

引用格式: 李大华, 孔凌风, 高强, 等. 基于三次相关改进的广义互相关时延估计法在局部放电超声波定位中的研究[J]. 声学技术, 2022, 41(5): 774-781. [LI Dahua, KONG Lingfeng, GAO Qiang, et al. Study on cubic correlation improvement based generalized cross correlation time delay estimation method of supersonic waves detection method for location partial discharge[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(5): 774-781.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.05.021

基于三次相关改进的广义互相关时延估计法 在局部放电超声波定位中的研究

李大华¹, 孔凌风¹, 高强¹, 于晓¹, 杜洋²

(1. 天津理工大学电气电子工程学院, 天津 300384; 2. 天津三源电力智能科技有限公司, 天津 300409)

摘要: 在现有的开关柜等电气设备局部放电超声波定位技术中, 到达时间差定位法(Time Difference of Arrival, TDOA)在定位精度与技术实现等方面有着一定的优势, 得到了广泛的使用, 是目前常用的方法, 其中的时延估计算法对整个系统起着关键作用。文章首先对目前现有的基本相关、广义相关、二次相关等时延估计算法进行了分析。其次, 在二次相关基础上再进行一次相关, 并设计了新型的加权函数, 将三次相关与广义互相关结合在一起, 成为一种新的方法, 即广义三次相关时延估计法。最后, 搭建了相应的开关柜实验平台并对以上方法进行了实验及对比, 分析了各算法的性能。结果表明, 广义三次相关时延估计法在相对强噪声环境中较其他算法抗噪性能更强, 具有更好的优越性。

关键词: 局部放电; 超声波定位法; 到达时间差; 时延估计算法

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-05-0774-08

Study on cubic correlation improvement based generalized cross correlation time delay estimation method of supersonic waves detection method for location partial discharge

LI Dahua¹, KONG Lingfeng¹, GAO Qiang¹, YU Xiao¹, DU Yang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Sanyuan Electric Power Intelligent Technology Co. Ltd, Tianjin 300409, China)

Abstract: In the existing ultrasonic positioning method of partial discharge for switchgear cabinet and other electrical equipment, time difference of arrival (TDOA) method has been widely used due to the advantage in positioning accuracy and technical implementation. Considering that the time delay estimation algorithm plays a leading role in the whole positioning system, the basic correlation, generalized correlation, quadratic correlation and other time delay estimation algorithms are analyzed in this paper. Then, based on the quadratic correlation, a new method, named the generalized cubic correlation time delay estimation method is presented by performing once more correlation again with new designed weighting functions. Finally, an experimental platform of switch cabinet is built to test the above methods and make comparative analyses. The performances of various algorithms are analyzed and compared. The results show that the generalized cubic correlation time delay estimation method has better advantages and better anti-noise performance than other algorithms in relatively strong noise environment.

Key words: partial discharge; ultrasonic positioning method; time difference of arrival; time delay estimation algorithm

0 引言

在针对局部放电源的定位技术中, 超声波定位法是一种捕获局部放电过程中产生的超声波信号,

利用其到达不同传感器的先后(时间或相位)关系对局部放电源进行精确定位的技术。类似的应用有很多: 利用超声波的时延差值, 采用负压波法可以对流体管道泄漏点进行定位以及检测^[1]。模拟人耳的超声波室内定位系统, 利用双耳效应原理, 仅使用 3 个超声波接收装置即可完成二维、三维的声源定位^[2]。

超声波信号源的定位算法多基于时差定位, 其

收稿日期: 2021-05-28; 修回日期: 2021-07-15

作者简介: 李大华(1978—), 男, 天津人, 副教授, 研究方向为高压电气设备的局部放电超声波检测。

通信作者: 孔凌风, E-mail: 2302375864@qq.com

时延的准确计算是局部放电源定位精准度的决定性条件^[3-5]。目前,在时延估计的研究中,互相关算法凭借抗噪能力强、计算简单以及受人为因素影响小的优点被广泛用于局部放电信号源的定位中^[6-7]。文献[8]分析了互相关算法后,提出了广义互相关算法,并应用于声发射定位中,提高了算法定位的精确性和稳定性^[8]。但在低信噪比环境中,相关函数会出现多个相关峰,最大峰被严重干扰,时延估计精度也随之变差。文献[9]将自相关和互相关结合起来,提出了二次相关法,随着相关峰波形的“放大”,提高了相关峰附近的分辨率,使得算法具有较高的抗噪性能^[9]。但在实际中,有必要对算法进一步改进,以提高其抗噪性,应对更复杂的环境。本文在前人研究的基础上提出了基于三次相关改进的广义互相关时延估计算法,将三次相关与广义互相关结合,并设计了新的加权函数,提高了时延估计的精准度,相较其他算法,最大程度上减小了噪声对时延估计的影响。

1 局部放电源定位信号模型

在开关柜等高压电力设备的正常运行过程中,发生局部放电时会使小范围内的温度短时间内上升,进而使介质的局部体积发生变化,产生一定的脉冲压力波,即为频率大于20 kHz的超声波。而通过测量和计算超声波信号到不同传感器间的相位差或时间差,可以对开关柜局部放电位置进行精确的定位。

开关柜局部放电数学模型如图1所示,柜内放电源坐标为 $S(x, y, z)$,基于机械波的传播的定律,声波的传播是以球面的形式向外传播^[10]。在实际检测时要放置四个不同位置的超声波传感器 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$, $P_4(x_4, y_4, z_4)$ 。从而得到三元二次方程组来对变量 S 求解。

