

基于 SWBC 变换尺度相关性的红外图像阈值降噪

李 骏, 朱维斌, 叶树亮

(中国计量大学 工业与商贸计量技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘 要:针对传统图像降噪算法无法较好地处理红外图像中的噪声问题,提出了一种基于 SWBC (Stationary Wavelet-based Contourlet) 变换尺度相关性的红外图像阈值降噪算法。本文分析红外图像信号和噪声在 SWBC 变换域各尺度上的能量分布特性,改进一般降噪算法对所有子带均进行处理的做法,只对高频子带系数进行降噪处理。同时为增加 SWBC 系数阈值判断的准确性,本文算法对每个系数设置不同的阈值,结合尺度相关特性,对系数进行双重判断。使用不同的含噪红外图像对本文算法进行检验。实验结果表明,相比于 WBC 尺度间硬阈值降噪、WBC 尺度间自适应阈值降噪和 WBC 尺度相关性降噪,本文算法能获得更高的 SNR 提升,且 SSIM 值也更接近于 1。

关键词:红外图像降噪;SWBC 变换;尺度相关性;阈值

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.022

Infrared image threshold denoising based on scale correlation of SWBC transform

LI Jun, ZHU Wei-bin, YE Shu-liang

(Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: As traditional denoising algorithm can't deal with the infrared image well, an infrared image threshold denoising algorithm based on scale correlation of SWBC (Stationary Wavelet-based Contourlet) transform is proposed. The energy distribution characteristics of signal and noise in SWBC transform domain were analyzed. The proposed de-noising algorithm only deals with high frequency sub-bands' coefficients instead of all sub-bands' coefficients in traditional de-noising algorithm. In order to increase the accuracy of SWBC coefficient threshold estimate, different thresholds were set for each coefficient, and combined with the scale correlation, double judgment was carried out for coefficients. In the experiments, different infrared images with noise are used to verify the proposed algorithm. Experimental results show that the proposed algorithm can obtain higher SNR improvement, and the SSIM is closer to 1, compared with the WBC inter-scale hard threshold denoising algorithm, WBC inter-scale self-adaptive threshold denoising algorithm and WBC scale correlation denoising algorithm.

Key words: infrared image denoising; SWBC transform; scale correlation; threshold

1 引 言

在光线较暗或者有障碍物遮挡时,红外图像往往能够比自然图像更加容易地捕捉目标信息,因此

被广泛应用于军事、医疗、气候、无损检测等领域中。但受环境、红外热成像设备等因素影响,红外图像噪声大、对比度低、边缘模糊,不利于图像信息的获取

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ470767)资助。

作者简介:李 骏(1991-),男,硕士生,主要从事图像算法研究。E-mail:lijun10@qq.com

收稿日期:2016-10-08

以及后续分析研究,故需要对其进行降噪处理。目前空间域降噪^[1-2]和变换域降噪^[3-4]是常用的降噪方法。相比于空间域降噪方法,变换域降噪能够较好保留信号特征,具有更优的降噪效果,已逐渐成为近年来一个研究热点。

小波变换是发展较早的尺度变换方式,在图像领域比如图像降噪、图像压缩以及图像分割等均有大量应用。为解决小波变换方向信息不足,无法最优表示二维图像中轮廓、纹理以及边缘等具有高维奇异特征部分的缺点^[5],Contourlet变换应运而生。而后相关学者将两者相结合,提出WBC(Wavelet-based Contourlet)变换,使其同时具有小波变换和Contourlet变换的优点,并在图像降噪中取得了较好效果^[6-7]。阈值降噪原理简单,实现容易,是众多变换域降噪方法中使用最为广泛的一种。但大多阈值降噪算法对同一子带系数设置相同的阈值,未考虑系数间的差异,容易过扼杀系数,破坏图像细节信息。此外单一阈值往往无法准确区分信号和噪声,在去除噪声同时会丢失信号系数,导致降噪效果不佳。为此,Xu等^[8]提出小波相关去噪算法,迭代计算相邻尺度间系数乘积作为相关量筛选小波系数,实现降噪目的;郁梅等^[9]在Xu等提出的算法基础上进行改进,用Contourlet变换取代小波变换,从而提出基于Contourlet变换尺度间相关特性的降噪算法;杨帆等^[10-11]同时考虑Contourlet系数尺度间和尺度内相关特性,提出了基于Contourlet系数相关特性的自适应图像降噪算法,降噪效果进一步增强。

