

改进阈值函数在图像去噪中的应用

谢家林¹, 李根强¹, 谢家丽², 张怀奇¹

(1.68006 部队,银川,750104;2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室,兰州,730000)

摘要 针对传统阈值函数在图像去噪中存在的缺点和阈值选取的不确定性,为进一步研究小波去噪处理算法,提出了一种新的改进阈值函数的去噪算法,分别对 Circuit、Eight、Road 3 幅图像采用传统的硬阈值、软阈值、半软阈值方法和文中方法进行 Matlab 仿真实验。对比分析,文中方法既获得了较好的视觉效果和更高的峰值信噪比,又克服了软阈值信号失真和硬阈值信号不连续、振荡等缺点,且能够在消噪和保留原有信号的弱特征之间获得较好的平衡,明显地改进了传统硬、软阈值函数去噪算法存在的诸多不足,在实际应用中更为有效。

关键词 小波变换;改进阈值函数;图像去噪;峰值信噪比

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.014

中图分类号 TP391.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0072-05

Research on the Application of the Improved Threshold Function to Image De-noising

XIE Jialin¹, LI Genqiang¹, XIE Jiali², ZHANG Huaiqi¹

(1.Unit 68006, Yinchuan 750104, China;

2.Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000,China)

Abstract: Aimed at the disadvantages of traditional threshold function in image de-noising and the uncertainty of the threshold selection, a new improved threshold function algorithm in image de-noising is proposed so as to further research on wavelet de-noising algorithm. Matlab simulation of Circuit, Eight, and Road images are performed respectively by adopting the traditional hard threshold, the soft threshold, and the semi-soft threshold method combined with this paper method. Through contrast and analysis, this method is good in visual effects and high in Peak Signal to Noise Ratio (PSNR). And at the same time, the signal distortion is solved in the soft threshold method, and the signal discontinuity and oscillation shortcomings in the hard threshold method are overcome as well. Moreover, the method can strike a good balance between noise elimination, and can also retain the weak features of the original signal and significantly address many problems in the traditional hard and soft threshold function de-noising algorithms. This method is good in effectiveness in practical applications.

Key words: wavelet transformation; improved threshold function; image de-noising; PSNR

收稿日期:2015-09-29

基金项目:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才成长基金(51Y451291)

作者简介:谢家林(1981-),男,内蒙古乌兰察布人,高级工程师,主要从事数值计算、图像处理、军事信息技术研究.E-mail: xiejl_01@126.com

引用格式:谢家林,李根强,谢家丽,等.改进阈值函数在图像去噪中的应用研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):72-76. XIE Jialin, LI Genqiang, XIE Jiali, et al. Research on the Application of the Improved Threshold Function to Image De-noising[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 72-76.

图像去噪的目的是去除图像信号中的噪声信号,尽可能地保留原始信号特征,保护边缘和细节特征信息,实现图像边缘检测、图像分割、分类识别、特征提取和图像融合,提高图像的视觉效果,还原图像重要信息和改善图像质量。由于小波变换在图像去噪处理方面具有低熵性、多分辨率、去相关性和选基灵活等特点,去噪效果较好,因此小波变换去噪算法成为近年来图像去噪处理研究的热点之一。Donoho 对基于小波阈值收缩去噪方法进行了一系列的理论研究^[1-2],提出了小波去噪的软、硬阈值方案,对信号小波分解得到的小波系数进行阈值函数处理能够获得在均方差意义上的最优解,但这 2 种算法在实际应用中取得成功的同时,也存在一些不足。例如,硬阈值法能够较好地保留图像边缘等局部细节特征,但与此同时,图像可能会出现振铃、伪吉布斯效应等视觉上的严重失真;而软阈值方法具有连续性,处理结果相对平滑,但往往会使图像边缘模糊,造成图像细节的丢失。基于以上考虑,国内外学者进行了针对性的研究,提出了一系列解决方案和改进算法^[3-16],如半软阈值法、模平方处理法、最大似然估计法、修正软阈值法和多项式插值法等,其中 Coifman 和 Donoho 提出的平移不变去噪方法^[3],通过对信号的循环位移去除人为伪影;Bui 和 Chen 把平移不变推广到多小波^[4],发现平移不变多小波比平移不变单小波获得的去噪效果更好;Cai 和 Silverman 提出了基于邻域系数的阈值方案^[5]。

