

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.05.008

# 基于改进经验小波变换的局部放电荧光信号去噪

胡程勇<sup>1</sup>, 王廷云<sup>1</sup>, 黄烽<sup>1</sup>, 张小贝<sup>1</sup>, 李群<sup>2</sup>, 张子阳<sup>3</sup>

(1. 上海大学(特种光纤与光接入网重点实验室), 上海 200444;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 由于现场环境的复杂性,局部放电(partial discharge,PD)检测伴随着大量噪声干扰,易出现PD漏报与误报现象,影响电力设备后续运维工作。文中采用荧光光纤PD检测法,提出了基于谱峭度和改进经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)的自适应PD荧光信号去噪算法。首先利用快速谱峭度图确定荧光信号傅里叶频谱的紧支撑区域边界,随后对含噪荧光信号进行EWT分解并获得荧光信号所在的有效信号分量,最后对有效信号分量采用小波阈值法去除残留噪声,得到去噪后的PD荧光信号。利用该方法对仿真荧光信号进行去噪分析,并将去噪结果与经验模态分解-小波变换(empirical mode decomposition-wavelet transform, EMD-WT)法和EWT法进行对比,结果表明,该方法在信噪比、均方根误差和归一化相关系数等指标方面都有所提升,证明了该方法具有良好的去噪效果。此外,实测信号的去噪结果表明,该方法的降噪率优于EMD-WT法和EWT法,具有较好的噪声抑制能力。

**关键词:** 局部放电(PD); 荧光光纤; 光纤传感; 经验小波变换(EWT); 谱峭度; 去噪

**中图分类号:** TM835

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)05-0063-07

## 0 引言

局部放电(partial discharge, PD)是高压电气设备绝缘损坏的主要原因,通过对其进行有效监测,可以评估高压设备的绝缘状态,减少设备运行故障的发生<sup>[1]</sup>。由于PD检测通常采用电学传感器,易受电磁干扰,所以实际采集到的PD信号叠加了大量的噪声,PD检测的真实性受到影响。在所有PD检测方法中,荧光光纤PD检测法采用光纤作为探测元件,其具有本质绝缘和抗电磁干扰的优点,因此可以屏蔽绝大部分的噪声干扰<sup>[2-3]</sup>。

通常,荧光光纤PD探测法采用光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)将PD荧光信号转换为电信号,以便后续进行信号处理。虽然PMT是低噪声器件,但仍存在散粒噪声(白噪声)<sup>[4-5]</sup>,因此,实现PD荧光信号的噪声抑制有利于荧光光纤PD探测法在PD检测领域中的进一步应用。

目前,已经有许多PD信号去噪方法被广泛研究,包括傅里叶分析法<sup>[6]</sup>、小波阈值去噪法(wavelet threshold, WT)法<sup>[7]</sup>、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)法<sup>[8]</sup>以及经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)法<sup>[9]</sup>等。傅里叶分析法主要用于平稳信号的去噪,而PD信号为非平稳信号,因此该方法具有一定的局限性<sup>[10]</sup>。WT法根

据信号频率变化自动调节时频窗,可以有效去除噪声,但是须提前确定合适的小波基函数和分解层数,因此该方法缺乏自适应性<sup>[11]</sup>,不适用于变化的PD信号。EMD法根据信号的特征,将其分解成不同的本征模态分量,但是该方法缺乏理论支撑,而且存在模态混叠<sup>[12]</sup>和端点效应的问题,限制了去噪性能。EWT法结合了EMD法和WT法,同时解决了模态混叠的问题,然而该方法中傅里叶频谱是基于极值划分的<sup>[13]</sup>,因此,当信号中存在噪声时,信号的极值分布情况会受到影响,造成划分结果存在大量冗余的模态分量<sup>[14]</sup>,导致计算量增加,从而影响算法实时性。

为了解决PD荧光信号噪声抑制问题,文中采用荧光光纤传感器采集PD荧光信号,提出了基于谱峭度和改进EWT的自适应PD荧光信号去噪算法。利用该方法对仿真PD荧光信号和实测荧光信号进行去噪处理,并将结果与EMD-WT法、EWT法进行对比,验证了所提方法优异的去噪性能。

## 1 基本原理

### 1.1 谱峭度

谱峭度是一种谱统计量,不仅能够表示非平稳信号的存在,而且能够定位非平稳信号在频谱中的位置<sup>[15]</sup>。若信号中只有高斯噪声,则其谱峭度近似为0;而在非平稳信号存在的频率上,其谱峭度为较大的正值。

