

基于广义形态滤波的电力 系统采样信号处理

张全明, 刘会金

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 数学形态学是以集合论和积分几何学为基础的一门对物体形态处理的学科, 是一种非线性分析方法, 在时域中对信号波形特征进行研究。针对电力系统采样信号, 提出一种采用不同采样频率的广义形态滤波方法。该方法滤除白噪声和脉冲噪声时采用较高频率; 滤除直流偏移时采用低频率。结构元素选取为与水平方向夹角为零度的直线型结构元素。由于滤除直流偏移时采用较低的采样频率, 因此, 结构元素较短、运算量较小、耗时少。仿真实验表明, 该方法能有效地滤除白噪声、脉冲噪声和直流偏移量, 信噪比显著增大, 均方误差较小。

关键词: 电能质量; 数学形态学; 广义形态滤波; 白噪声; 脉冲噪声; 去噪

中图分类号: TM 93

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)10-0045-04

0 引言

在分析电力系统的各项指标时, 需要采集大量的现场数据。在实际的工程应用中, 由于设备安装位置、外界电磁干扰及系统或现场设备的直流偏移量污染等因素, 采样信号通常包含噪声和直流偏移量干扰。干扰的存在会影响对信号分析的过程和结果, 故对采样信号进行去噪就显得尤为重要。小波变换具有良好的时频局部化特点, 已广泛应用于采样信号的去噪。但是, 小波变换存在频带混叠、泄漏效应、相位移和幅度衰减等问题, 并且不能滤除脉冲噪声和直流偏移量。

数学形态学 MM (Mathematical Morphology) 是一种非线性分析方法, 其对信号波形特征的研究完全在时域中进行, 而不是将信号变换到频域空间处理。因此, 处理后的信号不存在相位移和幅度衰减问题^[1]。此外, 数学形态学计算简单、并行快速, 一般其算法只有加减法和取极值计算, 不涉及乘除法, 因而对信号的处理速度快、时延小、易于硬件实现。数学形态学已应用于变压器励磁涌流的识别、超高速线路方向保护^[2]、高压线路故障测距、介损在线监测数据处理^[3-4]、变压器保护^[5]、谐波检测^[6]等。

文献^[7]提出了一种基于数学形态学的去除噪声和直流偏移的方法, 在去噪和去除直流偏移时采用相同的采样频率, 导致去除直流偏移时采用较长的结构元素(长度为 64), 因而运算量较大、耗时

收稿日期: 2006-02-17; 修回日期: 2006-05-17

间较长。本文在文献[7]的基础上,提出一种采用不同采样频率的广义形态滤波方法。用广义形态滤波滤除白噪声和脉冲噪声时采用较高频率,用形态滤波滤除直流偏移时采用较低频率,因而结构元素较短,运算量较小,耗费时间也较短。仿真实验表明了该方法的有效性和实用性。

1 数学形态学的基本原理

数学形态学是以集合论和积分几何学为基础发展起来的一门对物体形态处理的学科,利用预先定义的结构元(相当于滤波窗)对信号进行匹配或局部修正,对集中于物体形态中的各种形态分量进行分解、提取或者变形,以达到提取信号、保持细节和抑制噪声的目的。

数学形态学的运算以腐蚀和膨胀这2种基本运算为基础,并引出开、闭及开闭的级联组合。形态变换分为二值形态变换和多值形态变换。电力系统采样信号一般为一维信号,所以只介绍一维离散情况下的多值形态变换。

设 x 是一维多值信号, g 为结构元素(某个一维数组), A 、 B 分别为 x 和 g 的定义域, $A = \{1, 2, \dots, N\}$, $B = \{1, 2, \dots, M\}$, 且有 $M < N$ 。则离散信号 $x(n) (n \in A)$ 关于 g 的形态腐蚀和膨胀定义为

$$(x \ominus g)(n) = \min_{p=1,2,\dots,M} \{x(n+p) - g(p)\} \quad (1)$$

$$(x \oplus g)(n) = \max_{p=1,2,\dots,M} \{x(n+p) + g(p)\} \quad (2)$$

式中 $\ominus$ 指腐蚀运算; $\oplus$ 指膨胀运算; $n=1, 2, \dots, N$ 。

腐蚀变换是一种收缩变换,这种变换使目标肢体收缩、孔洞扩张,而膨胀变换是一个扩张过程,这种变换使目标肢体扩张、孔洞收缩^[8]。腐蚀和膨胀不是互为逆运算,先腐蚀后膨胀与先膨胀后腐蚀的结果通常不相同,所以它们可以级联组合使用,于是产生了新的形态学变换,先腐蚀后膨胀就构成了开运算,而先膨胀后腐蚀就构成了闭运算。

