

高分辨率红外图像的分层自适应阈值 Curvelet 系数萎缩去噪方法

刘鸿飞, 陈 忠

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 高分辨率红外图像在基于小波系数阈值萎缩的去噪过程中, 容易导致边缘模糊或丢失等失真。文中首次引入基于 wrapping 的第二代快速 Curvelet 变换, 对图像边缘信息进行有效的稀疏保存, 并采用分层自适应阈值算法独立估计每个尺度、方向上的 Curvelet 系数噪声阈值, 并针对红外图像的 Curvelet 系数能量高度集中于低尺度系数的特点, 采用尺度相关的硬阈值对染噪图像的 Curvelet 系数进行处理。实验结果表明: 在不同噪声条件下, 与基于小波系数的 Visu Shrink, Penalized, sparsity-norm 阈值等去噪算法相比, 文中提出的去噪算法取得了较好的去噪效果, 在噪声方差 $\sigma = 30$ 时, 使用该方法的峰值信噪比 (PSNR) 可高达 31.77 dB, 去噪后的图像边缘保持良好, 具有较好的视觉效果; 同时, 文中建议算法的计算量比传统 Curvelet 降低了 70% 以上, 适合在 DSP 等嵌入式系统应用。

关键词: 高分辨率红外图像; Curvelet 变换; 分层自适应阈值萎缩; 去噪

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

High resolution infrared image denoising based on curvelet and hierarchical adaptive threshold shrinkage

LIU Hong-fei, CHEN Zhong

(Dept. of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Edge of high resolution infrared image is blurry after denoising with the denoising arithmetic based on wavelet. A new denoising method based on 2th generation curvelet and hierarchical adaptive threshold is proposed to preserve the edge better. The denoising threshold of curvelet coefficient is estimated separately by hierarchical adaptive threshold and the noising image is denoising with hard threshold related to the transform scale because most of energy of curvelet coefficients is concentrated in the low scale coefficients. The experiment results show that the proposed algorithm can obtain a better denoising performance than some arithmetic based on wavelet like VisuShrink, Penalized, sparsity-norm in all kinds of noise spectral density. The PSNR is up to 31.51 dB with the proposed algorithm when noise variance is 30. The images after denoising based on curvelet preserve their edge better and is better in visual effect; furthermore, the computational complexity of proposed algorithm decreases 70% compared to classic curvelet transform.

Key words: high resolution infrared image; Curvelet; hierarchical adaptive threshold shrinkage; denoising

1 引 言

目前, 红外成像技术在航天、军事、工业、民用等各领域发挥了重要作用, 已广泛应用于航天与航空遥感、军事目标侦察、导弹制导、森林防火以及非典、甲流防治等军事和民用领域。由于红外探测器, 特

