right) \\ \beta = \arccos \left(c \sqrt{\frac{t_{12}^2}{D_{12}^2} + \frac{t_{43}^2}{D_{43}^2}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

进一步, 可通过时差 t_{12} 与 t_{34} 的符号判断放电源所在象限, 最后将方位角归一化在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围内。

1.3 不同天线阵列布置下波达方向估计

为了监测全站电力设备的局放, 天线阵列通常安装在可移动平台上, 在巡检通道内移动检测局放信号。考虑到巡检通道为长条形, 设计了菱形、矩形与 Y 形 3 种天线阵列分布, 见图 3。 a 、 b 为阵列长度与宽度, 定义宽长比 $h=b/a$ 。

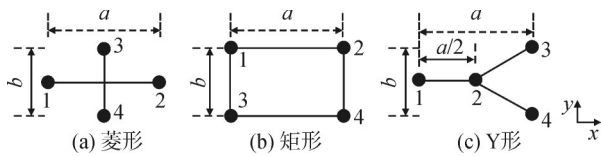


图3 菱形、矩形与 Y 形天线阵列

Fig. 3 The diamond, rectangle and Y-shape antenna array

以下针对 3 种阵列详述方位角与俯仰角估计算法, 横坐标 x 均沿水平方向。菱形与 Y 形阵列中天线对 1/2 与 3/4 互相垂直, 方位角与俯仰角可直接由式(6)求得。若 $t_{12} > 0$ 且 $t_{34} < 0$, 则放电源位于第一象限, 其他情况可类推得到。

对矩形阵列, 可选取相交的任意两对天线估计波达方向, 此处以天线对 1/4 与 2/3 加以说明, 两对天线的夹角为

$$J = 2 \arctan(b/a) \quad (7)$$

两对天线的天线间距均为

$$D = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (8)$$

根据式(5)与坐标系旋转得到方位角与俯仰角为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \left(\frac{t_{32}/t_{14} - \cos J}{\sin J} \right) - J/2 \\ \beta = \arccos \left\{ c \sqrt{\frac{[t_{32}/D - (t_{14} \cos J)/D]^2}{\sin^2 J} + \left(\frac{t_{14}}{D}\right)^2} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

通过以下变换可将 α 转换到 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围: 若 $\alpha > 0$ 且 $t_{23} > 0$, $\alpha = \alpha - 180^\circ$; 若 $\alpha < 0$ 且 $t_{14} < 0$, $\alpha = \alpha + 180^\circ$; 其余情况不变。

2 影响波达方向估计准确度的因素

放电源定位准确度受时差估计误差(与噪声水平、信号强度及估计算法准确度等因素有关)及天线布置误差影响, 可通过尽量精确的测量减小天线布置误差的影响, 但时差估计误差是无法消除的、影响定位准确度的主要因素。研究表明, 在视距模型下即放电源与天线之间为直线传播时, 时差估计误差满足标准正态分布^[18]。

2.1 波达方向估计误差仿真模型

为了分析时差估计误差对方位角及俯仰角估计误差的影响, 建立了基于蒙特卡罗法的波达方向估计误差仿真模型: ①设定放电源与天线阵列中心的水平距离 r 与其俯仰角 β , 将范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 的方位角 α 以 2° 为间隔均匀剖分, 进而得到各节点的坐标 $(r \cos \alpha, r \sin \alpha, r \tan \beta)$; ②将每个剖分节点作为放电源位置, 根据剖分节点与各天线坐标 $(x_i, y_i, 0)$ 的距离计算各天线接收 UHF 信号的理论时间差, 并随机添加标准差为 σ_n 的标准正态分布的时差误差, 利用前述波达方向估计方法求得方位角与俯仰角, 进而与实际角度求差值得到估计误差; ③对每个节点, 采用蒙特卡罗法统计计算 N_m 次, 计算 N_m 次统计的角度估计误差的平均值, 绘制方位角与俯仰角估计误差随方位角的变化曲线。仿真中时差标准差 $\sigma_n = 0.2 \text{ ns}$ 、 $N_m = 1000$, 俯仰角仿真时仅考虑 $z > 0$ 的情况。

