

文章编号:1000-582X(2008)04-0401-07

一种抑制 PD 白噪干扰的有效复合信息技术

唐 炬^{a,b}, 邓志勇^{a,b}, 周 倩^{a,b}, 张晓星^{a,b}, 谢颜斌^{a,b}

(重庆大学 a. 电气工程学院; b. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:根据局部放电(partial discharge, PD)信号与白噪干扰经复小波变换后的不同特点,利用复小波变换后实部、虚部的简单信息构造出一种抑制白噪干扰的实、虚部组合序列的有效复合信息,分析该复合信息中序列幂指数对 PD 去噪性能的影响,并用去噪前后描述信号波形相似参数(normalized correlation coefficient, NCC),结合信噪比(signal to noise ratio, SNR),对用复小波变换去噪后的效果进行综合评价,给出不同的局部放电波形对应的复合信息序列幂指数值,最后,用所构造的 db4 复小波对仿真和实测 PD 信号进行了去噪。研究结果证明了在众多的复合信息中,复小波变换实、虚部组合序列的复合信息能有效抑制 PD 白噪干扰,畸变小,在 -7 dB 的强噪声中,提取 PD 信号的 NCC 和 SNR 仍高达 0.918 6 和 17.42 dB,有利于 PD 检测。

关键词:局部放电;复小波;复合信息;白噪干扰

中图分类号:TM835

文献标志码:A

An effective technique of combining information for reducing the white noise of partial discharge signals

TANG Ju^{a,b}, DENG Zhi-yong^{a,b}, ZHOU Qian^{a,b}, ZHANG Xiao-xing^{a,b}, XIE Yan-bin^{a,b}

(a. College of Electrical Engineering; b. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Based on the differences between partial discharge (PD) signals and white noise after complex wavelet transformation, an effective information combining technique that included both simple real and imaginary partial information was used to suppress white noise. The influence of the combined information series index on denoising capability of PD was investigated. A comprehensive study of the denoising effect of complex wavelet transformation was carried out by the introducing a normalized correlation coefficient (NCC) and signal-to-noise-ratio (SNR). The constructed db4 complex wavelet was used to denoise simulated and real PD signals. The results indicate that this special information combining composed of real and imaginary parts of complex wavelet transformation, has the best ability to effectively suppress PD white noise in a number of information combinations. Even if the SNR of PD is -7 dB, the NCC and SNR of the denoising signal can still reach 0.918 6 and 17.42 dB, respectively. This result is beneficial for PD detection.

Key words: partial discharge; complex wavelet; combining information; white noise

收稿日期:2007-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50577069);973 计划前期专项资助(2006CB708411)

作者简介:唐炬(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,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.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

由于现场存在强烈电磁干扰,使气体绝缘电器(gas insulated switchgear, GIS)中十分微弱的局部放电(partial discharge, PD)信号被淹没在噪声之中,所以,必须设法对于干扰加以有效抑制。传统的去噪方法大都基于傅里叶变换^[1],对 GIS 局部放电这种奇异性很强的信号会造成很大的畸变,效果也并不理想。小波变换在时域和频域同时具有良好的局部性,不仅更适用于非平稳信号的处理,而且还可以用不同尺度对信号小波变换的结果进行干扰分析,从中提取故障信号特征参数,因而得到广泛应用。特别是文献[2-3]提出的复小波变换,可用调节其相频特性的方法使之与信号更加适应,从而具有更强的去噪能力。

用复小波变换去噪后得到的是复信号,它有实部和虚部 2 个简单信息。根据电力系统信号的特点,文献[4]中提出了复合信息算法,利用简单信息来构造复合信息,以增加复小波变换处理信号的手段。笔者在复小波变换去噪的基础上,提出一种用于抑制白噪声的复合信息新算法,该算法不但能从强白噪声干扰中有效地提取出 PD 信号,还能保证对信号的畸变尽可能小。

1 复小波变换

1.1 复小波的构造

文献[2,4]指出,只要采用保持实小波滤波器的幅频特性、改变其相频特性的方法,就能获得与现有实小波相同特性(正交、紧支撑、消失矩和正则性等)的复小波。采用上述方法,笔者构造了 db4 复小波,用于文中 PD 信号的去噪。