别是非制冷红外焦平面, 受红外背景辐射的光子起

基金项目: 国家博士后科学基金 (No. 20090460750) 资助。

作者简介: 刘鸿飞 (1979 -), 男, 博士后, 主要研究领域为红外图像处理技术和精密科学仪器研制。E-mail: hfliu@xmu.edu.cn

收稿日期: 2010-06-28; 修订日期: 2010-08-07

伏、光电转换噪声等影响,输出的红外图像噪声较大,影响后续的红外目标检测、识别,红外图像去噪算法的研究在红外仪器的研制过程中具有重要意义,一直是红外图像处理方面的重点内容之一。红外仪器的研制者在红外去噪方法上的研究已经进行了大量的工作,主要有数字形态学滤波方法^[1]、最小二乘去噪方法^[2]、基于系数相关性的小波变换去噪方法^[3]、离散平稳小波变换和 Bayes 估计的去噪方法^[4-5]、小波变换和改进 SVD 的红外图像去噪方法^[6]和基于 NSCT-I 的红外图像收缩阈值去噪方法^[7],其中小波去噪及其各种扩展方法取得了良好的去噪效果。近年来,红外图像朝高分辨率的方向发展,美国 Flir、日本 Nec 等公司已经推出 640×480 分辨率的红外热像仪,我国也已经开始了 640×512 高分辨红外热成像方面的应用^[8-9],随着红外图像分辨率的进一步提高,由于小波自身各向同性、逼近效果差、无法有效表达图像边缘信息等缺陷,导致在处理高分辨率红外图像时,出现图像边缘丢失、模糊等失真现象。Chao Ni 等人提出了联合估计边沿技术的小波红外去噪方法^[10],一定程度上提高了小波去噪的保护边缘能力,但是增加了计算复杂度。针对小波变换的缺陷,Candès 与 Donoho 提出了更适于分析信号中高维奇异性的 Curvelet 变换^[11-13],Curvelet 变换具有良好的方向选择与辨识能力,能够有效地逼近图像中的边缘与纹理等细节信息。由于 Curvelet 变换具有多尺度特性以及良好的方向特性,噪声信息和边缘信息能够很好地分开,在保持边缘的同时,使噪声抑制达到了一个很好的效果。文献[14-15]将 Curvelet 变换引入红外图像处理领域,用于红外背景抑制,取得了极好的效果,但是由于传统的基于 USFFT 的 Curvelet 变换计算量大,无法在嵌入式系统中得到应用。

2 Curvelet 变换

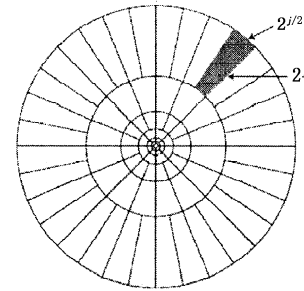
2.1 Curvelet 变换

Curvelet 变换是在 Ridgelet 变换的基础上发现的,是一种新的图像多尺度几何分析工具,其核心思想就是通过足够小地分块,将曲线近似为直线来处理。Curvelet 变换表示为: $c(j, l, k) = \langle f, \Phi_{j, l, k} \rangle$,其中 j, l, k 分别表示尺度、方向、位置信息。由公式(1)可以看出,Curvelet 变换比 Wavelet 增加了方向信息。如图 1(a)阴影部分所示,从频域来看,Curvelet 基支撑区间表现为“楔形”,表现出“方向”性^[16]。在楔形分块中,只有当逼近基与奇异性特征重叠,即其方向与奇异性特征的几何形状匹配时,才具有较

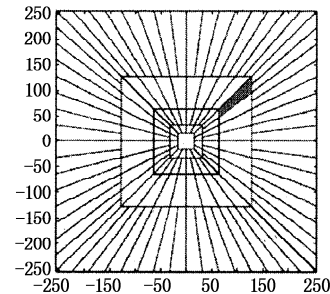
大的 Curvelet 系数。在二维空间 R^2 中,对每一尺度 $j \geq j_0$,可以定义其 Fourier 域的频率窗口为:

$$U_j(r, \theta) = 2^{-\frac{3j}{4}} W(2^{-j}r) V\left(\frac{2^{\lfloor \frac{j}{2} \rfloor} \theta}{2\pi}\right) \quad (1)$$

其中, $W(r)$ 和 $V(t)$ 为满足一定条件的径向与角度窗口对, $\lfloor \frac{j}{2} \rfloor$ 为取整运算。



(a) 连续 Curvelet 频率空间分块图



(b) 离散 Curvelet 频率空间分块图

图1 连续与离散 Curvelet 频率空间分块图

第二代 Curvelet 变换在第一代 Curvelet 的基础上进行了改进,将参数减少到 3 个,且采用更简单的结构来构造 Curvelet 变换,实现过程无需用到 Ridgelet,降低了数据的冗余度,提高了运算速度。对用同心方块分割后的频域可以运用 FFT 来实现,最后离散的二代 Curvelet 变换为:

$$c^D(j, l, k) = \sum_{n_1, n_2 \in P_j} \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_j] \times \hat{U}_j[n_1, n_2] \times e^{i2\pi(\frac{k_1 n_1}{l_1, j} + \frac{k_2 n_2}{l_2, j})} \quad (2)$$