2.2 放电源位置

采用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的方阵, 设置放电源半径为 10 m , 仿真得到不同方位角与俯仰角下的估计误差分布见图 4。分析结果可知, 方位角与俯仰角误差不随方位角变化, 原因为此时阵列为圆阵; 随俯仰角 β 增大, 方位角的估计误差逐渐增大, 在 $\beta < 60^\circ$ 时方位角估计平均误差 $< 4^\circ$, β 继续增大后方位角估计误差迅速增加; 随俯仰角 β 增大, 其估计误差减小, 在

$\beta > 40^\circ$ 时其估计平均误差 $< 3^\circ$ 。可见,在方位角误差较小时俯仰角误差较大,说明两者存在矛盾关系。此外,仿真表明,波达方向估计误差与放电源半径 r 无关。

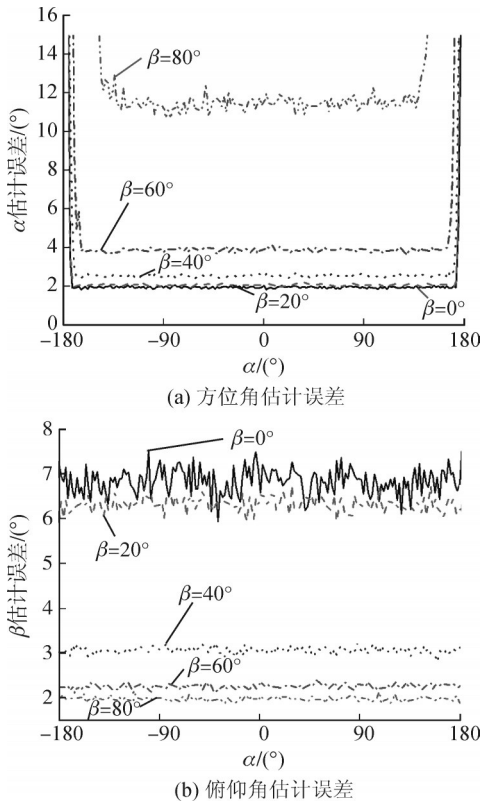


图4 放电源位于不同位置时估计误差分布

Fig. 4 The DOA error for PD sources in different positions

2.3 阵列尺寸与宽长比

仿真采用菱形天线阵,设置放电源半径为10 m、俯仰角为 30° 。首先保持阵列的宽长比为1,改变天线阵长度,得到不同天线长度 a 下估计平均误差分布见图5。从图5可以看出,随阵列尺寸的增加,方位角与俯仰角估计误差同时减小;当阵列尺寸为1 m \times 1 m时,可以达到满意的估计准确度,此时方位角与俯仰角误差分别约为 3° 、 6° 。

仿真中阵列长度固定为1 m,依次改变宽长比 h 为1、0.75、0.5、0.25。从图6可见,当 $h \neq 1$ 时,方位角与俯仰角估计误差均与方位角有关,此时波达方向估计精度具有方向性;长度不变时,降低宽长比使方位角与俯仰角估计误差同时增加,此时最小估计误差与 $h=1$ 时误差相同。

2.4 天线阵列布置方式

针对菱形、矩形与Y形3种天线阵列,仿真得到方位角与俯仰角估计误差见图7,其中菱形与Y形采用天线对1/2与3/4、矩形采用天线对1/4与2/3。仿真中阵列尺寸为 $a \times b = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。