1.2 复小波变换的简单信息和复合信息

通过复小波变换,能够得到实部和虚部 2 种基本信息^[4],因此,复小波变换的模和相角信息可以由下式定义,即

$$I_{wtr} = \sqrt{I_{wti}^2 + I_{wtm}^2}, \quad (1)$$

$$I_{wtp} = \arctan(I_{wti}/I_{wtr}), \quad (2)$$

式中: I_{wtr} 、 I_{wti} 分别为信号复小波变换后的实部、虚部信息; I_{wtr} 、 I_{wtp} 分别为模和相角信息。通常将以上 4 种信息定义为复小波变换的简单信息。根据复小波具有多信息的特点和文献[4-6]提出的方法,用以上的简单信息可以构造下列复合信息,即

$$I_{wtrp} = I_{wtr} \cdot I_{wtp}, \quad (3)$$

$$I_{wtip} = I_{wti} \cdot I_{wtp}, \quad (4)$$

$$I_{wtmp} = I_{wtm} \cdot I_{wtp}, \quad (5)$$

$$I_{wtir} = |I_{wtr}| \cdot |I_{wti}| \cdot I_{wtp}, \quad (6)$$

式中: I_{wtrp} 为信号复小波变换后实部与相角乘积的

复合信息; I_{wtip} 为虚部与相角乘积的复合信息; I_{wtmp} 为模与相角乘积的复合信息; I_{wtir} 为实、虚部模与相角乘积的复合信息。上述 4 种简单信息和复合信息,主要用于电力系统故障检测^[4],研究发现它们不适合从白噪声干扰中提取 PD 信号,提取出的信号信噪比不高,波形畸变严重。

为了尽可能地提高信噪比,同时减小波形畸变,笔者构造一种全新的复小波变换实部虚部组合的复合信息序列 $I_{wt,ir}^n$,即

$$I_{wt,ir}^n = I_{wtr} \cdot |I_{wti}|^n, \quad (7)$$

式(7)中随 n 取值的不同, $I_{wt,ir}^n$ 的去噪性能会相应发生变化,为了便于分析计算,笔者取 n 为小于 7 的非负整数。当 $n=0$ 时,复合信息 $I_{wt,ir}^n$ 就是简单信息 I_{wtr} 。

2 去噪效果参数定义

对局部放电信号去噪应满足 2 个基本原则:1)去噪算法能有效地提取信号,即去噪后信号的信噪比高;2)去噪后信号的畸变小。因此,笔者引入波形相似性参数(normalized correlatio coefficient, NCC)来描述去噪前后波形的相似程度,并结合信噪比(signal to noise ratio, SNR)进行综合评价。它们主要用于理论仿真研究,其定义见式(8)(9)。

$$NCC = \frac{\sum_{n=1}^N s(n) \cdot f(n)}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N s^2(n)\right) \cdot \left(\sum_{n=0}^{N-1} f^2(n)\right)}}, \quad (8)$$

式中: s 为原始信号; f 为去噪后的信号。

NCC 的值在 -1 到 1 之间, -1 代表变换前后的波形反向;0 代表两波形正交;1 则代表完全相同。NCC 大的波形其幅值不一定高,因为 NCC 只描述 2 个波形的相似程度,与波形幅值、能量衰减的多少无关。

$$SNR = 20 \lg \frac{\max_{i=1}^N \{s(i)\}}{\max_{i=1}^N \{n(i)\}}, \quad (9)$$

式中: $s(i)$ 为原始信号; $n(i)$ 为噪声信号。

笔者初步研究认为:当去噪后信号 $SNR > 10$ dB 时,对去噪效果的评价应主要由 NCC 的大小来表述。

3 复小波变换抑制白噪声干扰仿真分析

3.1 GIS 局部放电仿真信号源

采用常用的 4 种函数来模拟 PD 信号,即单指数衰减脉冲、双指数衰减脉冲、单指数衰减振荡脉冲和双指数衰减振荡脉冲^[2-3]。根据 GIS 局部放电的特性,选择时间常数 $\tau_1 = 1.5$ ns, $\tau_2 = 2.5$ ns; f_c 为

300 MHz。仿真中,设每个脉冲的采样率均为 20 G/s,采样点数 n 为 2 000,幅值 A 做归一化处理,其峰值的标么值为 1,并将其分别编号为①、②、③、④,如图 1(a)所示。用算法生成一组随机数作为白噪声^[7],其归一化峰值为 1 和 1.78,并与图 1(a)所示仿真信号分别叠加,得到如图 1(b)(c)所示的染噪信号。