如图 1(b)所示,离散的二代 Curvelet 变换将极坐标下光滑连续的环形频率窗 U_j 变成了方形分块,这个改变使得 Curvelet 适合离散化处理。

对一个二次连续可微的目标函数 $f \in L^2(R^2)$,考虑其非线性逼近误差,Curvelet 的逼近误差为:

$$\varepsilon_m(M) = \|f - f_m\|^2 = O(\log_m M)^{1/2} M^{-2} \quad (3)$$

而采用 Wavelet 和 Fourier 变换,则分别只能达到 $O(M^{-1})$ 和 $O(M^{-1/2})$ ^[17],所以相对 Wavelet 和 Fourier 变换来说,Curvelet 变换在逼近性能方面有着显著提高,可以对图像边缘进行更加稀疏表示,变

换后能量更加集中,有利于进行图像的分析 and 处理。

2.2 基于 Wrapping 的快速离散 Curvelet 变换

离散 Curvelet 有两种快速实现方法:USFFT 和 Wrapping,两种方法的主要区别在于每个尺度每个方向空间网格的选择方法不同。其中基于 Wrapping 的快速离散 Curvelet 变换是目前运算速度最快的 Curvelet 变换算法,其核心思想是围绕原点 wrap,即对任意区域,通过周期化技术逐一映射到原点的放射区域,其算法过程为:

1)对 $L^2(R^2)$ 的 $f[m_1, n_1]$ 进行 2D-FFT 变换得到 $\hat{f}[m_2, n_2]$;

2)在每个尺度 j 和角度 l ,对 $\hat{f}[m_2, n_2]$ 进行插值,得到 $\hat{f}[m_2, n_2 - m_2, \tan m_2]$;

3)用 $U_{j,l}(m_2, n_2)$ 乘以 \hat{f}_γ^{CT} ,从而得到局部化的频率分块;

4)围绕原点包装(wrap)上述乘积 $\hat{f}_{j,l}[m_2, n_2] = W(U_j \hat{f}_\gamma^{CT})[m_2, n_2]$;

5)对 $\hat{f}_{j,l}[m_2, n_2]$ 进行 2D-IFFT,得到曲波系数 $C^D(j, l, k)$;

基于 Wrapping 的快速离散 Curvelet 变换的计算复杂度为 $O(n^2 \log n)$,空间复杂度为 $O(n^2)$ ^[18],相对于其他的曲波实现方法有概念简单、计算快速、冗余小等特点。由于上述步骤每一步都是可逆的,因而可以将上一步骤逆序实现,即可实现 Curvelet 逆变换。

3 红外图像的 Curvelet 去噪方法

3.1 Curvelet 系数阈值萎缩去噪方法

红外热像中的噪声类型主要包括散粒噪声、热噪声和 $1/f$ 噪声三类,它们在统计特性上均服从高斯分布^[4]。在 Curvelet 变换中,当图像边缘轮廓方向与 Curvelet 波方向一致时,将有较大的 Curvelet 系数,反之,则 Curvelet 系数很小。当有噪声出现在图像中时,应用 Curvelet 变换,噪声变成 Curvelet 系数中的小系数,将这些小系数滤掉,就可以滤掉图像中的噪声,而不会损失图像的边缘信息。因此可以通过萎缩 Curvelet 系数来进行消噪,利用 Curvelet 进行阈值去噪的基本思想与基于小波变换的去噪方法基本相同^[17]。与小波变换系数对比,Curvelet 变换系数也具有大致相同的特点,因此可以通过阈值化处理去除噪声。算法步骤如下:

1)对含噪声图像进行 Curvelet 变换,得到 Curvelet 变换系数;

2)采用分层自适应阈值估算方法,估算各尺度、方向的 Curvelet 系数阈值 thr;

3)对图像的 Curvelet 变换系数进行阈值萎缩处理;

