

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.016

高压电缆局部放电小波包-峰度法在线检测与定位

孙抗 郭景蝶 马星河

(河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要:在利用双端行波法进行高压电缆局放在线检测与定位时,针对脉冲初至时刻拾取精度不高影响定位精度的问题,引入地震信号检测领域中的时变峰度法。首先利用时窗能量比检测局放事件,然后在确定的局放时窗内,通过计算时变峰度变化率并求其最大值点,初步实现脉冲初至时刻拾取。为了克服现场强噪声干扰对拾取精度的影响,利用小波包分离出局放脉冲所在的主要频带,并在此频带内求取时变峰度极大值,实现了局放脉冲初至时刻的高精度拾取。最后运用到到达时间分析法实现局部放电源的在线精确定位。实验结果表明,该方法抗噪声干扰能力强,定位精度高,在-14 dB的噪声环境下定位误差小于2 m,能够满足高压电网对局放故障在线定位的精度要求,有效提高供电可靠性。

关键词:局部放电;峰度;小波包变换;定位;到达时间分析法

中图分类号: TM726.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

On line partial discharge detection and localization based on the wavelet packet-kurtosis

Sun Kang Guo Jingdie Ma Xinghe

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: On the basis of using double terminal traveling wave method to carry out on line detection and location of PD of high voltage cable, the time varying kurtosis method used in the field of seismic signal detection is introduced to solve the problem that the precision of the first break time affects the positioning accuracy. Firstly, the PD events is detected by using the method of time window energy ratio, then the pulse arrival time is preliminary picked up by calculating the time varying kurtosis change rate and the maximum point in determining the discharge time window. In order to overcome the influence of strong noise on picking precision, the main frequency band of partial discharge pulse is separated by wavelet packet, and the time-varying kurtosis maximum is obtained in this frequency band, which ensures that the high precision picking up of the first break time of PD pulse is achieved. Finally, the PD source is located by the method of two-terminal traveling wave. The simulation results show that this method can meet the high-voltage power lines on the PD line fault positioning accuracy requirements and effectively improve the reliability of power supply, not only has high precision and strong anti-interference ability, but also can realize that the error is less than 2 m in -14 dB noise environment.

Keywords: partial discharge; kurtosis; wavelet packet; location; actual time arrival

1 引言

电缆局部放电(局放)的在线检测与定位对于电缆绝缘状况的诊断具有非常重要的意义^[1]。高频电流法通过高频电流传感器(HFCT)耦合局放脉冲产生的电磁信

号来检测局放信号,是目前常用的局放在线检测方法^[2]。行波反射法(TDR)和到达时间分析法(ATA)是基于高频电流的常用定位方法。李雪云等人^[3]运用上述方法对电缆局放源进行定位,但其定位的精度高度依赖于局放信号初至时刻的拾取精度。宋建辉^[4]提出了基于时域反射原理的阈值法对电缆局放源进行定位,但其受噪声和

波形畸变影响较大,定位精度难以保证。高树国等人^[5]采用小波模极大值和峰值法进行局放在线定位,但小波模极大值法易受噪声影响产生多个伪极值点,峰值法受噪声影响较大,定位精度不高。

峰度是基于高阶统计量的一个经典统计量,指频数分布的集中程度,峰度值可以表征信号概率分布的陡峭程度^[6]。峰度算法常用于地震信号检测,本文将将其引入,用于局放初至时刻的在线拾取。针对运行中的电缆所处环境复杂,局放信号受强噪声干扰的问题,本文将小波包算法引入,用于提取局放脉冲信号。仿真结果表明,基于小波包-峰度算法的局放在线检测与定位方法抗噪声干扰能力强,可有效实现电缆局放的在线检测与精确定位。

2 峰度法局放初至时刻拾取

2.1 问题描述

在电缆局放在线定位应用中,由于噪声干扰、高频信号衰减、频散和反射等原因,TDR方法通常只适用于短距离局放定位。对于较长距离的电缆,可利用多传感器ATA法,通过比较局放信号到达各传感器的时间差实现局放源定位。如图1所示,在电缆本体上安装3个传感器,首尾两端A、B间距离为L,传感器C位于A、B中点。若同一局放信号到达两端传感器A、B的时刻分别为 t_1 、 t_2 ,则局放源与A端的距离为:

$$X = 0.5[(t_1 - t_2)v + L] \quad (1)$$

式中: v 为局放信号在电缆中的传播速度。

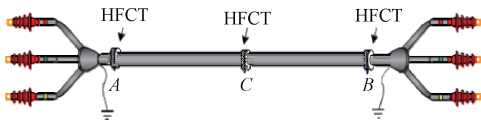


图1 多传感器安装示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-sensor installation

