DOI：10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180859

基于最大似然估计的变电站特高频局部放电定向方法

周　南　罗林根　宋　辉　盛戈皞　江秀臣

（上海交通大学电气工程系　上海　200240）

摘要　局部放电是电力设备绝缘劣化的早期征兆，其准确检测对电力设备安全稳定运行有重要意义。现有研究侧重于对局部放电脉冲波形进行分析与处理，来解决变电站现场局部放电信号信噪比低、易受干扰的问题，从而提高定向准确度。该文将局部放电定向问题转换为统计分析问题，利用概率统计中的最大似然估计法实现了低信噪比环境下的特高频局部放电准确定向。仿真分析计算及变电站电气试验结果证明，该方法能提高局部放电定向精度，特别是在干扰较多、信噪比较低的变电站环境下（信噪比约 5 dB），定向精度高于传统多信号分类（MUSIC）算法约 20%。该文为利用概率统计方法解决局部放电定向问题提供了新思路。

关键词：局部放电　特高频　概率密度　最大似然估计　定向

中图分类号：TM85

A Substation UHF Partial Discharge Directional of Arrival Estimation Method Based on Maximum Likelihood Estimation

Zhou Nan　Luo Lingen　Song Hui　Sheng Gehao　Jiang Xiuchen

（Department of Electrical Engineering　Shanghai Jiao Tong University　Shanghai 200240　China）

Abstract　Partial discharge (PD) is one of the causes of insulation degradation in electrical equipment. Accurate detection of partial discharge is of great significance to the safety and stability of electrical equipment. The existing research focuses on the analysis and processing of the partial discharge pulse waveform, trying to solve the problem of low signal to noise ratio (SNR) and susceptibility to interference, thereby improving the directional of arrival (DOA) estimation accuracy. In this paper, the problem of PD detection is transferred into a statistical analysis problem. The maximum likelihood estimation method is utilized to solve the problem of ultra-high frequency PD DOA estimation. Simulation analysis and field electrical experiment results showed that the method can improve the accuracy of DOA estimation, especially in substation environment where SNR=5dB. The estimation accuracy of the proposed method increased 20% compared to the traditional MUSIC algorithm. This paper provides a new perspective for solving the PD detection problem by using probability statistics method.

Keywords： Partial discharge, ultra-high frequency, probability density, maximum likelihood estimation, direction of arrival estimation

国家重点研发计划（2017YFB0902705）和 2016 年国网公司科技项目（基于特高频无线传感技术的变电站局放在线监测和定位关键技术研究）资助。

收稿日期 2018-05-16　改稿日期 2018-06-15

0 引言

电力设备绝缘介质部分区域发生放电，但整体尚未完全击穿的现象称为局部放电，是造成设备绝缘劣化的重要原因之一[1,2]。有效的局部放电检测与定位对电力设备的安全稳定运行有重要意义[3,4]。

局部放电的放电量随机变化，其信号容易受到噪声干扰，导致采集到的局部放电信号不稳定、随机性很强[5]，使得传统的定向方法在局部放电定位中限制较多且精度有限。现有的局部放电定位方法可分为两类：基于信号时差（Time Difference of Arrival, TDOA）的方法和基于空间谱的定向方法。TDOA 方法根据不同传感器接收同一信号的时间差进行定位，定位精度取决于时差计算精度。由于变电站环境中的噪声会干扰信号时差计算[6]，导致该方法在现场环境中定位误差较大甚至无法定位。基于空间谱的定向方法以多信号分类（Multiple Signal Classification, MUSIC）算法为代表，该方法基于信号子空间与噪声子空间的正交性进行定向[7]。当信噪比低于 5 dB 时噪声会破坏其正交性，导致在变电站环境中 MUSIC 算法定向精度较低[8]。

现有研究着重分析局部放电脉冲波形特点，利用各类信号处理算法提升定位精度的思路。而本文将局部放电定向问题转换为统计分析问题，利用概率统计中最大似然估计法[9]，实现低信噪比时基于特高频信号的局部放电精确定向。在推导局部放电概率密度函数的基础上，构建局部放电信号似然函数，并通过求取似然函数最大值得到局部放电源的方向角（Direction of Arrival, DOA）。该方法无需计算信号时差，且算法简洁高效便于实际应用。仿真分析及变电站现场试验证明本文方法能显著提升局部放电定向精度。特别地，在信噪比为 5 dB、噪声干扰较大的变电站环境下性能良好，定向精度高于传统 MUSIC 算法约 20%。该方法为利用概率方法解决特高频局部放电检测问题提供了新思路。

