

基于小波包改进阈值方法的电能质量信号消噪

金 燕, 钟金金

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 为了改善暂态电能质量扰动信号的消噪效果, 提出了一种小波包改进阈值的消噪方法。在分析了软阈值消噪方法和硬阈值消噪方法的基础上, 对阈值量化函数进行了改进, 并通过小波包变换对消噪效果进行了强化。改进后的新阈值消噪法能有效克服“硬阈值法不连续、软阈值法有偏差”的缺点。对暂态电能质量扰动信号消噪处理的仿真结果表明, 该新方法在消噪的同时能够减少信息的损失, 在不同信噪比下都能有效地去除白噪声, 其消噪效果优于软阈值函数消噪法。

关键词: 电能质量扰动; 小波包变换; 改进阈值

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)08-1012-03

Power quality signal de-noising based on wavelet package improved threshold method

JIN Yan, ZHONG Jin-jin

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to enhance the de-noising effect of transient power quality disturbance signals, a wavelet package improved threshold de-noising method was put forward. Based on analyzing the de-noise method of soft threshold and hard threshold, the threshold quantization function was improved. The new de-noising method can overcome the discontinuity of the hard threshold and the offset of the soft threshold. The simulation results of transient power quality disturbance signal de-noising show that the new method can not only reduce the loss of useful information while de-noising, but also effectively de-noise white noise under different SNRs. The de-noising effect is superior to the soft threshold function.

Key words: power quality disturbance; wavelet package transform; improved threshold

0 引 言

随着半导体制造业、信息业等高新技术产业的发展及敏感性电力电子器件的广泛使用, 不对称、冲击性、非线性负荷的数量和容量不断增加, 电能质量问题越来越引起人们的关注^[1]。对暂态电能质量扰动信号进行正确检测和分析成为解决电能质量问题的关键所在。暂态电能质量扰动信号具有发生随机性、持续时间短和非平稳的特性, 要求分析方法具有快速性和准确性, 即能完整地反映信号在任一时刻的频域特征^[2]。

目前, 小波消噪的方法主要有模极大值法、平移不变法^[3]和阈值法^[4]等。其中, 阈值法方法简单, 速度快, 且消噪效果良好。文献[5]中针对普通的小波消噪法, 提出了一种改进方法。改进后的消噪效果优于软、硬阈值消噪方法。但小波变换对高频分量不能进一步细分, 采用小波消噪后波形中突变点信息的损失仍然很多, 且文中方法只适合于高信噪比的噪声, 对于低信噪比的噪声消噪效果不佳。

小波包变换是建立在小波的基础上, 可以实现信号频带的均匀划分, 比多分辨率分析分解得更加精细, 具有更好的时频特性。本研究将小波包与改进的阈值法相结合应用到暂态电能质量扰动信号消噪中, 克服

收稿日期: 2010-12-20

作者简介: 金 燕(1964-), 女, 浙江杭州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事嵌入式系统研究与应用、计算机自动检测与控制、图像处理与识别方面的研究。E-mail: jy@zjut.edu.cn

了小波阈值法消噪的缺点,以电压暂降和暂态振荡两种典型信号消噪为例,对小波包改进阈值方法和软阈值法进行比较。

1 小波包原理

小波包变换是小波变换的完善和发展,它对小波变换中没有分解的高频部分也进行了细分,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择频带,提高了处理信号的能力,更适合用于处理非平稳信号。

本研究定义空间 w_j^n 为函数 $w_n(t)$ 的闭包空间, w_j^{2n} 为 $w_{2n}(t)$ 的闭包空间,并令 $w_n(t)$ 满足下式中的双尺度方程:

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) w_n(2t - k) \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) w_n(2t - k) \end{cases} \quad (1)$$

序列 $\{w_n(t)\}$ 称为由基函数 $w_0(t) = \phi(t)$ 确定的小波包。且式(1)中 $g(k) = (-1)^k h(1-k)$, $g(k)$ 和 $h(k)$ 分别是相互正交的低通滤波器与高通滤波器的系数。

设 $g_j^n(t) \in w_j^n$, 则 $g_j^n(t)$ 可表示为:

$$g_j^n(t) = 2^{j/2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{n,j}(k) w_n(2^j t - k) \quad (2)$$