由式(1)可知,ATA法的定位精度高度依赖于局放信号初至时刻的拾取精度^[7]。人工拾取精度虽高,但并不适用于在线定位。而现有的自动拾取方法拾取精度受噪声的影响较大。因此,能否在线高精度拾取局放初至时刻是电缆局放在线检测与定位的关键。

2.2 峰度

高阶统计量因其可提供比二阶统计量更全面的信息而被广泛应用于信号处理的各个领域。设随机变量 x ,则其数学期望可表示为:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx \quad (2)$$

式中: $p(x)$ 为 x 的概率密度。则随机变量 x 的 k 阶统计量可表示为:

$$m_k = E[(X - E[X])^k] \quad k > 1 \quad (3)$$

在电缆局放在线监测数据处理中,因监测数据量较大,若直接采用高阶统计量对其进行处理,计算效率不高,因此,可通过求取高阶统计量的特殊点或特殊切片来反映局放信号的特征,从而提高计算效率^[8]。峰度是基于高阶统计量的一个经典统计量,是非对称和非高斯分布时间序列的重要度量参数,反映了信号分布的集中程度,其值可以表征信号概率分布的陡峭程度。对于确定发生局放事件的时窗,波形的陡峭程度在局放初至时刻发生明显变化。因此,根据其峰度值可以确定信号的初至时刻。

由式(2)和(3)可知,峰度的表达式为:

$$K = \frac{m_4}{(m_2)^2} \quad (4)$$

2.3 局放时窗检测

运用峰度拾取局放初至时刻的前提是确定的局放时窗,本文采用时窗能量比来确定局放发生的时窗。

对于监测到的时间序列,对时间轴上第 i 个采样点邻域附近取一时窗,时窗样点长度为2 m,该采样点 i 即为时窗中心,则后时窗与前时窗之间的能量比值可用下式表示:

$$R(i) = [(\sum_{k=i}^{i+m-1} x_k^2)^{1/2} + \lambda] / [(\sum_{k=i-m}^{i-1} x_k^2)^{1/2} + \lambda] \quad (5)$$

式中: λ 为稳定因子,其值应远小于前时窗的能量值 $(\sum_{k=i-m}^{i-1} x_k^2)^{1/2}$ 。式(5)的意义在于,当初至信号到达后,通过检测时窗能量比 R 是否大于给定的阈值,判断是否有局放事件发生^[9-10]。若未检测到符合条件的能量比值则循环至下一时刻,若检测出局放事件,则可确定出以局放事件点为中心,大小为2 m的时窗 $[x_n]$ 。因该时窗为离散信号,则其 k 阶统计量可表示为:

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k \quad (6)$$

式中: \bar{x} 为 $[x_n]$ 的平均值。

2.4 局放初至时刻拾取

时窗 $[x_n]$ 在局放脉冲初至时刻非对称性最强,鉴于此,可利用时变峰度变化曲线表征该时刻 $[x_n]$ 的非对称性。在时窗 $[x_n]$ 中,设计一个固定时窗长度为 a ,以采样点 i 为时窗中心的子时窗,由式(4)与(6)求其峰度,时刻 i 对应的时变峰度定义为子时窗峰度相对于 $[x_n]$ 峰度的变化率。即:

$$K_i(i) = \frac{K(i) - K}{K} \quad (7)$$

式中: $K(i)$ 为子时窗的峰度值, K 为时窗 $[x_n]$ 的峰度值。

图2所示为 $[x_n]$ 的峰度变化率曲线,在局放初至时

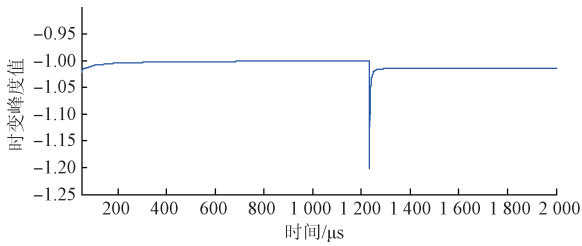


图2 时变峰度变化率曲线

Fig. 2 The time-varying kurtosis rate curve

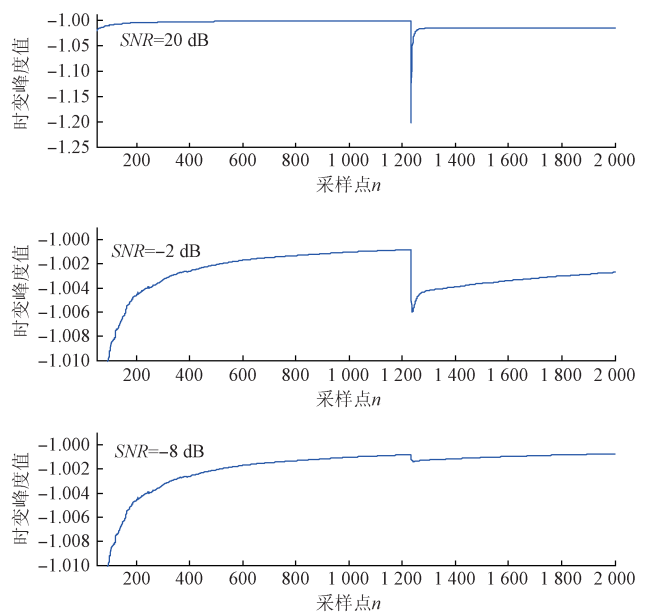
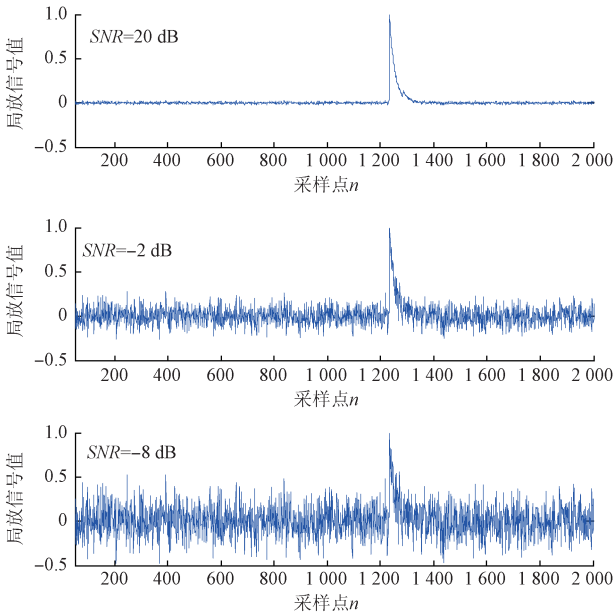


图3 不同程度噪声与对应特征曲线

Fig. 3 The curves of different noises and corresponding characteristic

表1 噪声对变峰度拾取结果的影响

Table 1 The effect of noise on pick-up result of kurtosis

SNR	20 dB	-2 dB	-5 dB	-8 dB	真实
结果	1 230	1 231	1 231	1 900	1 230

3 小波包-峰度法局放初至时刻拾取

由以上分析可知,单纯的峰度算法只适用于信噪比较高的情况下,当运行电缆受强噪声干扰时,基于峰度的局放在线定位方法其精度难以保证。而研究表明,电缆局放脉冲所含频带较高(最高达 GHz 数量级)而噪声干扰的频谱中主要分量多集中在 ≤ 1 MHz^[1]。因此,针对峰度算法受噪声干扰,影响初至时刻拾取精度的问题,提出采用小波或小波包分离高、低频信号以解决此问题^[11]。由于小波变换只对信号的低频部分做进一步分解,而对高频部分不再继续分解,所以小波变换仅能够很好地表征一大类以低频信息为主要成分的

信号,但它不能很好地分解和表示包含大量细节信息的信号,如非平稳机械振动信号、地震信号等^[12]。与之不同的是,小波包变换可以对高频部分提供更精细的分解,而且这种分解既无冗余,也无疏漏,所以对包含大量中、高频信息的信号能够进行更好的时频局部化分析^[13]。基于此理论,本文采用小波包对时间序列 $[x_n]$ 进行分析。

Wickerhauser(1992)提出了离散小波包变换公式,定义算子 F_0 和 F_1 为:

$$F_0 \{ S_k \} (j) = \sum_{k \in Z} S_k h_{k-2j}$$

$$F_1 \{ S_k \} (j) = \sum_{k \in Z} S_k g_{k-2j} \tag{8}$$

式中: $\{ h_m \}_{m \in Z}$ 和 $\{ g_m \}_{m \in Z}$ 分别为低通与高通滤波器^[14]。小波包变换表达式为:

$$c_{2n}^{k+1} = F_0(c_n^k)$$

$$c_{2n+1}^{k+1} = F_1(c_n^k) \tag{9}$$

式中: $c_n^k = \{ c_{n-j}^k \}_{j \in Z}$, $c_{2n}^{k+1} = \{ c_{2n-j}^{k+1} \}_{j \in Z}$, $c_{2n+1}^{k+1} = \{ c_{2n+1-j}^{k+1} \}_{j \in Z}$ 。