收稿日期:2023-08-03;修回日期:2023-09-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFF0708400)

由于PD荧光信号是非平稳信号,因此通过计算含噪信号的谱峭度,能够获取荧光信号所在的频率范围。常用的谱峭度计算方法有多种<sup>[16]</sup>,包括基于短时傅里叶变换计算方法、基于连续小波变换计算方法以及快速谱峭度图法。其中,前2种方法计算耗时严重,不适用于实际应用,因此,文中采用快速谱峭度图法。

快速谱峭度图法的基本原理是通过构建的1/3-二叉树滤波器组对信号进行分解<sup>[17]</sup>。该方法能够自动确定非平稳信号的最优中心频率 $f_c$ 和带宽 $B_w$ ,其结构如图1所示,图中 $f_s$ 为采样率。因此,通过最优中心频率 $f_c$ 和带宽 $B_w$ ,可以获取含噪信号中PD荧光信号在频谱中的分布位置。

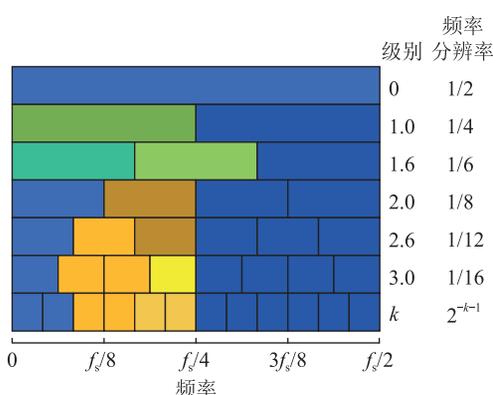


图1 快速谱峭度图结构

Fig.1 Structure of fast kurtogram

### 1.2 EWT

EWT法是一种针对非平稳信号的自适应分解方法。常规小波分析采用规定的尺度细分方案,即将信号连续划分为近似分量与细节分量,但由于该划分方案是预先规定的,所以常规小波分析缺乏自适应性。而EWT的划分方案是根据分析信号的频谱特征所建立的,因此EWT具有良好的自适应性。

假设傅里叶频谱 $[0, \pi]$ 被连续分割为 $N$ 个部分,每个部分的边界表示为 $\omega_n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ,其中 $\omega_0 = 0, \omega_N = \pi$ )。因此,紧支撑区域可以定义为:

$$A_n = [\omega_{n-1}, \omega_n] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$\cup_{n=1}^N A_n = [0, \pi] \quad (2)$$

利用Meyer和Littlewood-Paley小波构造思想,分别定义经验尺度函数 $\hat{\varphi}_1(\omega)$ 和经验小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$ <sup>[18]</sup>:

$$\hat{\varphi}_1(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| < (1-\gamma)\omega_1 \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_1}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_1)\right)\right) & (1-\gamma)\omega_1 \leq |\omega| < (1+\gamma)\omega_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_n)\right)\right) & (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| < (1+\gamma)\omega_n \\ 1 & (1+\gamma)\omega_n \leq |\omega| < (1-\gamma)\omega_{n+1} \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_{n+1})\right)\right) & (1-\gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| < (1+\gamma)\omega_{n+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\gamma$ 为紧支撑区域的相关参数; $\beta(m)$ 为辅助函数。

$$\gamma < \min\left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n}\right) \quad (5)$$

$$\beta(m) =$$

$$\begin{cases} 0 & m \leq 0 \\ m^4(35 - 84m + 70m^2 - 20m^3) & 0 < m < 1 \\ 1 & m \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

因此,原信号可以重构为:

$$x(t) = F^{-1}\left(\hat{W}_f^e(0, \omega)\hat{\varphi}_1(\omega) + \sum_{n=1}^{N-1} \hat{W}_f^e(n, \omega)\hat{\psi}_n(\omega)\right) \quad (7)$$

式中: $\hat{W}_f^e(0, \omega)$ 、 $\hat{W}_f^e(n, \omega)$ 分别为近似系数和细节系数; $F^{-1}(\cdot)$ 为傅里叶反变换。

由于快速谱峭度图能够获取含噪信号中PD荧光信号的最优中心频率 $f_c$ 和带宽 $B_w$ ,因此,在进行含噪信号的傅里叶频谱划分时,将噪声的紧支撑区域进行合并,即:

$$\begin{cases} \omega_0 = 0 \\ \omega_1 = (2\pi/f_s)(f_c - B_w/2) \\ \omega_2 = (2\pi/f_s)(f_c + B_w/2) \\ \omega_3 = \pi \end{cases} \quad (8)$$