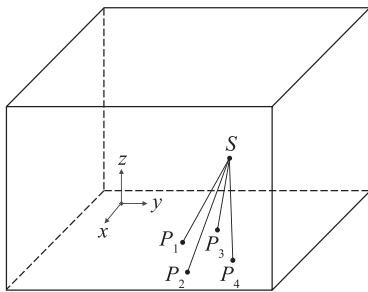


图1 开关柜局部放电模型概念图
Fig.1 Conceptual diagram of partial discharge model for switch cabinet gear

假设声波传感器 P_1, P_2, P_3, P_4 接收信号之间的时延分别为 D_1, D_2, D_3, D_4 。则由图1可得三元二次方

程组:

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = cD_1 \\ L_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} = cD_2 \\ L_3 = \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} = cD_3 \\ L_4 = \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} = cD_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_1, P_2, P_3, P_4 坐标已知, 变量 c 为代表超声波信号在介质中的传播速度。然而, 在实际情况中, 设备结构较为复杂, 超声波信号在内部不同介质传播时会发生折反射, 同时随着能量的缺失, 信号会不断衰减, 再加上边界(开关柜的外壳尺寸)的限制, 使得方程组具有一定的偏差。

于是对方程组做出必要的改进, 减小误差:

$$d(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 (L_i - L'_i) = \sum_{i=1}^4 \left\{ \left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - cD_i \right\} \quad (2)$$

式中: L_i 为第 i 个传感器到 S 点的实际距离。 L'_i 为测量出的理论距离, $L'_i = cD_i$ 。

因此, 超声波信号时延的准确计算是定位精准度的决定性条件, 通过对时延的精准测量计算, 根据式(2), 可以完成对局部放电信号源的定位。

2 三次相关与广义互相关时延估计

对两个信号求一次相关函数是求取时延的基本方法。在此基础上, 文献[11]把信号的自相关和互相关相结合, 提出了二次相关时延估计算法, 提高了时延估计精度^[11]。文献[12]结合了二次相关与传统互相关的思想, 提出了三次相关时延估计算法, 更进一步提升了算法的抗噪性^[12]。本文在综合分析了文献[13]中广义互相关各种加权函数的性质及其特点之后, 将其与三次相关相融合, 进一步提高了提高时延估计精度, 使其在更低信噪比条件下依然具有较好的时延估计性能。

2.1 基本一次相关时延估计

在实际检测中, 传感器所接收的信号包括局部放电源的超声波信号、其他多种声源信号以及环境中的噪声。所以, 可设其中两个信号模型为

$$\begin{cases} x_1(t) = s(t) + \sum_{i=1}^N u_i(t) + v(t) \\ x_2(t) = as(t+D) + \sum_{i=1}^N b_i u_i(t+t_n) + cv(t+t_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $s(t)$ 为局部放电源的信号; $u_i(t)$ 为其他声波

干扰信号； $v(t)$ 为背景噪声信号， D 为时间延迟； t_{ti} 为第二个传感器收到的其他声波干扰信号相对于第一个的时间差； c 为超声波在空气中的传播速度，通常为 $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； t_{tv} 为第二个传感器收到的背景噪声信号相对于第一个的时间差。传感器接收的信号为连续时间模拟信号，由于计算机只能处理离散信号，后期可对信号进行模数转换成为数字离散信号供计算机处理。则两信号的互相关函数，即一次相关为

$$R_{12}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t-\tau)] \quad (4)$$

其中： E 表示数学期望，可表示为

$$\begin{cases} E[x_1(t)x_2(t-\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t-\tau)f(T)dt \\ T = x_1(t)x_2(t-\tau) \end{cases} \quad (5)$$

其中： $f(T)$ 为概率密度函数； T 为概率密度。通常情况下，在有效区域内两信号的概率密度函数默认为1。将式(3)和式(5)代入式(4)得：

$$R_{12}(\tau) = E\{[s(t) + \sum_{i=1}^N u_i(t) + v(t)][as(t+D-\tau) + \sum_{i=1}^N b_i u_i(t+t_{ti}-\tau) + cv(t+t_{tv}-\tau)]\} \quad (6)$$

假定接收阵元间环境噪声的互相关性较弱，即可近似为非相关高斯白噪声，使得以上环境噪声信号之间正交，其相关函数皆为0，则：

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= E\{s(t)as(t+D-\tau) + \sum_{i=1}^N u_i(t) \cdot \\ &\quad \sum_{i=1}^N b_i u_i(t+t_{ti}-\tau) + v(t)cv(t+t_{tv}-\tau)\} = \\ &\quad aR_{ss}(\tau-D) + \sum_{i=1}^N b_i R_{u_i u_i}(\tau-t_{ti}) + cR_{vv}(\tau-t_{tv}) \end{aligned} \quad (7)$$

根据卷积与傅里叶变换的关系知，两信号的互相关函数与其是一对傅里叶变换，则互能谱为

$$\begin{aligned} W_{12}(j\omega) &= F[R_{12}(\tau)] = F[aR_{ss}(\tau-D)] + \\ &\quad F[\sum_{i=1}^N b_i R_{u_i u_i}(\tau-t_{ti})] + F[cR_{vv}(\tau-t_{tv})] \end{aligned} \quad (8)$$