本文针对WBC变换不具备平移不变性的缺点,使用SWBC(Stationary Wavelet-based Contourlet)变换作为尺度变换方式,并对SWBC变换域各尺度子带噪声能量进行研究。研究发现经过SWBC分解后低频子带噪声能量几乎可以忽略不计,故算法使用阈值和尺度相关性只针对高频子带进行处理。其中阈值设置上考虑到每个系数的差别,为每个系数均设置对应的阈值以提高系数判断准确性;相关性降噪处理借鉴Xu等提出的小波相关降噪算法思想。通过对不同图像的SNR和SSIM评价发现,本文提出的算法能有效提升SNR和SSIM,且提升效果优于WBC尺度间阈值降噪、WBC尺度相关性降噪等一般降噪算法。

2 基于SWBC变换尺度相关性的阈值降噪算法

2.1 SWBC变换

WBC变换中使用的小波是普通的离散正交小波,它不具备平移不变性,在降噪时容易使得降噪图

像边缘处产生振荡,造成图像边缘失真从而影响降噪效果。图1所示为两层WBC分解示意图。从该图看出,随着分解尺度增加,高频子带大小变为前一尺度子带大小的1/4,此时变换域系数中包含的信息量也随之减少。SWBC变换使用平稳小波代替离散正交小波,每一次平稳小波分解后子带大小不变,克服WBC变换在分解层数较大时性能快速下降的问题,从而具备比WBC变换更优的降噪效果。

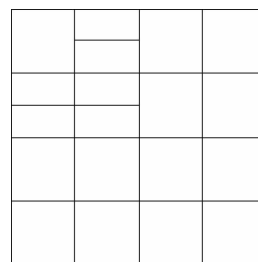


图1 两层WBC分解

Fig. 1 2 level WBC decomposition

对图2(a)和图2(b)分别进行2尺度SWBC分解,计算低频子带和高频子带系数能量,得到表1所示数据。系数能量计算公式如下:

$$S_{i,j}^2 = \sum_{i,j \in A} x_{i,j}^2 \quad (1)$$



(a) 原图



(b) 噪声图

图2 原图和噪声图

Fig. 2 Original image and noise image

其中, A 为子带区域; i, j 代表当前系数位置; x 为系数。

传统降噪算法对所有子带均进行降噪处理, 表面上这种方法可以获得较好的降噪效果。但实际研究发现, 图像经过 SWBC 分解后, 其低频子带噪声能量很小, 绝大部分能量是图像信号能量。若对低频子带进行处理, 不仅增加算法复杂度以及运行时间, 还可能会破坏图像信号系数, 导致图像质量下降。故本文降噪算法只针对高频子带系数进行处理, 低频子带系数予以保留。

表 1 各子带系数能量情况表

Tab. 1 The energy of coefficients in each sub-band

	原图能量	噪声图能量	噪声能量	噪声能量比例/%
低频子带	55223	55335	112	0.20
第二层高频子带	128.7563	158.3095	29.5532	18.67
第一层高频子带	43.7652	97.8394	54.0742	55.27

2.2 自适应阈值降噪

阈值降噪方法认为图像信号系数较大, 噪声系数较小, 通过设置合适的阈值即可将信号和噪声予以区分。因此, 阈值设置的合适与否直接影响到算法降噪效果的好坏。若阈值设置过大, 则大量有用信号系数被滤除; 若阈值设置过小, 则大量噪声系数被保留。Donoho 等在高斯噪声模型下推导得到的通用阈值 $T = \sigma \sqrt{2 \lg N}$ 是目前比较常用的阈值表达式^[12]。该阈值对同一子带内所有 SWBC 系数设置统一值, 未考虑各个 SWBC 系数之间的差异, 容易过扼杀系数导致图像细节丢失影响降噪算法效果。

尽管 SWBC 变换具有去相关能力, 但 SWBC 系数之间仍存在一定的相关性。如果一个 SWBC 系数幅值较大, 那么其邻域位置 SWBC 系数也可能较大。即当一个较大的 SWBC 系数邻域范围内其他系数幅值较小时, 该系数有极大可能被噪声污染。因此可以通过邻域系数对阈值进行自适应调整, 对每个系数设置不同的阈值, 使阈值更具针对性和准确性。