基于式(1)(2),形态开运算和形态闭运算定义为

$$(x \circ g)(n) = (x \ominus g \oplus g)(n) \quad (3)$$

$$(x \bullet g)(n) = (x \oplus g \ominus g)(n) \quad (4)$$

一般而言,开运算用于消除孤立点、“毛刺”和“小桥”,抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声,使信号光滑;闭运算用于填平“小洞”,弥合孔洞和裂缝,可以滤除信号中的低谷(负脉冲)噪声^[8]。在实际应用中,适当的形态运算组合可以用作形态学滤波。

Maragos 定义的形态开-闭(OC)和闭-开(CO)滤波器^[9]为

$$F_{OC}(x(n)) = (x \circ g \bullet g)(n) \quad (5)$$

$$F_{CO}(x(n)) = (x \bullet g \circ g)(n) \quad (6)$$

2 广义形态滤波及其应用

2.1 广义形态滤波原理

由于形态开的反扩展性和形态闭的扩展性,导致开-闭滤波器的输出幅度偏小,而闭-开滤波器的

输出幅度偏大,使得形态开-闭和闭-开滤波器在滤除信号中的正、负低谷噪声的同时,存在统计偏移现象。因此,为了减小偏移,文献[10]提出了选用不同尺寸的结构元素的广义开-闭和闭-开滤波器,即

$$F_{OC}(x(n)) = (x \circ g_1 \bullet g_2)(n) \quad (7)$$

$$F_{CO}(x(n)) = (x \bullet g_1 \circ g_2)(n) \quad (8)$$

式中 $g_1 \subseteq g_2$ 。

对于形态开-闭滤波器,先进行的开运算在滤除正脉冲噪声的同时,增强了负脉冲噪声,如果再用相同长度的结构元素进行闭运算,就不能有效地滤除负脉冲噪声^[4],而采样较长的结构元素有利于消除增强了的负脉冲噪声,对于闭-开滤波器也是同样的道理。因此,后级结构元素长度大于前级结构元素长度的广义形态滤波器,滤波性能比形态滤波器的滤波性能优良。

为了有效地滤除各种噪声,提高滤波效果,本文中取这2种滤波器的平均组合形式滤除白噪声和脉冲噪声。

2.2 结构元素的选取和滤波步骤

数学形态学的滤波效果不仅取决于变换方式,而且与结构元素的形状和大小密切相关。对于结构元素的形状和大小的选择,目前还没有系统的方法,主要靠经验或仿真来尝试。结构元素的宽度越长、形状越复杂,其滤波能力就越强,计算量也越大。以直线型结构元素为例,其宽度越长,则低通能力越强,即消噪能力越强^[11]。当直线型结构元素的长度为信号周期长度的 $1/2$ 时^[7],将滤除基波信号和噪声等高频分量,提取出直流偏移量,这就是数学形态学滤除直流偏移的原理。本文选取与水平方向夹角为 0° 的直线型结构元素,滤波过程分2步进行。

步骤1 采用较短的结构元素,应用式(7)(8)的平均值滤除白噪声和脉冲噪声。为了滤除脉冲干扰,直线型结构元素的宽度要大于采样信号中最大脉冲的宽度。

步骤2 对于上述滤波结果,采用较长的结构元素,应用式(5)(6)的平均值得到直流偏移量,进而除去直流偏移量。为了滤除其他成分而只保留呈正弦分布的直流偏移量,直线型结构元素的宽度要大于采样信号中其他成分而小于呈正弦分布的直流偏移量的周期长度。

2.3 去噪效果的衡量

在信号的去噪处理中,判断去噪效果的好坏主要有信噪比(SNR)和信号的重构均方误差(MSE)2个标准。一般,SNR越大,MSE越小,则去噪效果越好。SNR和MSE的计算公式为

$$SNR = 10 \lg(p_s/p_n) \quad (9)$$

式中 p_s 为信号方差; p_n 为噪声方差。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{f}(t_i) - f(t_i)]^2 \quad (10)$$

式中 n 为信号的采样点数; t_i 为各采样时刻。

3 仿真分析

3.1 例 1

信号的开和闭运算结果如图 1 所示,从上到下依次为闭运算结果、原始信号和开运算结果,从图中可以看出,开、闭运算对信号的处理效果。

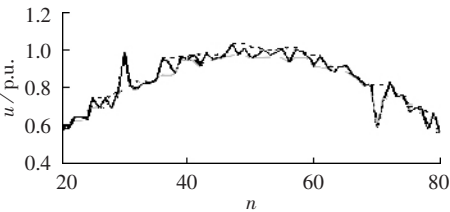


图 1 开和闭运算对信号的处理结果

Fig.1 Signal processing results of open and close calculations

3.2 例 2

应用上述步骤 1 滤波和小波去噪对加噪电压跌落信号进行处理,如图 2 所示(图中从上至下分别为原始信号、加噪信号、小波去噪信号及广义形态滤波信号),信号的采样频率为 20 kHz。小波去噪时,用 db8 小波分解 5 层,根据无偏风险规则(rigrsure)选取阈值,用软阈值方法去噪。广义形态滤波时选取 g_1 长度为 5 的直线型结构元素, g_2 长度为 9 的直线型结构元素。

