DOI: 10.7667/PSPC161028

基于复合结构元素的新型自适应形态滤波器设计

齐 郑，李 志，张首魁，张红颖

(华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206)

摘要：针对电力系统信号采集中常见的噪声干扰问题，提出一种使用复合结构元素的自适应形态学滤波器。这种滤波器融合两种及以上结构元素作为复合结构元素，统计分析输入信号与拟输出滤波信号之间的滤波误差，寻找复合结构元素的整体最优尺度，从而优化滤波效果。根据滤波误差极大值原理，调整组成复合结构元素的两种元素的参数占比，进一步优化，可得最优滤波使用的复合结构元素。仿真实验对包含随机白噪声的电力信号进行自适应滤波，结果表明，在面向随机噪声时，所提出的自适应滤波器能够准确寻求到最优结构元素，滤波性能优于使用单一结构元素的传统形态滤波器，具有良好的应用前景。

关键词：电力信号消噪；数学形态学；自适应滤波；复合结构元素；随机噪声

Design of a new adaptive morphological filter based on composite structure elements

QI Zheng, LI Zhi, ZHANG Shoukui, ZHANG Hongying

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the common noise interference in the signal acquisition of power system, an adaptive morphological filter using composite structure elements is proposed. The adaptive filter combines two or more structure elements as the composite structure element. The filtering error between the input and output signals is analyzed to determine the integral size of the composite structure element that can make the filtering effect reach the optimum. Then the parameters of the two elements of composite structure elements are adjusted according to the filtering error maximum principle for further optimization. Finally the optimal composite structure element is obtained. Simulation experiment is carried out on the adaptive filtering of the power signal containing random white noise. The results show that the proposed adaptive filter can accurately find the optimal structure element in the face of random noise. Compared with the traditional morphological filter using a single structure element, it has better filtering performance and also has a good application prospects.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277066).

Key words: power signal de-noising; mathematical morphology; adaptive filtering; composite structure element; random noise

0 引言

电力系统中的信号可分为有用信号和非有用信号[1]。有用信号通常包括工频信号和频率为 100 Hz、150 Hz 的信号和行波信号等，除此之外，其他各种噪声均属于非有用信号，统称为噪声干扰。噪声干扰通过各种途径侵入电力装置[2]，会对数据通信、数据采集以及继电保护造成不良影响。为此， 需要寻找一种能够有效抑制各种随机噪声的滤波算法。

数学形态学由集合论和积分几何发展而来，自 20 世纪 90 年代末开始广泛应用于电力系统信号处理，并已在信号消噪领域获得了成功的应用[3]。形态滤波器相比于传统的数字滤波器具有运算速度更快、无非线性相移等优点，在构造形态滤波器时需要综合考虑形态变换的组合形式和结构元素的选取两方面，而结构元素又在各种形态变换中起着关键作用，因此形态滤波器的性能很大程度上依赖于结构元素的选取[4]。目前已经提出了多种固定及可变权值的广义形态滤波器[5-10]，但本质上仍需依赖于对输入信号和干扰的变化特征有一个先前的预测或

基金项目：国家自然科学基金(51277066)

预先进行数值仿真来选取结构元素[11]，即面向随机噪声时无法获得最优结构元素。另外，结构元素的作用类似于一种能够提取信号特征的“探针”[12]，在处理复杂采样信号时，单一结构元素往往效果欠佳，因此应考虑采用组合形式的结构元素[13]，以完成对输入信号各部分细节特征的提取。

本文提出了一种使用复合结构元素对电力信号进行自适应消噪的新型形态滤波器，介绍了滤波器的算法过程。相比于传统形态滤波方法针对特定噪声经验性选取结构元素的不足，该算法在面向随机噪声时能够完成对结构元素的自适应最优选取。以电力系统中最常见的随机白噪声为例，仿真分析和实验结果证实了新方法能够有效地消除信号中的随机噪声，具有很好的实用性。

