

文章编号:1000-582X(2012)07-054-07

# 抑制局部放电混合干扰的浮阈值量化算法

唐 炬, 吴冕之, 李 伟, 周加斌, 张晓星

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 由于局部放电(PD)信号与含有的混合干扰(白噪和窄带)在能量分布频段上存在明显差异,根据小波包变换各节点分解系数能够有效反映被分析信号能量变化的特点,建立一种以反映PD信号分解系数中噪声能量为判据的浮阈值量化算法,使得最优基下各节点阈值随相应节点分解系数中信号噪声强度的变化而变化,自适应地决定各节点最佳阈值选择,实现对PD信号分解系数更精细划分。通过对含有混合干扰的仿真与实测PD信号的小波包最优分解,分别用传统全局阈值量化算法与笔者建立的浮阈值量化算法进行了干扰抑制效果的对比,结果表明:后者具有更强的抑制混合干扰的能力,且混合干扰抑制前后PD信号波形相似度更高。

**关键词:** 局部放电;混合干扰;小波包变换;浮阈值量化算法;干扰抑制

**中图分类号:** TM835

**文献标志码:** A

## A floating threshold quantization algorithm to suppress mixing interferences in partial discharge

TANG Ju, WU Mianzhi, LI Wei, ZHOU Jiabin, ZHANG Xiaoxing

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Due to the obvious difference of energy distribution frequencies from partial discharge (PD) signal and its mixing interferences (white-noise and narrow-brand), we uses the characteristic that node decomposition coefficients of wavelet packet transform can effectively show the energy change of signals to build up a floating threshold quantization algorithm (FTQA) varying with the noise energy of PD decomposition coefficients. It makes the node thresholds under the optimal base various with the noise strength in decomposition coefficients to self-adaptively reality the choice of optimal threshold to finely partition PD decomposition coefficients. For simulated and real PD signals with mixing interferences, the conditional global threshold quantization algorithm (GTQA) and the proposed floating threshold quantization algorithm are employed to suppress the mixing interferences in PD signals and compared, and the results show that the proposed algorithm has the stronger suppression ability to mixing interference on PD signal and keeps perfect PD waveform via suppression.

**Key words:** partial discharge; mixing interferences; wavelet packet transform; floating threshold quantization algorithm (FTQA); interference suppression

**收稿日期:** 2012-01-15

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB724506);国家自然科学基金资助项目(5177181)

**作者简介:** 唐炬(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,973 首席科学家,主要从事高压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究,(Tel)023-65112739,(E-mail)cqtangju@vip.sina.com。

在对现场高压电气设备进行局部放电 (partial discharge, PD) 在线监测时,不可避免会受到各种干扰<sup>[1]</sup>,如各种白噪声、电网载波通讯或无线电通讯产生窄带脉冲、电磁操作产生随机脉冲等,使得所检测到的微弱 PD 信号被深度淹没而难以有效获取<sup>[2-3]</sup>。因此,对 PD 在线监测干扰的有效抑制一直是本领域研究的热点和难点<sup>[4]</sup>,尽管已取得了很多研究成果,但总结起来,基本上都以小波<sup>[5-6]</sup>或小波包<sup>[7]</sup>或复小波变换<sup>[8]</sup>等对 PD 信号中的白噪声干扰或窄带干扰单独进行抑制。然而,在现场监测 PD 时,往往同时受到多种干扰(白噪声和窄带)的共同影响,即混合干扰。譬如,白噪声干扰因其源于信号检测线路必然存在,窄带干扰主要源于载波或无线电通讯而也可被认为是 PD 监测中常见干扰,对于存在窄带干扰时的 PD 监测信号则必然含有白噪声干扰。为此,在抑制 PD 窄带干扰时,应考虑必然存在的白噪声干扰,此时,PD 监测中干扰抑制的对象即为窄带和白噪声干扰组成混合干扰。因此,研究 PD 监测中混合干扰的有效抑制更具有实际意义。