针对以上问题,并基于当前的研究现状,本文试图提出一种新的改进阈值函数的半软阈值算法,进一步研究小波去噪处理算法,以保证图像处理效果,还原图像信息,提高信噪比,最后通过仿真实验进行检验。

1 小波域阈值图像去噪原理

考虑到有效信号和随机噪声在小波域内具有不同的性态特征,它们的小波系数幅值随着尺度变化的趋势不同,随机噪声幅值随着尺度的增加很快递减为零,而有效信号随尺度的变换基本保持不变。因此,在小波变换域中利用噪声和信号的这一特征,通过对小波系数进行切割、缩小幅度等非线性处理,实现去除噪声的目的。

首先,建立小波域滤波数学模型,观测的图像信号为:

$$f_i = g_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, N (N = 2^n) \quad (1)$$

其由真实信号 g_i 和加性噪声 ε_i 组成,向量形式表示为 $f = g + \varepsilon$ 。

实现小波域阈值图像去噪的过程如下:

步骤 1 对含噪信号 f 进行小波分解。选择一个小波并确定分解的层数,然后进行分解计算,得到各层小波系数 $w_{j,k}$;

步骤 2 对分解后的各个尺度下的小波系数进行阈值量化;

步骤 3 使用阈值量化后的小波系数进行重构得到滤波后的图像或信号。

2 阈值函数构造与阈值估计

在小波图像去噪中,如何选取最优的阈值以及对小波系数进行阈值量化,并构造好的阈值函数会直接影响滤波后的图像质量和去噪效果。

2.1 传统阈值函数去噪算法

在小波阈值滤波中,通常选取硬阈值函数、软阈值函数和半软阈值函数来对阈值进行处理,见式(2)~(4):

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} 0, & |w_{j,k}| \leq \lambda \\ w_{j,k}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} 0, & |w_{j,k}| \leq \lambda_1 \\ \text{sgn}(w_{j,k}) \left(\frac{\lambda_2(|w_{j,k}| - \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \right), & \lambda_1 < |w_{j,k}| < \lambda_2 \\ w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $w_{j,k}$ 为含噪信号的小波系数; $\hat{w}_{j,k}$ 为经过阈值化处理后的系数; λ 为各种算法所设定的阈值; λ_1 和 λ_2 分别为半软阈值函数中的下阈值和上阈值。

2.2 改进阈值函数去噪算法

传统的硬阈值函数和软阈值函数在重构数据与真实数据的逼近程度方面和序列的连续性都有各自的不足。其中,在硬阈值方法中,处理的小波系数在阈值 $-\lambda$ 和 λ 处是不连续的,这使重构序列的光滑性变差;在软阈值方法中,虽然处理后的小波系数整体连续性好,但小波系数与处理后的小波系数之间总存在着恒定的偏差,这会损失一些有用的高频信息,影响重构的精度;而半软阈值方法作为硬阈值方法和软阈值方法的一种折衷形式,保留了较大的系数,同时具有很好的连续性。

本文针对传统阈值函数的缺陷,提出一种新的半软阈值函数,见式(5):

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} 0, & |w_{j,k}| \leq \lambda_1 \\ \text{sgn}(w_{j,k}) \frac{\lambda_2(|w_{j,k}| - \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}, & \lambda_1 < |w_{j,k}| < \lambda_2 \\ \frac{|w_{j,k}|^2 - 2\lambda_2^2}{w_{j,k}}, & |w_{j,k}| \geq \lambda_2 \end{cases} \quad (5)$$

比较式(4)和式(5)可知,传统半软阈值函数并没有对大于上阈值的小波系数进行处理,而本文改进的阈值函数除了具有半软阈值的一些基本特点,还对大于上阈值的小波系数也进行了处理,这与实际情况中大于上阈值的系数也会存在噪声信号的干扰是相符的。因此,文中所提方法更利于对图像信号进行去噪处理。