如图 3 所示, 系数 $x_{i,j}$ 为当前研究对象, 使用公式(1)计算该系数 3×3 邻域内系数平方和, 然后根据公式(2)计算阈值调整因子:

$$u_{i,j} = \sqrt{S_{i,j}^2 / x_{i,j}^2} \quad (2)$$

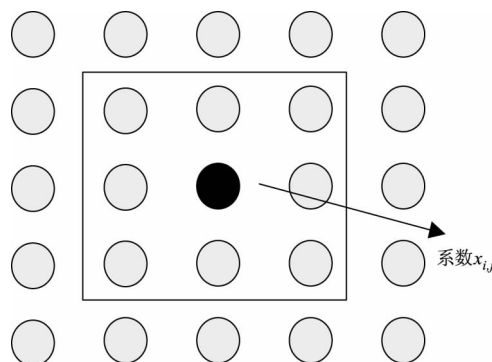


图 3 系数与邻域窗口位置关系图

Fig. 3 The relationship between coefficient and neighborhood window

若使用通用阈值 $T = \sigma \sqrt{2 \lg N}$ 作为基本阈值, 则可得到自适应阈值如下所示:

$$T_{i,j} = T / u_{i,j} \quad (3)$$

在阈值设置过程中, 对于噪声系数希望阈值尽可能大, 以便于将噪声彻底去除; 对于信号系数希望阈值尽可能小, 以更好保留图像细节。从自适应阈值表达式可以看出, 当系数 $x_{i,j}$ 为噪声系数时, 由于邻域系数有极大可能也为噪声系数, 故其邻域系数平方和较小, 导致调整因子较小, 最终其对应的阈值较大。通过增大阈值可以较好对噪声系数进行滤除; 当系数 $x_{i,j}$ 为信号系数时, 其最终得到的自适应阈值较小, 能对信号系数进行一个较好的保留。因此在理论上该自适应阈值表达式能够取得较好降噪效果。

2.3 尺度相关性降噪

相比于通用阈值, 自适应阈值能在一定程度上能增加系数判断准确性, 但无论阈值如何设置, 总会将部分 SWBC 系数值较小的信号系数判断为噪声系数, 将部分 SWBC 系数值较大的噪声系数判断为信号系数, 影响降噪效果。因此阈值降噪往往和相关性降噪相结合, 在阈值判断基础上使用尺度相关性对系数做进一步判断, 使得降噪算法既拥有阈值法有效去除噪声的优点, 又拥有相关性降噪法较好保留图像细节的优点。

尺度相关性一般分为尺度内相关性和尺度间相关性, 在构造自适应阈值时已经使用尺度内相关性思想。尺度间相关性认为图像信号经过 SWBC 变换之后, 相邻尺度间同一位置上是系数具有一定相关性, 即父系数在其邻域内较大, 则其子系数在其邻域内也较大; 而噪声系数由于其分布的不确定性, 相

相关性较弱或不存在相关性。

本文中相关性降噪借鉴 Xu 等提出的小波相关性降噪算法,但不再对相关量进行迭代计算,以减小相关性降噪算法复杂度。具体步骤如下:

(1) 计算相关量。相关量为相邻尺度同一位置 SWBC 系数的乘积,本文使用 2 尺度 SWBC 变换,故相关量为父子系数乘积 $Corr_{i,j} = x_{i,j} \times x_{i,j}^f$, 其中 $x_{i,j}^f$ 为 $x_{i,j}$ 的父系数。

(2) 归一化相关系数大小使其能与 SWBC 系数进行比较,归一化公式如下所示:

$$NewCorr_{i,j} = Corr_{i,j} \times \sqrt{P_c/P_{corr}} \quad (4)$$

其中, $P_c = \sum_i \sum_j x_{i,j}^2$ 代表系数能量, $P_{corr} = \sum_i \sum_j Corr_{i,j}^2$ 代表相关性能量。

(3) 利用相关性对系数进行判断处理,公式如下:

$$\hat{x}_{i,j} = \begin{cases} 0, & NewCorr_{i,j} < \rho \times |x_{i,j}| \\ x_{i,j} \times \sqrt{1 - T^2/S_{i,j}^2}, & else \end{cases} \quad (5)$$

其中, ρ 为权值因子,一般取值范围为 0.9 ~ 1.3。

3 本文算法步骤

根据上述分析,整理本文基于 SWBC 变换尺度相关性的阈值降噪算法步骤如下:

步骤 1: SWBC 变换。

对红外图像进行 2 尺度 SWBC 分解,得到 1 个低频子带、3 个第一尺度高频子带和 3 个第二尺度高频子带,其中每个第一尺度高频子带被细分为 4 个方向子带,每个第二尺度高频子带被细分为 2 个方向子带。

步骤 2: 自适应阈值降噪。

利用公式计算自适应阈值,当 $|x_{i,j}| \geq T_{i,j}$ 时对 SWBC 高频子带系数进行阈值降噪处理,处理公式如下:

$$\hat{x}_{i,j} = x_{i,j} \times \sqrt{1 - T^2/S_{i,j}^2}, \quad |x_{i,j}| \geq T_{i,j} \quad (6)$$

其中, T 为通用阈值; $T_{i,j}$ 为自适应阈值; $x_{i,j}$ 为当前待处理系数; $\hat{x}_{i,j}$ 为处理后系数。

步骤 3: 尺度相关性降噪。

当 $|x_{i,j}| < T_{i,j}$ 时,使用尺度间相关性降噪方法对 SWBC 高频系数进行处理,处理规则如公式(5)所示。

步骤 4: SWBC 逆变换。

对处理后系数进行 SWBC 逆变换,重构得到降噪后图像。

具体降噪算法流程图如图 4 所示。

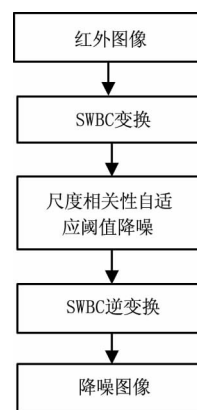


图 4 降噪算法流程图

Fig. 4 The flow chart of denoising algorithm

4 实验结果与评价

4.1 评价指标

本文采用 SNR 和 SSIM^[13] 两个指标对算法降噪效果进行客观评价。其计算公式如下所示:

$$SNR = 10 \times \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^{m,n} f_{i,j}^2}{\sum_{i=1}^{m,n} (f_{i,j} - h_{i,j})^2} \right)$$

$$SSIM = SSIM(f, h) = l(f, h)^\alpha c(f, h)^\beta s(f, h)^\gamma \quad (7)$$

其中, $l(f, h)$ 、 $c(f, h)$ 、 $s(f, h)$ 分别表示两幅图像的亮度、对比度、结构相似度; α, β, γ 的取值均为 1。

信噪比 SNR 反映图像中噪声成分的多少。SNR 越大,说明信号中噪声含量越小,图像成像质量越高,降噪效果越好。

结构相似度 SSIM 取值范围为 -1 到 1,代表两幅图像之间相似程度,相似程度越大,该值越接近 1。因此当含噪图像经降噪算法处理后,若 SSIM 值越接近 1,则说明降噪图像细节保持程度以及算法降噪效果越好。

4.2 实验结果

使用红外图像库中的船图 A 和急救图 B 作为测试对象。在这两个图像中加入一定大小的高斯噪声,得到 15 dB 含噪图像。使用 WBC 尺度间阈值降噪算法、WBC 尺度间自适应阈值降噪算法、WBC 尺度间相关性降噪算法和本文降噪算法对图像进行处理。通过观察图像的 SNR 和 SSIM 评价各算法对高斯噪声的降噪效果。具体降噪结果如图 5、图 6 和表 2、表 3 所示。

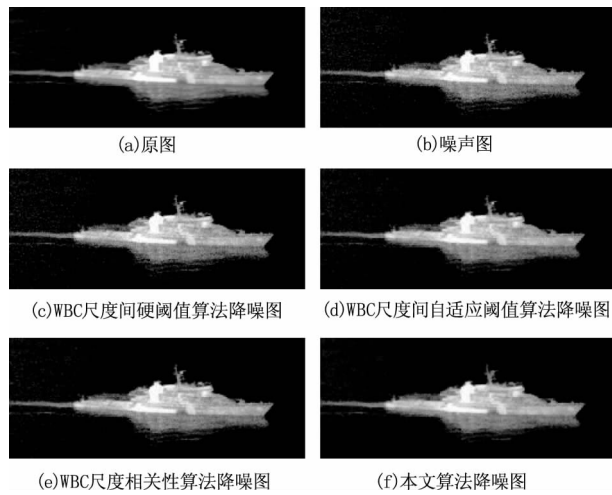


图 5 红外图像 A 降噪结果图

Fig. 5 The denoising results of infrared image

表 2 红外高斯噪声 A 图 SNR 和 SSIM 情况表

Tab. 2 The SNR and SSIM of the infrared image

A with Gaussian noise

	噪声图	尺度间硬阈值	尺度间自适应	尺度相关性	本文算法
SNR	15. 0507	16. 9605	17. 5799	18. 5196	19. 3548
SSIM	0. 7844	0. 8533	0. 8707	0. 9026	0. 9170