4)对处理后的 Curvelet 变换系数进行 Curvelet 逆变换,得到消噪后的图像。

3.2 Curvelet 系数的尺度相关硬阈值处理

利用 Curvelet 进行阈值萎缩去噪的基本思想与基于小波变换的去噪方法基本一致。设带有加性噪声的图像为:

$$f(m, n) = f_o(m, n) + \sigma N(m, n) \quad (4)$$

其中, $f_o(m, n)$ 表示待恢复的真实图像; $N(m, n)$ 为标准高斯噪声; σ^2 为噪声方差。Curvelet 变换的算子记为 C , 设 $f_{j,l}^{CT} = CF$ 为带噪图像 f 经过 Curvelet 变换后的系数, Donoho 等人已经证明:在 Curvelet 变换域中,每个尺度子带的噪声仍然保持加性与随机平稳^[17,19]。通常以系数的绝对值作为 Curvelet 系数的重要性评价,小波系数绝对值小,意味着该系数信息量少且强烈受到噪声干扰。软阈值法(Soft threshold)和硬阈值法(Hard threshold)是两种主要系数萎缩去噪方法,如图 2 所示,软阈值法具有连续性,在数学上容易处理,而硬阈值法则更接近实际应用,因此选用硬阈值法进行红外图像的滤波。硬阈值法估计

后的系数为 $\hat{f}_{j,l}^{CT}$, 则去噪函数表示为:

$$\hat{f}_{j,l}^{CT} = \begin{cases} f_{j,l}^{CT}, & |f_{j,l}^{CT}| \geq k\sigma_{j,l} \\ 0, & |f_{j,l}^{CT}| < k\sigma_{j,l} \end{cases} \quad (5)$$

其中, k 为与尺度相关的参数; $\sigma_{j,l}^2$ 为进行 Curvelet 变换后噪声方差。给定一个阈值 $\text{thr} = k\sigma_{j,l}$, 所有绝对值小于该阈值 thr 的 Curvelet 系数被认为是噪声,它们的数值以 0 替代,而超过阈值 thr 的系数则缩减后重新取值。

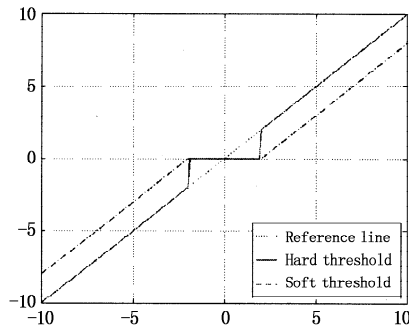


图 2 软阈值与硬阈值处理效果对比

由于红外热成像对比度低、变化缓慢等特点,因此,其 Curvelet 系数的能量更集中于低尺度系数范围内,而高尺度 Curvelet 系数则更多地由噪声引起。

因此,在高尺度系数时,取较大的 k 值,以更多地去除噪声,增强算法的去噪能力。文中,当尺度 $j > 3$ 时,取 $k = 3$ 。 k 的取值如式(6)所示。

$$k = \begin{cases} 1, & j \leq 3 \\ 3, & j > 3 \end{cases} \quad (6)$$

3.3 分层自适应阈值的确定

选择合适的阈值是 Curvelet 系数去噪性能的关键因素,阈值若太小,去噪后的信号仍有噪声存在,反之,若太大,则部分图像信息被滤掉,引起图像偏差。从直观上看,对于一定的曲波系数,噪声越大,则阈值就要越大,由于通过 Curvelet 变换后,分布在不同尺度和方向上的系数特点不同,需要在不同尺度和方向上采用不同的阈值。从理论的角度上看,阈值的选择可以通过一个风险函数 $R_{j,l}(\text{thr})$ 来定义。

$$R_{j,l}(\text{thr}) = \frac{1}{N_{j,l}} \| C_{j,l,\text{thr}} - V_{j,l} \|^2 \quad (7)$$

Donoho 等人已提出并证明了一种典型的阈值选取方法^[17,20],其大小为:

$$\text{thr}_{j,l} = \sqrt{2 \log N_{j,l}} \sigma_{j,l} \quad (8)$$

Donoho 和 Johnstone 提出在小波域中噪声标准方差的估计公式^[17],如公式(9):

$$\sigma_{j,l} = \frac{\text{Median}(|c(j,l)|)}{0.6745} \quad (9)$$

由于 Curvelet 系数与小波域系数有着相同的特性,因此借用 Donoho 的噪声标准方差估计公式,来估计各尺度 Curvelet 系数的噪声标准方差,其中 $\text{Median}(|c(j,l)|)$ 表示某个尺度和角度的 Curvelet 系数幅度的中值。