将快速谱峭度图和EWT结合可以减少无效噪声分量的划分,从而降低算法的计算成本。

因此,含噪信号的各模态分量可以表示为:

$$\begin{cases} x_0(t) = F^{-1}(\hat{W}_f^e(0, \omega)\hat{\varphi}_1(\omega)) \\ x_1(t) = F^{-1}(\hat{W}_f^e(1, \omega)\hat{\psi}_1(\omega)) \\ x_2(t) = F^{-1}(\hat{W}_f^e(2, \omega)\hat{\psi}_2(\omega)) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_1(t)$ 为重构PD荧光信号; $x_0(t)$ 、 $x_2(t)$ 为噪声信号。后续处理仅针对信号 $x_1(t)$ 。

### 1.3 小波阈值去噪

重构PD荧光信号 $x_1(t)$ 仍然残留了少量白噪声,因此,须对 $x_1(t)$ 做进一步去噪处理。文中采用

WT法,根据式(10)所示阈值函数对重构信号进行阈值去噪处理。

$$q(k) = \begin{cases} x_1(k) & |x_1(k)| \geq \lambda_{th} \\ 0 & |x_1(k)| < \lambda_{th} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\lambda_{th}$ 为阈值,采用绝对中位差法<sup>[19]</sup>(median absolute deviation, MAD)进行估计。阈值估计通常采用 $3\sigma$ 准则<sup>[20]</sup>,但是该方法易受极端值的影响,导致估计的阈值偏大,而MAD法不受极端值的影响,因此, $\lambda_{th}$ 值表示为:

$$\lambda_{th} = 2.5M_{MAD} + \text{med}(X) \quad (11)$$

$$M_{MAD} = 1.4826 \text{med}(|X - \text{med}(X)|) \quad (12)$$

式中: $X$ 为信号序列; $\text{med}(\cdot)$ 为对信号求中位数。

#### 1.4 算法流程

文中所提方法的实现步骤如下,其流程如图2所示。

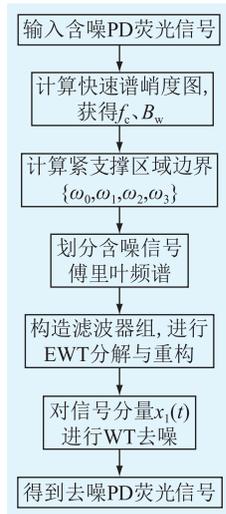


图2 算法流程

Fig.2 Flow chart of the algorithm

(1) 计算含噪信号的快速谱峭度图,得到PD荧光信号最优中心频率 $f_c$ 和带宽 $B_w$ ;

(2) 根据最优中心频率 $f_c$ 和带宽 $B_w$ 得到相应的紧支撑区域边界 $\{\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ ,随后划分含噪信号的傅里叶频谱;

(3) 利用上述边界构造滤波器组,并对含噪信号进行EWT分解,选择信号 $x_1(t)$ 为有用分量;

(4) 通过阈值函数和MAD阈值估计法对信号 $x_1(t)$ 进行WT去噪,最终获得去噪后的PD荧光信号。

## 2 仿真荧光信号分析

### 2.1 仿真荧光信号

荧光光纤PD探测法主要基于PMT输出的荧光强度。在PD紫外光的激发下,开始处于激发态

的粒子较多,荧光较强,随着时间的推移,荧光越来越弱,呈现双指数衰减<sup>[21]</sup>。因此,文中采用双指数衰减函数来模拟PD荧光信号<sup>[22]</sup>:

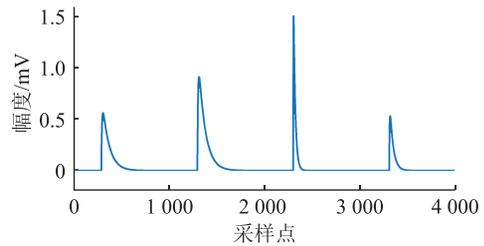
$$s(t) = A \left( e^{-\frac{1.3t}{\tau_1}} - e^{-\frac{2.2t}{\tau_2}} \right) \quad (13)$$

式中: $A$ 为脉冲峰值; $\tau_1, \tau_2$ 为时间常数。仿真信号由不同波形的脉冲组成,如表1所示。将高斯白噪声加入无噪PD荧光信号中,信噪比设置为0 dB,采样率 $f_s$ 设置为30 MHz,无噪荧光信号与含噪荧光信号如图3所示。