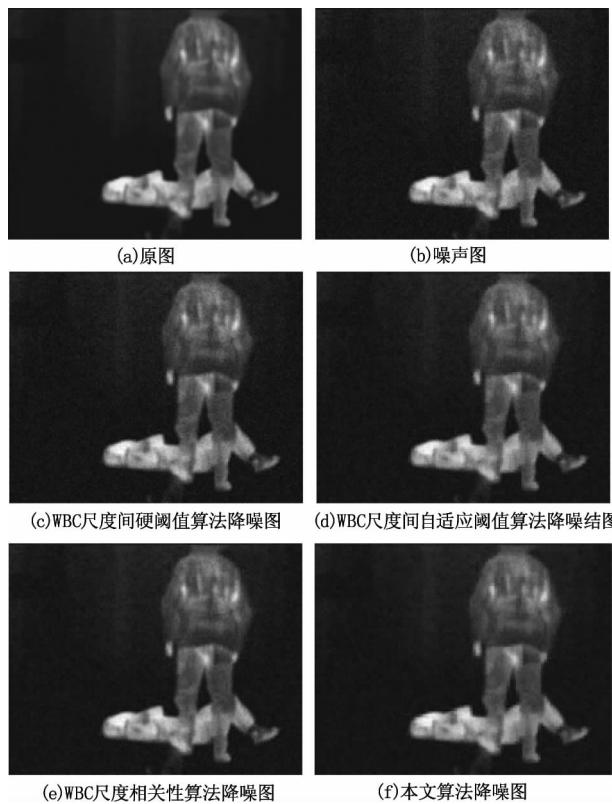


图 6 红外图像 B 降噪结果图

Fig. 6 The denoising results of infrared image B

表 3 红外高斯噪声 B 图 SNR 和 SSIM 情况表

Tab. 3 The SNR and SSIM of the infrared image

B with Gaussian noise

	噪声图	尺度间硬阈值	尺度间自适应	尺度相关性	本文算法
SNR	15. 0419	16. 5273	17. 6621	18. 2360	19. 6156
SSIM	0. 8347	0. 8851	0. 9095	0. 9331	0. 9469

观察图 5 和图 6 发现,无法用视觉观察对算法效果进行较好评价。观察表 2 和表 3 发现,降噪效果从 WBC 尺度间硬阈值降噪算法、WBC 尺度间自适应阈值降噪算法、WBC 尺度相关性降噪到本文降噪算法依次提高。WBC 尺度间自适应阈值降噪算法效果优于 WBC 尺度间硬阈值降噪算法,主要是因为自适应阈值根据系数特性对阈值进行自适应调整,使得阈值设置更具准确性;WBC 尺度相关性降噪算法综合考虑尺度间和尺度内相关性,系数判断准确性进一步提高;本文算法使用自适应阈值和尺度相关性对系数进行二重判断,且 SWBC 变换具有平移不变性,在以上算法中降噪效果最优,SNR 提升达到 4 dB 以上,且 SSIM 值也高于 0.9。由此说明本文降噪算法对高斯噪声的降噪效果优于一般降噪算法。

为进一步说明本文算法的适用性,在船图 A 和急救图 B 中加入散斑噪声,得到 15 dB 的含噪图像。使用各降噪算法进行处理,比较各降噪图像的 SNR 值和 SSIM 值。鉴于视觉评价较为困难,以下只使用 SNR 和 SSIM 数据进行说明。

观察表 4 和表 5 数据可得到与高斯噪声图像降噪实验相似的结论,即本文算法对散斑噪声的降噪效果要优于一般降噪算法,可将 SNR 提升 3 dB 以上,SSIM 值提升到 0.9 以上。