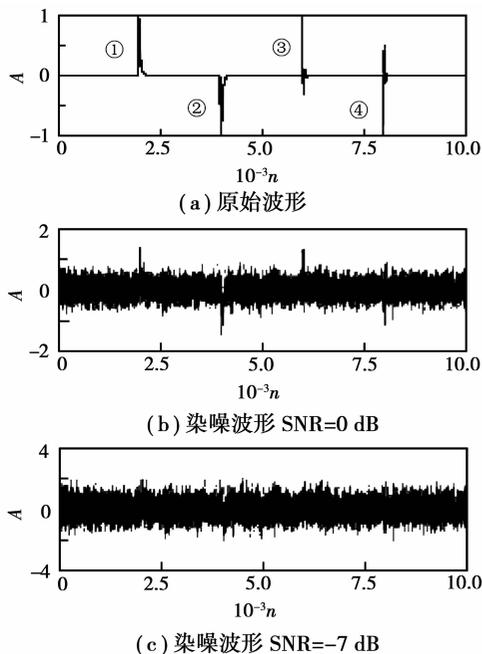


图 1 PD 信号源仿真

3.2 复小波变换抑制白噪干扰

笔者采用实小波 db4 构造的复小波对仿真信号①、②、③、④进行去噪,深入研究 $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列对白噪干扰的去噪能力。

笔者对信号进行 1~9 层分解,取极大极小阈值^[8-9],然后计算去噪前后信号的 NCC 和 SNR。当 n 取不同值时, $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列对不同染噪的信号提取的有效性有变化,即对不同 PD 信号和不同白噪声强度,对应有最佳的去噪复合信息。

3.2.1 简单信息与复合信息

1)染噪信号 SNR=0 dB 时的去噪效果。

图 2 是染噪信号的 SNR=0 dB 时,用复小波变换的 4 种简单信息去噪的结果。虽然噪声水平很低,但去噪效果并不理想,只有 I_{wtr} 能够提取部分仿真 PD 信号。从表 1、2 可见,对于信号②,其 NCC=0.903 9, SNR=11.32 dB,基本满足要求;对于信号③,其 SNR=10.26 dB 虽然满足要求,但 NCC 只有 0.8 左右,信号畸变较为严重;信号①④的 NCC 和 SNR 均不能达到去噪的基本要求。

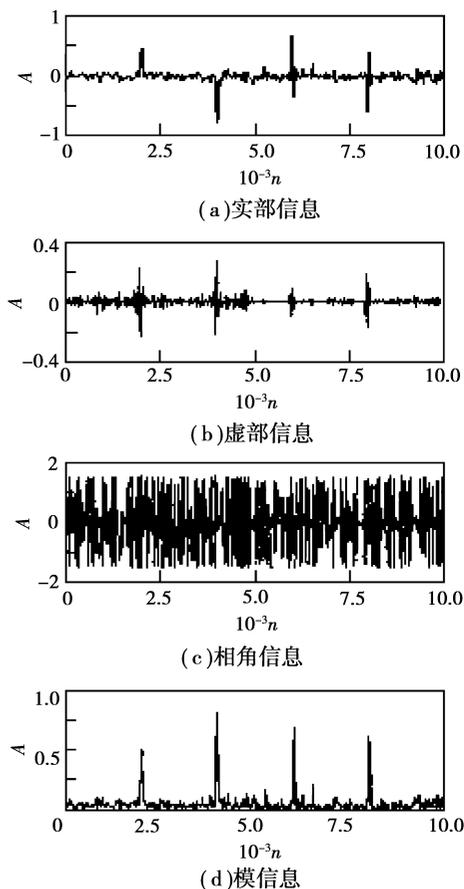


图 2 SNR=0 dB 时复小波变换的简单信息

表 1 SNR=0 dB 时的 NCC

复合信息	①	②	③	④
I_{wtr}	0.760 9	0.903 9	0.805 7	0.832 7
I_{wti}	-0.460 0	-0.470 0	-0.730 0	-0.790 0
I_{wtm}	0.733 1	-0.877 1	0.588 8	-0.409 7
I_{wtrp}	-0.623 0	-0.572 8	-0.760 4	-0.837 4
I_{wtip}	0.259 5	0.221 6	0.339 7	0.484 7
I_{wtmp}	-0.402 1	0.421 3	-0.391 9	0.292 4
I_{wtrip}	0.843 6	-0.831 3	0.539 2	-0.407 5
$I_{wt,ir}^1$	0.901 1	0.906 9	0.966 4	0.952 7
$I_{wt,ir}^2$	0.875 4	0.836 4	0.967 8	0.956 3