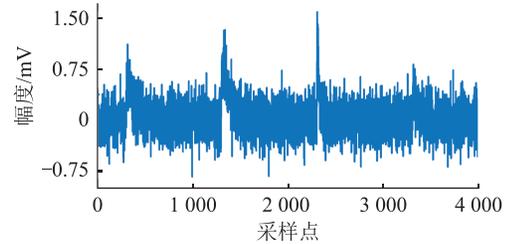
表1 仿真信号模型参数

Table 1 Parameters of the simulated signals model

脉冲参数	脉冲1	脉冲2	脉冲3	脉冲4
$A/\text{mV}$	0.8	1.3	2.0	0.8
$\tau_1/\mu\text{s}$	3.0	3.0	0.8	1.5
$\tau_2/\mu\text{s}$	0.5	0.5	0.1	0.3



(a) 无噪荧光信号



(b) 含噪荧光信号

图3 仿真信号

Fig.3 Simulated signals

### 2.2 仿真结果分析

仿真信号的快速谱峭度图如图4所示。可以看出,当分解级别为4.6时,谱峭度 $K$ 达到最大值,PD荧光信号的最优中心波长 $f_c$ 和带宽 $B_w$ 分别为0.3125 MHz和0.625 MHz。由于边界 $\omega_1 = 0$ ,所以紧支撑区域边界为 $\{0, 0.1309, \pi\}$ ,即信号的模态分量数为2。

根据上述获得的紧支撑区域边界,对含噪PD荧光信号进行EWT分解,分解结果如图5所示。由图5可以看出,PD荧光信号位于分量1中,而噪声信号位于分量2中。因此,将分量1进行EWT重构,随后对重构荧光信号进行WT处理,最终得到去噪后的PD荧光信号。

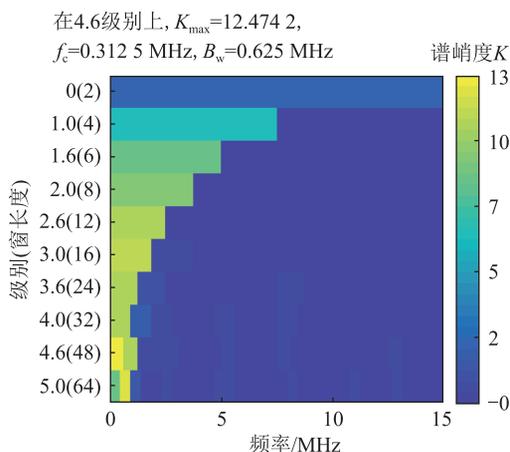


图4 快速谱峭度图

Fig.4 Fast kurtogram of simulated signals

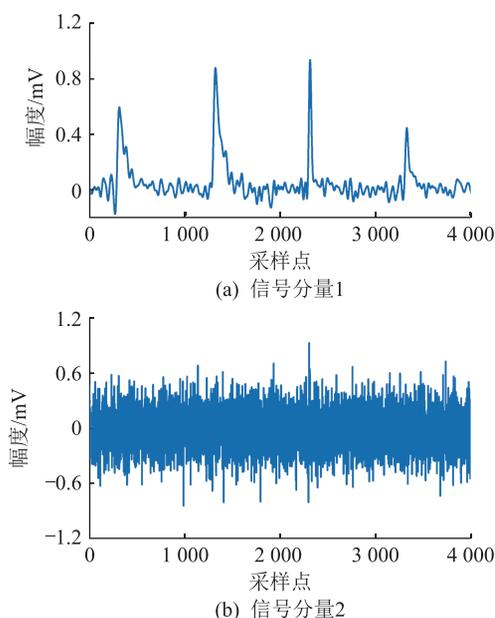


图5 EWT 分解结果

Fig.5 Results of EWT decomposition

为了检验所提方法的去噪性能,文中将所提方法与 EMD-WT 法<sup>[23]</sup>和 EWT 法<sup>[24]</sup>进行对比,3 种方法所对应的去噪结果如图 6 所示。

由图 6(a)可知,EMD-WT 法的去噪效果一般,可以明显看到振荡现象,这是由于存在模态混叠<sup>[25]</sup>。EWT 法能够分辨 PD 荧光信号,同时消除了模态混叠的影响,但还残留了少量的白噪声。因此,通过对比可知,文中所提方法具有更好的去噪效果。