1 基于似然函数的局部放电定向方法

1.1 特高频局部放电信号数学模型

设特高频天线由 M 个传感器线性排列组成，传感器间隔均为 d，天线采集获得的局部放电信号为 $\boldsymbol{y}(t)$，其信号模型为[10]

$$\boldsymbol{y}(t)=\boldsymbol{a}(\theta)\times\boldsymbol{s}(t)+\boldsymbol{v}(t) \tag{1}$$

式中，t 为采样点；$\boldsymbol{a}(\theta)$为信号导向矢量，θ为局部放电方向角；$\boldsymbol{s}(t)$为信号源矢量，包含信号的幅值信息；$\boldsymbol{v}(t)$ 表示期望为 0、方差为σ^2 的正态分布信号噪声。

$$\boldsymbol{a}(\theta)=\left[1,\mathrm{e}^{-\frac{2\pi}{f}d\sin\theta},\cdots,\mathrm{e}^{-\frac{2\pi}{f}(M-1)d\sin\theta}\right]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中，f 为信号波长。

1.2 局部放电信号概率分布

从统计学角度分析式（1），局部放电信号模型 $\boldsymbol{y}(t)$由期望非 0 的信号部分 $\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t)$与期望为 0、方差为$\sigma^2$ 的正态噪声 $\boldsymbol{v}(t)$共同构成。因此，$\boldsymbol{y}(t)$服从期望为 $\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t)$、方差为$\sigma^2$ 的正态分布，即满足

$$E[\boldsymbol{y}(t)]=\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t) \tag{3}$$

$$\mathrm{var}[\boldsymbol{y}(t)]=\boldsymbol{I}\sigma^2 \tag{4}$$

式中，$E[\cdot]$表示数学期望；$\mathrm{var}[\cdot]$表示方差；$\boldsymbol{I}$ 为数值均为 1 的单位向量。

若某随机变量服从数学期望为μ、方差为σ^2 的正态分布，则其概率密度函数 $f(x)$可表示为[11]

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{5}$$

将式（3）及式（4）代入式（5），则特高频局部放电信号的概率密度函数可表示为

$$f(\boldsymbol{y}(t))=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(\boldsymbol{y}(t)-\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t))^2}{2\sigma^2}\right] \tag{6}$$

1.3 信号似然函数的构建

基于最大似然估计的定向方法基本思想为：在已经利用特高频天线多次测量获得局部放电信号样本 $\boldsymbol{Y}=[\boldsymbol{y}_1,\cdots,\boldsymbol{y}_n]$的情况下，应该寻找使这个结果出现的可能性最大的$\theta$作为方向角估计值，即局部放电的定向结果。其具体方法是根据式（6）的概率密度函数构建信号似然函数 $L(\theta)$，并求其最大值对应的方向角θ。

若从一期望与方差均未知的正态分布 $N(\mu_x,\sigma_x^2)$中抽取 n 个样本$[x_1,\cdots,x_n]$，则该样本对未知参数(μ_x,σ_x^2)的联合概率密度可表示为[12]

$$L(\mu_x,\sigma_x^2)=\prod_{i=1}^{n}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\exp\frac{(x_i-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} \tag{7}$$

对于局部放电信号，其样本 $\boldsymbol{Y}$ 可通过特高频天线测量获得，则该样本对未知参数(θ,σ^2)的概率密度可通过将式（3）和式（4）代入式（7）获得。对

式（7）取自然对数，$\|\cdot\|$表示欧式范数，则可得局部放电信号似然函数为

$$L(\theta,\sigma^2)=\frac{-n}{2}\ln(2\pi\sigma^2)-\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{i=1}^{n}\left\|\boldsymbol{y}_i-\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t)\right\|^2 \quad (8)$$

$L(\theta,\sigma^2)$的实际意义是：在测得局部放电信号样本为 $\boldsymbol{Y}$ 的情况下，局部放电入射角为θ、噪声大小为σ^2 的概率，则式（8）的最大值所对应的θ即为局部放电最大概率处的方向角，因此局部放电的定向实际上是通过对式（8）求最大值实现。

1.4　局部放电方向角测量

为求取极大值，对似然函数 $L(\theta,\sigma^2)$求σ^2 的偏导数并置零，可得

$$0=\frac{-n}{4\pi\sigma^2}+\frac{1}{2\sigma^4}\sum_{i=1}^{n}\left\|\boldsymbol{y}_i-\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t)\right\|^2 \quad (9)$$

解式（9）得噪声方差σ^2 的估计值为

$$\sigma^2=\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\boldsymbol{y}_i-\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t)\right\|^2 \quad (10)$$