1　数学形态学

1.1 形态学基本运算及形态滤波器的设计

数学形态学的基本运算包括膨胀、腐蚀，以此为基础可以构成形态开和形态闭。设电力信号为 $f(n)$，定义域为 $D_{\mathrm{f}}=\{0,1,2,\cdots,N\}$，定义 $g(n)$ 为结构元素，定义域为 $D_{\mathrm{g}}=\{0,1,2,\cdots,P\}$，且 $P\le N$。$f(n)$ 关于 $g(n)$ 的膨胀和腐蚀分别如式(1)和式(2)。

$$(f\oplus g)(n)=\max\{f(n-x)+g(x)\,|\,(n-x)\in D_f,x\in D_{\mathrm{g}}\} \tag{1}$$

$$(f\Theta g)(n)=\max\{f(n+x)-g(x)\,|\,(n+x)\in D_f,x\in D_{\mathrm{g}}\} \tag{2}$$

腐蚀和膨胀只包含加减运算，不涉及乘除以及积分，因此运算速度较快。两种基本运算进行组合可以得到形态学的开、闭运算，如式(3)和式(4)所示。

$$f\circ g=f\Theta g\oplus g \tag{3}$$

$$f\bullet g=f\oplus g\Theta g \tag{4}$$

开、闭运算分别可以抑制信号中的峰值噪声和低谷噪声。将开—闭、闭—开运算级联起来可以组成最基本的形态开—闭和闭—开滤波器[14]，也称交替滤波器，如式(5)和式(6)所示。

$$[(f)OC(g)](n)=(f\circ g\bullet g)(n) \tag{5}$$

$$[(f)CO(g)](n)=(f\bullet g\circ g)(n) \tag{6}$$

形态开—闭和闭—开滤波器均存在输出统计偏移，而将两种交替滤波器组合后取平均构成的交替混合滤波器能较好地解决这一问题，如式(7)所示。

$$[(f)altmix(g)](n)=[(f)OC(g)+(f)CO(g)](n)/2 \tag{7}$$

1.2 结构元素的选取

数学形态学应用到电力系统中常采用的结构元素形状有三角形、正弦形和半圆形等等。结构元素在形状确定的情况下，尺度的基本特征包括长度和幅值。结构元素的长度不宜太短，否则难以有效去除干扰，也不宜过长，不然又会损坏有用信号。结构元素的幅值和待处理信号的幅值相比，一般要小一到两个数量级，才能获得较好的滤波效果[15]。

结构元素是影响形态滤波器滤波效果的关键，而至今为止尚未有一套完整的选取规则。在选取结构元素时一般需要参考待处理信号的采样率、要保持的信号特征以及噪声的类型、频率等众多因素[16]。

1.3 滤波效果的衡量

为了定量评估滤波器的滤波效果，可用滤波误差比较滤波前后信号的变化，并用信噪比衡量滤波后信号的含噪声程度，定义滤波误差如式(8)所示。

$$E=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left|f_0(n)-f_1(n)\right| \tag{8}$$