由于传感器接收信号的距离足够相近，可近似认为同一信号源传递到两传感器的信号不会发生畸变，幅度也没有较大变化，仅仅发生了时延，则有：

$$\begin{aligned} W_{12}(j\omega) &= G_{ss}(j\omega)e^{-j\omega D} + \\ &\quad \sum_{i=1}^N G_{u_i u_i}(j\omega)e^{-j\omega t_{ti}} + G_{vv}(j\omega)e^{-j\omega t_{tv}} \end{aligned} \quad (9)$$

计算出两个信号的互能谱，再由傅里叶逆变换得到最终的相关函数，根据其特性，由式子(7)可知在 $\tau=D$ 时， $aR_{ss}(\tau-D)$ 取得最大值，当信噪比足够大时，找出 $R_{12}(\tau)$ 的峰值，此时对应的时间点就是 D ，以上即为一次相关时延估计原理。

2.2 广义互相关时延估计

分析基本相关时延估计，并由式(9)可知，在信噪比相对较低时，背景噪声和其他点的声源干扰会使相关函数出现多个峰，从而大大影响了信号的相关函数值，使得相关计算结果出现较大的误差，因而要改进算法使噪声的影响最小。

在频域上用不同的滤波器对接收的放电信号进行处理，最终使得相关函数在时延点处的峰值更加明显，这就是广义互相关法的基本思想。

互能谱经滤波后的形式为

$$\begin{aligned} W_{12}(j\omega)H(j\omega) &= H(j\omega)G_{ss}(j\omega)e^{-j\omega D} + \\ &\quad \sum_{i=1}^N H(j\omega)G_{u_i u_i}(j\omega)e^{-j\omega t_{ti}} + \\ &\quad H(j\omega)G_{vv}(j\omega)e^{-j\omega t_{tv}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中： $H(j\omega)$ 被称为加权函数。

广义互相关法的关键就是选取怎样的加权系数，以提高时延估计的精度，以源信号功率谱密度的倒数为例，即 $H(j\omega) = 1/G_{ss}(j\omega)$ ，利用该加权函数滤波后，两路信号的互能谱为

$$\begin{aligned} W_{12}(j\omega)H(j\omega) &= e^{-j\omega D} + \\ &\quad \sum_{i=1}^N \frac{G_{u_i u_i}(j\omega)}{G_{ss}(j\omega)} e^{-j\omega t_{ti}} + \frac{G_{vv}(j\omega)}{G_{ss}(j\omega)} e^{-j\omega t_{tv}} \end{aligned} \quad (11)$$

很明显，对该式右边进行逆变换后，在时域上相关函数中包含了一个冲激函数： $\delta(t-D)$ ，且系数较大，表明波形在时延 D 处会出现相对尖锐的峰值。

目前，广义互相关中主要有以下几种方法：

(1) ROTH加权法，其加权函数为 $1/G_{11}$ （或者 $1/G_{22}$ ）。低信噪比时，可以在频域上有效地抑制噪声，等价于维纳(Winener)滤波，但一定程度上会展宽函数的峰。

(2) SCOT加权法，其加权函数为 $1/(G_{11}W_{12})^{1/2}$ 。

当 $G_{11}=G_{22}$ 时，等价于ROTH加权函数，与ROTH不同的是，其同时考虑了两个通道的影响。

(3) PHAT加权法，其加权函数为 $1/|W_{12}|$ 。在降噪的同时也抑制了信号中的周期成分，故在实际应用中，可能会同时降低信噪比。

(4) Eckart加权法。以输出信噪比最大作为优化的标准，对噪声高的频带也具有较好的抑制效果。其加权函数为： $aG_{ss}/(\sum_{i=1}^N G_{u_i u_i} + G_{vv})^2$ 。

2.3 三次相关时延估计

在实际测量中，噪声往往处于非理想状况，导致在信噪比足够低时还是会出现一定的误差^[14]，可

对信号进行多次相关来降低这个阈值，以提高信号抗噪性，例如三次相关。

由前文可知，式(3)中信号 $x_1(t)$ 的自相关函数 $R_{11}(\tau)$ 可表示为

$$R_{11}(\tau) = E[x_1(t)x_1(t-\tau)] = R_{ss}(\tau) + \sum_{i=1}^N R_{u_i u_i}(\tau) + R_{vv}(\tau) \quad (12)$$

由维纳辛钦定理知，两信号的自相关函数与其功率谱密度 $G_{11}(j\omega)$ 是一对傅里叶变换，表达式为

$$G_{11}(j\omega) = G_{ss}(j\omega) + \sum_{i=1}^N G_{u_i u_i}(j\omega) + G_{vv}(j\omega) \quad (13)$$

由于 $R_{11}(\tau)$ 和 $R_{12}(\tau)$ 两个相关函数是时间函数，所以可将它们作为一组新的信号，用变量 t 代替 τ ，使其再进行一次相关运算：

$$R_{R_{11}R_{12}}(\tau) = E[R_{11}(t)R_{12}(t-\tau)] \quad (14)$$

将式(7)和式(12)代入式(14)得：

$$R_{R_{11}R_{12}}(\tau) = E\left\{[R_{ss}(t) + \sum_{i=1}^N R_{u_i u_i}(t) + R_{vv}(t)] \cdot [R_{ss}(t-D-\tau) + \sum_{i=1}^N R_{u_i u_i}(t-t_{ti}-\tau) + R_{vv}(t-t_{tv}-\tau)]\right\} = R_{R_{ss} \cdot R_{ss}}(\tau+D) + \sum_{i=1}^N R_{R_{u_i u_i} \cdot R_{u_i u_i}}(\tau+t_{ti}) + R_{R_{vv} \cdot R_{vv}}(\tau+t_{tv}) \quad (15)$$