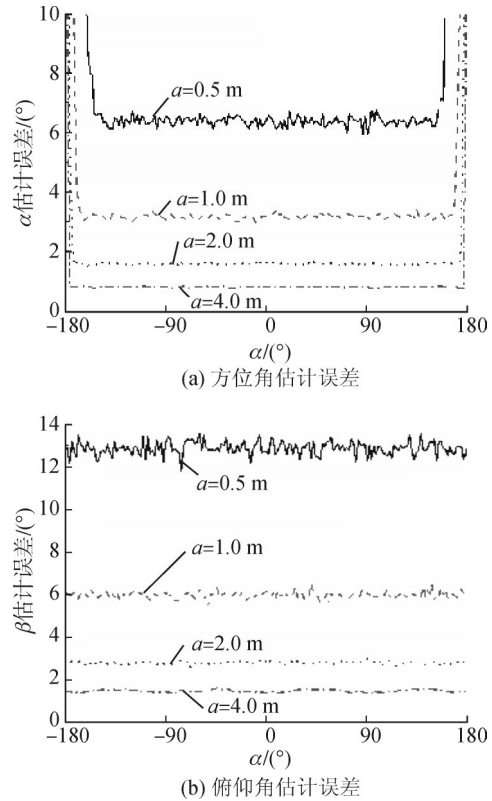


图5 天线尺寸对波达方向估计误差的影响

Fig. 5 Influence of array size on DOA estimation error

不同宽长比下的波达方向估计误差对比见图6。

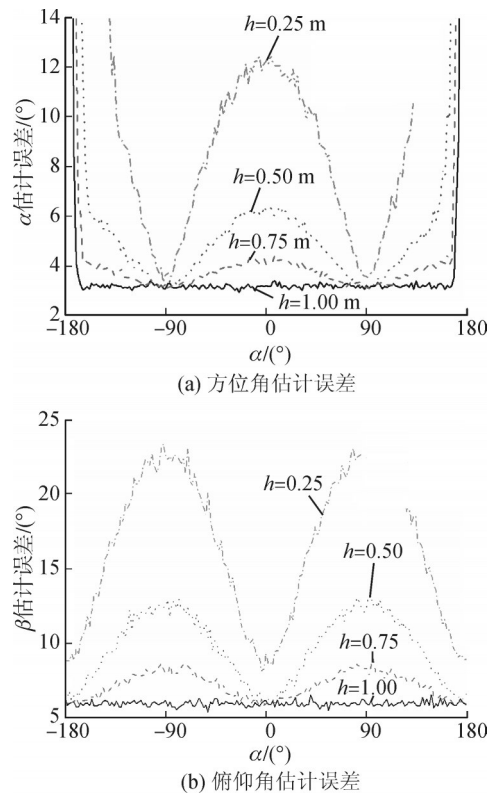


图6 阵列宽长比对波达方向估计误差的影响

Fig. 6 Influence of aspect-ratio on DOA estimation error.

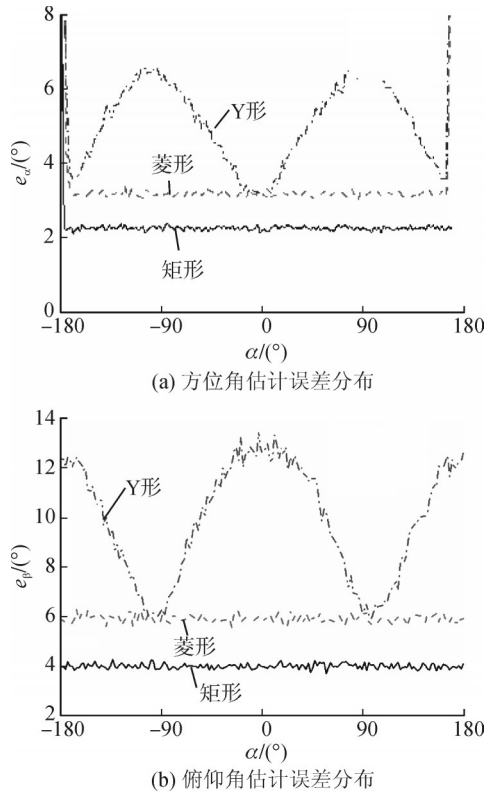


图7 不同天线阵列布置的方位角与俯仰角误差分布

Fig. 7 DOA estimation error of different antenna arrays

方位角与俯仰角估计误差由小到大的阵列排序依次为: 矩形 < 菱形 < Y形。Y形阵列估计准确度存在方向性, 方位角在 -90° 与 90° 处准确度最高, 俯仰角 0° 与 $-180^\circ/180^\circ$ 准确度最高, 分别位于距离最大天线对 $1/2$ 的法线处与延长线处。Y形阵列误差最小值与菱形阵误差相同, 这是由于天线对 $1/2$ 间距与菱形阵列中两对天线间距相同, 均为 1 m ; 而矩形阵列中两对天线的间距均为 $\sqrt{2}\text{ m}$, 大于菱形阵列天线间距(1 m), 因此其估计准确度最高。综上所述, 天线间距是不同天线阵列布置下估计准确度不同的主要因素。天线阵列优化时一般将其限定在矩形或圆形区域内, 在两种情况下矩形天线阵的两对对角线天线都具有最大的间距, 因此是波达方向估计的最优布置方式。