将式（10）代入式（8），忽略常数项并化简，方向角θ的测量问题可转换为式（11）的极值问题。

$$\max_{\theta}\left[-n\cdot\ln\left(\frac{\pi}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\boldsymbol{y}_i-\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t)\right\|^2\right)\right] \quad (11)$$

根据对数函数单调性，式（11）可等效为

$$\min_{\theta}\sum_{i=1}^{n}\left\|\boldsymbol{y}_i-\boldsymbol{a}(\theta)\boldsymbol{s}(t)\right\|^2 \quad (12)$$

利用类似的方法，固定θ对 $\boldsymbol{s}(t)$进行估计，并代回式（12）中，最终的似然函数可表示为

$$L(\theta)=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{y}_i^{\mathrm{H}}\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{a}(\theta)}\boldsymbol{y}_i=\mathrm{tr}\left(\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{a}(\theta)}\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{y}_i\boldsymbol{y}_i^{\mathrm{H}}\right) \quad (13)$$

式中，$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{a}(\theta)}$ 为投影算子，$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{a}(\theta)}=\boldsymbol{a}(\theta)[\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{a}(\theta)]^{-1}\times\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)$，$(\cdot)^{\mathrm{H}}$表示共轭，$[\cdot]^{-1}$表示矩阵逆；$\mathrm{tr}(\cdot)$表示矩阵的迹。定义局部放电信号协方差矩阵 $\boldsymbol{R}=(1/n)\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{y}_i\boldsymbol{y}_i^{\mathrm{H}}$，则局部放电方向角的 DOA 估计表达式为

$$\theta=\arg\max_{\theta}(\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{a}(\theta)}\boldsymbol{R})) \quad (14)$$

式中，$\arg\max(\cdot)$表示使函数取最大值时变量θ的值。

1.5　计算复杂度分析

设天线有 M 个阵元，进行 n 次快拍采样，信号源的数量为 p，特征分解的迭代次数为 r，谱峰搜索步长为 S。

最大似然估计法使用轮流投影的迭代方法进行求解[13]，协方差矩阵的计算量为 nM^2 次复数乘法（Complex Multiplication, CM），每次迭代的计算量为$(3/2+M)Mp(p-1)^2+3M^2/2+M+2M^3$。谱峰搜索范围是$[-\pi/2,\pi/2]$，共需要 $180/S+1$ 步。最大似然估计法计算量约为$(180/S+1)[(1+r)(3M^2/2+2M^3)+nM^2]$。

相同条件下，MUSIC 算法的协方差矩阵构造共需要 nM^2 次 CM，特征分解一次迭代的计算量为 M^3，谱峰搜索的运算量为$(180/S+1)[2M(M-p)+M]$。因此在上述相同条件下，MUSIC 算法的计算量大致为$(180/S+1)[r(2M^2+M^3)+nM^2]$。

在典型的局部放电定向应用环境中，天线阵元约为 4~9 个，快拍数为 2 048，设谱峰搜索的步长为 1°，则最大似然估计法的计算复杂度约为 MUSIC 算法 2 倍。由于局部放电检测中，相对计算量问题更加注重算法定向的准确度，因此上述计算量的增加作为算法精度提升的代价应在接受范围内。

2　仿真及结果分析

2.1　仿真步骤

为验证上述方法可行性，本文利用仿真计算对局部放电源方向角进行定向测试，具体仿真条件及步骤如下：

1）局部放电仿真信号

仿真试验中采用局部放电双指数模型[14]对信号进行模拟，设信号为 $\boldsymbol{y}_{\mathrm{s}}(t)$，则

$$\boldsymbol{y}_{\mathrm{s}}(t)=A[\mathrm{e}^{-1.3(t-t_0)/\tau}-\mathrm{e}^{-2.2(t-t_0)/\tau}]\sin(2\pi f_{\mathrm{c}}t+\theta_0) \quad (15)$$

式中，A 为局部放电信号幅值；τ为衰减常数；f_{c} 为局部放电信号中心频率；t_0 为时间初值，可用于调整局部放电源与天线间的距离；θ_0 为相位初值，用于调整局部放电与天线间的方向角，局部放电仿真时域信号及频谱如图 1 所示。

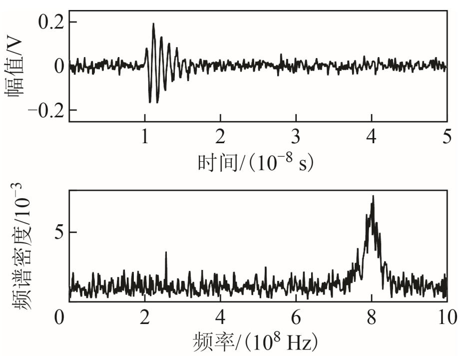


图 1　局部放电仿真时域信号及频谱

Fig.1　The simulated partial discharge signal in time domain and frequency domain

参照3.2节变电站现场特高频信号，设局部放电信号中心频率为 800 MHz。设特高频天线阵元数为 4，局

部放电入射方向角为−30°。在信号中引入信噪比为 5 dB 高斯噪声。设备采样频率设为 2 GS/s，以 2 048 的采样快拍数（即信号长度）对信号进行同步采样。