混合干扰必然包含多种噪声信号频率及各类噪声信号特性。小波包分解通过把不同频率成分的信号分解到对应频段上而产生对应信号频率的分解系数<sup>[9]</sup>,再采用全局阈值量化算法对分解系数的适度取舍以实现信号噪声的抑制。然而,全局阈值量化算法没有对不同信号频率的分解系数区别对待,存在对信号“粗糙”处理的不足。为此,笔者在小波包最优分解框架下,以小波包最优分解系数的噪声信号能量为判据,建立浮阈值量化算法,对不同频率的小波分解系数进行更精细选择以实现 PD 监测信号的“精细”处理,从而达到有效抑制混合干扰的目的。

## 1 小波包最优分解框架下浮阈值量化算法

小波包变换能够为分析信号提供更加精细的频率划分,在对低频信号空间进行深度分割的同时,同样对高频信号空间进行小波变换没有的相同层次和深度的二叉树结构分割,以实现频域空间的任意深度划分。

设  $\varphi(t)$  和  $\psi(t)$  分别是正交尺度函数与小波函数,在二尺度序列空间  $\{h_k\}$  和  $\{g_k\} \in I^2$  下满足:

$$\begin{cases} \varphi(t) = \sum_k h_k \varphi(2t-k), \\ \psi(t) = \sum_k g_k \varphi(2t-k), \end{cases} \quad (1)$$

式中  $g_k = (-1)^{k-1} h_{-k+1}$ ,则关于尺度函数  $\varphi(x)$  的小

波包分解迭代函数为

$$\begin{cases} \varphi_{2n}(t) = \sum_k h_k \varphi_n(2t-k), \\ \varphi_{2n+1}(t) = \sum_k g_k \varphi_n(2t-k). \end{cases} \quad (2)$$

通过上述迭代得到的不同频率小波包分解系数  $C(j, k)$ ,在分析信号噪声强度为  $\sigma$  时,常用小波包变换全局阈值量化算法下的全局阈值获取于以下极小化 Birge-Massart 惩罚函数,即

$$Thr(t) = - \sum C^2(k) + 2\sigma^2 t(\alpha + \ln(n/t)), \quad k \leq t; \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为调节参数;  $n$  为小波包分解系数个数。分析式(3),全局阈值从信号噪声强度  $\sigma$  考虑,顾及所有分解系数。阈值一旦确定后,对所有最优基下的高频分解系数采用相同阈值,没有针对不同分解层最优小波包基下的高频分解系数进行区别对待,分解系数的取舍显得“粗糙”,信号的干扰抑制效果欠佳以及重构信号的波形畸变较大从而导致信号的正确辨识率不高。

事实上,在最优小波包分解框架下,分析信号中各频率成分的信号能量已经反映在小波包最优基下各节点的分解系数上,包括信号能量和噪声能量。因此,可以根据这个潜在的可利用条件,建立以分解系数中噪声能量大小为判据的阈值量化算法,即所谓小波包最优分解浮阈值量化算法,使得最优基下各节点阈值跟随相应节点分解系数中信号噪声强度的变化而变化,以实现不同节点分解系数更精细划分,自适应地决定各节点最佳阈值的选择。

设  $\sigma_j$  为各节点分解系数中的噪声能量,由于分解系数的不确定性,可采用分解系数中位数法确定  $\sigma_j$ ,即

$$\sigma_j = \frac{\text{MED}(C(j, k))}{0.6745}, \quad (4)$$

式中:符号  $\text{MED}(\cdot)$  为分解系数中间值。因此,在最优基下对分解系数分别设置跟随噪声能量  $\sigma_j$  变化的浮阈值为

$$Thr_j = \frac{\sigma_j \sqrt{2 \ln(n)}}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

获取浮阈值  $Thr_j$  后,对分解系数进行非线性函数的阈值变换,可获得浮阈值后的分解系数:

$$\bar{C}(j, k) = \text{sgn}(C(j, k))(|C(j, k)| - Thr_j), \quad (6)$$

利用分解系数  $\bar{C}(j, k)$  重构信号,可以最大程度地消除信号干扰,保持信号特征波形。

## 2 模拟 PD 信号序列的混合干扰抑制

采用 4 脉冲数学模型<sup>[10]</sup>: ①单指数衰减脉冲; ②双指数衰减脉冲; ③单指数衰减振荡脉冲; ④双指数衰减振荡脉冲。分别代表 4 类不同典型绝缘缺陷诱发的 PD 信号, 构造相互独立的模拟 PD 信号序列, 如图 1(a)所示。