3 实验测试

3.1 实验系统

为了测试方位角与俯仰角估计的准确性, 建立了局放检测与定位实验系统, 包括局放模拟器、天线阵列、等长度同轴电缆、信号调理电路及采集与分析单元。天线结构为双锥式, 具有全向检测性能, 使用矢量网络分析仪实测在检测带宽 $300\text{ MHz} \sim 2\text{ GHz}$ 内驻波比基本小于 2 。信号调理电路对采

集的UHF信号放大 24 dB 。信号采集系统由两块同步数据采集卡组成, 信号采样率为 2.5 GS/s 。开发了信号采集与分析软件, 利用前述算法估计UHF信号波达方向。

文中共开展了两组不同的实验。实验1中, 天线阵列采用菱形、矩形与Y形布置方式, 阵列尺寸均为 $a \times b = 4\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。在天线阵列周围多个位置依次放置局放模拟器, 其与天线在同一水平面上, 与阵列中心距离均为 7 m , 见图8。实验2中, 采用尺寸为 $0.7\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ 的方阵, 在方位角为 -90° 方向、距离天线阵中心 1.95 m 处不同高度的多个位置依次放置局放模拟器。实验中选取与天线阵列距离较近的放电位置, 并不完全满足“入射电磁波可近似为平面波”的假设, 但若此时定位准确度较高, 远距离放电的准确度有望进一步提高。每个位置检测约 150 组局放信号, 以所有信号估计结果中出现概率最高位置为最终方位角 α_e 与俯仰角 β_e , 定义估计误差为

$$e_\alpha = |\alpha_e - \alpha_r| \quad (10)$$

式(10)中, α_r 为实际方位角。

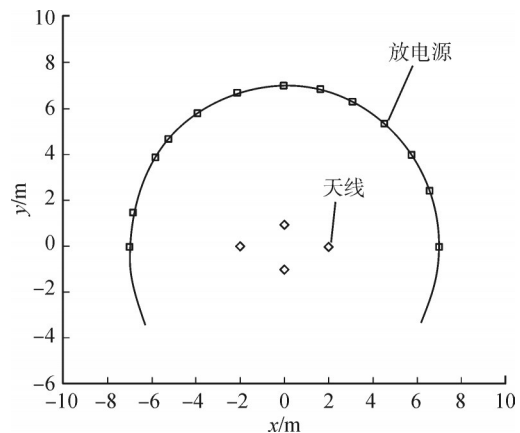


图8 局放检测与定位实验布置

Fig. 8 Experimental setup for PD detection and localization

局放模拟器通过升压电路持续激发间隙放电, 测得一次典型放电信号的波形见图9。从图9可见, 信号频谱主要集中在 $300 \sim 800\text{ MHz}$, 符合典型局放信号的特征。

3.2 方位角估计准确度测试

采用实验1测试方位角估计的准确度, 各种天线阵列下的方位角估计误差见图10。从图10可以看出, 矩形与菱形阵列具有较高的方位角估计准确度, 误差均在 4° 以下; Y形阵列方位角估计误差较大, 最高可到约 10° , 且具有较强的定位方向性。矩形阵列的方位角估计准确度整体最高, 与2.4节仿真结果一致。