2）投影算子及协方差矩阵构造

按照式（2）及 1.4 节所示，构造投影算子 $\boldsymbol{P}_{a(\theta)}$，其中方向角$\theta$应选取为向量形式，取值范围及取值精度应按照定向精度要求。按照 1.4 节计算采样获得的局部放电信号协方差矩阵 $\boldsymbol{R}$。

3）似然函数构造及 DOA 估计

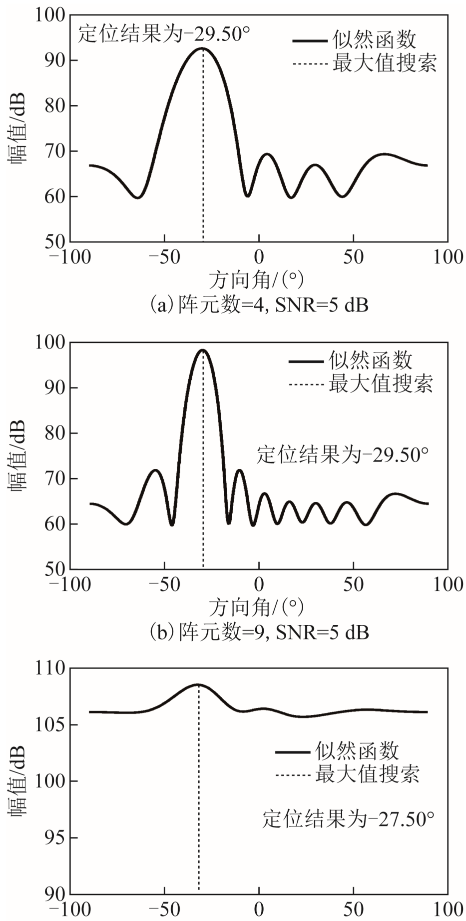
按照式（14）所示构造似然函数，即

$$L(\theta)=\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{a(\theta)}\boldsymbol{R}) \tag{16}$$

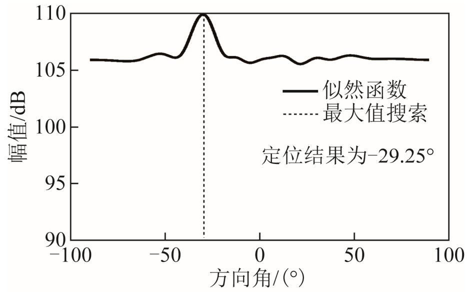
对似然函数求最大值，将最大值对应的θ作为局部放电 DOA 估计的结果。

2.2 仿真结果及分析

图 2a、图 2b 为在不同阵元数、相同信噪比情况下的定向结果。在噪声干扰较小，即信噪比较高的情况下，似然函数值在信号源方向角处显示出明显的峰值，利用最大值搜索便可较为清晰地估计出信号的入射方向。



(a) 阵元数=4, SNR=5 dB
(b) 阵元数=9, SNR=5 dB
(c) 阵元数=4, SNR=−5 dB



(d) 阵元数=9, SNR=−5 dB

图 2 不同阵元数及信噪比情况下定向结果

Fig.2 The DOA estimation results under different conditions of sensor numbers and SNR

根据仿真结果可知，随着阵元数的增加，信号波束主瓣的宽度减小，由于定向算法的方向分辨能力与波束主瓣宽度呈反比[15]，因此信号源的分辨能力也有所提升。图 2c、图 2d 是 SNR=−5 dB 时最大似然估计法的定向结果，可知增加的噪声使得波束旁瓣与主瓣的幅值差距变小，且旁瓣几乎消失，这表示在噪声影响下算法对于信号的分辨能力有所下降。SNR=−5 dB 意味着噪声有效值约为信号有效值的 2 倍，实际应用中噪声如此大时算法已经失效，此处用于展示噪声影响。

2.3 算法性能分析

为进一步说明最大似然估计法的定向性能，对算法定向成功率、信号信噪比、天线阵元数之间的关系进行仿真计算，并以 MUSIC 算法作为对比。在各条件下进行 50 次蒙特卡洛仿真，共进行 9 100 次仿真，构建仿真结果三维图。两算法定向成功率与信噪比、阵元数的关系如图 3 所示。