4 实验结果与分析

为验证本文算法,我们采用大小为 512×512 的远景红外图像进行 Curvelet 系数去噪仿真实验,如图 3(a)所示,并利用 Matlab 小波工具箱,与基于平稳小波变换(SWT)的 Visu Shrink, Penalized, sparsity-norm 阈值去噪法进行比较,平稳正交小波函数取 sym4 小波,采用三层小波分解。实验中图像去噪的质量用均方差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)来衡量:

$$\text{MSE} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (f(m,n) - \hat{f}(m,n))^2 \quad (10)$$

$$\text{PSNR} = 20 \times \lg \left[\frac{255}{\sqrt{\text{MSE}}} \right] \quad (11)$$

表 1 给出了不同噪声水平 ($\sigma_{\min} = 5, \sigma_{\max} = 30$) 的红外图像,分别采用基于小波系数的 Visu Shrink, Penalized, sparsity-norm 阈值去噪法和本文建议去噪方法的去噪效果,可以看出本文建议的 Curvelet 系数分层自适应阈值萎缩去噪方法明显优于其他四种去噪算法。

表 1 不同去噪方法 MSE 和 PSNR 的比较结果

		染噪图	基于 wavelet				文中方法
			固定阈值	penalize high	penalize medium	sparsity-norm	
$\sigma = 5$	MSE	25.12	7.29	24.50	15.63	7.88	6.16
	PSNR	34.13	39.50	34.24	36.19	39.17	40.33
$\sigma = 10$	MSE	99.57	47.27	37.44	25.87	19.11	14.13
	PSNR	28.15	31.39	32.40	34.00	35.32	36.80
$\sigma = 15$	MSE	225.71	137.11	48.58	35.88	71.19	21.73
	PSNR	24.60	26.76	31.27	32.58	29.61	34.92
$\sigma = 20$	MSE	399.86	275.09	58.69	45.32	176.93	29.29
	PSNR	22.11	23.74	30.44	31.57	25.65	33.66
$\sigma = 30$	MSE	900.55	703.06	77.10	64.64	547.68	45.92
	PSNR	18.59	19.66	29.26	30.03	20.75	31.77

图 3 中表示不同去噪方法的去噪效果,其中图 3(a)为高分辨远景红外图像原图;图 3(b)表示噪声方差为 30 时的加噪图像,峰值信噪比为 18.59 dB;图 3(c)表示基于平稳小波变换的硬阈值去噪结果,峰值信噪比为 19.66 dB;图 3(d)表示基于平稳小波变换的 penalize high 阈值去噪结果,峰值信噪比为 29.26 dB;图 3(e)表示基于平稳小波变换的 penalize medium 阈值去噪结果,峰值信噪比为

30.03 dB;图 3(f)表示基于平稳小波变换的 sparsity-norm 阈值去噪结果,峰值信噪比为 20.75 dB;图 3(g)表示本文建议的 Curvelet 系数分层自适应阈值萎缩去噪结果,峰值信噪比为 31.77 dB;可以看出本文建议的去噪方法,其去噪结果的峰值信噪比高于其他四种去噪方法,而且图像主观视觉质量也有了较大改善。