由前文知， $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 为同一信号源传递到两传感器的信号，可近似认为 $x_2(t)$ 不会发生畸变，幅度也没有发生较大变化，仅仅发生了时延，则由相关函数定义可得：

$$R_{22}(\tau) = R_{11}(\tau) = E[x_1(t)x_1(t-\tau)] = R_{ss}(\tau) + \sum_{i=1}^N R_{u_i u_i}(\tau) + R_{vv}(\tau) \quad (16)$$

同理，变量 t 代替 τ ，使其继续进行一次相关运算，即两信号的三次相关函数 $R_{RRR}(\tau)$ ：

$$R_{RRR}(\tau) = E[R_{22}(t) \cdot R_{R_{11}R_{12}}(t-\tau)] = E\left\{[R_{ss}(t) + \sum_{i=1}^N R_{u_i u_i}(t) + R_{vv}(t)] \cdot [R_{R_{ss} \cdot R_{ss}}(t+D-\tau) + \sum_{i=1}^N R_{R_{u_i u_i} \cdot R_{u_i u_i}}(t+t_{ti}-\tau) + R_{R_{vv} \cdot R_{vv}}(t+t_{tv}-\tau)]\right\} = R_{R_{ss}^3}(\tau-D) + \sum_{i=1}^N R_{R_{u_i u_i}^3}(\tau-t_{ti}) + R_{R_{vv}^3}(\tau-t_{tv}) \quad (17)$$

其中：3表示三次相关，当 $\tau=D$ 时，三次相关函数取得最大值，则此时，时延值 D 为相关函数峰值点对应的横坐标。

3 广义三次相关时延估计

在总结了广义互相关与三次相关算法各自的原理之后，本文在三次相关的基础上，设计了一种新的加权函数，使得三次相关与广义互相关相结合，成为了一种的新型时延估计方法，并为其加入了快速傅里叶变换算法(Fast Fourier Transform, FFT)，改善了其计算量大的缺点。新型方法大大提高了抗噪性能，使得时延估计更加精准，称之为广义三次相关时延估计。

3.1 快速傅里叶变换

计算信号的相关函数时，计算量较大，采用FFT进行快速计算，可以减少计算量。计算机只能处理离散信号，所以先对传感器接收的连续时间模拟信号转换为离散信号，使得 $x_1(t), x_2(t)$ 变为 $x_1(n), x_2(n)$ ，再用FFT计算离散傅里叶变换，则有：

$$\begin{cases} X_1(f) = \text{FFT}[x_1(n)] \\ X_2(f) = \text{FFT}[x_2(n)] \end{cases} \quad (18)$$

根据相关与卷积的关系知，相关运算相当于先对第二个函数反演，取共轭，再进行卷积运算：

$$R_{12}(n) = x_1(n) * x_2^*(-n) \quad (19)$$

由时域卷积定理知，两信号在时域的卷积积分等于自身在频域时的傅里叶变换的乘积，再结合傅里叶的尺度变换性质可得：

$$\begin{cases} W_{12}(f) = \text{FFT}[R_{12}(n)] = X_1(f) \cdot X_2^*(f) \\ G_{11}(f) = \text{FFT}[R_{11}(n)] = X_1(f) \cdot X_1^*(f) = |X_1(f)|^2 \end{cases} \quad (20)$$

同理，由此可知二次相关与三次相关的互能谱：

$$\begin{cases} W_{RR}(f) = \text{FFT}[R_{R_{11}R_{12}}(n)] = |X_1(f)|^2 \cdot [X_1(f) \cdot X_2^*(f)]^* = |X_1(f)|^2 \cdot X_1^*(f) \cdot X_2(f) \\ W_{RRR}(f) = \text{FFT}[R_{RRR}(n)] = |X_2(f)|^2 \cdot [X_1(f)]^2 \cdot X_1^*(f) \cdot X_2^*(f) = |X_1(f)|^4 \cdot X_1(f) \cdot X_2^*(f) \end{cases} \quad (21)$$

由此可减少大量计算量，得出三次相关值 $R_{RRR}(n)$ ：

$$R_{RRR}(n) = \text{IFFT}[W_{RRR}] = \text{IFFT}[|X_1(f)|^4 \cdot X_1(f) \cdot X_2^*(f)] \quad (22)$$

3.2 基于三次相关改进的广义互相关时延估计

由文献[15]知：使用Eckart加权法时，权值会随着信噪比的降低而减小，避免了噪声峰值被加重，虽然增加了一定的计算量，但稳定性更高^[15]。

所以，为了进一步提高三次相关的抗噪性能与估计时延的精准度，本文基于Eckart函数加权的广

义互相关时延估计方法,设计了一种新型加权函数,与三次相关相结合,成为一种新型的时延估计方法。

由前文可知:

$$W_{RRR}(j\omega) = F[R_{RRR}(\tau)] = G_{G_{\omega}}(j\omega) \cdot e^{-j\omega D} + \sum_{i=1}^N G_{G_{\omega_i}}(j\omega) \cdot e^{-j\omega t_{\omega_i}} + G_{G_{\omega_v}}(j\omega) \cdot e^{-j\omega t_{\omega_v}} \quad (23)$$