式中：N 为信号的采样点数；$f_0(n)$ 和 $f_1(n)$ 是需要比较的两种信号。滤波误差越大代表所比较的两种信号差异越大。

滤波后信号的信噪比 y_{SNR} 定义如式(9)所示。

$$y_{\mathrm{SNR}}=10\log(p_{\mathrm{s}}/p_{\mathrm{n}}) \tag{9}$$

式中：p_{s} 为信号方差；p_{n} 为噪声方差。信噪比越大，说明信号含有的噪声越小即滤波效果越好。

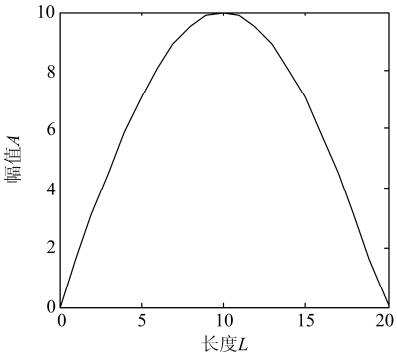
2　复合结构元素自适应形态滤波器

2.1 复合结构元素的选取

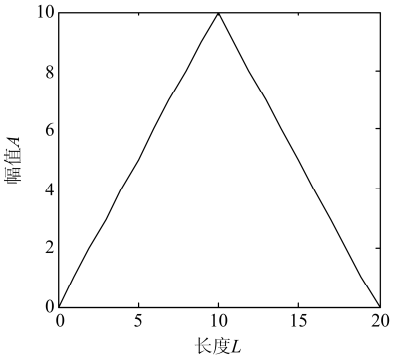
对于形态滤波来说，一般只有与结构元素的形状和尺寸相匹配的信号，其特征才能够被保持。传统形态滤波的研究基本上是基于有效信号的特征来选择结构元素，总结特定波形叠加噪声后何种结构元素能产生较好的滤波效果，但由于实际采样信号往往成分复杂，所含的噪声种类通常也并不单一，因此采取单一结构元素进行滤波，效果并不理想。复合结构元素自适应形态滤波器采用多种基本结构元素的组合形式，即复合结构元素进行滤波，可以满足复杂信号消噪处理的要求。

自适应滤波器选择多种常见的结构元素建立组成复合元素的“元素库”，库中储备的结构元素均可用于构建滤波使用的复合元素。大量仿真及实验研究表明，针对常见的脉冲噪声选择三角形结构元素滤波效果较好，而对于正弦型的电力信号，采用正弦形的结构元素普遍可以达到较好的滤波效果。因此，自适应滤波器的“元素库”中优先添加但并不限于正弦形和三角形两种基本结构元素。“元素库”中的基本结构元素及其构成的复合结构元素如图 1 所示。

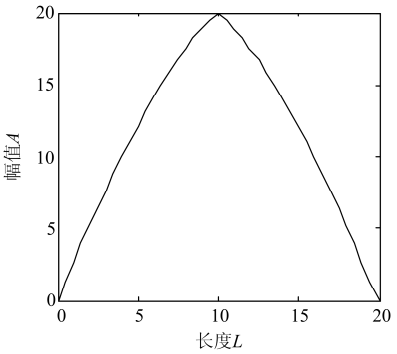
元素库中储备的结构元素越多，可构成的复合结构元素的种类也就越多，自适应形态滤波器处理各种噪声的能力也就越强。



(a) 正弦形结构元素



(b) 三角形结构元素



(c) 复合结构元素

图 1 自适应形态滤波器“元素库”中的结构元素

Fig. 1 Structure elements in the "element library" of adaptive morphological filter

2.2 基于滤波误差极大值的自适应滤波算法

采用开—闭、闭—开两种滤波器的平均组合形式[17]，即交替混合滤波通常能达到更好的消噪效果。因此，自适应滤波器采用这种形态复合运算形式。设电力采样信号为 $f(n)=s(n)+d(n)$，n 为采样点数，n=1, 2, $\cdots$, N。其中 $s(n)$ 为有用信号，$d(n)$ 为噪声干扰。设结构元素为 $g(n)$，$g(n)$ 的尺度远小于 $f(n)$。则自适应滤波器的输出信号 $y(n)$ 为

$$y(n)=[(f)OC(g)+(f)CO(g)](n)/2 \tag{10}$$

同时也可以写成如下形式：

$$y(n)=u(n)+r(n) \tag{11}$$

式(11)中 $u(n)$ 为理想有用信号，$r(n)$ 代表形态滤波后残留的噪声干扰，滤波效果越好则 $r(n)$ 的值越小，完全滤除噪声干扰且不损害有用信号的情况下，$r(n)$ 中只包含零元素，这是最理想的情况。

自适应滤波器不需掌握有用信号 $u(n)$ 的特征，而是依靠比较滤波结果 $y(n)$ 与输入信号 $f(n)$ 之间的差异来决定结构元素的选取，避免了传统形态滤波依靠对波形的先验性选取结构元素无法完成自适应最优选取的问题。基于 $f(n)$ 和式(11)中 $y(n)$ 的定义，计算选择不同结构元素后得到的滤波结果 $y(n)$ 与输入信号 $f(n)$ 的滤波误差，如式(12)所示。

$$E_{f-y}=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left|f(n)-y(n)\right| \tag{12}$$