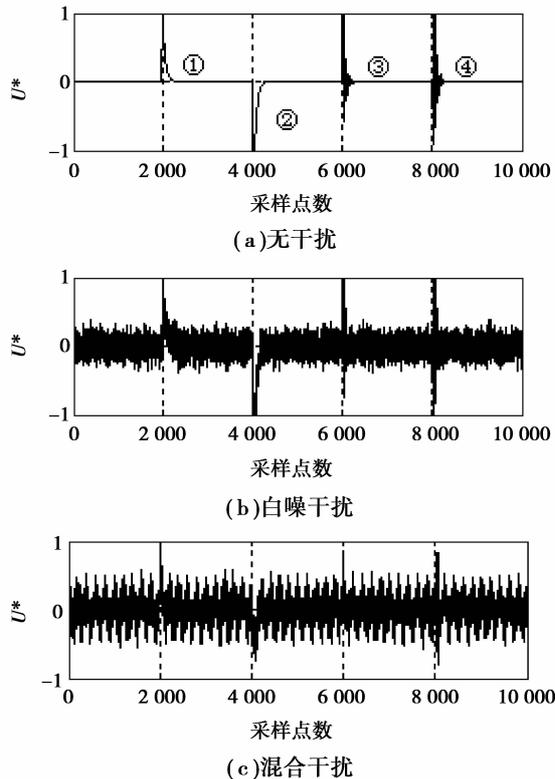


图 1 模拟 PD 脉冲序列

通过人工加白噪声干扰(SNR=2.5 dB)后的模拟 PD 信号如图 1(b)所示, 可见当 PD 信号被白噪声严重干扰后, 其波形特征已难以辨识。另外, 考虑到现场窄带干扰源性质与数量具有随机性, 笔者采用具有正弦、余弦和高斯信号特性且分别在 100、400、900 MHz 3 个频段窄带信号来模拟现场可能出现的随机窄带干扰, 模拟的窄带信号强度比(白噪声能量与窄带干扰能量的比值)为 1, 与白噪声一起形成的模拟混合干扰信号的信噪比 SNR 为 2.5 dB, 构造的含混合干扰的模拟 PD 信号序列如图 1(c)所示。

分别观察图 1(b)、(c)可以看出, 混合干扰对 PD 信号序列的波形特征辨识更难, 几乎分辨不出原信号的波形特征, 在信号段与非信号段都存在微小的“脉冲”波形。由于混合干扰更符合现场 PD 实测信号的干扰情形, 因此采用小波包最优分解框架下已有的全局阈值量化算法与笔者提出的浮阈值量化

算法分别对图 1(c)的模拟混合干扰 PD 信号进行干扰抑制效果的对比分析。

采用 Db3 母小波对图 1(c)中含混合干扰的模拟 PD 信号进行 8 层小波包分解, 在 Shannon 熵信息目标函数下的最优小波基共有 42 个节点, 通过浮阈值算法后前 10 个不同节点分解系数阈值见表 1。很显然, 针对不同节点的小波分解系数, 其阈值大小各不相同, 相互间差值较大, 与全局阈值量化算法(阈值固定为 0.54)相比, 其阈值差各异且差别较大, 可以推知浮阈值后小波分解系数的选择更“精细”, 表明去噪效果更好。重构混合干扰抑制后的 PD 信号序列如图 2(a)所示。为了进行对比分析, 同时给出了相同小波包分解下采用全局阈值量化算法抑制含混合干扰的结果如图 2(b)所示。

表 1 小波包最优分解下前 10 节点不同的浮阈值

| 节点序号 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 浮阈值  | 2.11 | 0.95 | 4.39 | 0.47 | 1.13 | 0.30 | 1.48 | 0.12 | 0.58 | 0.55 |
| 全局阈值 | 0.54 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