设计新的加权函数为

$$H(j\omega) = a G_{G_{\omega}}(j\omega) / \left(\sum_{i=1}^N G_{G_{\omega_i}}(j\omega) \cdot G_{G_{\omega_v}}(j\omega) \right)^2 \quad (24)$$

由式(24)可以看出,新的加权函数明显增强了有效信号的权值,在信噪比降低时同时降低了噪声信号权值,将其反变换为时域,可使得时延点更加明显,提高了其抗噪性能,将这种新方法定义为广义三次相关时延估计(Generalized Third Cross-Correlation, GTCC),GTCC算法流程如图2所示。

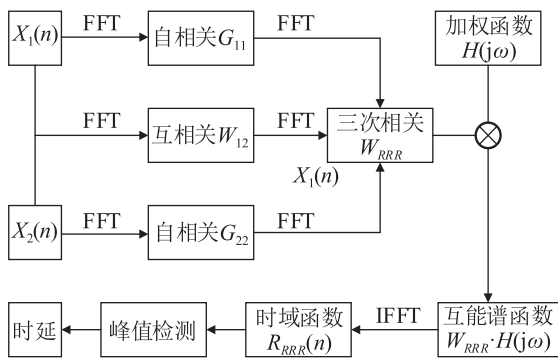


图2 广义三次相关(GTCC)算法流程图
Fig.2 Flow chart of GTCC algorithm

4 仿真对比与实验分析

为了检验GTCC在实际环境中的定位效果,在实验室搭建了开关柜电晕放电实验平台。

4.1 实验平台的搭建以及信号的收集

4.1.1 高压电源模型

目前,10 kV、35 kV等交流高压开关柜电气设备广泛应用于电力系统中,且直流电无法进行升降压,所以本文采用成都创新电子电器厂生产的CX-50TA高压电源。输入电压为实验室220 V交流电,输出电压为4~20 kV,高压电源的输入、输出接线图如图3所示,使其满足放电电压条件。

4.1.2 针板放电模型

在开关柜的制造过程中,由于多方面原因,绝缘器件外通常有一些表面毛刺,在作业中的高压环境下,将引起电晕放电。故常常采用针板电极来模拟电晕放电,开关柜中的绝缘材料通常为石墨,所

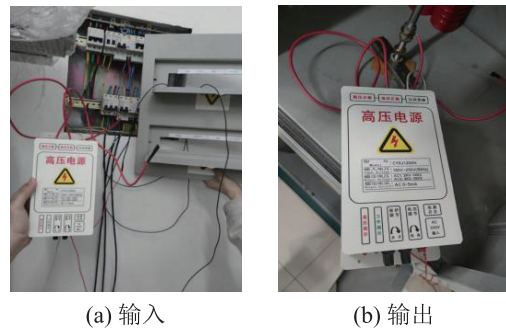


图3 高压电源输入、输出接线图
Fig.3 Wiring diagrams of high voltage power input and output

以针板放电模型的绝缘结构采用石墨块。上电极为高度为35 mm、倒角半径为1 mm的黄铜尖端电极,下电极直径为50 mm、高度为25 mm的圆形石墨电极,上电极与石墨电极间距离为10 mm,放电前与放电时的针板电极模型如图4所示。

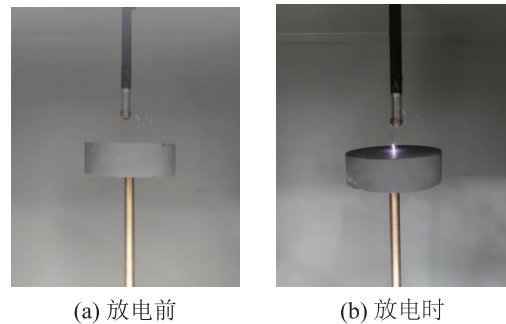


图4 放电前与放电时的针板电极模型
Fig.4 Models of needle plate electrode before discharge and during discharge

4.1.3 信号的收集

实验在周围环境足够安静时进行,以避免不必要的噪声尽量降低环境噪声对其的影响。为了模拟超声波传感器,并使用Matlab软件分析信号,本文用两部手机来进行超声波放电信号的收集,二者之间距离小于1 m。但是,若人为进行控制,收集的同步性会较低,相对于超声波有着较高的延迟,为了避免这个问题,用速度近似为光速的无线电波,即蓝牙来控制,并用华为(HUAWEI)同款手机进行实验,使得信号收集的同步性最大,保障了后续时延检测的精度。

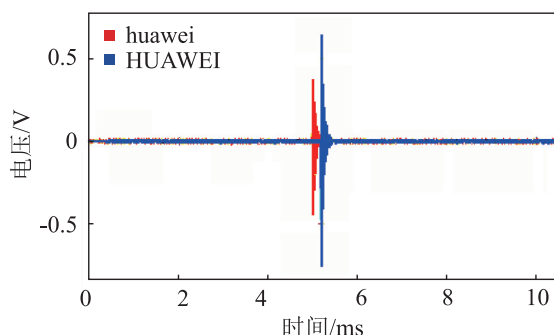
4.1.4 信号分析

原始放电信号与沿x轴放大的信号如图6所示,用Matlab读取接收到的声发射信号,用变量huawei和HUAWEI分别代表图中从左到右两部手机的接收信号;将图延x轴放大至0.1 ms为单位,可以看到,HUAWEI手机接收的信号在时域上相对于huawei手机接收的信号延迟了0.2 ms。