滤波在不破坏有用信号 $u(n)$ 的前提下 $f(n)$ 与 $y(n)$ 相减即 $d(n)$ 与 $r(n)$ 相减，其结果可理解为滤波消减掉的噪声干扰，消减的越多，滤波误差越大，滤波效果也就越好。在改变结构元素尺度进行滤波的过程中，滤波效果趋于理想，滤波误差持续增大，最优结构元素出现时滤波误差达到极大值，之后再改变元素尺度滤波效果出现下降或基本不变；结构元素的尺度进一步改变后不仅噪声被消减，而且会逐渐破坏理想信号，此后滤波误差将持续增大。

基于以上分析，寻求到式(12)中滤波误差的极大值即可确定最优复合结构元素的尺度，进一步调整复合结构元素中两种基本结构元素的参数占比，对复合元素进行优化可以使滤波效果达到最优。而在调整参数占比时，调整宽度比例会造成复合结构元素不平滑使得结构元素复杂度增加，不仅影响滤波处理速度而且并不会显著提升滤波效果，因此主要以调整幅值比例为主对复合结构元素进行优化。

2.3 自适应形态滤波器的去噪流程

自适应形态学滤波器使用更适合处理复杂采样信号的复合结构元素，并基于输入信号 $f(n)$ 与拟输出滤波信号 $y(n)$ 之间的滤波误差变化规律寻求最优滤波的复合结构元素。滤波器对采样信号的具体消噪处理步骤如下。

(1) 建立包含多种形状及尺度结构元素在内的“元素库”，选择其中的两种结构元素进行融合，作为滤波用复合结构元素，决定复合元素具体形状的参数为幅值 A 和长度 L。设置复合结构元素的幅值备选序列 $A_{\mathrm{SE}}=\{A_1, A_2, \cdots, A_p\}$，$p$ 为备选幅值个数；设置复合结构元素的长度备选序列 $L_{\mathrm{SE}}=\{L_1, L_2, \cdots, L_q\}$，

q 为备选长度个数。

(2) 输入待处理信号 $f(n)$，设置复合结构元素的幅值为 $A=A_1$，不断改变元素的长度 L，其中 $L \in L_{SE}$，逐次对 $f(n)$ 进行交替混合滤波，得到结构元素在 $A=A_1$，不同长度下的滤波拟输出信号序列 $y(n)$，$y(n)=\{y_{L_1}(n), y_{L_2}(n), \cdots, y_{L_q}(n)\}$。选取一个完整周期的波形数据计算并存储 $f(n)$ 与 $y(n)$ 之间的 E_{f-y} 值，并在众多 E_{f-y} 值中找出 E_{f-y} 的极大值。

(3) 不断改变复合结构元素的幅值 A，其中 $A \in A_{SE}$，按照(2)的内容操作，得到在各个幅值下使用不同长度结构元素滤波对应的 E_{f-y} 极大值序列，在该序列中找出 E_{f-y} 极大值中的最大值，记录对应的结构元素的 A、L 值，即为最优复合结构元素的尺度。

(4) 固定组成最优复合结构元素的两种基本结构元素的宽度，调整幅值比例，根据滤波误差极大值原理，确定最终最优滤波复合结构元素中两种基本元素的幅值比例。

(5) 应用最优滤波复合结构元素进行滤波处理输出自适应滤波器的最终滤波结果。

3　仿真验证

3.1 实验条件

应用 Matlab 平台仿真产生 1 V，50 Hz 的标准正弦信号作为有用信号 $u(n)$，在信号上叠加幅值为 0.2 V 的随机白噪声 $d(n)$，待处理采样信号为 $f(n)=u(n)+d(n)$。设置采样率为 100 kHz，一个周波共 2000 个采样点的数据。待处理采样信号的初始信噪比为 15.6008。理想有用信号 $u(n)$，随机噪声干扰 $d(n)$ 和叠加噪声后的待处理采样信号 $f(n)$ 分别如图 2 所示。