目测比较图 2(a)和(b)中不同阈值量化算法抑制混合干扰所得到的 PD 信号序列波形。很显然, 浮阈值量化算法能把混合干扰下的 4 个 PD 信号波形全部提取出来, 并保持较好波形, 而全局阈值量化算法在同样条件下抑制混合干扰, 丢失了第 3 个 PD 信号, 而提取出的其他 3 个 PD 信号, 波形畸变相对较严重。

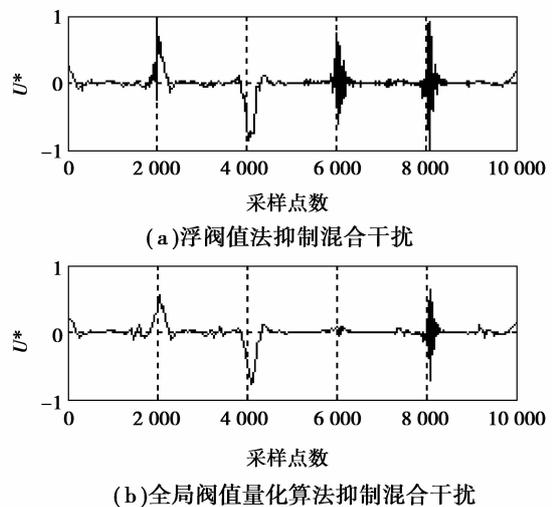


图 2 小波包最优分解不同阈值量化算法混合干扰抑制

计算混合干扰抑制后 PD 信号序列的信噪比 (SNR) 为 18.6 dB, 干扰抑制效果非常明显。分析干扰抑制后的 PD 信号序列波形畸变情况, 与图 1(a) 比较, 其波形相似系数 (NCC)<sup>[11]</sup> 达到了 0.84, 表明干扰抑制前后波形相似度较高, 畸变不严重。总体来看, 浮阈值量化算法抑制混合干扰比全局阈值量化算法具有明显优势, 能把小波包更精细的频率划分特点通过浮阈值方式尽显出来, 既获得明显的干扰抑制效果, 又能较好保持信号波形特征。

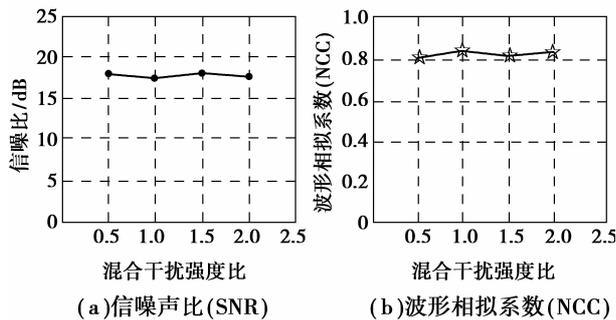


图3 不同混合干扰强度比下的干扰抑制效果

为了比较在不同混合干扰强度比下用小波包最优分解浮阈值量化算法抑制干扰的效果, 分别对干扰强度比为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 进行了干扰抑制效果比较, 其 NCC 和 SNR 曲线如图 3 所示。由此可见, 在不同混合后干扰强度下对模拟 PD 信号序列的混合干扰抑制效果, 其 SNR 和 NCC 分别都在 15 dB 和 0.8 以上, 表明小波包最优分解浮阈值算法能对不同混合干扰强度比环境下的 PD 信号进行有效提取, 具有较强的自适应性。

### 3 实测 PD 信号的混合干扰抑制

#### 3.1 PD 信号检测与 PD 混合干扰构造

为了检验小波包最优分解浮阈值量化算法对含有混合干扰的不同类型 PD 实测信号进行干扰抑制的能力, 笔者在实验室 GIS 模拟装置上, 分别设置 3 类典型绝缘缺陷物理模型<sup>[12]</sup>进行 PD 试验, 即(a)金属突出物(N类); (b)自由金属微粒(P类); (c)绝缘子气隙(G类), 试验接线如图 4 所示。试验电源为 YDTW-25/100 无晕试验变压器, PD 信号由内置环天线传感<sup>[13]</sup>, 用力科 Wavepro7100 数字示波器(带宽 1 GHz, 最大采样率 20 GS/s, 采样点为 10 000 个点, 存储深度双 48 MB)采集 PD 信号。