小波包分解算法可描述为:

$$c_{j+1,2m}(k) = \sum_n c_{j,m}(n) h(n-2k) \quad (3)$$

$$c_{j+1,2m+1}(k) = \sum_n c_{j,m}(n) g(n-2k)$$

其小波包重构算法为:

$$c_{j,m}(k) = \sum_n c_{j+1,2m}(n) \overline{h(k-2n)} + \sum_n c_{j+1,2m+1}(n) \overline{g(k-2n)} \quad (4)$$

式中: $\overline{h(k-2n)}$ 和 $\overline{g(k-2n)} = h(k-2n)$, $g(k-2n)$ 的共轭。

针对如下的电能质量扰动模型,本研究可以对其进行小波包分解后并设定阈值,保留大于阈值的小波系数值用于信号重构。

$$f(t) = s(t) + N_n(t) \quad (5)$$

式中: $s(t)$ —没有叠加噪声的原始信号; $f(t)$ —加了噪声后的采样信号; $N_n(t)$ —服从 $N(0, \sigma^2)$ 的方差为 σ^2 的高斯白噪声。

本研究用小波包法对其消噪的步骤如下:

(1) 确定小波包分解的最高层次 N , 对电能质量扰动信号进行 N 层小波包分解。

(2) 根据给定的熵标准, 计算最佳小波包分解树, 本研究中采用 shannon 熵。

(3) 对于小波包分解系数选择适合的阈值, 并对小波包基每个节点上的系数进行阈值量化处理。

(4) 利用量化处理后的系数进行信号的重构。

在小波包消噪的步骤中, 最关键的在于如何选取阈值, 以及如何进行阈值量化处理。文中所采用的为 Sqtwolog 阈值, 下面将重点研究阈值函数的选取。

2 阈值函数的选取

目前, 消噪时一般采用硬阈值法和软阈值法两种方法^[6-8]。

硬阈值函数为:

$$D_n^j = \begin{cases} d_n^j & |d_n^j| \geq T \\ 0 & |d_n^j| < T \end{cases} \quad (6)$$

软阈值函数为:

$$D_n^j = \begin{cases} \text{sgn}(d_n^j) (|d_n^j| - T) & |d_n^j| \geq T \\ 0 & |d_n^j| < T \end{cases} \quad (7)$$

式中: d_n^j —第 j 层小波变换系数, T —阈值。

从式(6,7)中可以看出, 硬阈值法和软阈值法均存在不足。硬阈值法中, 经阈值处理后的小波系数在 $\pm T$ 处是不连续的, 将导致重构信号产生振荡。而软阈值法虽然连续性好, 但当 $|d_n^j| > T$ 时经阈值处理后的小波系数与处理前之间存在恒定的偏差, 这种恒定的偏差将导致重构信号中幅值较大的小波系数有较大的衰减^[9]。

为克服软硬阈值法的不足, 本研究采用了一种改进型阈值函数—均方根插值阈值法^[10]。该函数表达式如下:

$$D_n^j = \begin{cases} \text{sgn}(d_n^j) \sqrt{\frac{(d_n^j)^2 + (|d_n^j| - T)^2}{2}} & |d_n^j| \geq T \\ 0 & |d_n^j| < T \end{cases} \quad (8)$$

当 $|d_n^j| = T$ 时, D_n^j 随着 $|d_n^j|$ 的增大而增大, 当 $|d_n^j| \rightarrow \infty$ 时, D_n^j 趋向于 d_n^j 。且当 $|d_n^j| \geq T$ 时, D_n^j 和 d_n^j 之间的插值不恒定, D_n^j 随着 $|d_n^j|$ 的增大而逐渐接近 d_n^j 。因此式(8)很好地解决了硬阈值和软阈值法的缺点, 其消噪效果优于软、硬阈值法。

3 仿真算例

在 Matlab 软件平台上, 本研究采用小波包改进阈值方法对电网中典型的电压暂降和暂态振荡两种信号进行消噪效果分析, 并与小波软阈值消噪方法的仿真结果作比较。用 Matlab 模拟产生电压暂降和暂态振荡信号, 信噪比 20 dB, 信号的采样频率为 20 kHz。采

用 db4 小波函数进行 4 层小波分解,shannon 熵原则选取最佳小波包树,Sqtwolog 阈值法选取阈值,以及文中采用的改进型阈值函数进行阈值量化处理。