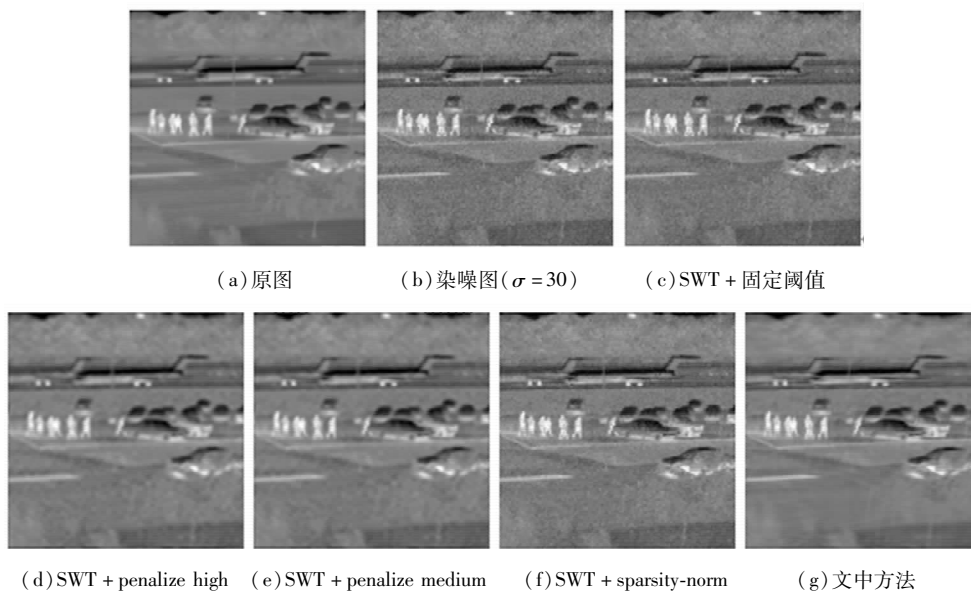


图3 不同去噪方法的去噪效果

在同样的实验条件下,对文中建议算法的计算复杂度和文献[14]提出的基于 USFFT 红外图像处理算法进行比较。采用 Matlab 7.3 编制去噪算法,运行于 PC 机上,CPU 为双核 2.80 GHz,内存为 2 GB,实验结果如图 4 所示。对 128 × 128 像素的低分辨率红外图像处理时,文献[14]算法耗费时间为 0.81 s,文中建议算法耗费时间为 0.23 s;对 256 × 256 像素的中分辨率红外图像进行处理时,基于 USFFT 的去噪算法耗时 3.23 s,文中建议算法则耗时 0.46 s;对 512 × 512 像素的高分辨率红外图像进行去噪处理,基于 USFFT 的去噪算法耗时 12.50 s,文中建议算法则耗时 1.37 s,运行时间减少了 89.0%。对于未来可能出现的 1024 × 1024 像素的超高分辨率红外图像,基于 USFFT 的算法预计将耗时 75.06 s,文中建议算法则需耗时 4.40 s,减少 94.1%。因此,针对高分辨率红外图像,文中建议算法越能发挥运算复杂度低的特性。

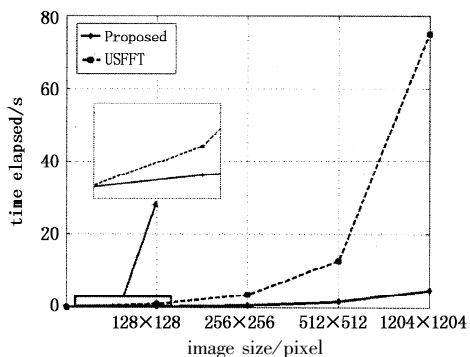


图4 文中建议算法与基于 USFFT 去噪算法的计算量比较

5 结束语

针对基于小波系数的去噪方法在处理高分辨

率红外图像时,存在边缘丢失的情况,本文给出了基于 Curvelet 系数分层自适应阈值萎缩的红外图像去噪方法,充分利用了二代 Curvelet 变换运算速度快、图像边缘稀疏性更强等特性,采用最小均方误差算法估计 Curvelet 系数,从而提高了信号 Curvelet 系数估计的准确性,另外,根据红外图像 Curvelet 系数能量集中于低尺度系数的特点,采用尺度相关的硬阈值萎缩方法,有效地去除噪声,提高了峰值信噪比,并获得良好的视觉效果。但是去噪阈值的精确估计还有待进一步深入研究;另外从图 3(g)中可以看出,Curvelet 系数分层自适应阈值萎缩处理的图像中,个别地方出现轻微的类似“刻痕”的失真,降低或者消除“刻痕”失真,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Dong Yi, Jin Wei-qi, Zhang Miao. Research on noise removal with morphological filter [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(8): 795 - 798. (in Chinese)
董怡,金伟其,张淼. 数学形态学滤波在红外图像去噪中的应用研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(8): 795 - 798.
- [2] Yang Hong-sen. Infrared image denoise based on total least squares [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 961 - 964. (in Chinese)
杨鸿森. 基于总体最小二乘的红外图像去噪[J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 961 - 964.
- [3] Liu Gui-ming. Infrared image denoising based on wavelet transform using intra-scale coefficients dependency [J]. Microcomputer Information, 2009 (18): 309 - 310. (in Chinese)