试验时分别将绝缘缺陷物理模型放入 GIS 模拟装置内, 并充以 0.3 MPa SF<sub>6</sub> 绝缘介质气体, 分别外

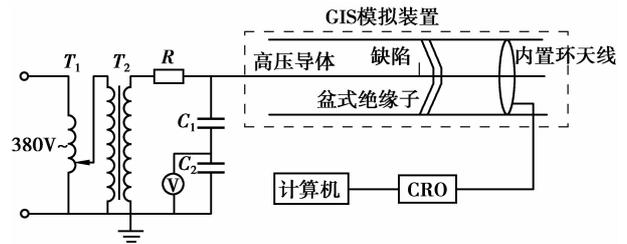


图4 GIS 模型与 PD 采集线路

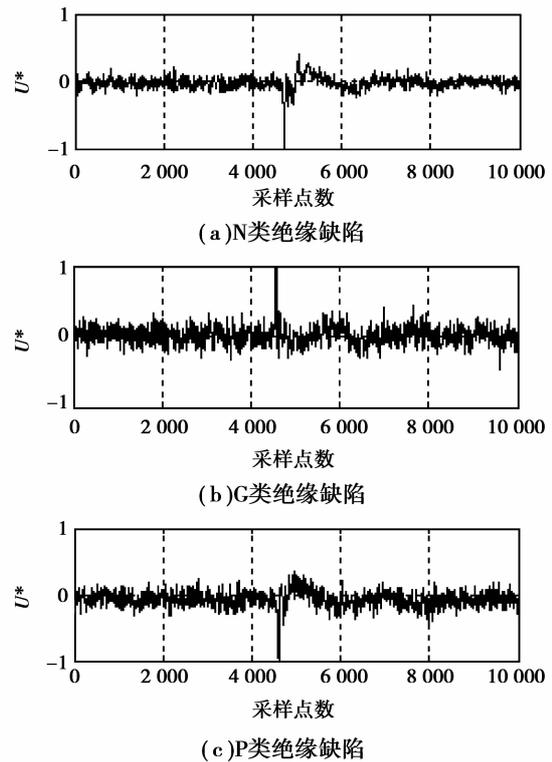


图5 实测 PD 信号

施电压使其产生稳定的 PD, 得到的 UHF PD 信号如图 5 所示。观察图中各 PD 信号波形不难看出, 各 PD 信号在实验室条件下仍存在较强的白噪干扰。可以推知, 在 GIS 现场较长的 PD 检测线路以及复杂的混合窄带干扰源条件下, 所检测的微弱 PD 信号必然被深度淹没在混合干扰背景下而更加难以辨识。

众所周知, 在现场监测 PD 信号中, 遇到的窄带干扰在类型、频带大小以及窄带数上具有随机性, 因此不同的窄带干扰信号必然构成不同特性的混频窄带干扰, 加之必然存在的白噪干扰, 会形成复杂的混合干扰。然而, 由于试验条件的局限性, 难以在实验室获取类似现场的各类窄带干扰, 加之窄带干扰源的随机性, 即使在试验中获得某一窄带干扰的 PD 信号也并不具有完全的代表性, 因此, 笔者采用人工加噪法, 对实验室获取的含有 900 MHz

窄带干扰(试验时用手机产生)和一定白噪的混合 PD 信号,再用两种频段、不同强度的窄带信号进行人工加噪,以构造出含有多频窄带混合干扰的混合 PD 信号。

在检测 PD 信号的天线传感器附近放置手机作为干扰源,以便在获取 PD 时得到含有 900 MHz 的通讯窄带干扰混合信号。图 6 是在检测 G 类绝缘缺陷产生 PD 时含有 900 MHz 通讯窄带干扰和白噪干扰信号的混合 PD 信号,为了节约篇幅,其他类型绝缘缺陷相应的含有混合干扰的 PD 检测信号省略。