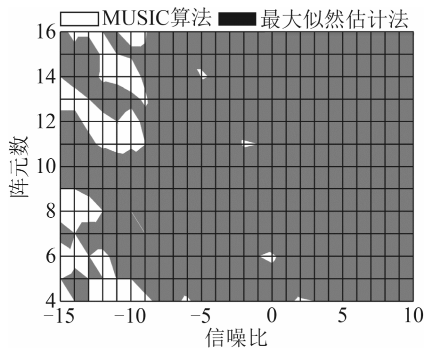


图 3 两算法信噪比与阵元数的关系

Fig.3 The relationship between SNR and sensor number of two algorithms

图 3 中图像 z 轴坐标为定向成功率，因此成功率较高的算法在图像上方。定向成功的判断条件为 $|\theta_e-\theta_0|\leqslant 3°$，$\theta_e$ 表示测量方向角，θ_0 表示实际方向角，

图 3 的俯视图如图 4 所示。

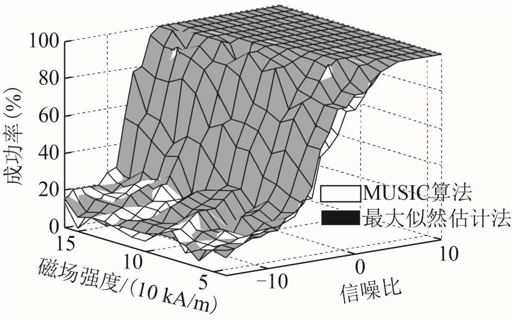


图 4　定向成功率与信噪比、天线阵元数的关系

Fig.4　The relationship between DOA estimation successful rate, SNR and different sensor numbers

图 4 中，其横坐标为信噪比，纵坐标为阵元数，图中灰色部分表示在该条件下最大似然估计法的定向成功率更高，白色部分则表示 MUSIC 法定向成功率较高。

可将按信噪比将图 4 分为三个区域，信噪比为[−15, −7.5]的第一区、[−7.5, 5]的第二区和[5, 10]的第三区。第一区中，灰色部分与白色部分各占约 50%，两种算法的成功率均较低，这是由于在信噪比为[−15, −7.5]时，噪声幅值过大，信号随机性过大，导致两算法均未能有效定位。第二区基本为灰色部分，表明最大似然估计法在信噪比为[−7.5, 5]的情况下成功率更高。第三区由于成功率均为 100%，不做对比。最后在表 1 中给出了信噪比为[−7.5, 0]时两算法定向误差对比。

表 1　信噪比为[−7.5, 0]时两种算法定向仿真误差对比

Tab.1　Comparison of DOA simulation error of two algorithms with SNR of [−7.5, 0]

信噪比	误差/(°)	
	MUSIC 算法	最大似然估计法
−7.5	41.25	36.05
−6.0	36.78	28.60
−4.5	16.56	12.16
−3.0	3.14	2.88
−1.5	1.85	1.74
0.0	1.19	1.13

由表 1 可知，随着信噪比的增加，两种算法的定向误差均明显减小。值得注意的是，最大似然估计法在信噪比为−7.5、−6.0、−4.5、−3.0 四种情况下，定向精度相比 MUSIC 算法提升约 20%。随着信噪比进一步增加，精度提升的幅度降低，这是因为高信噪比时定向误差本身较小，最大似然估计法对精度的提升相对较少。

上述仿真计算分析结果证明了最大似然估计法在信噪比[−7.5, 5]的情况下性能更好，定向精度较传统 MUSIC 算法最多提升约 20%。

3　试验验证与结果分析

3.1　试验条件与步骤

为验证本方法在变电站现场干扰情况下的定向情况，本文在某 220 kV 变电站利用基于移动平台的特高频局部放电定向系统开展现场试验测试。搭建的基于最大似然估计法的特高频局部放电定向系统由特高频天线、预处理单元、高速同步采集系统及数据处理终端四部分组成。天线阵列采用宽带全向特高频天线，其频率检测范围为 300 MHz~1.5 GHz；信号放大器的频率检测范围为 300 MHz~1.5 GHz，增益为 20 dB。变电站现场的定向系统天线安装于可移动平台，变电站现场特高频局部放电定向测试如图 5 所示。对于天线实测局部放电信号的处理步骤与 2.1 节仿真信号处理较为类似，区别在于信号的获取方式不同，具体步骤如下。