表 2 SNR=0 dB 时去噪后 SNR dB

复合信息	①	②	③	④
I_{wtr}	7.02	11.32	10.26	8.99
I_{wti}	8.32	9.68	1.22	6.51
I_{wtm}	7.63	11.75	10.29	9.32
I_{wtrp}	9.64	11.38	3.20	8.27
I_{wtip}	9.39	9.20	-2.75	2.54
I_{wtmp}	9.41	9.16	-0.48	4.92
I_{wtrip}	18.67	21.77	5.12	15.49
$I_{wt,ir}^1$	21.35	27.30	21.71	24.19
$I_{wt,ir}^2$	31.40	37.69	33.15	36.60

在染噪信号 SNR=0 dB 时,用复小波变换的各种复合信息去噪的结果如图 3 所示,可以看出,几种复合信息的去噪效果有很大差别,前 4 种复合信息基本不能提取出 PD 信号,无论是 SNR 还是 NCC

都不能达到要求; $I_{wt,ir}^n$ 序列的效果很好,它对于 4 种不同种类的 PD 信号,其 NCC 值都是最大的(见表 1),且其 SNR 也高达 20 dB 左右(见表 2),完全能满足要求。

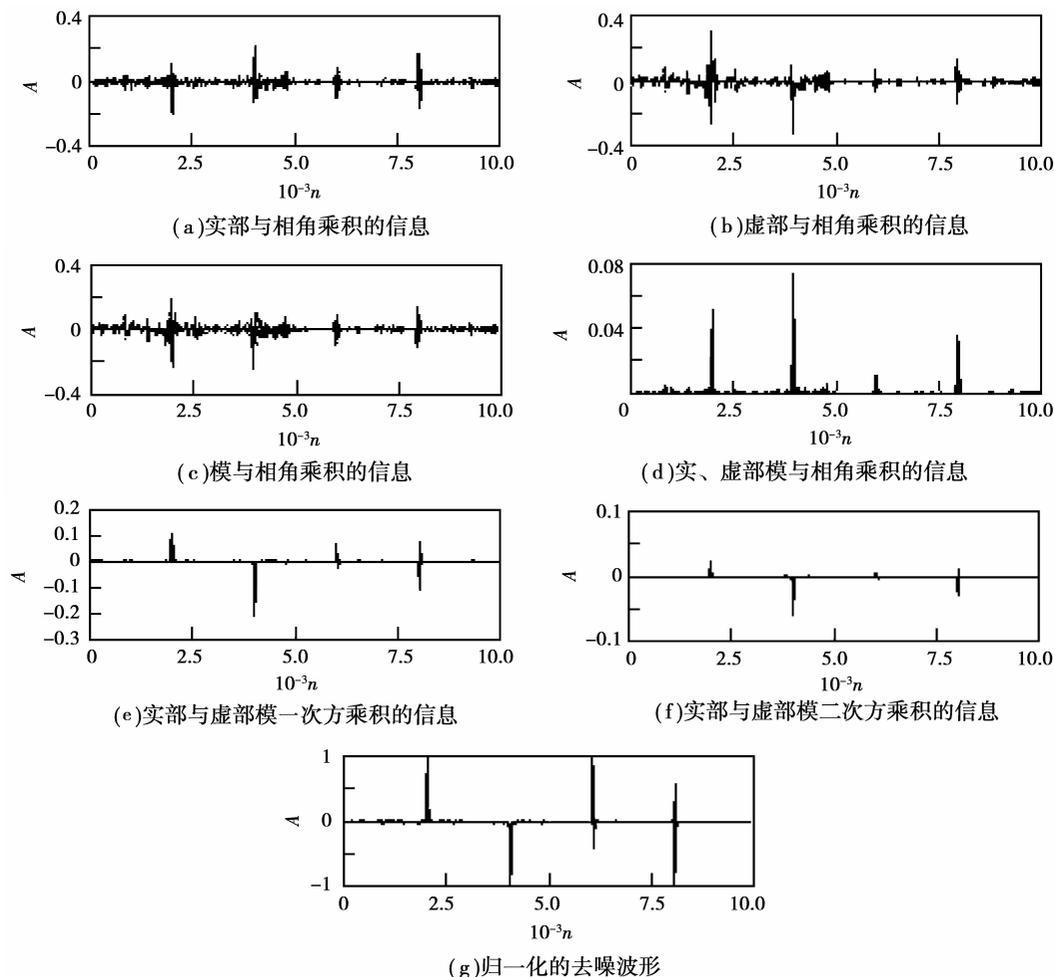


图 3 SNR=0 dB 时复小波变换的复合信息

复合信息 $I_{wt,ir}^n$ 中 n 的取值对去噪性能有很大影响,仿真实验发现,对 SNR=0 dB 的染噪信号, $I_{wt,ir}^1$ 对于信号①②能够获得最大的 NCC, $I_{wt,ir}^2$ 对于信号③④能够获得最大的 NCC,其 SNR 也达到大于 10 dB 的要求。因此,在 SNR=0 dB 时, $I_{wt,ir}^1$ 是信号①②的最佳去噪复合信息; $I_{wt,ir}^2$ 是信号③④的最佳去噪复合信息。