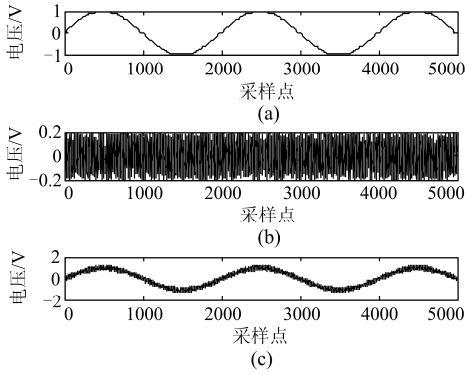


图 2 正弦信号加入随机白噪声

Fig. 2 Sinusoidal signal with random white noise

按照 2.3 节所述的处理步骤，首先在自适应形态滤波器中建立包含正弦形，三角形和半圆形结构元素在内的元素库。由于正弦形和三角形结构元素分别能够较好地保持电力信号的特征和滤除常见的脉冲噪声，因此按照幅值和宽度 1:1 融合这两种元素产生自适应滤波器所用的基本复合结构元素如图 3 所示。

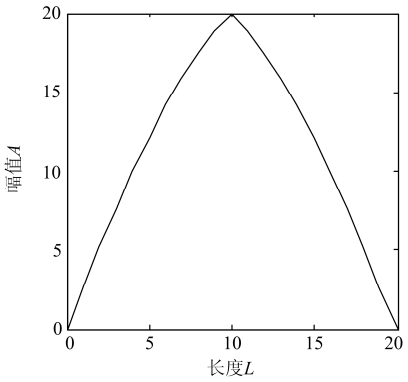


图 3 三角形和正弦形结构元素 1:1 组成的复合结构元素

Fig. 3 Composite structure element consisting of triangular and sinusoidal structure elements within the ratio of 1:1

仿真中噪声干扰信号的最大峰值为 0.2 V，最大干扰宽度未知，因此复合结构元素长度选择范围较大，这虽然使得滤波器的运算量增大，但能更好地保证算法的精确性。结构元素的幅值备选序列设置为 {0.01, 0.05, 0.1}；长度备选序列设置为 {10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300}。

仿真目的主要包括：统计分析自适应滤波器输入—输出之间滤波误差的变化规律，并验证自适应滤波器能够自适应选取最优复合结构元素；验证同等条件下使用复合结构元素进行形态滤波的效果要优于使用单一形状结构元素。

3.2 实验结果及分析

根据自适应形态学滤波器的设计原理，计算并统计各次拟输出滤波结果 $y(n)$ 与含噪声信号 $f(n)$ 之间的滤波误差 E_{f-y} 以及各次滤波后信号的信噪比 y_{SNR}，将数据列于表1中。

观察表1中的数据，仿真结果与自适应滤波器的设计规律是相符的：使用复合结构元素进行形态滤波，随着结构元素长度的逐渐增加，在A=0.01, 0.05, 0.1三种幅值下，E_{f-y} 分别达到极大值，而后基本不变或逐渐变小，当结构元素的尺度继续增大继而破坏有用信号时，E_{f-y} 值开始迅速增大。

将表1中复合结构元素在各幅值下的 E_{f-y} 值变化趋势绘制如图4所示。

表 1 复合结构元素自适应形态滤波器输入—输出滤波误差及滤波后信号的信噪比统计

Table 1 Statistics on the input-output E_{f-y} and y_{SNR} of the adaptive filter with using composite structure element

实验组别	复合结构元素					
	A=0.01		A=0.05		A=0.1	
L	E_{f-y}	y_{SNR}	E_{f-y}	y_{SNR}	E_{f-y}	y_{SNR}
10	0.0957	27.8966	0.0948	27.7140	0.0918	26.9330
20	0.0973	31.8639	0.0973	31.3657	0.0960	30.3301
30	0.0975	33.2277	0.0981	33.6235	0.0974	32.5404
40	0.0976	33.2718	0.0982	34.9083	0.0979	34.3839
50	0.0975	32.9049	0.0982	34.8277	0.0982	35.3945
60	0.0975	32.5976	0.0982	34.7464	0.0982	35.7820
70	0.0975	32.3655	0.0981	34.4470	0.0983	35.8293
80	0.0975	29.4994	0.0981	31.6414	0.0983	34.9151
90	0.0975	28.8106	0.0980	30.6917	0.0982	33.5080
100	0.0975	28.4644	0.0980	30.1978	0.0982	32.3779
150	0.0977	24.0058	0.0979	25.1365	0.0981	26.5947
200	0.0983	20.4184	0.0978	21.5304	0.0980	22.7733
250	0.0990	17.7618	0.0980	18.7415	0.0983	19.8998
300	0.1020	15.5236	0.0998	16.5013	0.0985	17.7081