2.3 阈值的估计

在小波域阈值滤波方法中,阈值的估计是一个非常关键的问题,如果阈值太小,信号仍会含有大量噪声,不能达到去噪的效果,而太大又会造成信号的细节丢失,使信号变得模糊。常用的阈值选取方法有:VisuShrink 阈值、SUREShrink 阈值、GCV 阈值和 BayesShrink 阈值等^[17-19],本文采用通用阈值 $t = \sigma \sqrt{2 \ln N}$ 进行测试。

3 仿真实验结果及分析

为验证改进的阈值函数在小波变换下的去噪效果,证明改进的阈值函数与通用阈值相结合的去噪算法的有效性和优越性,在小波变换的情况下,分别采用硬阈值函数、软阈值函数、半软阈值函数和本文改进的阈值函数方法对几组二维图像信号进行 Matlab 去噪处理。小波分解时,选用 db8 作为小波基,分解层数为 2,阈值为 $t = \sigma \sqrt{2 \ln N}$ 。

实验选择大小为 257×257 的 Circuit、Eight、Road 3 幅图像作为测试图像,加入均值为 0,标准差分别为 10、20、30、40、50 的随机分布噪声,分别从主、客观两方面对传统阈值函数和改进阈值函数处理算法进行评价(客观以峰值信噪比 PSNR,主观以视觉效果),说明本文提出的阈值函数与传统阈值函数小波去噪在图像重构、图像去噪、图像视觉等方面的差异。本文的阈值函数与传统阈值函数在图像去噪后的峰值信噪比(PSNR)对比情况见表 1。

由表 1 可知,图像信号 Circuit、Road 和 Eight 分别在方差 σ 取不同值时获得的峰值信噪比,本文方法得到的峰值信噪比明显高于传统硬阈值、软阈值、半软阈值去噪方法,图像信号的信噪比越高,原始信号与消噪信号的均方差越小,消噪信号越接近于原始信号,去噪效果相对越好,可见采用本文的阈值函数去噪算法优于传统阈值函数去噪算法。

图 1~6 给出了二维图像信号 Circuit、Road 和 Eight 分别在 $\sigma = 10$ 和 $\sigma = 50$ 时主观去噪效果图。

表 1 不同阈值函数小波去噪效果对比(PSNR)

Tab.1 Comparison of wavelet denoising effect with different threshold function(PSNR)

图像名称	σ	含噪	硬阈值	软阈值	半软阈值	本文方法
Circuit	10	28.089 1	30.424 9	29.093 5	32.590 9	32.738 0
	20	22.129 4	27.615 5	27.520 1	27.788 3	27.845 9
	30	18.576 4	26.421 5	26.409 6	26.697 6	26.814 3
	40	16.080 0	25.327 0	25.238 5	25.425 1	25.541 1
	50	14.100 4	24.186 0	24.174 5	24.302 7	24.401 2
Eight	10	28.115 3	30.575 1	29.213 4	29.498 6	29.681 0
	20	22.120 0	27.749 0	27.393 9	27.158 4	27.745 1
	30	18.566 0	26.327 1	26.140 8	26.170 6	26.371 5
	40	16.141 9	25.112 9	25.102 0	25.099 2	25.120 2
	50	14.144 1	23.969 8	24.125 5	24.044 3	24.213 4
Road	10	28.112 4	32.716 7	32.003 8	32.583 7	32.743 8
	20	22.122 3	30.049 8	30.038 4	30.040 4	30.162 5
	30	18.597 3	28.243 9	28.176 2	28.332 9	28.384 3
	40	16.078 2	26.558 6	26.676 2	26.637 1	26.813 4
	50	14.148 9	25.128 8	25.295 8	25.166 0	25.631 5

实验结果表明,本文改进的阈值函数小波去噪效果优于硬阈值、软阈值和半软阈值函数,处理后的图像视觉效果也相对较好。在 $\sigma = 10$ 的 3 幅图像去噪效果中,由于随机噪声影响较小,经过不同阈值函数小波处理后,既表现出清晰地边缘轮廓,也保护了电路板、道路和硬币的纹理细节信息,而在 $\sigma = 50$ 的 3 幅图像去噪效果中,随着随机噪声对原始图像影响的增大,本文方法去噪处理效果较为明显,电路板、硬币细节表现比较清楚,道路纹理要素和边缘轮廓更加全面清晰,道路车道白色虚线分界线较传统方法处理更加清楚,而传统阈值函数处理方法往往会保留较多的斑点噪声或丢失部分原始信号,造成失真。