2) 染噪信号 SNR=-7 dB 时的去噪效果。

当染噪信号 SNR=-7 dB 时,几种简单信息和复合信息的去噪效果如图 4、5 和表 3、4 所示。

算例中,PD 信号已被噪声所淹没。从提取信号的角度看,简单信息的去噪能力显著下降,已不能有效地提取 PD 信号; $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列除外,但不同

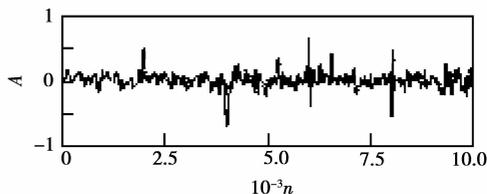


图 4 SNR=-7 dB 时复小波变换的简单信息

序列的 $I_{wt,ir}^n$ 对不同类型 PD 信号在强噪声下的去噪效果是不一样的, $I_{wt,ir}^1$ 对信号②, $I_{wt,ir}^2$ 对信号①④, $I_{wt,ir}^3$ 对信号③的畸变最小,且其去噪后的 SNR > 10 dB。因此,在 SNR=-7 dB 时, $I_{wt,ir}^1$ 是信号②的最佳去噪复合信息; $I_{wt,ir}^2$ 是信号①④的最佳去噪复合信息; $I_{wt,ir}^3$ 是信号③的最佳去噪复合信息。

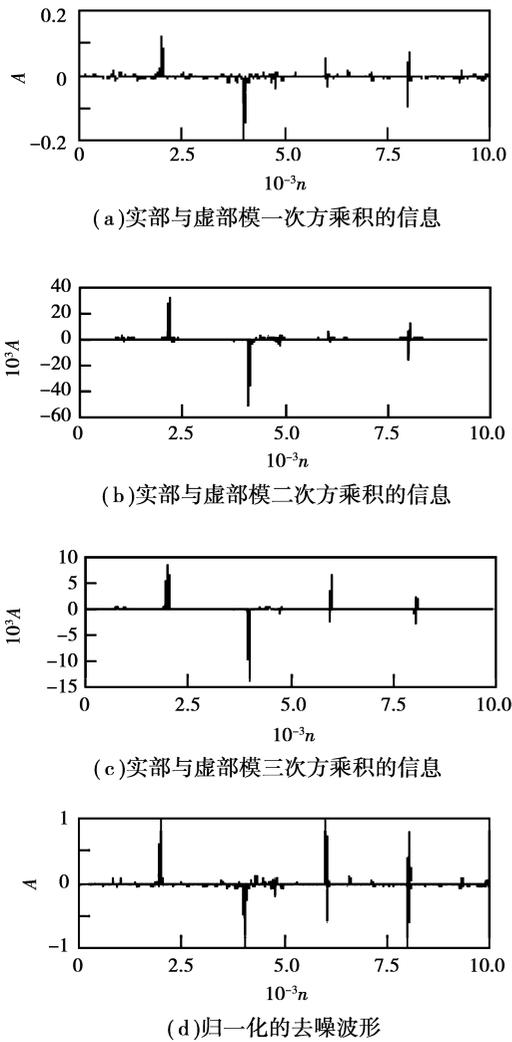


图 5 SNR=-7 dB 时复小波变换的复合信息

表 3 SNR=-7 dB 时的 NCC

复合信息	①	②	③	④
$I_{wt,ir}^0$	0.631 0	0.739 9	0.598 9	0.652 2
$I_{wt,ir}^1$	0.853 4	0.825 5	0.813 9	0.900 9
$I_{wt,ir}^2$	0.864 6	0.805 4	0.884 0	0.924 5
$I_{wt,ir}^3$	0.836 2	0.771 5	0.898 3	0.918 6