电压暂降和暂态振荡在信噪比为 20 dB 时的原始信号,加噪信号,软阈值法和改进法分别消噪后的电压暂降信号图如图 1、图 2 所示。

为了进一步评价消噪效果,本研究引入均方误差

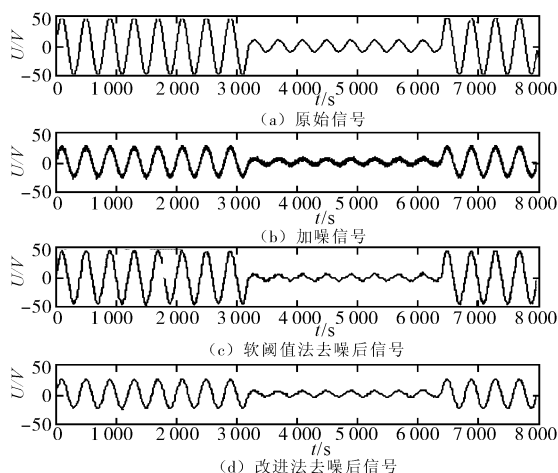


图 1 电压暂降信号消噪效果

理想的消噪效果为均方误差越小、信噪比越高,则估计信号越接近于原始信号^[11]。本研究对 6 个不同输入信噪比的两种信号进行消噪仿真实验。当输入信噪比分别为 -5 dB,0 dB,5 dB,10 dB,15 dB,20 dB 时,软阈值法与改进法的效果比较如表 1、表 2 所示。

表 1 电压暂降信号在不同信噪比下的消噪效果

输入 SNR/dB	-5	0	5	10	15	20
改进法输出 MSE	0.613	0.364	0.202	0.117	0.067	0.038
软阈值法输出 MSE	0.633	0.412	0.248	0.148	0.089	0.052
改进法输出 SNR/dB	4.280	8.868	14.064	18.659	23.422	28.623
软阈值法输出 SNR/dB	3.692	7.501	12.063	16.479	20.874	25.506

表 2 暂态振荡信号在不同信噪比下的消噪效果

输入 SNR/dB	-5	0	5	10	15	20
改进法输出 MSE	0.801	0.488	0.268	0.149	0.084	0.049
软阈值法输出 MSE	0.804	0.538	0.344	0.207	0.117	0.069
改进法输出 SNR/dB	1.925	6.221	11.436	16.519	21.474	26.062
软阈值法输出 SNR/dB	1.897	5.387	9.285	13.719	18.620	23.139

(MSE)和信噪比(SNR)评价指标:

$$MSE(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (f - \hat{f})^2}}{N} \times 100\% \quad (9)$$

$$SNR(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} f^2}{\sum_{n=0}^{N-1} (f - \hat{f})^2}\right) \quad (10)$$

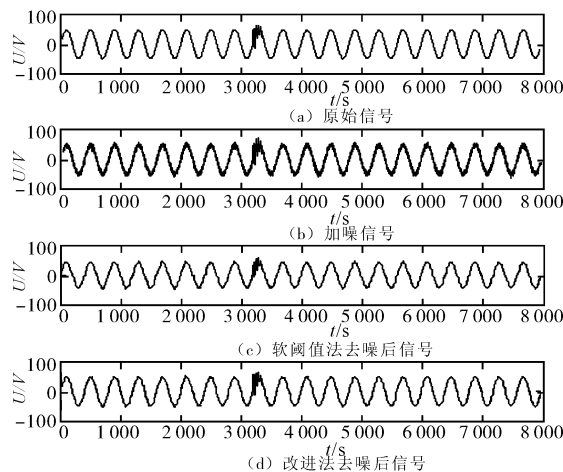


图 2 暂态振荡信号消噪效果

比较表 1、表 2 数据可以看出,改进后的方法比软阈值法消噪后能够得到更好的信噪比和均方误差,更接近于原始信号。

4 结束语

噪声是影响电能质量扰动信号检测精度的一个重要因素。为了克服小波阈值法消噪的缺点,本研究提出了一种将小波包与改进的阈值法相结合的小波包改进阈值消噪方法,并应用到暂态电能质量扰动信号消噪中。该小波包改进阈值消噪方法原理简单,容易实现,效果好,特别适合于处理电能质量中的非平稳信号。由仿真结果可知,和软阈值法相比,利用小波包改进阈值消噪的方法能够得到更小的均方误差和更大的信噪比,达到更好的消噪效果。

参考文献(References):

- [1] 李 宁,任子晖,刘伟伟,等. 基于小波包能量熵的电能质量扰动识别[J]. 工矿自动化,2010,(8): 56-61.
- [2] 胡昌华,张军波,夏 军,等. 基于 Matlab 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [3] 张婷婷,杨洁明. 基于改进小波域阈值法的平移不变振动信号去噪[J], 机电工程,2009,26(6): 65-67.