为了定量分析所提方法的去噪性能,文中采用信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR), 均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 和归一化相关系数 (normalized correlation coefficient, NCC) 3 个指标<sup>[26]</sup>进行评价,表达式如下:

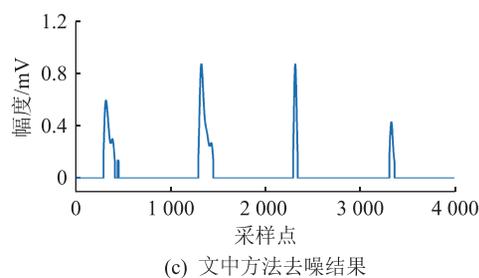
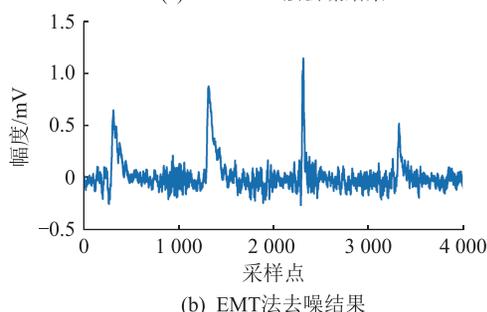
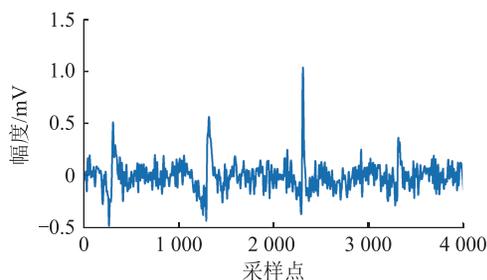


图6 不同去噪方法结果对比

Fig.6 Results comparison of different denoising methods

$$S_{\text{SNR}} = 10 \lg \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{len}}} s^2(k)}{\sum_{k=1}^{N_{\text{len}}} (y(k) - s^2(k))} \right) \quad (14)$$

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{len}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{len}}} (y(k) - s^2(k))} \quad (15)$$

$$N_{\text{NCC}} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{len}}} s(k)y(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_{\text{len}}} s^2(k) \sum_{k=1}^{N_{\text{len}}} y^2(k)}} \quad (16)$$

式中: $s$ 为无噪荧光信号; $y$ 为去噪后的荧光信号; $N_{\text{len}}$ 为信号长度。其中, $S_{\text{SNR}}$ 和  $N_{\text{NCC}}$ 越大, $R_{\text{RMSE}}$ 越小,表明方法的去噪性能越好。3 种方法去噪性能评价指标的对比如表 2 所示。由表 2 可知,与其他 2 种方法相比,文中所提方法的  $S_{\text{SNR}}$  和  $N_{\text{NCC}}$  最大,且  $R_{\text{RMSE}}$  最小,表明去噪后的信号有效抑制了噪声,同时波形失真更小,进一步证明了所提方法去噪的有效性。此外,3 种方法的计算时间分别为 0.387 2 s、1.683 0 s、0.351 3 s,表明文中所提方法在保证去噪性能的同时没有增加额外的计算成本。

表 2 去噪算法性能对比

Table 2 Performance comparison of denoising methods

方法	$S_{SNR}$	$R_{RMSE}$	$N_{NCC}$	计算时间/s
EMD-WT	0.912 4	0.140 1	0.531 8	0.387 2
EWT	7.107 6	0.068 7	0.904 3	1.683 0
文中方法	9.949 6	0.049 5	0.949 5	0.351 3

### 3 实测荧光信号分析

#### 3.1 实验装置

为了进一步验证所提方法的降噪效果,文中采用所提方法对实测荧光信号进行了处理分析,其实验装置如图 7 所示。采用针板缺陷模型模拟局部放电,通过荧光光纤传感器采集 PD 产生的紫外光,荧光光纤传感器采用实验室自制的铈钽共掺石英荧光光纤<sup>[27]</sup>,长度为 10 cm,该传感器置于一个黑色不透光的试验罐体中,该罐体设计参照国家电网公司企业标准《局部放电超声波检测仪技术规范》(Q/GDW 11061—2017)。荧光光纤传感器通过传输光纤连接到 PMT(H10722-210, Hamamatsu Photonics)。随后,采用高速示波器(MSO8204, Rigol)进行信号采集,采样率为 50 MSa/s。