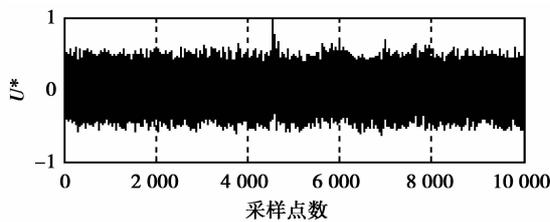


图 6 通讯窄带干扰的 G 类 PD 实测信号

为了验证前述的仿真研究结果,对图 6 的实测信号再人工加入具有正弦和余弦信号特性的分别在 100, 400 MHz 时的混合周期窄带干扰,当混合干扰强度比为 1.2 时,G 类绝缘缺陷的多频窄带混合干扰 PD 信号如图 7(b)所示,其余 2 类绝缘缺陷的多频窄带混合干扰 PD 信号如图 7(a)、(c)所示。观察对图 7 中的 3 类绝缘缺陷类型多频窄带混合干扰 PD 信号发现,加入混合干扰后,PD 信号基本上被多频窄带干扰和白噪干扰所淹没,与图 5 实测的无窄带干扰(只含有白噪干扰)PD 信号相比,信号受干扰程度强很多,其特征波形完全不可辨识。

### 3.2 实测 PD 信号的混合干扰抑制

分别采用前述的小波包阈值量化算法以及常用的全局阈值量化法对图 7 中含有混合干扰 PD 信号进行干扰抑制,并通过目测比较及 SNR 计算值定量来评价这两种阈值量化法的混合干扰抑制效果。

在小波包最优分解框架下,仍用 Db3 母小波并进行 8 层小波包分解,以 Shannon 熵为信号目标函数,只是对最优基节点下高频分解系数的阈值选择采用不同的方法。在浮阈值量化算法下混合干扰抑制后的 PD 信号如图 8 所示,而通过全局阈值量化算法后的 PD 信号则如图 9 所示。