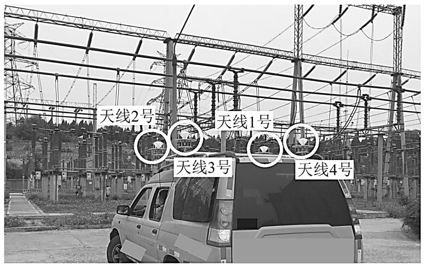


图 5　变电站现场特高频局部放电定向测试

Fig.5　The UHF partial discharge DOA estimation system in substation

1）确定放电位置：本试验中放电点至定向系统的径向距离固定为 3 m，分别在方位角为−30°、0°和 30°的坐标处利用手持式静电枪 DITO ESD SIMULATOR 模拟局部放电源进行放电，每次试验重复 50 次。放电枪可模拟接触放电和空气放电 500~16 500V，电压误差在 5%以内，放电脉冲上升时间为 0.8 ns，误差在 25%以内，产生的放电信号频谱在 0~2 GHz 范围。

2）信号采集：利用特高频局部放电采集系统采集四路局部放电时域信号，采样率为 2 GS/s。试验测得典型特高频局部放电四路信号，再利用快速傅

里叶变换（Fast Fourier Transformation, FFT）将信号转换到频域。

3）局部放电定向：按照式（2）构造信号导向矢量，根据 1.4 节所示构造投影算子 $\boldsymbol{P}_{a(\theta)}$。根据式（11）构建似然函数 $L(\theta)$并求取最大值，最大值对应的方向角即为局部放电的定向结果。

3.2 环境噪声分析

变电站环境下特高频局部放电信号频谱如图 6 所示。变电站现场的信号中包含多种分量：频率范围为 600~850 MHz 的局部放电特高频信号，整个频域内均匀分布的白噪声及多个窄带干扰信号。根据窄带信号特点，应至少包含频率为 100 MHz 左右的无线短波信号、400 MHz 左右的微波信号及 900 MHz 左右的手机通信信号。

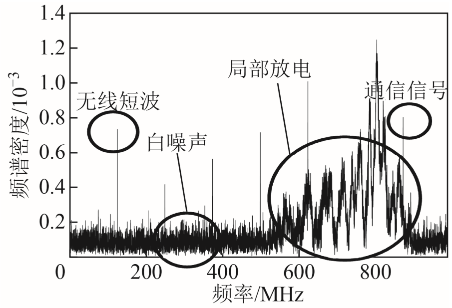


图 6 变电站环境下特高频局部放电信号频谱

Fig.6 Frequency spectrum of UHF partial discharge signals sampled in substation environment.

图 6 的实际局部放电信号频谱与图 1 的仿真信号频谱可类比，然而实际信号的频谱更加复杂，且信噪比较低。本文变电站环境下的信噪比为

$$\mathrm{SNR} = 20\lg\frac{V_{\mathrm{S}}}{V_{\mathrm{N}}} \tag{17}$$

式中，V_{S}为局部放电信号电压有效值；V_{N}为噪声电压有效值，取为白噪声电压值。经计算，现场测试变电站的局部放电特高频信号信噪比约为 5 dB。

3.3 定位结果与分析

特高频局部放电典型信号及其似然谱如图 7 所示。局部放电实际方向为 30°，定向结果为 29.50°，误差仅为 0.5°。更重要的是，由于信号似然谱的峰值取决于信号协方差矩阵，噪声的干扰通过谱峰的差值体现，图 7 中全局最大值对应的谱峰与局部最大值对应的谱峰存在较明显的幅值差值，表明最大似然估计法对环境噪声有一定的抑制能力。

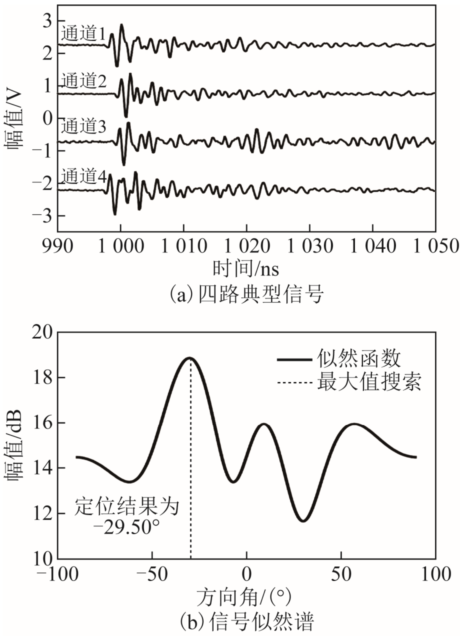


图 7 特高频局部放电典型信号及其似然谱

Fig.7 Typical signal and likelihood spectrum of UHF partial discharge

为验证本方法对于定向精度的提升能力，分别利用最大似然估计法与 MUSIC 方法在变电站环境中进行 300 次试验取均值，放电方向角分别为±60°、±45°、±30°和 0°，两种方法的局部放电定位结果对比见表 2。传统 MUSIC 算法的定向误差约为 4°，标准差约为 3.5°；最大似然估计法对局部放电特高频信号定向的误差约 1.7°、标准差约 2°以内，证明了该算法在提升定向精度上的有效性。