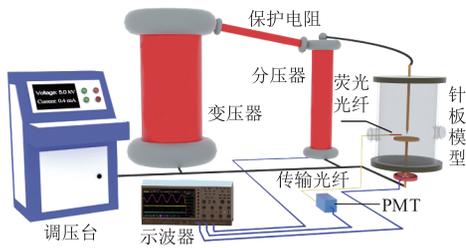


图 7 实验装置

Fig.7 Experimental setup

#### 3.2 结果与讨论

实验系统采集到的 PD 荧光信号如图 8 所示,采用上述不同方法对实测荧光信号进行去噪处理,其结果如图 9 所示。由图 9(a)可知,EMD-WT 法的去噪结果残留了较多的噪声,并且整体存在振荡现象。由图 9(b)可知,EWT 法的去噪效果相对较好,但残留了少量的白噪声。由图 9(c)可知,文中方法消除了白噪声,并且较好地恢复了 PD 荧光信号。

实测信号通常是含噪声的信号,无法获得无噪荧光信号,因此,2.2 节中评价指标不适用于实测信号,可采用降噪率(noise reduction ratio, NRR)来描述不同方法对实测信号的去噪性能,其表达式为:

$$N_{NRR} = 10(\lg \sigma_1^2 - \lg \sigma_2^2) \quad (17)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 分别为含噪荧光信号和去噪后荧光信号的标准差。通常, $N_{NRR}$ 越大,表明该方法的去噪性能越好。3 种方法的降噪率分别为 2.666 8(EMD-

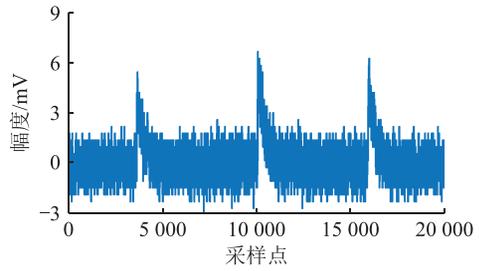
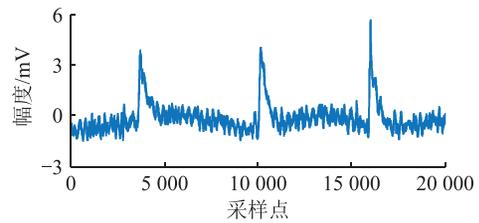
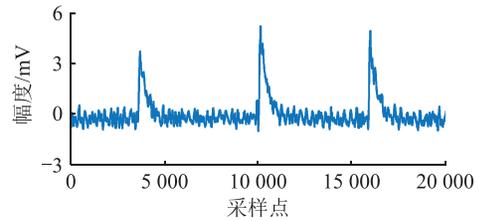


图 8 实测信号

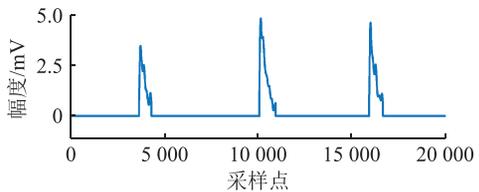
Fig.8 Measured Signals



(a) EMD-WT法去噪结果



(b) EWT法去噪结果



(c) 文中方法去噪结果

图 9 实测信号去噪结果对比

Fig.9 Denoising results comparison of measured signals

WT)、2.695 8(EWT)和 4.007 3(文中方法),因此可知文中方法的降噪率高于其他 2 种方法,去噪程度较高。综上所述,文中所提方法可以有效提取荧光信号,在 PD 荧光信号去噪方面具有明显的优势。

### 4 结语

文中采用荧光光纤 PD 检测法,提出了基于谱峭度和改进 EWT 的自适应 PD 荧光信号去噪算法。首先采用快速谱峭度图确定荧光信号的中心频率与带宽,并由此确定荧光信号的傅里叶紧支撑区域,将冗余分量的紧支撑区域进行合并以减少计算量,随后进行 EWT 分解获得荧光信号所在的有用信号分量。对有用信号分量采用 WT 法去除残留噪声,最终获得去噪后的 PD 荧光信号。对比文中方法与 EMD-WT 法和 EWT 法对仿真荧光信号和实测