观察图 8 中混合干扰抑制后的 PD 信号波形,很显然,信号干扰程度大幅度下降,PD 信号脉冲波形特征凸显出来。然而,信号中混合干扰抑制后遗

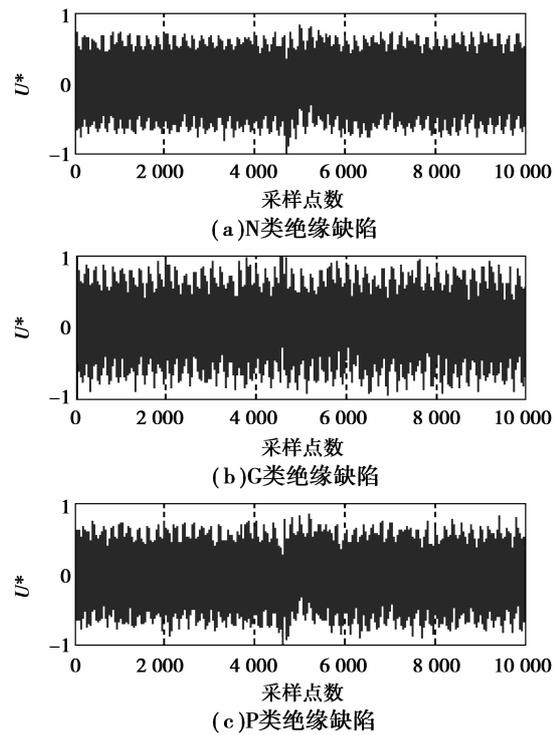


图 7 窄带干扰的实测 PD 信号

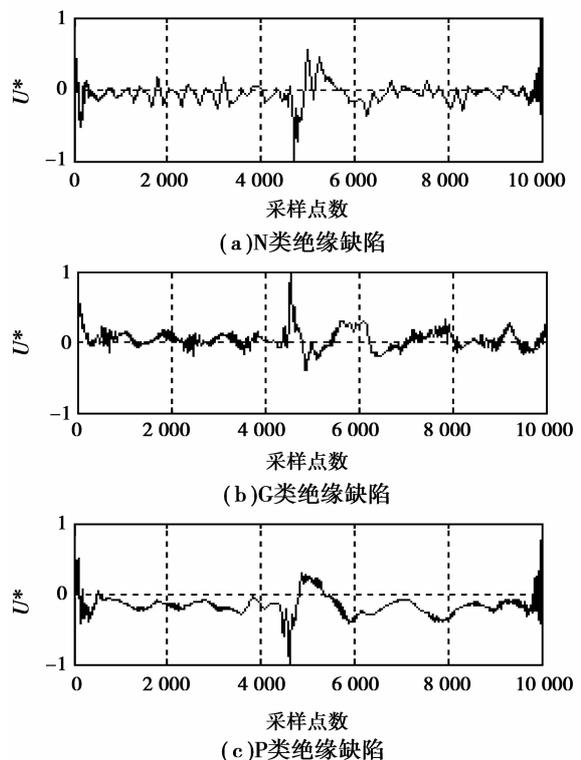


图 8 浮阈值量化算法混合干扰抑制的 PD 信号

留下的微小干扰“痕迹”仍然存在,各类 PD 信号情况略有不同。在非信号时间段干扰“波纹”幅度较大些,各 PD 信号在开始和结束处都存在较大的幅值突变。在信号段,PD 信号却保持着较好的波形特

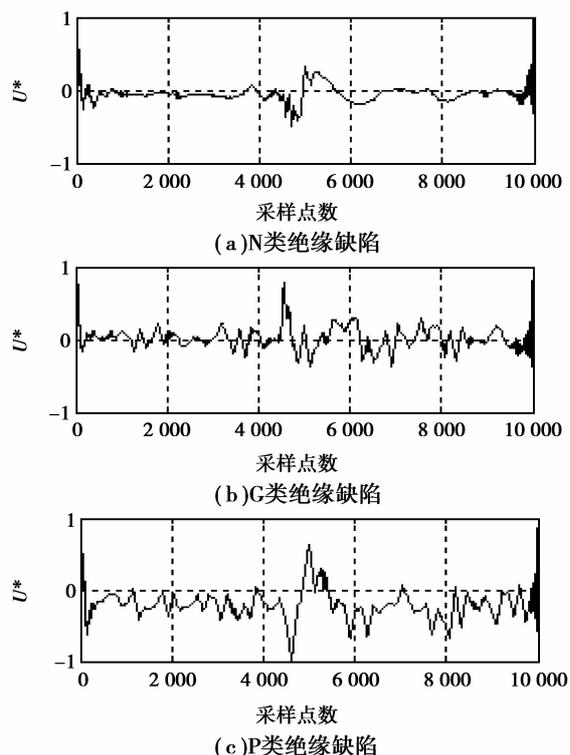


图9 全局阈值量化算法混合干扰抑制的 PD 信号

征,易于辨识绝缘缺陷类型,相对于图5和图6中的PD信号,混合干扰已经得到有效抑制。

相比图8中各类PD信号的干扰抑制,尽管在全局阈值量化算法能够把混合干扰抑制到一定程度(图9),然而,抑制后的PD信号波形畸变较重,G类和P类绝缘缺陷的PD特征波形仍可以显现出基本轮廓,但是在细节处信号信息丢失较大,而对N类绝缘缺陷,几乎损失了原有PD信号的特征波形,或者说PD信号根本就没有从混合干扰中提取出来。

表2 实测PD信号混合干扰抑制SNR(dB)计算

| PD类型 | N    | P    | G    |
|------|------|------|------|
| 浮阈值  | 16.5 | 17.8 | 17.4 |
| 全局阈值 | 12.8 | 13.7 | 10.5 |

由于各实测PD信号的理想波形难以确定,无法计算去噪前后波形的NCC,故仅进行SNR比较分析。通过两种不同阈值量化算法的混合干扰抑制后,各PD信号的SNR计算如表2所示。对浮动阈值量化算法,其SNR值均提高到16dB以上,然而,全局阈值量化算法后的SNR值不到14dB,表明前者信号中的混合干扰下降较多而抑制效果更好。对

比目测PD混合干扰抑制前后波形的干扰程度(图7、图8和图9),表明PD信号中的混合干扰抑制效果明显,与其SNR计算值所反映的干扰抑制效果一致,此外,浮动阈值量化算法后PD波形的特征信息损失更少。

## 4 结 论

1)由于各种噪声的能量分布频段存在差异,建立一种基于小波包变换抑制混合干扰的浮阈值量化算法,给出了浮阈值量化表达式,实现了对小波包最优分解框架下更精细的分解系数选择,能对检测的PD信号中含有不同噪声性质、多种干扰频段、不同干扰强度的混合干扰进行有效抑制。