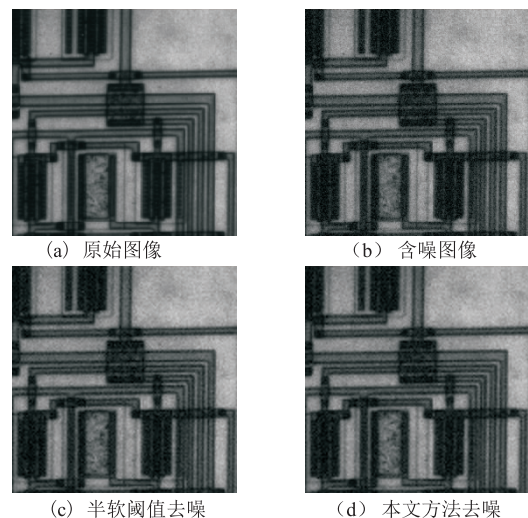


图 1 $\sigma = 10$ Circuit 图像去噪效果图

Fig.1 $\sigma = 10$ Circuit image denoising

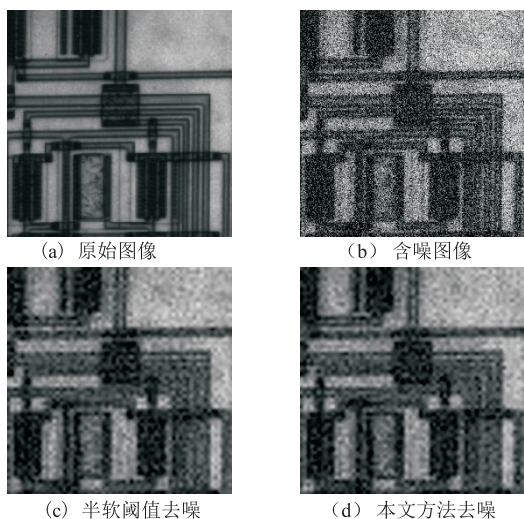


图 2 $\sigma = 50$ Circurit 图像去噪效果图
Fig.2 $\sigma = 50$ Circurit image denoising

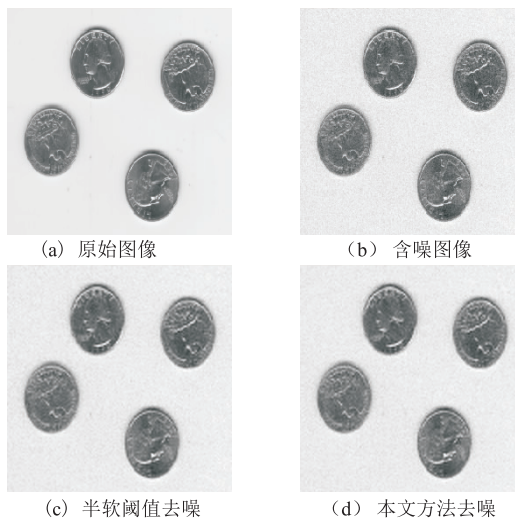


图 5 $\sigma = 10$ Eight 图像去噪效果图
Fig.5 $\sigma = 10$ Eight image denoising

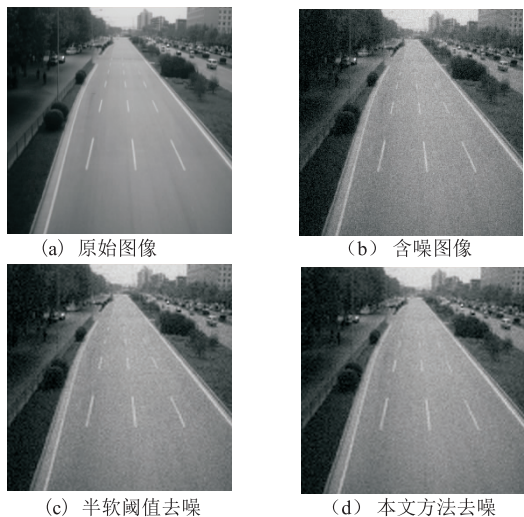


图 3 $\sigma = 10$ Road 图像去噪效果图
Fig.3 $\sigma = 10$ Road image denoising

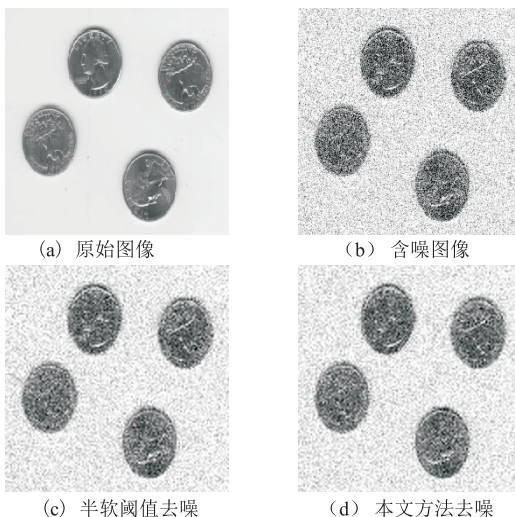


图 6 $\sigma = 50$ Eight 图像去噪效果