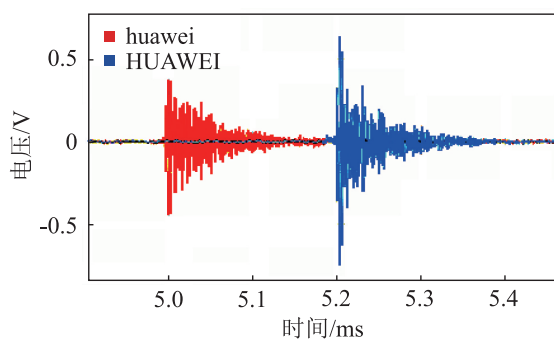
再测量放电源距两部手机的距离,发现其相差



图5 信号的收集
Fig.5 Signal collection



(a) 原始放电信号



(b) 沿x轴放大的信号

图6 原始放电信号与沿x轴放大的信号
Fig.6 Original discharge signal and the signal amplified along x-axis

大约为7 cm。声波在空气介质中的传播速度约为 $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，实际延迟时间与理论相符，进一步说明了信号的准确性。

4.2 抗噪性的对比及分析

对采集的信号分别添加随机高斯白噪声，高斯白噪声之间及其与超声波信号之间互不相关。同前文所述，认为同一环境下两信号的信噪比(Signal to Noise Ration, SNR)相同。

基于本文提出的广义三次相关算法，针对针板模型放电信号进行时延估计。实验放电电压设置为10 kV，并与其他3种算法在不同信噪比环境下进行对比，以此来验证算法的准确性。

4.2.1 SNR为10 dB

信噪比为10 dB时4种互相关算法的时域结果

如图7所示。由图7可知，信号质量较高时(SNR为10 dB)，4种方法的函数图像在时延点处的峰值都比较明显，误差较小。

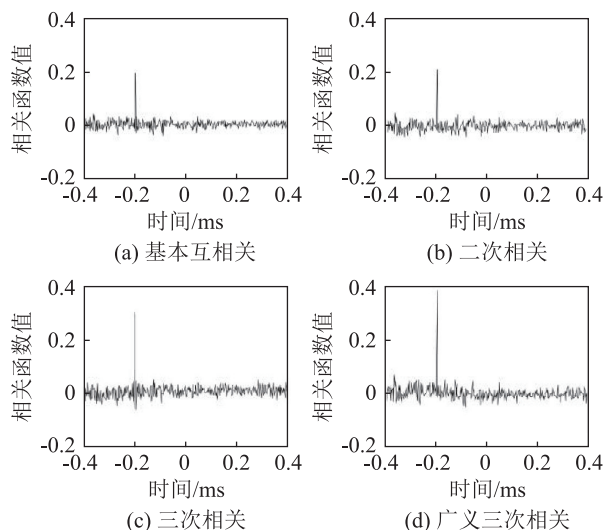


图7 SNR为10 dB时4种互相关算法的时域结果

Fig.7 Time domain diagrams of four kinds of cross-correlation functions at SNR is 10 dB

4.2.2 SNR为0 dB

信噪比为0 dB时，4种互相关算法的时域结果如图8所示。由图8可知，在信噪比降低(0 dB)时，4种方法都出现了相对较强的次高峰干扰，但其峰值仍都比较突出，尖锐程度较高。

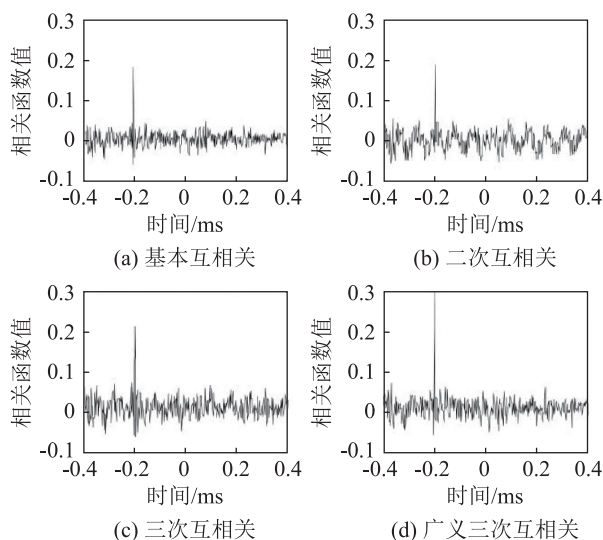


图8 SNR为0 dB时4种互相关算法的时域结果

Fig.8 Time domains diagram of four kinds of cross-correlation functions at SNR is 0 dB