表 4 SNR=-7 dB 时去噪后 SNR dB

复合信息	①	②	③	④
$I_{wt,ir}^0$	1.54	4.68	3.76	2.24
$I_{wt,ir}^1$	9.18	12.15	5.94	8.35
$I_{wt,ir}^2$	13.20	15.18	9.21	12.83
$I_{wt,ir}^3$	14.23	18.20	12.48	17.42

且在相同的噪声幅值下,不同 PD 信号也会有不同的最佳去噪复合信息。但是,无论在什么噪声水平下,复合信息 $I_{wt,ir}^n$ 序列都能提取出 PD 信号,并且对信号的畸变最小。

3.2.2 幂次 n 对 $I_{wt,ir}^n$ 的影响分析

从以上 2 种不同程度染噪信号的去噪效果可以看出, $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列中幂次 n 的选择对其去噪能力有很大影响,笔者对于 n 的选择,主要依据 NCC 和 SNR 的综合描述。用 $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列去白噪时,其去噪后的 SNR 比较高,且随着 n 的增大而增大,都能满足去噪要求;NCC 随 n 变化如图 6 所示,这里取 $n=1,2,\dots,6$,噪声归一化峰值取 1、1.5、2、2.5,即染噪信号的 SNR 分别为 0、-3.52、-6.02、-7.95 dB。

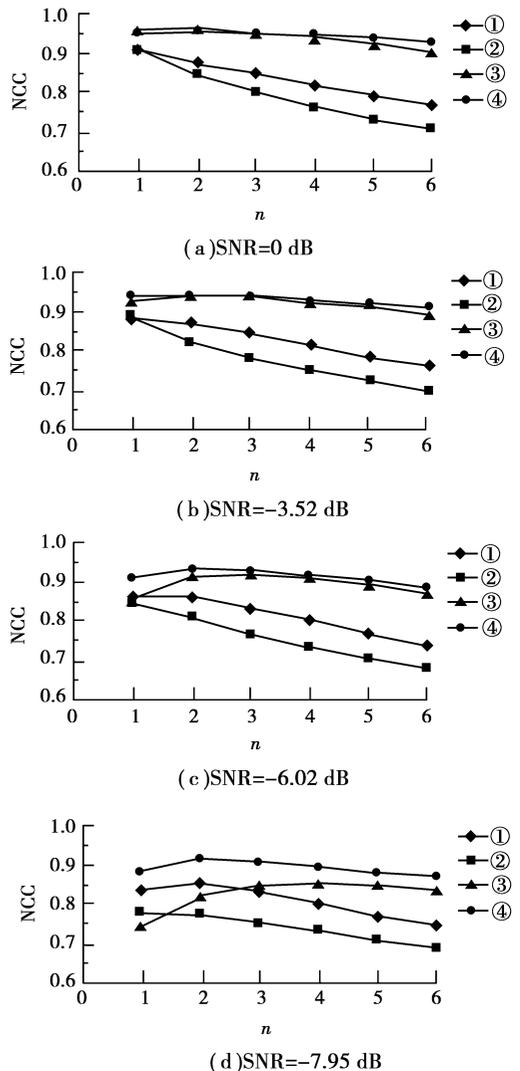


图 6 NCC 的变化

当噪声水平发生变化时,不同类型的 PD 信号所对应的最佳去噪复合信息会发生相应的改变,并

从图 6 所示,随着噪声水平的不断提高,各信号的最佳去噪 $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列中的 n 有增大的趋

势。以信号①为例,随着噪声的增强, $I_{wt,ir}^1$ 的去噪效果逐渐降低,而 $I_{wt,ir}^2$ 的效果逐渐上升,当染噪信号 SNR=0 dB 时, $I_{wt,ir}^1$ 去噪后的 NCC 比 $I_{wt,ir}^2$ 大 0.03,而当噪声增大到 SNR=-7.95 dB 时, $I_{wt,ir}^1$ 去噪后的 NCC 比 $I_{wt,ir}^2$ 小 0.02, $I_{wt,ir}^2$ 上升为最佳去噪复合信息。由图可见,其余 3 种仿真信号的最佳去噪复合信息也有类似的变化趋势。但是,对于不同种类信号, $I_{wt,ir}^n$ 中 n 值增大的速率并不相同。