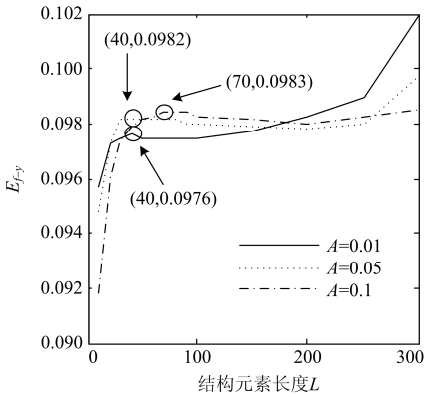


图 4 复合结构元素尺度对自适应滤波器输入-输出滤波误差的影响

Fig. 4 Influence of composite structure element size on the input-output E_{f-y} of adaptive filter

图4中在各条曲线上用“o”标注出三种幅值的复合结构元素在长度变化过程中 E_{f-y} 的极大值，由于 E_{f-y} 在结构元素最优尺度附近的变化趋势比较平缓，因此可以认为在各幅值下，随着结构元素长度的增加，在各条曲线由上升至明显变缓的起始位置为 E_{f-y} 的极大值点，该点对应的尺度为优选结构元素尺度。由图4可以得到自适应形态滤波器寻求到的优选滤波结构元素的尺度为：A=0.01，L=40；A=0.05，L=40；A=0.1，L=70。比较后选出 E_{f-y} 极大值中的最大值可最终将最优滤波元素确定为 A=0.1，L=70尺度下的复合元素。

将表1中复合结构元素在各幅值下不同长度的各次滤波拟输出信号的信噪比 y_{SNR} 绘制如图5。

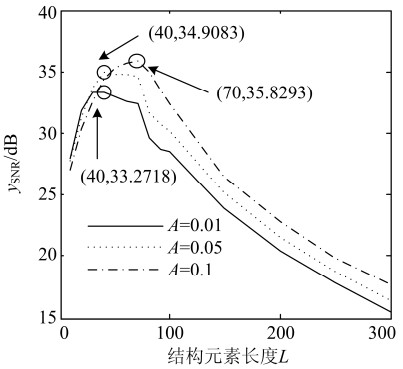


图 5 复合结构元素尺度对自适应滤波器滤波输出信号信噪比的影响

Fig. 5 Influence of composite structure element size on the y_{SNR} of output signal of adaptive filter

同样在图 5 中各条曲线上用“o”标注出三种幅值的复合结构元素在长度变化过程中滤波得到的信号信噪比 y_{SNR} 的最大值。滤波后信号信噪比最大值对应滤波效果最好，可以看到，根据滤波误差极大值规律选择出的最优滤波结构元素进行形态滤波时，信号的信噪比出现最大值，因此证明自适应形态滤波器能够自适应地选取最优滤波所用的复合结构元素。

为了进一步证明使用复合结构元素进行形态滤波所取得的效果比同尺度的正弦及三角形结构元素更好，按照幅值及长度备选序列，使用正弦及三角形结构元素在各尺度下进行滤波，将所得到的滤波拟输出信号的信噪比最大值及对应的尺度进行统计，并列于表 2 中。

由表 2 数据可得，单一正弦形结构元素的最优

表 2 正弦及三角形结构元素滤波后信号的信噪比最大值及对应的最优尺度统计

Table 2 Statistics on the maximum value of y_{SNR} of the filtered signal and the corresponding optimal scale with using sinusoidal and triangular structure elements

结构元素	最优尺度(幅值，长度)	滤波后信号信噪比最大值/dB
正弦形	A=0.01, L=30	33.3181
	A=0.05, L=40	35.0119
	A=0.1, L=60	35.5405
三角形	A=0.01, L=30	33.2227
	A=0.05, L=60	34.7340
	A=0.1, L=70	35.7050