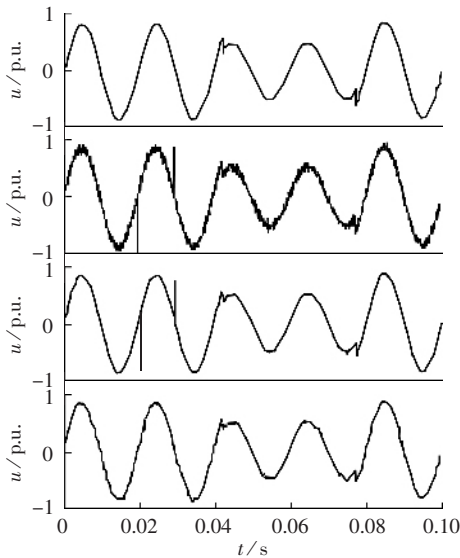


图 2 广义形态滤波和小波去噪结果

Fig.2 Results of generalized morphological filtering and wavelet denoising

从图中可看出,广义形态滤波和小波都能去除白噪声。但是,由于小波变换能敏感地检测到奇异点,故不能去脉冲噪声;广义形态滤波有效地滤除了脉冲噪声,并且较好地保留了电压变化时的局部特征。滤波前信噪比为 27.1909 dB,小波和广义形态滤波后信噪比分别为 31.536 dB 和 36.135 dB,均方误差分别为 1.3197 和 0.8332。基于不同阈值选取(原始信噪比为 27.085 dB)规则的小波软阈值去噪和本文

方法的去噪结果如表 1 所示。可见,广义形态滤波比小波去噪效果好。

表 1 加噪电压跌落信号的去噪效果比较

Tab.1 Denoising effect comparison among different selection rules for voltage sag signal with noise

选取规则	去噪后的信噪比/dB	均方误差
无偏风险	31.2794	1.3541
固定阈值	31.7569	1.2909
启发式阈值	31.2874	1.3529
极大极小值	31.6433	1.3056
本文方法	35.8981	0.8531

3.3 例 3

设采样信号为

$$x(n)=s(n)+w_1(n)+w_2(n)+w_3(n) \quad n=1,2,\cdots,N$$

式中 $s(n)$ 是幅值为 1 的正弦待检测信号; $w_1(n)$ 为脉冲噪声; $w_2(n)$ 是幅值为 0.05 的白噪声; $w_3(n)$ 为呈正弦分布的直流偏移量,而且 $w_3(n)=0.2\times\sin(4\pi n\Delta T)$, ΔT 为采样间隔。

第 1 步滤波选取 g_1 长度为 4 的直线型结构元素, g_2 长度为 7 的直线型结构元素。第 2 步滤波时选取 g 长度为信号 1 个周期长度的 1/2 的直线型结构元素^[7]。

较高的采样频率有利于滤除白噪声,因此,第 1 步滤波时的采样频率取为 9 600 Hz。如果直接对第 1 步滤波后的信号进行处理,因为 g 长度要取为信号 1 个周期长度的 1/2,故 g 的长度较大,计算量较大,所用时间较长。因此,对第 1 步滤波后的信号进行重采样,采样频率为 2 400 Hz,据此取 g 的长度为 24。

采样信号滤除白噪声、脉冲噪声和直流偏移量的过程如图 3 所示(图中从上至下分别为采样信号,第 1 步滤波去除白噪声、脉冲噪声的结果,第 2 步滤波提取出来的直流偏移量,滤除白噪声、脉冲噪声和直流偏移量后的结果)。

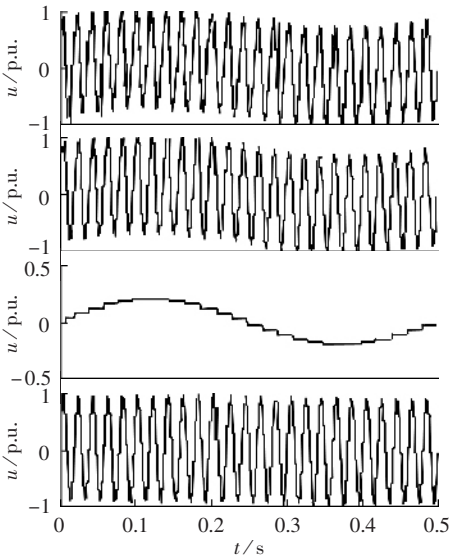


图 3 滤除噪声和直流偏移量的结果

Fig.3 Result after filtering noise and DC offset

从图中可见,第1步较好地滤除了白噪声和脉冲噪声;第2步有效地提取出了呈正弦分布的直流偏移量,虽然它存在波动,不是很光滑,但是,其精度可满足工程应用的需要。滤波前信噪比为 18.4902 dB,形态滤波后信噪比为 25.432 0 dB,均方误差为 1.0154。本文去噪方法取得了较好的效果,满足较小的均方误差和光滑性要求,去噪后的信号较好地保留了原信号的特性。