在 SNR=0 dB 到 SNR=-7.95 dB 的范围内,对于单指数衰减振荡脉冲,其 n 的取值均为 1;对于单指数衰减脉冲和双指数衰减振荡脉冲,其 n 值为 1~2;对于双指数衰减脉冲,其 n 值为 2~3。但不论哪种信号, n 的取值均是随噪声强度的增加而增加的。

4 $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列对实测 PD 去噪

为检验 $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列对实测 PD 信号的去

噪能力,笔者从实验室 GIS 模拟实验装置上获取了由金属突出物、金属微粒、绝缘子表面污染、绝缘子与高压导体间气隙缺陷产生的 PD 信号^[10-11]。

由于试验中难以获得无干扰的 PD 信号实测波形,所以无法再用 NCC 和 SNR 来对去噪后的实验室实测 PD 信号进行综合描述,为了定量地对实测 PD 信号去噪效果的分析比较,笔者引入噪声抑制比 (noise rejection ratio, NRR)^[12] 来描述,其定义如下:

$$NRR = 10(\lg \sigma_1^2 - \lg \sigma_2^2) \quad (10)$$

式中 σ_1 、 σ_2 为噪声方差。

对上述实测 PD 信号进行复小波变换,分解层数为 5。对信号进行去噪后,选取 NRR 较高,且波形畸变相对较小的作为去噪结果,如图 7 和表 5 所示,图中纵坐标为测得 PD 信号电压幅值 U 。可以看见, $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列对实测 PD 信号也有很好的去噪效果。