滤波尺度为A=0.1, L=60，滤波后信号的信噪比为35.5405；单一三角形结构元素的最优滤波尺度为A=0.1, L=70，滤波后信号的信噪比为35.7050；而使用由自适应形态滤波器选择出的最优复合结构元素在A=0.1，L=70尺度下滤波，输出信号的信噪比为35.8293，因此验证了在处理含有随机白噪声干扰的采样信号时，复合型结构元素的滤波效果要优于单一形状的结构元素。

进一步调整A=0.1，L=70尺度复合结构元素中正弦形和三角形结构元素的幅值占比，设三角形幅值占比为a，则正弦形结构元素幅值占比为1–a，计算并统计调整幅值占比后各次的滤波误差 E_{f-y} 以及滤波后信号的信噪比y_{SNR}，将数据列于表3中。

表 3 调整基本结构元素幅值占比对应的输入—输出滤波误差及滤波后信号的信噪比统计

Table 3 Statistics on the input-output $E_{f\text{-}y}$ and y_{SNR} of the filtered signal with adjusting the amplitude ratio of basic structure element

a	$E_{f\text{-}y}$	y_{SNR}
0.1	0.0982	35.6203
0.2	0.0982	35.6884
0.3	0.0983	35.7406
0.4	0.0983	35.7895
0.5	0.0983	35.8293
0.6	0.0984	35.8492
0.7	0.0983	35.8274
0.8	0.0982	35.7609
0.9	0.0982	35.6540

根据滤波误差极大值原理选取a=0.6时的复合结构元素为最终的最优滤波结构元素，对应的滤波后信号信噪比证明了该幅值占比为最优比例。最优滤波结构元素的参数设置为A=0.1, L=70，三角形元素幅值占60%，正弦形结构元素幅值占40%。

使用最优滤波结构元素进行滤波，自适应形态滤波器的最终输出信号如图6所示，消噪效果良好，与理想有用信号已经十分贴近。

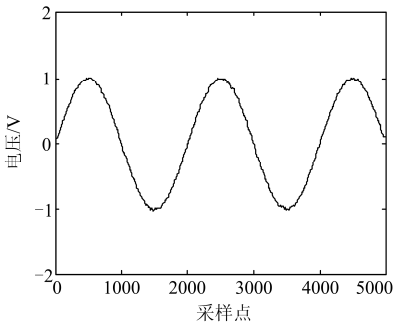


图 6 自适应滤波器最优滤波输出信号

Fig. 6 Optimal output signal of adaptive filter

4 结论

本文提出的复合结构元素自适应形态滤波器，借助含噪声信号和滤波信号之间的滤波误差寻求最优滤波所需的复合结构元素，解决了传统形态学滤波需要分析有用信号特征才能经验性地选择结构元素的问题，且在同等结构元素尺度条件下滤波性能要优于使用单一结构元素的传统形态滤波器。在自适应滤波器定义的元素库中加入更多种类的结构元素，改良组成滤波器的开—闭、闭—开级联形式等可以达到更优良的滤波效果，因此有进一步深入研究的空间和价值。

参考文献

[1] 史登祥. 电力系统中的噪声干扰及抑制方法[J]. 农村电气化, 2008(8): 22-23.
SHI Dengxiang. Noise interference and suppression methods in power system[J]. Rural Electrification, 2008(8): 22-23.

[2] 陆康, 刁倩. 有源滤波器在不同网络中的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 143-149.
LU Kang, DIAO Qian. Analysis of active power filter applications in different networks[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 143-149.

[3] 赵辉, 吕新亚, 王红君, 等. 基于复合控制策略的混合有源滤波器谐波治理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 60-66.
ZHAO Hui, LÜ Xinya, WANG Hongjun, et al. Study on control strategy based on compound control for hybrid active power filter harmonic governance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 60-66.

[4] 张黄群, 于盛林, 白银刚. 形态学图像去噪中结构元素选取原则[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(增刊 1): 81-83.
ZHANG Huangqun, YU Shenglin, BAI Yingang. Selected principle for structuring element in image denoising based on mathematical morphology[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2008, 23(S1): 81-83.