信号的去噪结果可知,文中方法具有较好的去噪效果以及较小的波形失真。

#### 参考文献:

- [1] 宫成明. 电力设备局部放电超声波检测及降噪方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2022.  
GONG Chengming. Research on ultrasonic detection and noise reduction method of partial discharge in power equipment[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2022.
- [2] WU S Y,ZHENG S S. Detection of partial discharge in GIS and transformer under impulse voltage by fluorescent optical fiber sensor[J]. IEEE Sensors Journal,2021,21(9):10675-10684.
- [3] CHENG H T,ZHANG X X,TANG J, et al. The application of fluorescent optical fiber in partial discharge detection of Ring Main Unit[J]. Measurement,2021,174:108979.
- [4] 李乐,汪龙祺,黄煜,等. 光电探测系统噪声特性研究与降噪设计[J]. 光学精密工程,2020,28(12):2674-2683.  
LI Yue,WANG Longqi,HUANG Yu, et al. Study on noise characteristics of photoelectric detection system and noise reduction design[J]. Optics and Precision Engineering,2020,28(12):2674-2683.
- [5] 潘国鑫,刘惠,翟泽辉,等. 平衡零拍探测器的噪声特性分析与实验研究[J]. 量子光学学报,2021,27(2):109-116.  
PAN Guoxin,LIU Hui,ZHAI Zehui, et al. Analysis of the noise spectra in balanced homodyne detector[J]. Journal of Quantum Optics,2021,27(2):109-116.
- [6] WEI L L,LIU Y S,CHENG D F, et al. A novel partial discharge ultra-high frequency signal de-noising method based on a single-channel blind source separation algorithm[J]. Energies,2018,11(3):509.
- [7] 许佳,牛海清,郑文坚,等. 改进阈值函数的小波熵方法抑制局部放电白噪声的研究[J]. 电测与仪表,2017,54(8):28-32.  
XU Jia,NIU Haiqing,ZHENG Wenjian, et al. Suppressing white noise research in PD signal based on wavelet entropy and improved threshold function[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(8):28-32.
- [8] 张开生,赵小芬,王泽,等. 基于总体平均经验模态分解和一步式字典学习联合去噪的语音端点检测算法[J]. 科学技术与工程,2020,20(35):14536-14542.  
ZHANG Kaisheng,ZHAO Xiaofen,WANG Ze, et al. Voice endpoint detection algorithm based on ensemble empirical mode decomposition and one-stage dictionary learning joint denoising[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(35):14536-14542.
- [9] 秦金飞,朱琦,周玮,等. 基于经验小波与小波变换的GIS局部放电信号去噪方法研究[J]. 高压电器,2019,55(7):70-77,86.  
QIN Jinfei,ZHU Qi,ZHOU Wei, et al. Research on denoising method of GIS partial discharge signal based on improved empirical wavelet and wavelet transform[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(7):70-77,86.
- [10] JIN T,LI Q G,MOHAMED M A. A novel adaptive EEMD method for switchgear partial discharge signal denoising[J]. IEEE Access,2019,7:58139-58147.
- [11] 张健文,陈焕栩,周鹏. 基于小波阈值的局部放电去噪新方法[J]. 电工电能新技术,2017,36(8):80-88.  
ZHANG Jianwen,CHEN Huanxu,ZHOU Peng. New de-noising method for partial discharge signals based on wavelet threshold[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2017,36(8):80-88.
- [12] 江友华,朱毅轩,杨兴武,等. 基于Hankel-SVD-CEEMDAN改进阈值的局部放电特征提取方法[J]. 电网技术,2022,46(11):4557-4567.  
JIANG Youhua,ZHU Yixuan,YANG Xingwu, et al. Hankel-SVD-CEEMDAN improved threshold partial discharge feature extraction method[J]. Power System Technology,2022,46(11):4557-4567.
- [13] GILLES J,HEAL K. A parameterless scale-space approach to find meaningful modes in histograms—application to image and spectrum segmentation[J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing,2014,12(6):1450044.
- [14] LIU Q Q,YANG J T,ZHANG K. An improved empirical wavelet transform and sensitive components selecting method for bearing fault[J]. Measurement,2022,187:110348.
- [15] 高锐文,胡定玉,师蔚,等. 基于最大相关峭度解卷积和谱峭度的滚动轴承声信号故障特征增强[J]. 噪声与振动控制,2022,42(2):102-107.  
GAO Ruiwen,HU Dingyu,SHI Wei, et al. Enhancement of fault characteristics of rolling bearing acoustic signals based on maximal correlation kurtosis deconvolution and spectrum kurtosis[J]. Noise and Vibration Control,2022,42(2):102-107.
- [16] WANG Y X,XIANG J W,MARKERT R, et al. Spectral kurtosis for fault detection, diagnosis and prognostics of rotating machines;a review with applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2016,66:679-698.
- [17] 张旭辉,张超,樊红卫,等. 快速谱峭度结合阶次分析滚动轴承故障诊断[J]. 振动. 测试与诊断,2021,41(6):1090-1095,1235.  
ZHANG Xuhui,ZHANG Chao,FAN Hongwei, et al. Improved fault diagnosis of rolling bearing by fast kurtogram and order analysis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2021,41(6):1090-1095,1235.
- [18] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2013,61(16):3999-4010.
- [19] LEYS C,LEY C,KLEIN O, et al. Detecting outliers: do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the Median[J]. Journal of Experimental Social Psychology,2013,49(4):764-766.
- [20] 卢其威,李亚松,苏猛猛,等. 基于改进HHT的直流串联电弧故障检测方法[J]. 电工电能新技术,2022,41(11):70-81.  
LU Qiwei,LI Yasong,SU Mengmeng, et al. A DC series arc