图4所示为 $[x_n]$ 小波包三尺度分解与重构波形。由图4可以看出,在高频重构层(a)中中局放脉冲信号含量最高,噪声含量较小,其他各层均严重受噪声影响,与实

际运行环境中测得的局放信号频谱特性一致^[15]。

采用时变峰度率绘出各重构层的时变峰度率曲线,如图5所示。

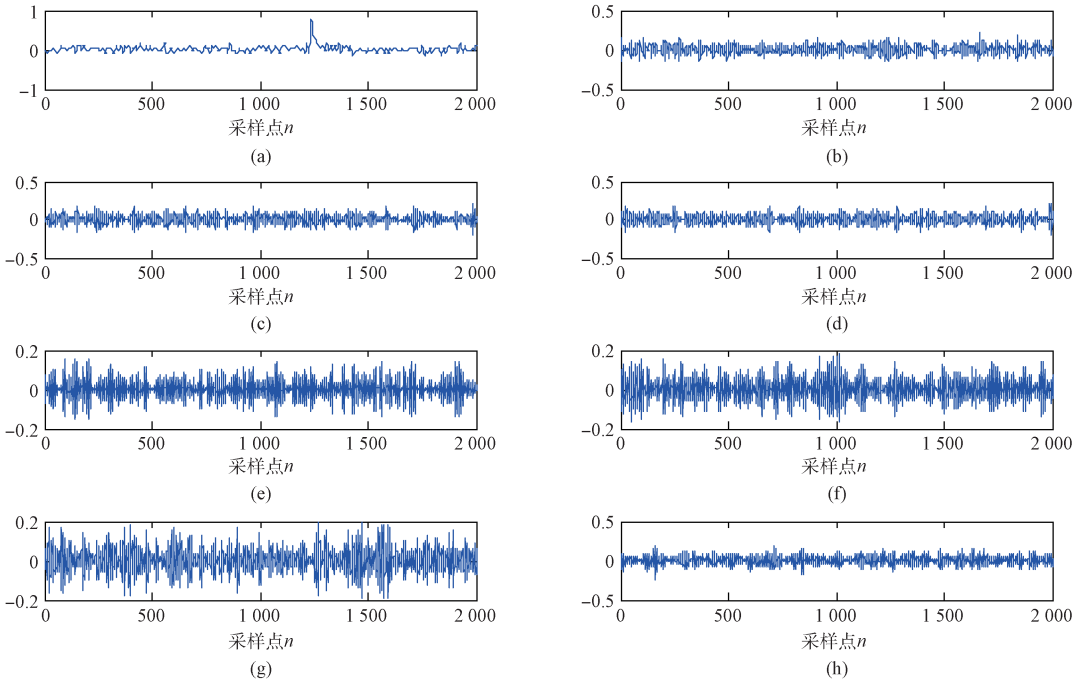


图4 小波包3尺度分解各层重构图

Fig. 4 Each layer reconstitution graph of wavelet packet 3-scale decomposition

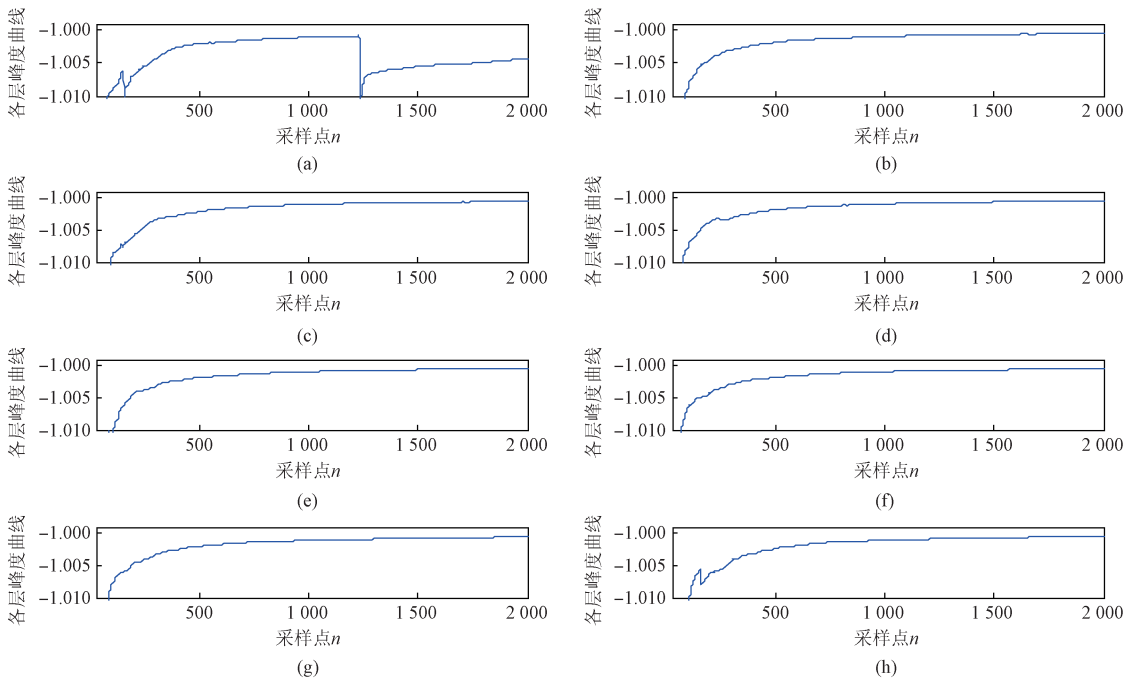


图5 小波包3尺度分解各层峰度

Fig. 5 Each layer kurtosis graph of wavelet packet 3-scale decomposition

通过图 5 中各层时变峰度率曲线得出的局放初至时刻分别为 1229、1996、1982、1986、1996、1996、1996、1996。

由此可知,通过高频重构层 a 得到的局放初至时刻与真实时刻最为接近,精度最高,其他各层均受噪声严重影响,难以拾取初至时刻。

基于此,提出小波包-峰度算法实现局放信号初至时刻的高精度拾取。首先采用小波包分离出局放脉冲所在的主要频带,然后求取该频带的时变峰度曲线,取其最大值为局放脉冲初至时刻。该方法可在更大程度上消除噪声对脉冲初至时刻拾取精度的影响,为下一步局放故障源的精确定位打下基础。

4 局放源在线定位

如上所述,运用小波包-峰度可以得到如图 1 中传感器 A、B、C 的波至时刻为 $t_{A(jd)}$ 、 $t_{B(jd)}$ 、 $t_{C(jd)}$ 。接下来,可通过这 3 个时刻值确定局放源范围,并进一步计算出局放信号在电缆中的传播速度,解决了因电缆型号、状态以及信号频率等多种因素导致传播速度与经验固定速度存在差异的波速不定性问题。 L 为所检测电缆长度。