[5] 张全明, 刘会金. 基于广义形态滤波的电力系统采样信号处理[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 45-48.
ZHANG Quanming, LIU Huijin. Processing of sampled power system data based on generalized morphological filtering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 45-48.

[6] 刘盼, 王静, 刘涤尘. 改进的自适应广义形态滤波器设计[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 94-98.
LIU Pan, WANG Jing, LIU Dichen. Design of an improved adaptive generalized morphological filter[J]. Power System

Technology, 2009, 33(2): 94-98.

[7] 孙浩云, 牟龙华, 周伟. 自适应形态学滤波器在 HAPF 中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 1-6.
SUN Haoyun, MU Longhua, ZHOU Wei. Study on application of adaptive morphological filter in HAPF[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 1-6.

[8] 程汪刘, 郭跃霞, 王静, 等. 快速傅里叶变换和广义形态滤波器在抑制局部放电窄带干扰中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 94-97.
CHENG Wangliu, GUO Yuexia, WANG Jing, et al. Application of fast Fourier transform and generalized morphological filter in suppression of narrow-band interference in partial discharge signal[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 94-97.

[9] 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 Fangcheng, LIU Yunpeng, et al. Study on application of adaptive generalized morphological filter in processing on-line monitoring tan δ data[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 161-165.

[10] 张文斌, 周晓军, 林勇. 广义形态滤波器在振动信号处理中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 203-205.
ZHANG Wenbin, ZHOU Xiaojun, LIN Yong. Application research of generalized morphological filter in vibration signal processing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 203-205.

[11] 赵昭, 刘利林, 张承学, 等. 形态学滤波器结构元素选取原则研究与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 21-25.
ZHAO Zhao, LIU Lilin, ZHANG Chengxue, et al. Research and analysis of morphological filter structure element selection principle[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 21-25.

[12] 张杰. 基于数学形态学的故障行波测距方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
ZHANG Jie. Research of fault traveling wave fault location method based on mathematical morphology[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.

[13] 郭景峰, 蔺旭东. 数学形态学中结构元素的分析研究[J]. 计算机科学, 2002, 29(7): 113-115.
GUO Jingfeng, LIN Xudong. The analysis and study of structural elements of mathematical morphology[J]. Computer Science, 2002, 29(7): 113-115.

[14] 崔屹. 图形处理与分析: 数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 30-40.

[15] 刘姝. 数学形态学在信号处理方面的应用研究[D]. 大大连: 连理工大学, 2006.
LIU Shu. Mathematical morphology and its application on signal processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

[16] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 60-65.
CHEN Ping, LI Qingmin. Design and analysis of mathematical morphology-based digital filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 60-65.

[17] 江辉, 郑岳怀, 王志忠, 等. 基于数字图像处理技术的暂态电能质量扰动分类[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 72-78.
JIANG Hui, ZHENG Yuehuai, WANG Zhizhong, et al. An image processing based method for transient power quality classification[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 72-78.

[18] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.
LI Anna, WU Xi, JIANG Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-142.

[19] 李帅, 虞小燕, 龚世敏, 等. 数字量输入式合并单元的白噪声处理[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 128-133.
LI Shuai, YU Xiaoyan, GONG Shimin, et al. White noise processing in merging unit of digital input[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 128-133.

[20] DEBAYLE J, PINOLI J C. Multiscale image filtering and segmentation by means of adaptive neighborhood mathematical morphology[C] // IEEE International Conference on Image Processing, 2005: 537-540.

收稿日期：2016-07-07；　　修回日期：2016-09-30

作者简介：

齐　郑(1977—)，男，博士，副教授，主要研究方向为电力系统分析与控制，配电网自动化；E-mail: qizheng319@126.com

李　志(1992—)，男，通信作者，硕士研究生，主要研究方向为配电网自动化；E-mail: lizhi1992328@163.com

张首魁(1994—)，男，硕士研究生，主要研究方向为含分布式电源的配电网故障恢复。E-mail: shoukuizhang611@163.com

(编辑　姜新丽)