4.2.3 SNR为-10 dB

SNR为-10 dB时4种互相关函数的时域结果如图9所示。由图9可知，在信噪比较低时(-10 dB)，基本互相关与二次相关的函数图中，干扰

严重，误差较大。三次相关和三次广义相关函数的峰值仍比较尖锐，但都出现了一些较强的干扰。

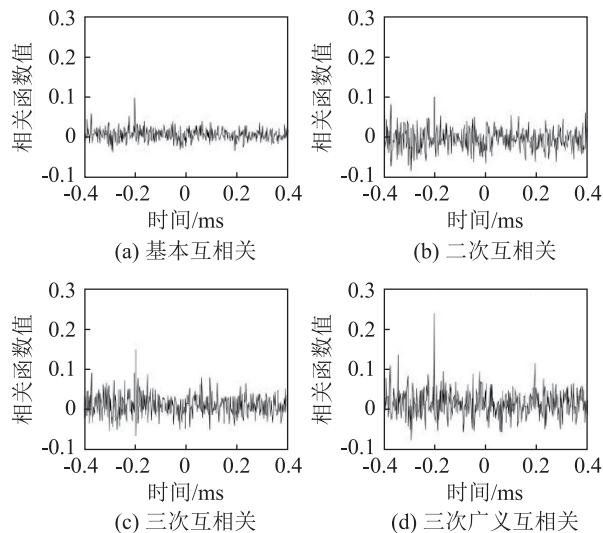


图9 SNR为-10 dB时4种互相关算法的时域结果
Fig.9 Time domains diagram of four kinds of cross-correlation functions at SNR is -10 dB

4.2.4 SNR为-15 dB

SNR为-15 dB时4种互相关函数的时域结果如图10所示。在-15 dB时，前三种方法的函数峰值几乎已经完全淹没在干扰峰中，而三次广义互相关函数的峰值依然足够尖锐，在实际实验中验证了其在理论上的优越性。

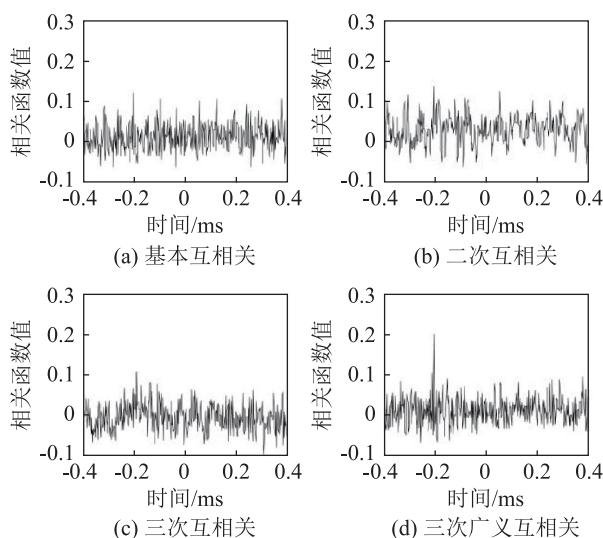


图10 SNR为-15 dB时4种互相关算法的时域结果
Fig.10 Time domains diagram of four kinds of cross-correlation functions at SNR is -15 dB

4.3 时延估计误差的对比及分析

均方根误差是用来衡量观测值同真值之间的偏差^[16]。为了进一步分析在不同高斯白噪声条件下传

统互相关、二次相关以及三次相关和广义三次相关算法的时延估值能力，定义其时延估计均方根误差为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2}$$

(25)

式中： d_i 为第*i*组测量值与真值的偏差值。
对本文选取的实验信号在不同信噪比下用不同方法进行*N*=100次时延估算，得到四种时延估计算法在SNR为-20~10 dB条件下的时延估算标准差，结果如图11所示。

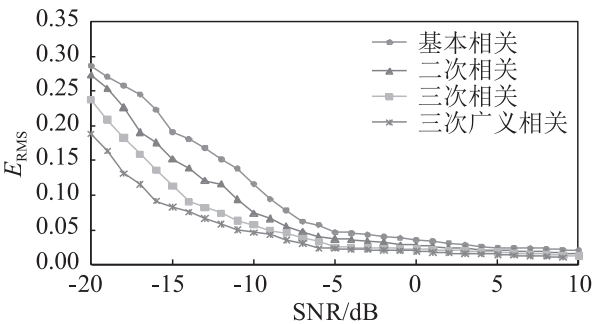


图11 4种相关算法的时延估计性能对比
Fig.11 Comparison of delay estimation performances of four correlation algorithms

由图11可知，在SNR为-20~10 dB范围内二次相关及三次相关时延估计算法均优于基础互相关法。当SNR大于5 dB时，随着信噪比的增加，二次相关及三次相关时延估计算法的估值能力相当，当SNR小于5 dB时，随着信噪比下降，三次相关法的估值准确度高于二次相关法。

表1 在不同信噪比下各相关算法的时延估计误差(单位:s)
Table 1 Delay estimation errors of various correlation algorithms under different SNRs (unit :ms)

算法类型	-15 dB	-10 dB	-5 dB	0 dB	5 dB
基础互相关	0.192	0.117	0.047	0.036	0.025
二次相关	0.153	0.075	0.038	0.028	0.021
三次相关	0.124	0.058	0.026	0.023	0.018
三次广义相关	0.092	0.051	0.024	0.022	0.016

表2 某次各相关算法在不同信噪比下估计的时延(单位:s)
Table 2 Time-delay estimates of various correlation algorithms at different SNRs (unit :ms)

算法类型	-15 dB	-10 dB	-5 dB	0 dB	5 dB
基础互相关	0.269	0.176	0.191	0.207	0.205
二次相关	0.254	0.215	0.207	0.193	0.196
三次相关	0.179	0.189	0.194	0.195	0.204
三次广义相关	0.218	0.212	0.208	0.204	0.197

