

基于奇异值分解的雷达微小目标检测方法

吴琳拥^{1,2}, 毛 谨^{1*}, 白渭雄²

(1. 四川九洲防控科技有限责任公司 四川 绵阳 621000; 2. 空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

【摘要】提出了一种强杂波环境下雷达微小目标的检测方法。该方法以奇异值分解理论为基础, 利用奇异值一阶、二阶差分谱进行奇异值选择, 通过奇异值逆变换将雷达回波信号分解成不同的成份, 从而实现杂波抑制和小微目标凸现。试验表明: 该方法能有效抑制杂波, 平均提升信噪比7 dB左右。

关 键 词 奇异值差分谱; 信噪比; 微小目标检测; 杂波环境

中图分类号 TN957 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.03.002

Radar Small Target Detection Based on Singular Value Decomposition Method

WU Lin-yong^{1,2}, MAO Jin^{1*}, and BAI Wei-xiong²

(1. Sichuan Jiuzhou Falcon Technologies Co., Ltd Mianyang Sichuan 621000;

2. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University Xi'an 710051)

Abstract A detection method of radar small target in a strong clutter environment is proposed. On the basis of singular value decomposition theory, the first order and second order difference spectrum of singular values is used to select the singular values in various combination. Radar echo signal is decomposed into different compositions by inverse singular value transformation, thus realizing the clutter suppression and small target highlights. The experiment shows that the method can effectively suppress the strong clutter and improve the signal to noise ratio 7dB of small targets.

Key words difference spectrum of singular value; signal to noise ratio; small target detection; strong clutter environment

强杂波环境下低小慢目标的检测一直是雷达探测的研究重点, 随着民用航空技术的推广和低空空域的逐步开放, 以旋翼无人机为代表的低小慢目标迅猛发展, 其所带来的安全隐患越来越突出。在城市等人口密集地区和机场、政府机关等重点安全区域, 由于周边建筑环境、电磁环境、气象环境、交通环境复杂, 倾测、管控和处置低小慢目标十分困难。文献[1-7]针对强杂波环境下的低小慢目标探测, 一方面通过优化传统的杂波模型和恒虚警检测方法, 提升对多种杂波的抑制方法和弱小目标的检测技术。此类方法通过改进杂波模型和恒虚警检测的参数, 对杂波干扰进行优化, 但其性能仍然受限于检测方法的理论极限, 提升效果有限。文献[8-14]另一方面, 利用小波变换等多尺度多分辨的特点, 结合雷达目标信号的相关性和杂波的随机性, 在小波域中进行杂波抑制和目标检测。此类方法通过改

变传统的距离-频率域的目标检测, 通过小波变换在小波域中进行杂波抑制和目标检测, 能够获得更多的目标信息, 但此方法受限于小波函数的选择和小波分解层数的限制, 不适用复杂的雷达使用环境。为了充分利用雷达回波的信息, 并突破传统距离频率维目标检测的限制, 本文借鉴主成份分析中的奇异值变换方法^[15-16], 在保留目标雷达回波全部信息的基础上, 通过分析雷达回波的弱小目标和杂波的特点, 利用奇异值进行雷达成份分解, 引入奇异值一阶、二阶差分谱, 借助差分谱信息对雷达回波信号进行分类重构, 实现雷达杂波和目标的有效分离, 达到杂波抑制和小微目标检测的目的。

1 理论分析

1.1 奇异值分解分析

对于一帧雷达回波信号 X , 对 X 做奇异值矩阵分

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-05-20

作者简介: 吴琳拥(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事雷达信号处理、雷达系统设计等方面的研究。

通信作者: 毛谨, E-mail: maojin999@aliyun.com

解(SVD分解), 结果为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (1)$$

对角矩阵 \mathbf{S} 对角线上的元素对应奇异值, \mathbf{U} 和 \mathbf{V}^T 是正交矩阵, 即满足:

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{I} \quad (2)$$

$$\mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I} \quad (3)$$

若一帧雷达回波信号中只包含单一的目标回波信号, 则 \mathbf{X} 中每一个脉冲信号是两两相关的, 对角矩阵 \mathbf{S} 对角线上的元素为零。实际雷达回波中包含目标信号、杂波信号以及噪声信号, 对角矩阵 \mathbf{S} 对角线上的元素均不为零, 且有:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k \geq \sigma_{k+1} \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0 \quad (4)$$