若 $|t_{A(jd)} - t_{C(jd)}| < |t_{B(jd)} - t_{C(jd)}|$, 则局放源在 AC 段,局放脉冲的传播速度为:

$$v = \frac{L}{2(t_{B(jd)} - t_{C(jd)})} \quad (10)$$

若 $|t_{A(jd)} - t_{C(jd)}| > |t_{B(jd)} - t_{C(jd)}|$, 则局放源在 BC 段,局放脉冲的传播速度为:

$$v = \frac{L}{2(t_{C(jd)} - t_{A(jd)})} \quad (11)$$

若 $|t_{A(jd)} - t_{C(jd)}| = |t_{B(jd)} - t_{C(jd)}|$, 则局放源在 AB 外的电缆两端,局放脉冲的传播速度为:

$$v = \frac{L}{2|t_{B(jd)} - t_{C(jd)}|} = \frac{L}{2|t_{A(jd)} - t_{C(jd)}|} \quad (12)$$

将波速代入式(1)中,则局放源在 AC 段时,距离 A 端的距离为:

$$X = 0.5[(t_{A(jd)} - t_{C(jd)}) \frac{L}{2(t_{B(jd)} - t_{C(jd)})} + L] \quad (13)$$

局放源在 BC 段时,距离 B 端的距离为:

$$X = 0.5[(t_{B(jd)} - t_{C(jd)}) \frac{L}{2(t_{C(jd)} - t_{A(jd)})} + L] \quad (14)$$

5 仿真实验研究

5.1 仿真实验模型与方法

利用 PSCAD/EMTDC 中的 Bergeron Model 电缆模型对电缆局放系统进行仿真,验证小波包-峰度算法在电缆局放定位中的可行性。配置一根长 1 km 的电缆,将该电