Fig.6 $\sigma = 50$ Eight image denoising

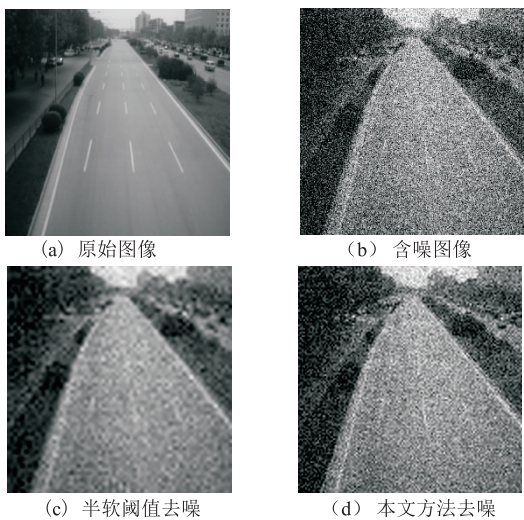


图 4 $\sigma = 50$ Road 图像去噪效果图
Fig.4 $\sigma = 50$ Road image denoising

由此可见,无论是采用主观评价还是客观评价准则,本文方法不仅可以获得比传统硬、软阈值化方法更好的视觉效果和更高的峰值信噪比,而且在提高算法复杂度以实现优化去噪效果的同时,其运算耗时量并未显著增加,去噪性能优于传统阈值函数小波去噪方法。

4 结语

本文首先介绍了小波域阈值去噪方法的基本原理和实现步骤,并且分析了传统硬、软阈值去噪方法在图像处理中的不足,在此基础上提出了一种基于小波分析的改进阈值函数的半软阈值去噪方法,最后使用传统处理方法和本文所提方法对 3 组图像进行 Matlab 仿真实验对比,实验结果表明,采用本文改进阈值函数去噪方法在视觉效果和客观评价上相

比传统方法都有明显改善,取得了更为理想的结果。未来在军事活动中,利用本文方法在远距离图像传输、采集和特征提取方面,将有较好的应用前景。

参考文献(References):