式中, σ_k 表示奇异值分解得到的对角矩阵 \mathbf{S} 的第 k 个奇异值, $k=1, 2, \dots, n$ 。信号中的成分通过奇异值分解后, 通过奇异值能够进一步将信号进行成份划分, 通过选择不同的奇异值重构奇异值矩阵, 利用奇异值逆变换就可以得到原始信号中的不同成份。而对于原始回波中强杂波环境下小微目标的检测的关键在于选择合适的奇异值个数进行信号重构。

1.2 奇异值差分谱

利用奇异值由大到小顺序排列的特点, 奇异值的一阶差分谱定义为:

$$d_i = \sigma_i - \sigma_j, \quad j=i+1, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

获得奇异值一阶差分谱为:

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (6)$$

式中, D 中的第 k 个元素 d_k 为第 k 个奇异值与第 $k+1$ 个奇异值之差。由于奇异值序列是由大到小排列, 奇异值一阶差分谱全为正值。当相邻两个奇异值对应雷达回波的相同成份时, 其差值较小; 反之, 则差值较大, 变现为奇异值一阶差分谱中的极大值点。即奇异值序列中第 k 个奇异值与第 $k-1$ 个奇异值对应雷达回波中的相同成份, 差值较小, 而第 k 个奇异值与第 $k+1$ 个奇异值对应雷达回波的不同成份, 差值较大, 同时第 $k+1$ 个奇异值和第 $k+2$ 个奇异值对应雷达回波相同成份, 差值较小。最终使得奇异值一阶差分谱中的第 k 个值为奇异值一阶差分谱的极大值点。这些奇异值一阶差分谱中的极大值点可以看作奇异值对应的雷达回波不同成份之间的分隔。通过这些点将奇异值分成不同的区域段, 每一段奇异值代表了原始雷达回波信号中的不同成份。通过不同成份的分离实现强杂波和目标信号的分离, 实现强杂波环境下小微目标的检测。

1.3 基于奇异值分解的微小目标检测流程

通过上述技术原理分析说明, 利用奇异值分解

的方式实现强杂波环境下微小目标探测的距离工作流程如图1所示。

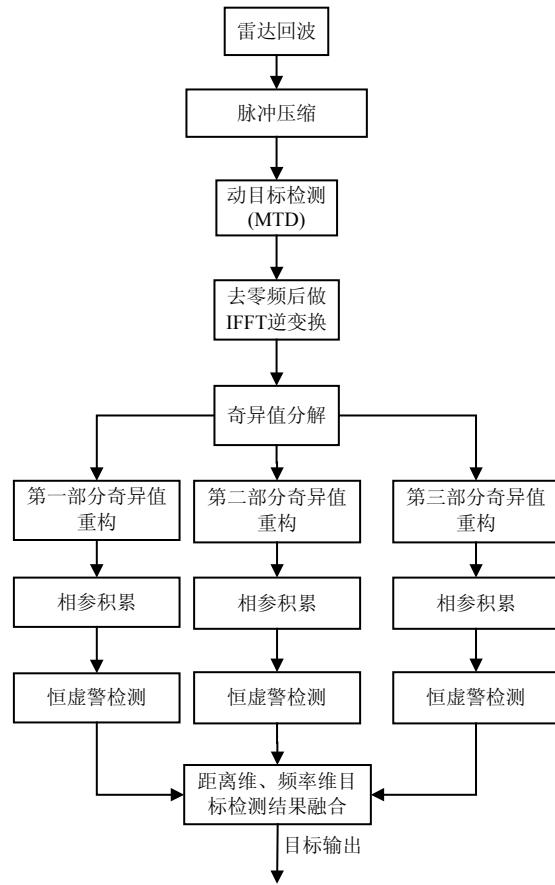


图1 基于奇异值分解的强杂波环境下
微小目标检测流程示意图

2 数据仿真

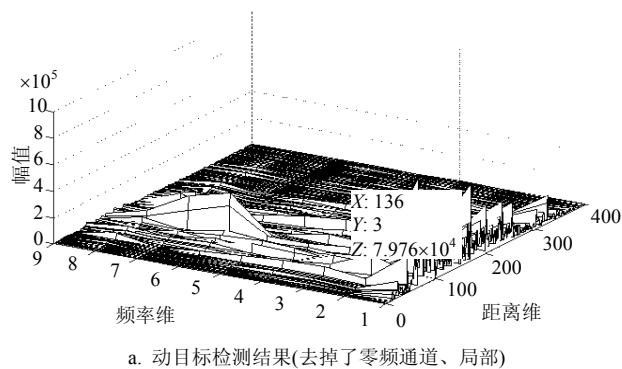
2.1 微小目标检测

以典型的四旋翼无人机大疆“精灵4”为目标, 采集某型雷达数字下变频(DDC)之后的数据, 通过传统的脉冲压缩和相参积累后, 目标回波信号位于距离维136通道和频率维第4通道。雷达目标检测结果如图2a所示(去掉了零频通道), 提取频率维第4通道的数据如图2b所示。由图中可以看出, 周围杂波的回波远大于目标回波, 传统的恒虚警检测方法无法有效检测目标。