缆模型简化为 3 部分:导体层、屏蔽层和外皮,如图 6 所示。电缆参数如表 2 所示。

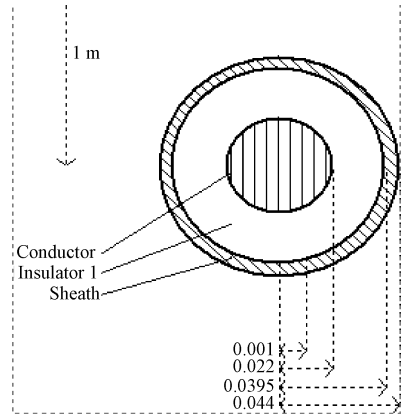


图 6 电缆仿真模型

Fig. 6 The simulation model of cable

表 2 10 kV 电缆模型参数

Table 2 The model parameters of 10 kV cable

电缆长度 L/m	导体半径 r_c/mm	绝缘半径 r_1/mm	$\rho/$ ($\Omega \cdot m$)	外壳半径 r_s/mm	ϵ_D
1 000	22	39.5	44	1.68×10^{-8}	4.1

缆放波形上升沿陡峭并且持续时间短,在数学模型上可以用指数函数模型来等效:

$$f(t) = Ae^{-(t-t_0)/\tau} \quad (15)$$

式中: A 是信号的幅值, t_0 是信号发生时间, τ 是衰减系数。当取 $A = 2 \text{ mV}$, $\tau = 1 \mu\text{s}$ 时,放电模型如图 7 所示。

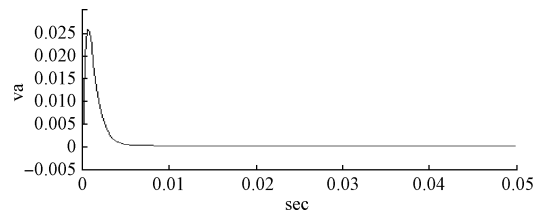


图 7 指数函数放电曲线

Fig. 7 The discharge curve of exponential function

在距离 A 端 100 m 处注入模拟脉冲;pscad 仿真模型图如图 8 所示。

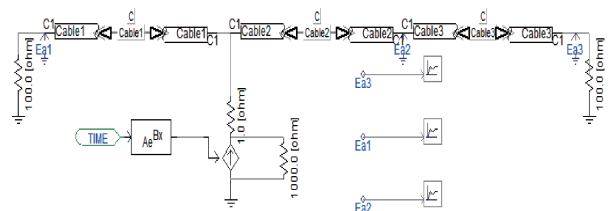


图 8 局部放电 Pscad 仿真模型

Fig. 8 Pscad simulation model of PD

利用传感器 Ea1、Ea2、Ea3 采集局放信号,如图 9 所示。从图可以看出局放信号到达传感器的时间延迟与电缆长度正相关。

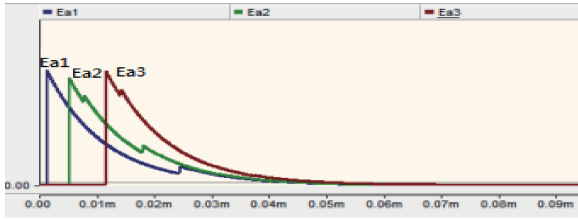


图9 传感器测得的局放信号

Fig.9 PD signal measured by sensor

5.2 结果分析

在电缆运行环境下,测量噪声难以避免。为验证算法对强噪声的适应能力,对局放脉冲分别添加信噪比为 -8、-12 和 -14 dB 的高斯白噪声,并分别对其运用本文所提出的小波包-峰度算法,得其时变峰度曲线如图 10 所示。

表 3 所示为不同信噪比情况下,分别运用小波包-峰度和当前应用较为普遍的峰值法得到的脉冲初至时刻以及基于 ATA 对长为 1 km,局放源距离为 100 m 的电缆进行在线局放故障定位的结果。