2)构建了含有不同混合干扰强度下的仿真PD信号序列并对其进行混合干扰抑制,获得了较高的信噪比和波形相似系数,与常用的全局阈值量化算法相比,抑制混合干扰的效果更好。

3)在实验室获取了含有较强通讯窄带和白噪声干扰的3类典型绝缘缺陷产生的PD信号,并进行了多频窄带、不同强度干扰的加噪,进一步检验了浮阈值量化算法对混合干扰的抑制效果,其信噪比达到16dB以上,且PD波形特征突显,能对含有混合干扰的PD信号进行有效提取。

## 参考文献:

- [1] 高宁,朱德恒,谈克雄. 变压器局部放电在线监测信号中的电磁干扰及抑制[J]. 电工电能新技术, 1999, 18(4): 23-27.  
GAO Ning, ZHU Deheng, Tan Kexiong. Methods of noise suppression for online monitoring partial discharge in transformers [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1999, 18(4): 23-27.
- [2] Hoshino T, Nojima K, Hanai M. Real-time PD identification in diagnosis of GIS using symmetric and asymmetric UHF sensors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1072-1077.
- [3] Choi Y C, Jung S W, Kim S N, et al. Development of automatic identification method for GIS PD (Partial Discharge) defects diagnosis[C]//Proceedings of the 2007 IEEE Lausanne Power Tech, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 1005-1014.
- [4] Azcarraga C G, Garcia colon V R. Experiences on GIS on-site evaluation using high sensitivity PD techniques

- [C]//Proceedings of the 2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Oct. 10-12, 2007, Montreal, Que. Canada. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 181-185.
- [5] Lü J. Study on adaptive-threshold and translation invariant wavelet denoising in GIS[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, July 26-29, 2005, Beijing, China. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 224-228.
- [6] Sagar S R, Amarnath J, Narasimham S V L. Wavelet-based partial discharge signal analysis in GIS[C]//Proceedings of the 2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Oct. 14-17, 2007, Vancouver, BC, Canada, [S. l.]: IEEE Press, 2007: 217-220.
- [7] 周力行. 变压器局部放电检测中的小波包去噪算法[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 19-21.  
ZHOU Lixing. Noise eliminating algorithm by wavelet packet in on-line HV transformer PD detection [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 19-21.
- [8] 唐炬, 许中荣, 孙才新, 等. 应用复小波变换抑制 GIS 局部放电信号中白噪声干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 30-34.  
TANG Ju, XU Zhongrong, SUN Caixin, et al. Application of complex wavelet transform to suppress white-noise Interference in GIS PD signals [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(16): 30-34.
- [9] 李剑, 王小维, 金卓睿, 等. 变压器局部放电超高频信号多尺度网格维数的提取与识别[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 159-163.  
LI Jian, WANG Xiaowei, JIN Zhuorui, et al. Multi-scale grid dimension extraction and recognition of ultra-high frequency signals of transformer partial discharge [J]. Power System Technology, 2010, 34 (2): 159-163.
- [10] Tang J, Zhou Q, Tang M, et al. Study on mathematical model for VHF partial discharge of typical insulated defects in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 30-38.
- [11] 唐炬, 彭莉, 谢颜斌. 一种用于抑制白噪声的分层复阈值算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 25-30.  
TANG Ju, PENG Li, XIE Yanbin. An algorithm of complex multilevel threshold for reducing white-noise [J]. Processing of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(21): 25-30.
- [12] 周倩, 唐炬, 唐铭, 等. GIS 内 4 种典型缺陷的局部放电超高频数学模型构建[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 99-105.  
ZHOU Qian, TANG Ju, TANG Ming, et al. Mathematical model of four typical defects for UHF partial discharge in GIS [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26 (8): 99-105.
- [13] 唐炬, 侍海军, 许高峰, 等. GIS 局部放电两种内置传感器响应特性分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 29-31.  
TANG Ju, SHI Haijun, XU Gaofeng, et al. Two couplers for detection of partial discharge in gas-insulated substations [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(2): 29-31.

(编辑 王维朗)