- fault detection method based on improved HHT[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(11):70-81.
- [21] 杨碧玉,徐跃.一种基于 LSTM 神经网络的荧光寿命还原算法[J]. *光子学报*,2022,51(6):164-175.  
YANG Biyu,XU Yue. A fluorescence lifetime retrieval algorithm based on LSTM neural network[J]. *Acta Photonica Sinica*,2022,51(6):164-175.
- [22] 周国华,原辉,林语,等.基于 IDCQGA-OMP 的变压器局部放电稀疏分解去噪[J]. *高压电器*,2022,58(2):126-134.  
ZHOU Guohua,YUAN Hui,LIN Yu, et al. Partial discharge sparse decomposition denoising of transformer based on IDCQGA-OMP[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(2):126-134.
- [23] YANG J J, YAN K, WANG Z, et al. A novel denoising method for partial discharge signal based on improved variational mode decomposition[J]. *Energies*, 2022, 15(21):8167.
- [24] ZHONG J, BI X W, SHU Q, et al. Partial discharge signal denoising based on singular value decomposition and empirical wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(11):8866-8873.
- [25] SHANG H K, LI Y C, XU J Y, et al. A novel hybrid approach for partial discharge signal detection based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise and approximate entropy[J]. *Entropy*, 2020, 22(9):1039.
- [26] 高淑萍,徐振曦,宋国兵,等.基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3):29-40.  
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3):29-40.

---

作者简介:



胡程勇

胡程勇(1994),男,博士在读,研究方向为特种光纤及光纤传感技术(E-mail:desert\_hcy@163.com);

王廷云(1963),男,博士,教授,研究方向为特种光纤、光纤通信与传感、光互连技术、光电信号处理;

黄恽(1978),男,博士,副教授,研究方向为特种光纤及光纤传感技术。

## Denoising of partial discharge fluorescence signals based on improved empirical wavelet transform

HU Chengyong<sup>1</sup>, WANG Tingyun<sup>1</sup>, HUANG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Xiaobei<sup>1</sup>, LI Qun<sup>2</sup>, ZHANG Ziyang<sup>3</sup>

(1. Shanghai University (Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks), Shanghai 200444, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Due to the complexity of the operation environment, partial discharge (PD) detection is accompanied by a large amount of noise interference, resulting in the phenomenon of missed and false alarms, which affects the subsequent operation and maintenance of power equipment. In this paper, an adaptive denoising algorithm for PD fluorescence signal based on spectral kurtosis and improved empirical wavelet transform (EWT) is proposed by fluorescence fiber PD detection method. Firstly, the fast kurtogram is used to determine the compact support boundary of the Fourier spectrum of the fluorescence signal, and then the EWT is used to decompose the noise-containing fluorescence signal to obtain the useful signal components where the fluorescence signal is located. Finally, the wavelet threshold method is used to remove the residual noise from the useful signal components to obtain the denoised PD fluorescence signal. This proposed method is used to carry out denoising analysis on simulated fluorescent signals. The de-noising results are compared with the empirical mode decomposition-wavelet transform (EMD-WT) and the EWT method, which show that the method in this paper improves the signal-to-noise ratio, root-mean-square error and normalized correlation coefficient, proving that the method has good denoising effect. In addition, the denoising results of the measured signals demonstrate that this method in this paper has a higher noise reduction rate than the EMD-WT method or the EWT method does, as well as superior noise suppression capacity.

**Keywords:** partial discharge (PD); fluorescent fiber; optical fiber sensing; empirical wavelet transform (EWT); spectral kurtosis; denoising

(编辑 钱悦)