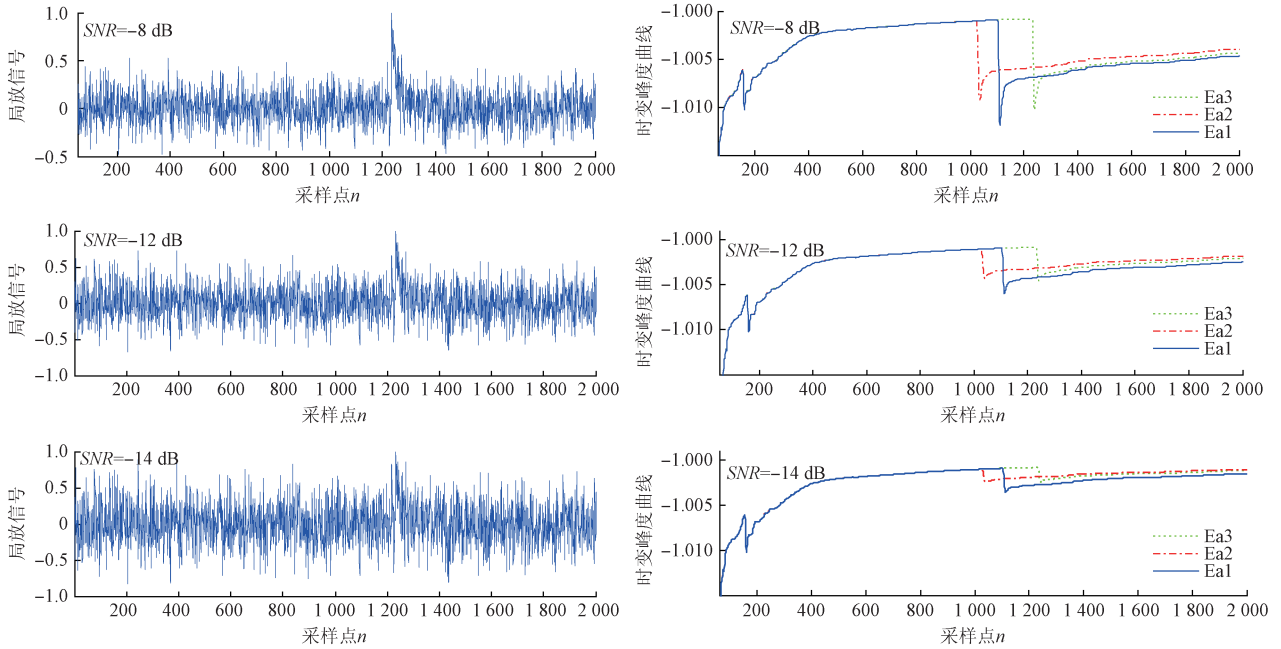


图 10 不同噪声与对应特征曲线

Fig.10 The curves of different noises and corresponding characteristics

表 3 不同噪声环境下局放波至时刻拾取及定位结果

Table 3 The pick-up and location result of wave moment of PD under different noisy environment

SNR/dB	小波包-峰度法					峰值法				
	Ea1	Ea2	Ea3	定位/m	误差/相对误差	Ea1	Ea2	Ea3	定位/m	误差/相对误差
-8	1 022	1 100	1 229	98.8	1.2 m/0.12%	1 028	1 107	1 234	93.1	6.9 m/0.69%
-12	1 023	1 101	1 230	98.8	1.2 m/0.12%	1 028	1 108	1 234	91.3	8.7 m/0.87%
-14	1 024	1 101	1 231	101.9	1.9 m/0.19%	1 028	1 108	1 234	91.3	8.7 m/0.87%

表 3 中相对误差定义如下:

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{实验值} - \text{真实值}|}{\text{线路总长度}} \times 100\% \quad (16)$$

比较可知,峰值法和本文所提小波包-峰度法的定位精度均受信噪比影响,但在相同噪声环境下,小波包-峰度法的定位误差小于峰值法。例如,在 -14 dB 的噪声环境下,对长度为 1 km 的电缆进行局放源在线定位,峰值

法的相对误差为 0.87%,而相同条件下,小波包-峰度法相对误差可达 0.19%,定位精度更高。

6 结 论

本文提出的小波包-峰度算法可实现电缆局放的在线定位,其定位精度高于传统的阈值法、峰值法和小波模

极值法。基于多传感器的 ATA 方法不仅实现了长电缆局部放电的在线检测与定位,且解决了波速不定性问题,提高了在线定位的精度。相比于单纯的峰度算法,本文所提出的小波包-峰度对噪声具有更强的适应能力,能够满足高压电网对局放故障在线定位的精度要求。