表 2 两种方法的局部放电定位结果对比

Tab.2 Comparison of the results of partial discharge positioning by two methods

（单位：°）

算法	实际方向	定向结果	误差	标准差
MUSIC 算法	−60.0, 60.0	−56.7, 57.3	3.30, 2.70	3.10, 2.90
	−45.0, 45.0	−48.4, 41.1	3.40, 3.90	3.18, 3.30
	−30.0, 30.0	−27.3, 33.5	2.70, 3.50	3.40, 2.95
	0.0	3.89	3.89	3.65
最大似然估计法	−60.0, 60.0	−57.9, 58.6	2.10, 1.40	1.93, 1.47
	−45.0, 45.0	−46.6, 43.4	1.60, 1.60	1.69, 1.54
	−30.0, 30.0	−28.2, 31.8	1.80, 1.80	1.76, 2.04
	0.0	−1.56	1.56	1.31

为了进一步分析两种定位方法与误差的关系，表 3 给出了两种方法的局部放电定向误差分布对比，同时在图 8 中给出了两种方法定向结果误差的积累密度函数（Cumulative Density Function, CDF）。

表 3　两种方法的局部放电定向误差分布对比

Tab.3　Comparison of directional error distribution of partial discharge by two methods

	最大似然估计法	MUSIC 算法
平均定向误差/(°)	1.72	3.36
误差小于 0.5° 百分比(%)	22.2	16.9
误差小于 2.5° 百分比(%)	78.1	66.5
误差小于 5.0° 百分比(%)	100	95.6
最大误差/(°)	4.78	6.15

由表 3 可知，在变电站复杂的电磁环境中，最大似然函数法能够以较高的精度定向局部放电源，90%以上的定向结果误差小于 3°，最大误差不超过 5°;基于 MUSIC 算法的局部放电定向误差则相对较大，70%左右的误差小于 3°，最大定向误差达到 6.15°。

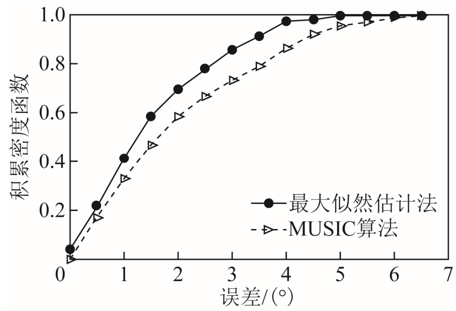


图 8　两种方法定向结果误差的积累密度函数

Fig.8　Cumulative density function of the two localization methods

图 8 中两种算法的最大定向误差相近，差异主要体现在误差为 1.5°~4.5°的区间，该区间内最大似然估计法的曲线位于 MUSIC 法上方，表明最大似然估计法的定向误差相对更小。

产生定向精度差异的原因在于，MUSIC 算法在计算信号协方差矩阵的基础上，需要根据协方差矩阵的特征值大小进行子空间分解，子空间分解受噪声影响出现误差，导致算法定向误差。相对地，根据式（11），最大似然估计法只需计算协方差矩阵而无需子空间分解，因此受噪声影响较小，其定向精度也相对更高。

4　结论

针对局部放电特高频信号不稳定、随机性强，导致传统方法难以准确定向的问题，本文提出了一种基于最大似然估计的变电站特高频局部放电定向方法，给出了理论推导过程及具体实现方法，并通过仿真分析及电气试验进行了验证，得到如下结论：

1)本文将特高频局部放电定向问题从信号波形处理转换为统计分析问题，在推导特高频局部放电信号概率密度分布的基础上，构建了其似然函数，并最终利用概率统计中的最大似然估计法测量了局部放电源的方向角。

2）仿真分析及变电站现场电气试验结果表明，在信噪比位于[−7.5dB, 5dB]范围时，最大似然估计法的定向性能更好，定向精度较传统 MUSIC 算法提升约 20%；在变电站环境下（信噪比约 5 dB），定向精度仍更优，误差为 1.7°。

3)本文为利用概率统计方法解决特高频局部放电定向问题提供了新的思路，对于多信号源的分离与定向将是本文的下一步工作。

参考文献

[1] 张强, 李成榕. X 射线激励下局部放电的研究进展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 22-32.
Zhang Qiang, Li Chengrong. Review on X-ray induced partial discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 22-32.