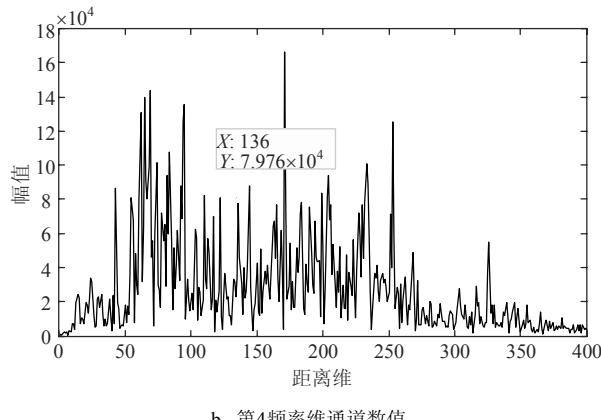
通过奇异值分解获得雷达回波信号的奇异值及其奇异值一阶差分谱如图3所示。图中“*”为奇异值, “•”为奇异值一阶差分谱。

由图3可知: 奇异值由大到小顺序排列, 奇异值的一阶差分谱在第4、第13个位置出现跳跃(不是正常递减), 通过奇异值二阶差分谱获得雷达回波信号的奇异值一阶差分谱的突变点位于第4、第13个奇异

值位置处。通过奇异值突变点的位置将奇异值序列分为3个部分:1) 奇异值序列的第1到第4个点;2) 奇异值序列的第5到第13个点;3) 奇异值序列的第14点之后。第一部分保留第1到第4个奇异值,其余奇异值置零,构建第一步部分的新的奇异值矩阵 S ,利用式(1)通过奇异值逆变换原始雷达回波信号的第一部分;雷达回波信号的第二、第三部分通过上述方法,保留相应部分的奇异值,利用式(1)通过奇异值逆变换获得。原始雷达回波信号通过奇异值优选分解的第一、第二、第三部分信号,分别如图4、图5、图6所示。



a. 动目标检测结果(去掉了零频通道、局部)



b. 第4频率维通道数值

图2 传统动目标检测结果

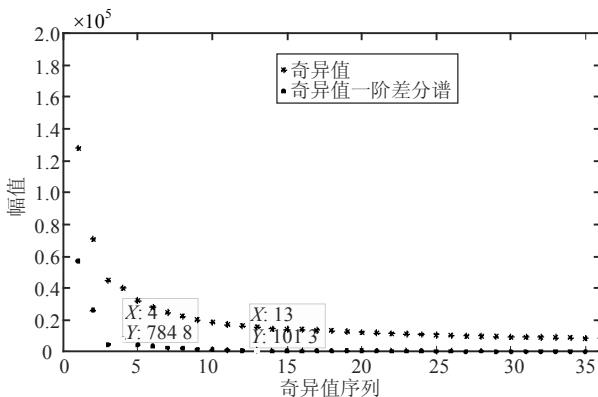


图3 雷达回波信号的奇异值及其奇异值差分谱

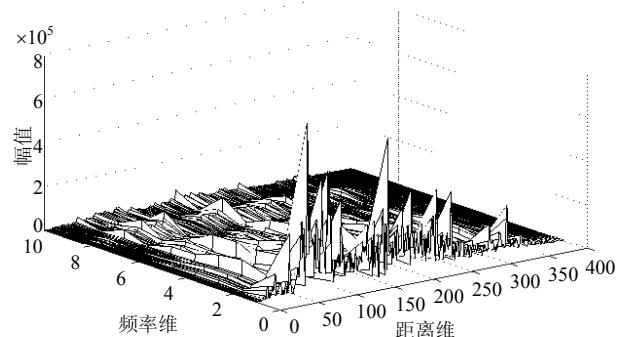


图4 雷达回波奇异值分解后第一部分(局部)