参考文献

- [1] 张磊祺, 盛博杰, 姜伟, 等. 交叉互联高压电缆系统的局部放电在线监测和定位[J]. 高电压技术, 2015, 41(8):2706-2715.
ZHANG L Q, SHENG B J, JIANG W, et al. On-line partial discharge localization in cross-bonded HV cable systems[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2706-2715.
- [2] 雷志鹏, 宋建成, 孙晓斐, 等. 矿用高压电缆局部放电测量传感器的研究及应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12):2265-2271.
LEI ZH P, SONG J CH, SUN X F, et al. Research and application of high-frequency current transformers for partial discharge measurement of mining cables [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2265-2271.
- [3] 李雪云, 刘青, 李丽英. 基于单端行波法的配电网混合线路波头组式故障测距方法[J]. 华北电力大学学报:自然科学版, 2014, 41(5):55-61
LI X Y, LIU Q, LI L Y. Based on single-ended traveling wave a head combined fault location method about distribution network the hybrid [J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(5):55-61.
- [4] 宋建辉. 基于时域反射原理的电缆测长若干关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
SONG J H. Some key techniques of cable lengths measurement based on time domain reflectometry [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [5] 高树国, 刘贺晨, 范辉, 等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2244-2250.
GAO SH G, LIU H CH, FAN H, et al. PD location method of power cable based on wavelet transform modulus maxima considering wave characteristics [J]. Power System Technology, 2016, 40(7):2244-2250.
- [6] 胡永泉, 尹成, 潘树林, 等. 改进的时变斜度峰度法微地震信号识别技术[J]. 石油物探, 2012, 51(6): 625-632.
HU Y Q, YIN CH, PAN SH L, et al. Improved kurtosis time-varying gradient method of micro seismic signal recognition technology [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum 2012, 51(6):625-632.
- [7] 刘劲松, 王赟, 姚振兴. 微地震信号到时自动拾取方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5):1660-1666.
LIU J S, WANG Y, YAO ZH X, et al. On micro-seismic first arrival identification: A case study [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1660-1666.
- [8] 郭洁, 陈祥献, 黄海, 等. 基于峰度的电力变压器铁芯松动故障在线监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11):2401-2407.
GUO J, CHEN X X, HUANG H. Application of kurtosis in on line detection of transformer iron core looseness[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2010, 31(11):2401-2407.
- [9] 张唤兰, 朱光明, 王云宏. 基于时窗能量比和 AIC 的两步法微震初至自动拾取[J]. 物探与化探, 2013, 37(2):269-273.
ZHANG H L, ZHU G M, WANG Y H, et al. Automatic picking up of seismic first arrival based on time window energy ratio and AIC two-step [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 269-273.
- [10] 秦晖, 宋维琪. 基于时窗能量比与互信息量的微地震初至拾取方法[J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 374-379.
QIN H, SONG W Q. Method of picking up microseismic first arrivals based on time - window energy ratio and mutual information [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2016, 40(2):374-379.
- [11] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用故障特征频带和 TT 变换的电缆单端行波测距[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22):103-112.
SHU H CH, TIAN X C, DONG J, et al. A single terminal cable fault location method based on fault characteristic frequency band and TT transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(22): 103-112.
- [12] 杜云朋, 王建斌, 靳小强. 超声导波管道检测的小波模极大值去噪法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7):683-687.
DU Y P, WANG J B, JIN X Q. Defect detection of ultrasonic guided wave pipeline using de-noising method based on wavelet modulus maximum [J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2013, 27(7): 683-687.
- [13] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19):8-13.
HAN X J, CHEN Y Y, ZHANG H, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuations of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19):

8-13.

- [14] 何星, 王宏力, 陆敬辉, 等. 基于优选小波包和 ELM 的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11):2614-2619.
- HE X, WANG H L, LU J H, et al. Analog circuit fault diagnosis method based on preferred wavelet packet and ELM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11):2614-2619.
- [15] 衡玲燕, 戴鹏, 符晓, 等. 基于小波包频带-能量重构的电机断条故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(10):56-60.
- HENG L Y, DAI P, FU X, et al. Rotor bar breaking fault diagnosis for motor based on wavelet packet frequency band-energy reconstruction [J]. Motor and

control applications, 2010, 37(10):56-60.

作者简介



孙抗, 2004 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2011 年于北京理工大学获得博士学位, 现为河南理工大学副教授, 主要研究方向为设备在线监测、智能电器等。

E-mail: sunkanghpu@163.com

Sun Kang received B. Sc. from Harbin Institute of Technology in 2004 and Ph. D. from Beijing Institute of Technology in 2011, respectively. Now he is associate professor in Henan Polytechnic University. His main research interest includes on-line monitoring and intelligent electrical apparatus.