- [1] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal Spatial Adaptation via Wavelet Shrinkage [J]. *Biometrika*, 1994, 81(3): 425-455.
- [2] Donoho D L. Denoising by Soft Thresholding [J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [3] Coifman R R, Donoho D L. Translation Invariant Denoising [C]// *Wavelets and Statistics*, Springer Lecture Notes in Statistics. New York: Springer, 1995: 125-150.
- [4] Bui T D, Chen G Y. Translation Invariant Denoising Using Multiwavelets [J]. *IEEE Trans Signal Process*, 1998, 46(12): 3414-3420.
- [5] Cai T T, Silverman B T. Incorporating Information on Neighbouring Coefficients into Wavelet Estimation [J]. *The Indian Journal of Statistics, Series B*, 2001, 63(2): 127-148.
- [6] 惠飞, 史昕, 赵祥模, 等. 基于改进阈值函数的小波去噪算法研究 [J]. *现代电子技术*, 2011, 34(12): 61-64. HUI Fei, SHI Xin, ZHAO Xiangmo, et al. Research of Wavelet De-noising Algorithm Based on Improved Threshold Function [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(12): 61-64. (in Chinese)
- [7] 李树钰. 改进的小波阈值去噪方法及其在 MATLAB 中的仿真 [J]. *噪声与振动控制*, 2010, 30(2): 121-124. LI Shuyu. Improved Wavelet Threshold Denoising Method and Its Simulation Using MATLAB [J]. *Noise and Vibration Control*, 2010, 30(2): 121-124. (in Chinese)
- [8] 万晟聪, 杨新. 基于自适应小波阈值的 SAR 图像降噪 [J]. *信号处理*, 2009, 25(6): 874-880. WAN Shengcong, YANG Xin. SAR Image Denoising Based on Adaptive Wavelet Thresholding [J]. *Signal Processing*, 2009, 25(6): 874-880. (in Chinese)
- [9] 王彪, 李建文, 王钟斐, 等. 基于小波分析的新阈值去噪方法 [J]. *计算机工程与设计*, 2011, 32(3): 1099-1102. WANG Biao, LI Jianwen, WANG Zhongfei, et al. Threshold De-noising Method Based on Wavelet Analysis [J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(3): 1099-1102. (in Chinese)
- [10] 李根强, 黄永东, 蒋肖. 基于小波变换和脊波变换的自适应图像去噪算法 [J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(8): 3192-3194. LI Genqiang, HUANG Yongdong, JIANG Xiao. Adaptive Image Denoising Method Based on Wavelet Transform and Ridgelet Transform [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(8): 3192-3194. (in Chinese)
- [11] Poornachandra S. Wavelet-Based De-noising Using Subband Dependent Threshold for ECG Signals [J]. *Digital Signal Processing*, 2008, 18(1): 49-55.
- [12] 刘恒冰, 韩世勤, 刘晶. 基于新阈值函数及最优尺度的小波去噪研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(24): 72-74. LIU Hengbing, HAN Shiqin, LIU Jing. Wavelet Denoising Based on Novel Thresholding Function and Best Decomposition Scale [J]. *Computer Engineering and Application*, 2007, 43(24): 72-75. (in Chinese)
- [13] 张冬雪, 苑津莎, 李中. 一种改进阈值法小波去噪的信号包络分析方法研究 [J]. *电力科学与工程*, 2010, 26(6): 7-11. ZHANG Dongxue, YUAN Jinsha, LI Zhong. Study on a Signal Envelopment Analysis Method Based on Threshold Method of Improved Wavelet Denoising [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2010, 26(6): 7-11. (in Chinese)
- [14] 寇俊克, 魏连鑫. 一种改进的小波阈值图像去噪方法 [J]. *现代电子技术*, 2012, 35(4): 102-104. KOU Junke, WEI Lianxin. An Improved Method for De-noising of Wavelet Threshold Images [J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(4): 102-104. (in Chinese)
- [15] 李翀, 顾行发. 基于小波萎缩方法的图像小波去噪的研究 [J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 697-702. LI Chong, GU Xingfa. Wavelet Image Denoising in Wavelet Shrinkage Ways [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 697-702. (in Chinese)
- [16] 李丽婧, 黄永东. 分层 FDR 阈值滤波算法 [J]. *计算机工程*, 2011, 37(1): 187-189. LI Lijing, HUANG Yongdong. Layered FDR Threshold Filtering Algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(1): 187-189. (in Chinese)
- [17] Candes E J. Monoscal Ridgelets for the Representation of Images with Edges [R]. Department of Statistics, Stanford University, 1999.
- [18] Candes E J, Donoho D L. Ridgelets: A Key to Higher-Dimensional Intermittency [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1999, 357(1760): 2495-2509.
- [19] Kaur Lakhwinder, Gupta Savita, Chauhan R C. Image Denoising Using Wavelet Thresholding [C]// *Indian Conference on Computer Vision*. 2001: 1522-1531.

(编辑:徐楠楠)