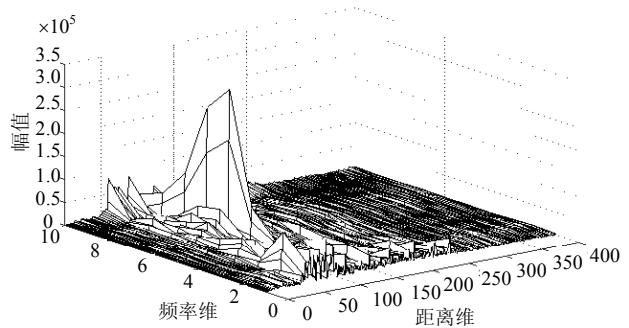


图5 雷达回波奇异值分解后第二部分(局部)

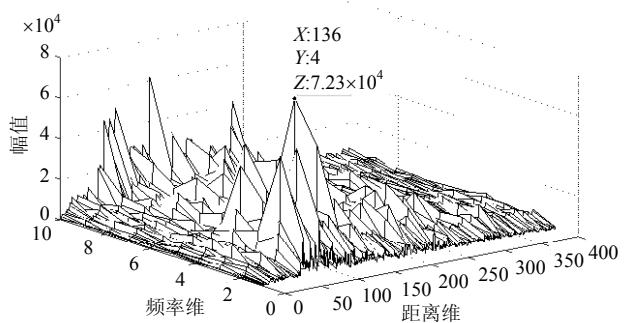


图6 雷达回波奇异值分解后第三部分(局部)

提取分析目标所在的频率维第4通道的数据,可以看出频率维第4通道也被分成3个组成部分,如图7所示。

由图7中可知,通过奇异值变换将雷达回波信号重构成3个部分后,目标回波信号所在的第三部分(如图中“+”型虚线所示)与第一部分(如图中“*”型虚线所示)、第二部分(如图中“.”型实线所示)得到分离,在第三部分中,目标信号得到凸显,极大提高了目标的检测概率。第3频率维通道数据和自适应检测门限如图8所示,第3频率维通道数据主成份分解后第三部分数据和自适应检测门限如图9所示。

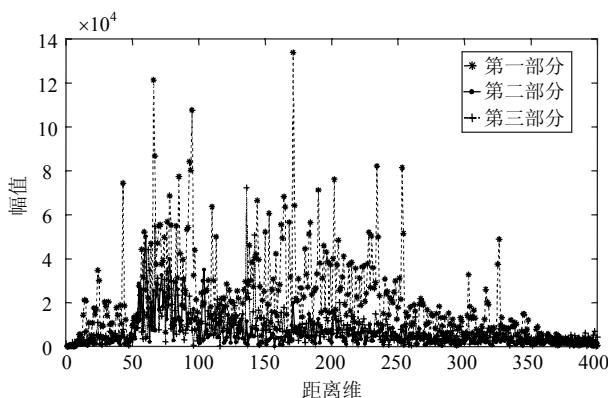


图7 雷达回波奇异值后第3频率维通道数据

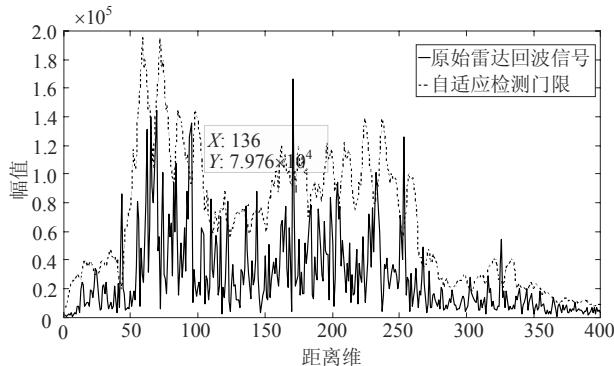
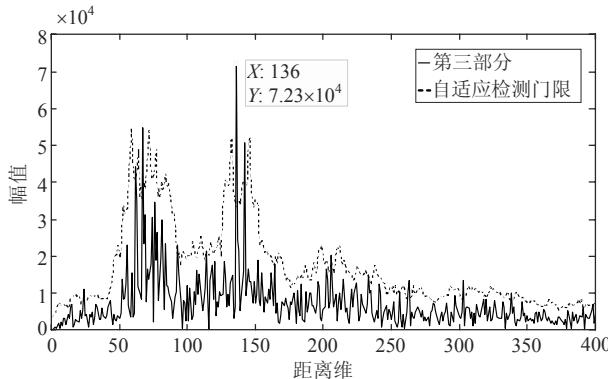