综上所述，三次相关法与传统互相关、二次相关相比，在信噪比较低的环境中仍能保持较高的时延估计精度，能够提高系统定位精度。

5 结论

由本文的实验和仿真分析结果可知, 基本互相关、二次相关、三次相关和广义三次相关4种方式的时延估计误差随着信噪比的降低而增大, 互相关函数峰值的尖锐程度随信噪比的降低而降低。相对于基本互相关、二次相关和三次相关, 广义三次相关时延估计法在较低的信噪比时, 波动程度更小、峰值更尖锐, 表现出较强的抗噪性能。由于本文重点偏向于对新方法的验证, 本次实验采集信号的方法较为繁琐, 应用于开关柜局部放电信号源定位中的实用性较差, 后续可以加以改进, 用多个超声波传感器进行信号的采集, 并分析不同介质中不同压强与湿度对声传播的影响, 在开关柜坐标系中对局部放电源进行明确的定位, 从而在更直观的对比中突出广义三次相关时延估计的优越性以及实用性。

参 考 文 献

- [1] 郎宪明, 郭颖, 高文帅, 等. 基于超声波声速的流体管道泄漏点定位方法[J]. 信息与控制, 2020, **49**(5): 546-551, 559.
LANG Xianming, GUO Ying, GAO Wenshuai, et al. Leak localization method for fluid pipeline leakage based on sound velocity of an ultrasonic signal[J]. Information and Control, 2020, **49**(5): 546-551, 559.
- [2] 邵明启, 郭嵘, 郑明. 基于“双耳效应”和反射锥的超声波定位系统[J]. 实验室研究与探索, 2020, **39**(10): 93-96.
SHAO Mingqi, GUO Rong, ZHENG Ming. Ultrasound positioning system based on binaural effect and reflecting cone[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, **39**(10): 93-96.
- [3] 王玉龙, 张晓虹, 李丽丽, 等. 基于超声波声压衰减效应的局部放电源定位与强度标定[J]. 物理学报, 2021, **70**(9): 305-314.
WANG Yulong, ZHANG Xiaohong, LI Lili, et al. Localization and intensity calibration of partial discharge based on attenuation effect of ultrasonic sound pressure[J]. Acta Physica Sinica, 2021, **70**(9): 305-314.
- [4] ARIFIANO D, WIRAWAN, ATMAJA B T, et al. Azimuth tracking of underwater moving sound source based on time delay estimation using hydrophone array[J]. Procedia Engineering, 2017, **170**: 169-176.
- [5] HASHEMI H S, RIVAZ H. Global time-delay estimation in ultrasound elastography[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, **64**(10): 1625-1636.
- [6] 周凯, 饶显杰, 汪先进, 等. 基于距离的互相关算法在电力电缆局部放电定位中的应用[J]. 高电压技术, 2021, **47**(8): 2946-2954.
- [7] ZHOU Kai, RAO Xianjie, WANG Xianjin, et al. Application of distance-based cross-correlation algorithm in partial discharge location of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2021, **47**(8): 2946-2954.
- [8] KE W, ZHANG M, ZHANG T C. Three-dimensional sound source localization using distributed microphone arrays[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2017, **36**(2): 231-244.
- [9] 金中薇, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于广义互相关时延估计算法的声发射定位技术[J]. 传感技术学报, 2013, **26**(11): 1513-1518.
JIN Zhongwei, JIANG Mingshun, SUI Qingmei, et al. Acoustic emission localization technique based on generalized cross-correlation time difference estimation algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, **26**(11): 1513-1518.
- [10] 茅惠达, 张玲华. 声源定位中广义互相关时延估计算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, **52**(22): 138-142.
MAO Huida, ZHANG Linghua. Research on generalized cross correlation algorithm for time delay estimation in sound source localization[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, **52**(22): 138-142.
- [11] 杨开旭. 开关柜局放的超声波及TEV检测技术与现场应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
YANG Kaixu. Switchgear partial discharge ultrasonic detection technology and TEV analysis and field application[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.
- [12] 周康辉, 董万胜, 刘恒毅, 等. 利用二次相关改进的广义互相关时延估计算法[J]. 数据采集与处理, 2013, **28**(6): 801-806.
ZHOU Kanghui, DONG Wansheng, LIU Hengyi, et al. Improved generalized cross correlation method for time delay estimation by using second correlation[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2013, **28**(6): 801-806.
- [13] 何伟杰, 严天峰, 张宇, 等. 基于三次相关的时延估计算法[J]. 兰州交通大学学报, 2019, **38**(1): 66-71.
HE Weijie, YAN Tianfeng, ZHANG Yu, et al. Time delay estimation algorithm based on third correlation[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2019, **38**(1): 66-71.
- [14] 胡小锋, 刘卫东, 王雷, 等. 广义互相关电晕放电辐射信号时延估计方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, **30**(1): 56-60.
HU Xiaofeng, LIU Weidong, WANG Lei, et al. Time-delay estimation of corona discharge radiation signal based on generalized cross correlation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, **30**(1): 56-60.
- [15] POURMOHAMMAD A, AHADI S M. N-dimensional N-microphone sound source localization[J]. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, 2013(1): 27.
- [16] 孙洋, 徐慨, 杨海亮. 基于广义互相关时延估计算法的性能分析[J]. 计算机与数字工程, 2013, **41**(1): 33-34, 144.
SUN Yang, XU Kai, YANG Hailiang. Performance analysis of time-delay estimation based on generalized cross-correlation algorithm[J]. Computer & Digital Engineering, 2013, **41**(1): 33-34, 144.
- [17] 田孟. 统计学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 2019.