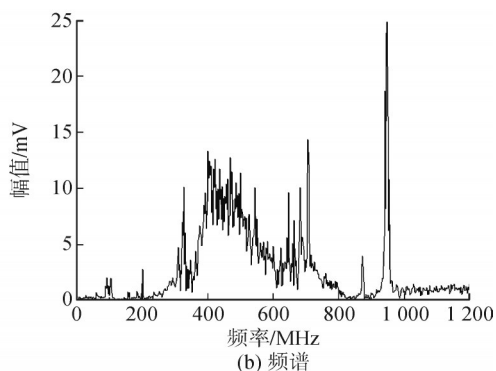
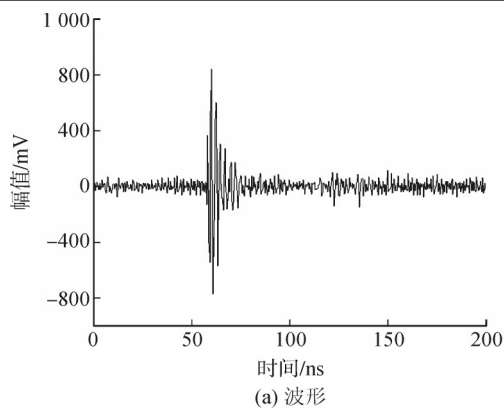


图9 检测信号的波形与频谱

Fig. 9 Waveform and spectrum of detected signal

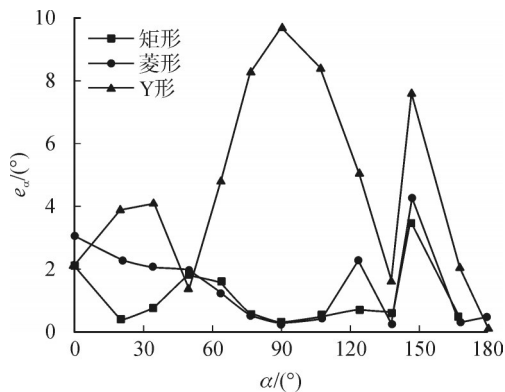


图10 不同阵列下方方位角估计误差

Fig. 10 Azimuth angle error of different arrays

各位置方位角估计结果分布图见图11,图11中方形点为各信号的估计结果,半径按实际7 m绘制,颜色灰色表征散点的密度,三角形点为放电源实际位置。可以看出,在所有位置下,方位角估计结果分散度均较小,最大与最小结果范围一般在4°以下,说明波达方向估计方法具有较高的稳定性。

3.3 俯仰角估计准确度测试

采用实验2同时考察方位角与俯仰角的估计准确度,得到方位角与俯仰角估计结果见表1,表1中结果为所有信号结果的最高概率点对应方位角与俯仰角。

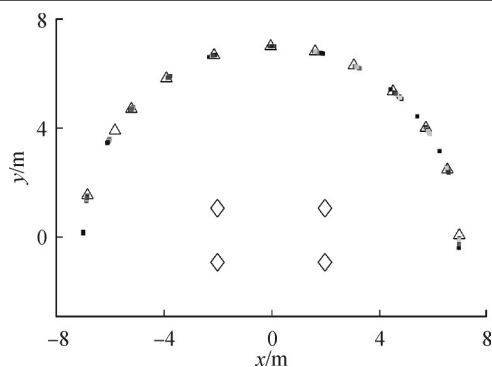


图11 矩形阵列的方位角估计分布图

Fig. 11 Distribution of azimuth angle estimated with rectangle array

表1 估计俯仰角与真实俯仰角对比结果

Table 1 Estimated error of elevation angle (°)

| 序号 | 真实俯仰角 | 估计方位角 | 估计俯仰角 | 俯仰角误差 |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.0 | -90.9 | 23.2 | 23.2 |
| 2 | 18.4 | -88.4 | 27.6 | 9.2 |
| 3 | 21.5 | -88.8 | 29.6 | 8.1 |
| 4 | 30.7 | -89.7 | 36.9 | 6.2 |
| 5 | 37.2 | -89.2 | 42.1 | 4.9 |
| 6 | 40.7 | -89.4 | 46.1 | 5.4 |