图8 雷达回波第3频率维通道数据及自适应检测门限

图9 雷达回波第3频率维通道数据主成份分解
后第三部分及自适应检测门限

2.2 信噪比分析

表1 原始信号和目标所在的第三部分的信噪比对比

处理阶段	目标回波幅值	附近杂波幅值均值	信噪比/dB
原始信号	7.976×10^4	1.8993×10^4	12.4640
目标所在的 第三部分	7.2302×10^4	7.2907×10^4	19.9277

定义雷达回波目标信噪比为目标信号的幅值与周围区域回波的幅值的均值之比。如目标回波幅值位置为(136距离维、4多普勒维), 则周围区域回波范围为(106~166距离维、2~30多普勒维), 通过计算

目标回波幅值与此范围内回波(除去目标所在位置的幅值)的平均值的比值为目标的信噪比。则原始信号和奇异值分解后目标所在的第三部分的信噪比统计结果见表1。

3 试验验证

将上述仿真结果应用于某型L波段雷达, 在山地环境下对旋翼无人机进行检测试验, 雷达脉冲重复周期为80 us, 信号时宽6 us, 带宽5 MHz, 相参积累脉冲数1 024, 试验目标为精灵4型四旋翼无人机, 飞行高度≤50 m, 飞行速度≤4 m/s。利用奇异值分解对雷达采集的强杂波环境下小微目标进行试验验证, 并与传统检测方法比对结果如图10所示。统计传统方法和奇异值分解方法的目标信噪比如图11所示。

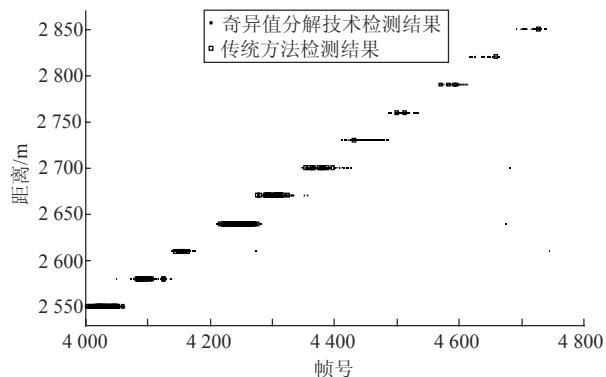
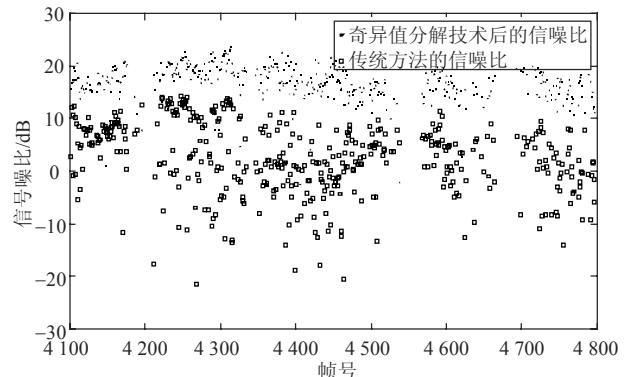


图10 奇异值分解技术与传统检测技术检测结果对比

图11 奇异值分解技术与传统检测技术提升目标
信杂比对比图

由图10可知, 在目标轨迹的尾部, 目标接近杂波区域, 被附近的杂波干扰。此时, 传统的检测方法无法有效检测出目标, 利用奇异值分解技术能够连续稳定的检测到目标。

由图11可知, 通过奇异值分解技术, 使得微小目标的信杂比获得明显提升, 有利于强杂波环境中微小目标的检测。

进一步, 将奇异值分解技术运用到Ku、Ka波段,

凝视、周扫等不同体制雷达回波试验数据目标检测中, 均可能达到杂波和微小目标信号的有效分离, 其试验条件及信噪比改善结果如表2。

表2 不同体制雷达信噪比改善对比

频段	信号带宽/MHz	俯仰波束/ $^{\circ}$	目标高度/m	信噪比提升/dB
L	5	16.3	50	7.8
			20	8.2
Ku	20	4.2	50	6.7
			20	7.3
Ka	25	1.8	50	6.3
			20	6.5