4 结论

数学形态学对信号的处理完全在时域中进行,而不是将信号变换到频域空间处理,处理后的信号不存在相位移和幅度衰减的问题,计算简单,并行快速。选择合适的结构元素,采用不同采样频率的广义形态滤波方法能有效地滤除白噪声、脉冲噪声和直流偏移量,减小了结构元素的长度,从而减少计算量,并且较好地保留了信号的局部特征。此方法可应用于电力系统中大量采样信号的预处理,具有较大的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(7):45-49.
WU Qing-hua,ZHANG Dong-jiang. Morphological filtering techniques and application in protection relaying[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(7):45-49.
- [2] 林湘宁,刘沛,高艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):13-18.
LIN Xiang-ning,LIU Pei,GAO Yan. Ultra-high-speed line directional protection based on transient and mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(4):13-18.
- [3] 王楠,律方成. 数学形态学滤波预处理 tans 在线监测数据[J]. 高电压技术,2003,29(7):32-33.
WANG Nan,LÜ Fang-cheng. Data preprocessing of on-line monitoring tans based on mathematical morphology filter[J]. High Voltage Engineering,2003,29(7):32-33.
- [4] 王楠,律方成,刘云鹏,等. 自适应广义形态滤波方法在介损在线监测数据处理中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24

(2):161-165.

- WANG Nan,LÜ Fang-cheng,LIU Yun-peng,et al. Study on application of adaptive generalized morphological filter in processing on-line monitoring $\tan\delta$ data[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(2):161-165.
- [5] 郑涛,刘万顺,肖仕武,等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):18-24.
ZHENG Tao,LIU Wan-shun,XIAO Shi-wu,et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(7):18-24.
- [6] 曾纪勇,丁洪发,段献忠. 一种基于数学形态学的谐波检测方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(6):55-59.
ZENG Ji-yong,DING Hong-fa,DUAN Xian-zhong. A harmonics detection method based on mathematical morphology[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(6):55-59.
- [7] 欧阳森,王建华,宋政湘,等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法[J]. 电网技术,2003,27(9):61-65.
OUYANG Sen,WANG Jian-hua,SONG Zheng-xiang,et al. New power system sampled data processing method based on morphology theory[J]. Power System Technology,2003,27(9):61-65.
- [8] 岳蔚,刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化,2002,26(7):13-17.
YUE Wei,LIU Pei. Detection of power quality disturbances based on Mathematical Morphology (MM) filter[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(7):13-17.
- [9] SERRA J. Morphological filtering: an overview[J]. Signal Processing,1994,38(4):3-11.
- [10] ZHAO Chun-hui,SUN Sheng-he. A generalized morphological filter based on adaptive weighted average[J]. The Chinese Journal of Electronics,1997,6(3):32-37.
- [11] 欧阳森,王建华,陈德桂,等. 一种基于数学形态学的电能质量信号快速定位方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(19):25-29.
OUYANG Sen,WANG Jian-hua,CHEN De-gui,et al. A new fast disturbance location method based on mathematical morphology for power quality signal[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(19):25-29.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

张全明(1980-),男,湖北红安人,博士研究生,研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:zqm20021009@sina.com);

刘会金(1952-),男,湖北大冶人,教授,博士研究生导师,从事电能质量分析和控制、灵活交流输电方面的研究工作。

Processing of sampled power system data based on generalized morphological filtering

ZHANG Quan-ming,LIU Hui-jin

(School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: MM(Mathematical Morphology) is a subject concerning with the shape of an object based on set theory and integral geometry,which is a nonlinear approach,studying the waveform characteristics of signals in the complete time domain. A generalized morphological filtering method using different sampling frequencies is proposed for sampled power system signal. The higher frequency is used to filter white noise and impulse noise,while the lower frequency to filter the DC offset. The horizontal linear structure element is selected. The use of low frequency for DC offset filtering shortens structure element and reduces calculation time. Simulations show that it filters white noise,impulse noise and DC offset effectively with the SNR(Signal-to-Noise-Ratio) increased and the MSE(Mean Square Error) decreased.

Key words: power quality; mathematical morphology; generalized morphological filtering; white noise; impulse noise; denoising