从分析结果可知,随着俯仰角增大,其估计误差呈现减小趋势,与2.2节仿真结果一致;当俯仰角为0°时估计误差较大达23.2°,当俯仰角增高至20°以上时估计误差减小至<10°;为了降低俯仰角估计误差,可增大天线阵列尺寸。方位角估计准确度仍非常高,最大误差<2°。位置6的方位角与俯仰角估计结果统计图见图12,由于天线阵列间距仅为0.7 m,方位角与俯仰角估计结果分散度较4 m×2 m尺寸下增大,最大分散度约为10°。

需要说明的是,尽管基于移动式UHF天线阵列的变电站局放检测系统已在现场发现部分潜在放电故障,但电力设备内部放电辐射的UHF电磁波需经非金属部件泄漏至外部空间,且在变电站空间中传播时受到大地、电力设备等障碍物影响发生衰减,因此只能检测外部放电、敞开式设备内部放电及金属封闭设备内部靠近套管或绝缘子等非金属部件的较剧烈放电。此外,为了获得更高的检测灵敏度,一般要求天线下限检测频率高于100 MHz,上限检测频率高于1 000 MHz,在检测带宽内天线驻波比小于3,且需要加入滤波、放大等信号调理环节^[19-21]。

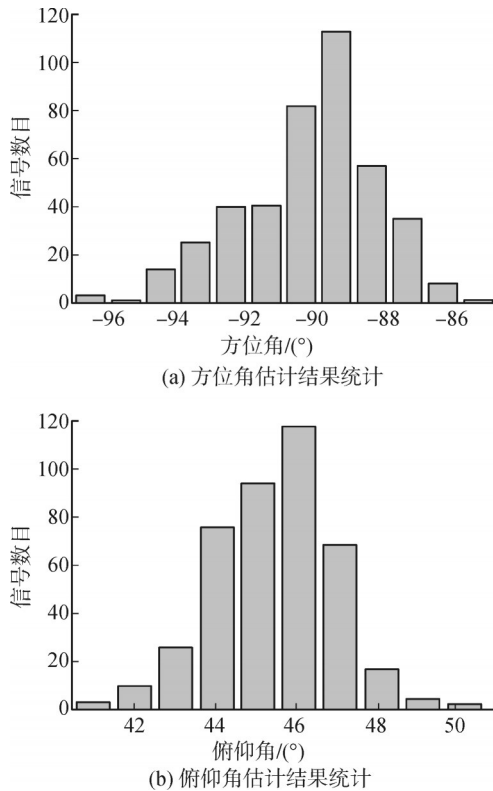


图12 位置6方位角与俯仰角估计结果统计

Fig. 12 Statistical chart of estimated azimuth and elevation angles for position 6

4 结论

利用两对相交天线 UHF 信号入射角与方位角、俯仰角的几何关系,文中推导了方位角与俯仰角的计算公式;在实验室内测试了估计方法的准确度。得到以下结论:

1)方位角与俯仰角估计准确度存在矛盾关系,即在方位角误差较小时俯仰角误差较大,反之亦然。

2)随放电源俯仰角增大,方位角估计准确度降低,俯仰角估计准确度升高。随阵列尺寸增大,方位角与俯仰角估计误差同时减小;当阵列尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 时,可以达到满意的估计准确度。

3)矩形天线阵的两对对角线天线具有最大的间距,是波达方向估计的最优阵列型式。

4)实验测试结果表明,对尺寸为 $4\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的矩形与菱形天线阵,方位角估计误差 $< 4^\circ$,对尺寸为 $0.7\text{ m}\times 0.7\text{ m}$ 方阵,俯仰角大于 20° 时其估计误差 $< 10^\circ$ 。

参考文献:

[1] OKABE S, UETA G, HAMA H, et al. New aspects of UHF

PD diagnostics on gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2245-2258.

[2] TENBOHLEN S, DENISSOV D, HOEK S M, et al. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1544-1552.

[3] 赵林杰, 季洪鑫, 齐波, 等. $\pm 800\text{ kV}$ 换流变压器局部放电干扰的旁路监测[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 864-872.

ZHAO Linjie, JI Hongxin, QI Bo, et al. Bypass monitoring for PD interferences of $\pm 800\text{ kV}$ converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 864-872.