从试验结果看, 此方法适用性较好, 相比传统算法而言, 对不同类的雷达, 更加能够提升信噪比。同时, 该方法对俯仰宽波束、信号窄带宽雷达和目标低高度探测改善效果较好, 即杂波越强, 相对传统算法信噪比提升越明显, 这与前文分析是一致的。

4 结束语

本文通过奇异值对雷达回波进行分解, 利用差分谱极值点对雷达回波信号进行合理分区。由于不同的分区对应不同种类的雷达回波信号, 将雷达信号按区间范围重构雷达回波, 能够实现雷达回波中低小慢目标信号和杂波信号的有效分离, 从而达到杂波抑制和目标检测目的。通过仿真以及多型雷达试验验证, 本文提出的方法信噪比相比传统检测算法平均提升7 dB以上, 为复杂环境下的低小慢目标检测提供了有效方法。通过优化硬件结构, 实现重构雷达回波信号的并行实时性处理是后续工程化的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 郭汝江, 郝明. 海杂波背景下的低空小目标检测[J]. 信息化研究, 2009, 35(3): 26-29.
GUO Ru-jiang, HAO Ming. Low-flying small-target detection in sea clutter[J]. Informatization Research, 2009, 35(3): 26-29.
- [2] 彭卫华. 雷达信号的非相参积累检测和恒虚警处理[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(6): 50-52.
PENG Wei-hua. Noncoherent Accumulation detection and constant false alarm processing for radar signal[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2007, 30(6): 50-52.
- [3] 刘伊丽, 张临杰, 张晰, 等. 双参数CFAR舰船检测算法两种实现方法之分析与比较[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(10): 136-142.
LIU Yi-li, ZHANG Lin-jie, ZHANG Xi, et al. Comparison between two implementations of two-parameters CFAR ship detection method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 136-142.
- [4] ZAIMBASHI A. An adaptive CA-CFAR detector for interfering targets and clutter-edge situations[J]. Digital Signal Processing, 2014, 31(8): 59-68.
- [5] WEINBERG G V, KYPRIANOU R. Optimized binary integration with order statistic CFAR in Pareto distributed clutter[J]. Digital Signal Processing, 2015, 42(7): 50-60.
- [6] BOUDEMAGH N, HAMMOUDI Z. Automatic censoring CFAR detector for heterogeneous environments[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(12): 1253-1260.
- [7] DAVID M M, NEREA D R M, VICTOR M P S, et al. MLP-CFAR for improving coherent radar detectors robustness in variable scenarios[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(11): 4878-4891.
- [8] ZHANG Bo, SUN Lan-xiang, Yu Hai-bin, et al. A method for improving wavelet threshold de-noising in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 2015, 107: 32-44.
- [9] 李红延, 周云龙, 田峰, 等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2200-2206.
LI Hong-yan, ZHOU Yun-long, TIAN Feng, et al. Wavelet-based vibration signal de-noising algorithm with a new adaptive threshold function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2200-2206.
- [10] 曹晓英, 张智军, 向建军. 基于提升小波改进阈值的雷达信号去噪方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(14): 143-147.
CAO Xiao-ying, ZHANG Zhi-jun, XIANG Jian-jun. Method of radar signal de-noising based on lifting wavelet improved threshold[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(14): 143-147.
- [11] PARTHA R, MAITRA A K, ARIJIT B. A new threshold function for de-noising partial discharge signal based on wavelet transform[C]/International Conference on Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition [ICSPIPR]. Colmbat: IEEE, 2013: 185-189.
- [12] 袁开明, 舒乃秋, 孙云莲, 等. 基于阈值寻优法的小波去噪分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2015, 48(1): 74-80.
YUAN Kai-ming, SHU Nai-qiu, SUN Yun-lian, et al. Wavelet denoising based on threshold optimization method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(1): 74-80.
- [13] WANG Jian-hui, XIAO Qian, JANG Yan, et al. An adaptive filter model based on wavelet transform. [C]// WRI Global Congress on Intelligent Systems. Xiamen: IEEE, 2009: 136-139.
- [14] ELYASI I, ZARMCHI S. Elimination noise by adaptive wavelet threshold[J]. Engineering and Technology, 2009(56): 462-466.
- [15] JHA S K, YADAVA R D S. Denoising by singular value decomposition and its application to electronic nose data processing[J]. Sensors Journal, 2011, 11(1): 35-44.
- [16] ZHAO Xue-zhi, YE Bang-yan. Selection of effective singular values using difference spectrum and its application to fault diagnosis of headstock[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(5): 1617-1631.