表 4 红外散斑噪声 A 图 SNR 和 SSIM 情况表

Tab. 4 The SNR and SSIM of the infrared image

A with speckle noise

	噪声图	尺度间硬阈值	尺度间自适应	尺度相关性	本文算法
SNR	14. 8139	16. 3183	16. 8955	17. 2709	18. 2704
SSIM	0. 8687	0. 9259	0. 9165	0. 9278	0. 9362

表 5 红外散斑噪声 B 图 SNR 和 SSIM 情况表
Tab. 5 The SNR and SSIM of the infrared image
B with speckle noise

	噪声图	尺度间 硬阈值	尺度间 自适应	尺度 相关性	本文 算法
SNR	14.9321	15.8818	16.7720	17.6163	18.8110
SSIM	0.9257	0.9577	0.9563	0.9646	0.9718

5 结论

本文使用 SWBC 变换作为尺度变换方式,并对 SWBC 域各尺度噪声能量进行分析,发现低频子带噪声能量较少,几乎可以忽略不计,故本文算法只针对高频子带系数进行处理。在区分高频子带信号系数和噪声系数上,使用阈值和相关性双重判断方法。其中阈值的设置考虑了每个 SWBC 系数的差异,对每个系数设置一个对应的阈值,以增加阈值设置的准确性;相关性计算上参考小波相关降噪算法思想,对未用阈值进行较好区分的系数使用相关性做二次判断。通过实验证明,对于高斯噪声和散斑噪声,本文提出的基于 SWBC 变换尺度相关性的阈值降噪算法均能够有效提升 SNR 值和 SSIM 值,且提升效果明显优于 WBC 变换尺度间硬阈值降噪算法、WBC 变换尺度间自适应阈值降噪算法和 WBC 变换尺度相关性降噪算法。

参考文献:

- [1] Gupta G. Algorithm for image processing using improved median filter and comparison of mean, median and improved median filter [J]. International Journal of Soft Computing & Engineering, 2011, 1(5): 2231 - 2307.
- [2] Ma M, Tian H, Hao C. Image denoising using grey relational analysis in spatial domain [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005, 5960(1): 335 - 342.
- [3] Eslami R, Radha H. Translation-invariant Contourlet transform and its application to image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3362 - 74.
- [4] LIU Zhuhua. The research of image denoising method [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2005. (in Chinese)
刘祝华. 图像去噪方法的研究 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2005.
- [5] LIN Liyu, ZHANG Youyan. Contourlet transform-Image processing application [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
林立宇 张友焱. CONTOURLET 变换——影像处理应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] WAN Zhiping. Efficient image denoising method based on wavelet-contourlet transform and threshold [J]. Laser & Infrared. 2013, 43(7): 831 - 836. (in Chinese)
万智萍. 一种高效的小波 Contourlet 变换阈值去噪算法 [J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 831 - 836.
- [7] ZHENG Jiafewng, ZHANG Wei, YE Shuliang. Infrared image directional and inter-scale denoising of WBC transform [J]. Laser & Infrared. 2016, 46(3): 351 - 356. (in Chinese)
郑佳枫, 张伟, 叶树亮. 红外图像 WBC 变换方向内和尺度间降噪 [J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 351 - 356.
- [8] Xu Y, Weaver J B, Healy D M, et al. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique [J]. Image Processing IEEE Transactions on, 1994, 3(6): 747 - 758.
- [9] YU Mei, YI Wenjuan, JIANG Gangyi. Image denoising based on inter-scale correlations of Contourlet transform [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(6): 73 - 77. (in Chinese)
郁梅, 易文娟, 蒋刚毅. 基于 Contourlet 变换尺度间相关的图像去噪 [J]. 光电工程, 2006, 33(6): 73 - 77.
- [10] YANG Fan, ZHAO Ruizhen, HU Shaohai. Adaptive algorithm for image denoising based on correlation properties of Contourlet coefficients [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 357 - 361. (in Chinese)
杨帆, 赵瑞珍, 胡绍海. 基于 Contourlet 系数相关特性的自适应图像去噪算法 [J]. 光学学报, 2009, 29(2): 357 - 361.
- [11] YANG Fan. The research of denoising algorithm based on Contourlet transform [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
杨帆. 基于 Contourlet 变换的图像去噪算法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [12] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425 - 455.
- [13] Z Wang, A C Bovik, H R Sheikh, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2004, 4: 600 - 612.