[4] 黄亮, 唐炬, 凌超, 等. 基于多特征信息融合技术的局部放电模式识别研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 947-955.

HUANG Liang, TANG Ju, LING Chao, et al. Pattern recognition for partial discharge based on multi-feature fusion technology[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 947-955.

[5] TUNGKANAWANICH A, KAWASAKI Z I, ABE J, et al. Location of partial discharge source on distribution line by measuring emitted pulse-train electromagnetic waves[C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 2453-2458.

[6] TUNGKANAWANICH A, KAWASAKI Z I, MATSUURA K. Location of multiple PD sources on distribution lines by measuring emitted pulse-train electromagnetic waves [J]. IEEE Transactions on Power & Energy, 2000(120): 1431-1436.

[7] MOORE P J, PORTUGUES I E, GLOVER I A. Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2264-2272.

[8] PORTUGUES I E, MOORE P J, GLOVER I A, et al. RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 20-29.

[9] 侯慧娟, 盛戈皞, 白万建, 等. 基于电磁波阵列信号处理和波达方向分析的变电站局部放电定位[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2692-2698.

HOU Huijuan, SHENG Gehao, BAI Wanjian, et al. Partial discharge location in substation based on electromagnetic array signal processing and direction of arrival[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2692-2698.

[10] 汤林, 胡岳, 王红斌, 等. 基于插值相关法的局部放电特高频脉冲信号时延估计[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3320-3325.

TANG Lin, HU Yue, WANG Hongbin, et al. Time-delay estimation of partial discharge UHF pulse signals based on

- interpolation cross - relation algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3320-3325.
- [11] 胡岳, 王红斌, 汤林, 等. 基于UHF天线阵列的变电站局部放电全站监测研究与实践[J]. 电工技术学报, 2014, 29(s1): 502-509.
HU Yue, WANG Hongbin, TANG Lin, et al. Research and practice of partial discharge online monitoring and locating for substation using UHF sensor array[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(s1): 502-509.
- [12] 侯慧娟, 盛戈皞, 姜文娟, 等. 基于信号模型参数辨识的变电站局部放电电磁波信号重构[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 209-216.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, JIANG Wenjuan, et al. Signal reconstruction for partial discharge electromagnetic wave in substation based on signal model parameters identification[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 209-216.
- [13] 姚陈果, 周电波, 陈攀, 等. 采用超高频法监测变电站设备局放水平及其早期预警[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1670-1676.
YAO Chenguo, ZHOU Dianbo, CHEN Pan, et al. UHF-based monitoring for equipment PD within the substation and early warning[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1670-1676.
- [14] ZHU Mingxiao, WANG Yanbo, LIU Qing, et al. Localization of multiple partial discharge sources in air - insulated substation using probability - based algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 157-166.
- [15] TANG Zhiguo, LI Chengrong, CHENG Xu, et al. Partial discharge location in power transformers using wideband RF detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(6): 1193-1199.
- [16] ZHENG Shusheng, LI Chengrong, TANG Zhiguo, et al. Location of PDs inside transformer windings using UHF methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 386-393.
- [17] TIAN Y, TATEMATSU A, TANABE K, et al. Development of locating system of pulsed electromagnetic interference source based on advanced TDOA estimation method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6): 1326-1334.
- [18] HO K C, VICENTE L M. Sensor allocation for source localization with decoupled range and bearing estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(12): 5773-5789.
- [19] 基于天线阵列的变电站内放电点检测与定位导则: T/CSEE/Z 0028—2017[S]. 2017.
Guide for discharge detection and location based on antenna array in substation: T/CSEE/Z 0028—2017 [S]. 2017.
- [20] 朱明晓. 基于特高频天线阵列的变电站站域局部放电检测与定位技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
ZHU Mingxiao. Detection and localization of partial discharges in substation space based on ultra-high-frequency antenna array[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2017.
- [21] LI Pengfei, ZHOU Wenjun, YANG Shuai, et al. A novel method for separating and locating multiple partial discharge sources in a substation[J]. Sensors, 2017, 17(2): 247.

徐越峰(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事继电保护、变电运维检修管理及安全监督管理工作。