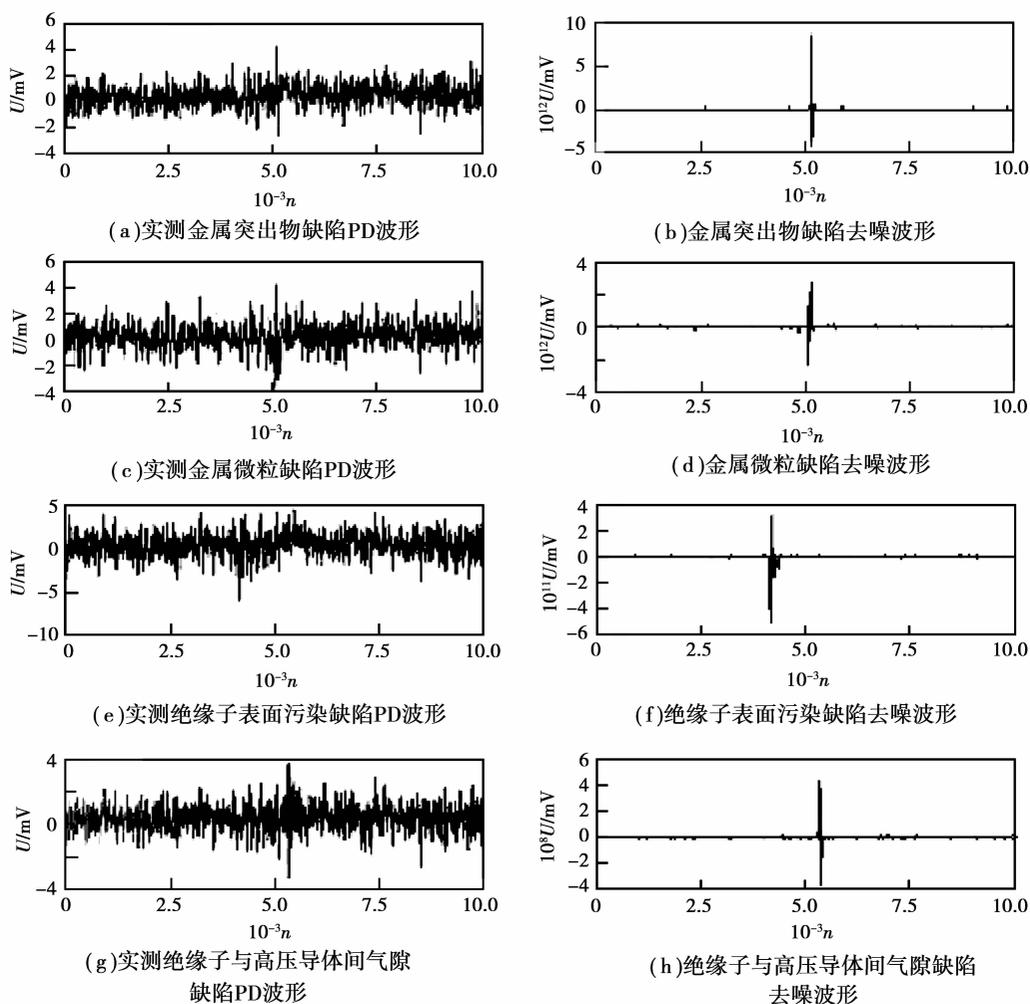


图7 复小波变换抑制白噪声

表5 实测信号的最佳去噪效果

缺陷	复根位置	分解层数	复合信息	NRR/dB
金属突出物	4	5	$I_{wt,ir}^3$	172.25
金属微粒	4,5	5	$I_{wt,ir}^3$	171.88
表面污染	全部	5	$I_{wt,ir}^3$	165.88
绝缘气隙	1	5	$I_{wt,ir}^3$	100.97

5 结论

1)构造了抑制PD信号检测中白噪干扰的复小波变换的 $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列。通过对4种典型仿真PD信号的去噪研究,证明了选择不同的 n , $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列是抑制白噪干扰的最佳去噪复合信息。

2)当白噪的强度发生变化时,不同PD信号对应的最佳去噪复合信息会发生相应的改变,不同PD信号也会有不同的最佳去噪复合信息。因此,针对不同噪声水平和PD信号应选择与其对应的最佳去噪复合信息。

3)在不同的SNR下, n 的选择对 $I_{wt,ir}^n$ 复合信息序列的去噪能力有较大影响,随着噪声水平的提高, n 值有增大的趋势,但对于不同种类的PD信号,其 n 值增大的速率并不相同。

参考文献:

- [1] 高胜友,朱德恒,谈克雄,等. 变压器局部放电在线监测信号处理技术的研究[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2003, 43(9): 1181-1183.
GAO SHENG-YOU, ZHU DE-HENG, TAN KE-XIONG, et al. Signal processing technique for on-line partial discharge monitoring of power transformers[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(9): 1181-1183.
- [2] 唐炬,许中容,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 ZHONG-RONG, SUN CAI-XIN, et al. Application of complex wavelet transform to suppress white-noise Interference in GIS PD signals [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 30-34.
- [3] 唐炬,谢颜斌,朱伟,等. 用于复小波变换的EWC阈值法抑制周期性窄带干扰[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 1-5.
TANG JU, XIE YAN-BIN, ZHU WEI, et al. Suppression of narrowband interference with EWC thresh-

old method for complex wavelet transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 1-5.

- [4] 陈祥训. 正交紧支复小波的生成及其在电力系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 83-88.
CHEN XIANG-XUN. Complex compactly-supported orthonormal wavelets and their applications in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 83-88.
- [5] WERLE P, AKBARI A, BORSI H, et al. Enhanced online PD evaluation on power transformers using wavelet techniques and frequency rejection filter for noise suppression [J]. In IEEE Int Sym Electrical Insulation, 2002, 21(4): 195-198.
- [6] HE HAIBO, CHENG SHIJIE, ZHANG YOUBING, et al. Analysis of reflection of signal transmitted in low-voltage powerline with complex wavelet[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2004, 19(1): 86-91.
- [7] 苏金明,张莲花,刘波. MATLAB工具箱应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [8] SARDY S. Minimax threshold for denoising complex signals with waveshrink [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000, 48(4): 1023-1028.
- [9] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] 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 CSEE, 2006, 26(8): 99-105.
- [11] 唐炬,朱伟,孙才新,等. 检测GIS局部放电的超高频屏蔽谐振环天线传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(7): 705-709.
TANG JU, ZHU WEI, SUN CAI-XIN, et al. Study of the UHF shield resonance loop antenna for detecting PD in GIS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(7): 705-709.
- [12] 刘云鹏,律方成,李成榕,等. 基于数学形态滤波器抑制局部放电窄带周期性干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 169-173.
LIU YUN-PENG, LV FANG-CHENG, LI CHENG-RONG, et al. Study of the mathematical morphological filter in suppressing periodic narrow bandwidth noise of PD [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 169-173.