(下转第 1018 页)

所示,图中虚线为拟合结果,实线为实际波形。进一步得出误差曲线如图 3 所示。可见,所提算法能够准确分析出微波炉电流的谐波参数。

表 6 微波炉电流的分析结果

谐波次数	频率 / Hz	幅值 / A	相位 / (°)
1	49.988 4	5.181 8	214.149 6
2	99.976 7	0.005 7	274.499 4
3	149.965 1	2.258 9	254.968 8
4	199.953 5	0.005 0	188.998 8
5	249.941 8	0.765 9	304.284 7
6	299.930 2	0.002 2	283.410 3
7	349.918 6	0.131 8	16.744 9
8	399.906 9	0.001 7	197.909 7
9	449.895 3	0.065 6	195.098 7
10	499.883 7	0.000 5	292.321 2

5 结束语

本研究分析了六项余弦窗函数的旁瓣特性,推导了其插值 FFT 算法,得出插值系数的显式公式,其频率、幅值和相位的估计公式简单明了。提出的谐波分析方法具有插值修正公式简单,计算量小,分析精度高的优点。仿真和实验结果都表明,该算法适合电力系统谐波的准确测量。

参考文献 (References):

- [1] YACAMINA R. Power system harmonics part 4, interharmonic[J]. **Power Engineering Journal**, 1996, 10(4): 185-193.
- [2] ZHANG F, GENG Z, YUAN W. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power

system[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2001, 16(2): 160-164.

- [3] JAIN V K, COLLINS W L, DAVIS D C. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT[J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 1979, 28(2): 113-122.
- [4] 祁才君,陈隆道,王小海. 应用插值 FFT 算法精确估计电网谐波参数[J]. 浙江大学学报:工学版,2003, 37(1): 112-116.
- [5] 周 俊,王小海,祁才君. 基于 Blackman 窗函数的插值 FFT 在电网谐波信号分析中的应用[J]. 浙江大学学报:理学版,2006, 33(6): 650-653.
- [6] 赵文春,马伟明,胡 安. 电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报,2001, 21(12):83-87,92.
- [7] QIAN H, ZHAO R, CHEN T. Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2007, 22(2): 1064-1069.
- [8] 卿柏元,滕召胜,高云鹏,等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(25): 153-158.
- [9] RELJIN I S, RELJIN B D, PAPIC V. Extremely flat-top windows for harmonic analysis[J]. **IEEE Transactions on Instrument and Measurement**, 2007, 56(3): 1025-1041.
- [10] HARRIS F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. **Proceedings of the IEEE**, 1978, 61(1): 51-83.
- [11] HUANG S, FAN X, LIU S, et al. Research on Optimized Combined Cosine Windows with Maximum Side Lobe Decay for Harmonic Analysis[C]// Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2009:277-281.

[编辑:张 翔]

(上接第 1014 页)

- [4] 洪晓明,叶 明,孟 明. 一种新的阈值方法在肌电信号消噪中的应用[J], 机电工程, 2009, 26(10): 90-98.
- [5] 柯 慧,顾 洁. 电能质量信号的小波阈值去噪[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 103-108.
- [6] 熊玲玲,刘会金,金涌涛,等. 小波包在暂态电能质量分析中的应用[J]. 电工技术, 2004, 8(4): 27-30.
- [7] BURLY S, DARNELL M. Robust impulse noise suppression using adaptive wavelet denoising[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Munich, Germany, 1997: 3417-3420.
- [8] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. **IEEE Transactions Information Theory**, 1995, 41(3): 613-

627.

- [9] SONG G X, ZHAO R Z. Three novel models of threshold estimator for wavelet coefficients[C]//Proceedings of the Second International Conference on wavelet Analysis and Its Applications. Hong Kong, China, 2001: 145-150.
- [10] 蒋克荣,唐向清,朱德泉. 基于改进阈值小波算法的汽车轮速信号处理[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 736-740.
- [11] 张 飞. 基于小波包变换的多阈值法语音信号去噪净化[J]. 通信技术, 2009, 42(8):118-122.

[编辑:李 辉]