[2] 刘宇舜, 周文俊, 李鹏飞, 等. 基于广义 S 变换模时频矩阵的局部放电特高频信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 211-220.
Liu Yushun, Zhou Wenjun, Li Pengfei, et al. Partial discharge ultrahigh frequency signal denoising method based on generalized S-transform modular time-frequency matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 211-220.

[3] 李臻, 罗林根, 盛戈皞, 等. 基于压缩感知的特高频局部放电定位法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 202-208.
Li Zhen, Luo Lingen, Sheng Gehao, et al. Ultrahigh frequency partial discharge localization methodology based on compressed sensing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 202-208.

[4] 律方成, 刘宏宇, 李志兵, 等. 直流电压下 SF_6 气体中电极覆膜对金属微粒启举的影响机理[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 239-247.
Lü Fangcheng, Liu Hongyu, Li Zhibing, et al. Influence mechanism of dielectric coated electrodes on metallic particle lift-off in SF_6 gas under DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical

Society, 2017, 32(13): 239-247.

[5] 孙振权，赵学风，李继胜，等．雷电冲击电压下油纸绝缘气隙模型的局部放电测量与分析[J]．西安交通大学学报, 2009, 43(12): 75-80.
Sun Zhenquan, Zhao Xuefeng, Li Jisheng, et al. Partial discharge measurement and analysis of gap in oil-paper insulation model under lightning impulse voltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12): 75-80.

[6] 吕亮，辛晓虎，黄国强，等．用于油中局部放电定位且可重复布置的超声阵列与超高频复合传感器设计[J]．高电压技术, 2014, 40(8): 2328-2334.
Lü Liang, Xin Xiaohu, Huang Guoqiang, et al. Design of re-locatable ultrasonic array and ultra-high frequency combined sensor for partial discharge location in oil[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2328-2334.

[7] 蓝晓宇．提高空间谱估计分辨率的超分辨测向算法研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2012.

[8] 杨志伟，贺顺，廖桂生．加权伪噪声子空间投影的修正 MUSIC 算法[J]．信号处理, 2011, 27(1): 1-5.
Yang Zhiwei, He Shun, Liao Guisheng. Modified MUSIC approach with weighted pseudo-noise subspace projection[J]. Signal Processing, 2011, 27(1): 1-5.

[9] 石鹏，徐凤燕，王宗欣．基于传播损耗模型的最大似然估计室内定位算法[J]．信号处理, 2005, 21(5): 502-504.
Shi Peng, Xu Fengyan, Wang Zongxin. A maximum-likelihood indoor location algorithm based on indoor propagation loss model[J]. Signal Processing, 2005, 21(5): 502-504.

[10] 石国德，王明皓，吕朝晖．空间谱估计经典算法性能比较[J]．电子设计工程, 2013, 23(2): 190-193.
Shi Guode, Wang Minghao, Lü Zhaohui. Performance comparison of spatial spectrum estimation classic algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 23(2): 190-193.

[11] 盛骤，谢式千，潘承毅．概率论与数理统计第四版[M]．北京：高等教育出版社, 2010.

[12] 王小英，陈常龙，尹俊平．正态分布和瑞利分布混合情形下的参数估计及分类问题[J]．数学建模及其应用, 2016, 5(3): 25-30.
Wang Xiaoying, Chen Changlong, Yin Junping. The parameter estimation and classification under mixture model of normal and Rayleigh distribution[J]. Mathematical Modeling and Its Application, 2016, 5(3): 25-30.

[13] 李军．极大似然和 MUSIC 算法用于 DOA 估计的 DSP 实现[D]．成都：电子科技大学, 2005.

[14] 唐炬，周倩，许中荣，等．GIS 超高频局部放电信号的数学建模[J]．中国电机工程学报, 2005, 25(19): 106-110.
Tang Ju, Zhou Qian, Xu Zhongrong, et al. Establishment of mathematical model for partial discharge in GIS using UHF method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 106-110.

[15] 薛晓峰，王永良，张永顺，等．二维 MUSIC 算法分维处理及其阵列结构的研究[J]．空军工程大学学报·自然科学版, 2008, 9(5): 33-37.
Xue Xiaofeng, Wang Yongliang, Zhang Yongshun, et al. A study of decoupling 2D-MUSIC algorithm and array structure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2008, 9(5): 33-37.

作者简介

周　南　男，1993 年生，博士研究生，研究方向为电力设备状态监测等。

E-mail：zhounan@sjtu.edu.cn

罗林根　男，1982 年生，博士，研究方向为智能电网、电力系统状态监测等。

E-mail：llg523@sjtu.edu.cn（通信作者）

（编辑　张洪霞）