- 刘贵明. 基于系数相关性的小波变换红外图像去噪[J]. 微计算机信息, 2009, (18): 309-310.
- [4] Ji Hu, Liu Qian-lei, Zheng Yong-huang, et al. De-noising of infrared images based on stationary wavelet transform and Bayes estimation[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(6): 677-680. (in Chinese)
季虎, 刘钦磊, 郑永煌, 等. 基于离散平稳小波变换和 Bayes 估计的红外图像去噪方法[J]. 激光与红外, 2009, 39(6): 677-680.
- [5] Lu Ming-bo, Zhou Jun. Underwater infrared image denoising based on un-decimated wavelet transform bayesian estimation[J]. Ocean Technology, 2010, 29(1): 87-90. (in Chinese)
卢明波, 周军. 基于非抽取小波变换贝叶斯估计的水下红外图像去噪[J]. 海洋技术, 2010, 29(1): 87-90.
- [6] Huang Fei-jiang, Zhu Shou-ye. Infrared image denoising based on wavelet transform and improved SVD[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3): 335-338. (in Chinese)
黄飞江, 朱守业. 基于小波变换和改进 SVD 的红外图像去噪[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 335-338.
- [7] Li Jun-shan, Sun Li-hui, Shi De-qin, et al. Shrinking threshold denoising algorithm for infrared image based on NSCT-I [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 173-178. (in Chinese)
李俊山, 孙李辉, 史德琴, 等. 基于 NSCT-I 的红外图像收缩阈值去噪算法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 173-178.
- [8] Xu Zhao-dong, Liu Xin, Dong Tao. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 619-621. (in Chinese)
许照东, 刘欣, 董涛. 机载高分辨率连续变焦红外热像仪设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 619-621.
- [9] Xu Zhao-dong, Liu Xin, Wei Zhong. Airborne IR system design using 640×512 element detector [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(4): 524-529. (in Chinese)
许照东, 刘欣, 尉钟. 采用 640×512 元探测器的机载红外系统设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4): 524-529.
- [10] Ni Chao, Li Qi, Xia Liang Z. A novel method of infrared image denoising and edge enhancement [J]. Signal Processing, 2008, 88(6): 1606-1614.
- [11] Candes E J, Donoho D L. Continuous curvelet transform I. resolution of the wavefront set [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2005, 19(2): 162-197.
- [12] Candes E J, Donoho D L. Continuous curvelet transform II. discretization and frames [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2005, 19(2): 198-222.
- [13] Donoho D L, Duncan M R. Digital curvelet transform: strategy, implementation and experiments [J]. Wavelet applications VII, 2000, 4056: 12-30.
- [14] Li Zhi-jie, Gao Xin-bo, Ji Hong-bin. A curvelet transform based on clutter suppression algorithm for infrared image [J]. Infrared Technology, 2004, (5): 9-15. (in Chinese)
李智杰, 高新波, 姬红兵. 基于 Curvelet 变换的红外图像背景杂波抑制算法[J]. 红外技术, 2004(5): 9-15.
- [15] Zhang Xiang, Zhang Jian-qi, Qin Han-lin, et al. Background suppression for infrared dim target detection based on second generation curvelet transform [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, (6): 757-761. (in Chinese)
张翔, 张建奇, 秦翰林, 等. 基于二代曲线波变换的红外弱小目标背景抑制[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, (6): 757-761.
- [16] Zhou G Y, Cui Y, Chen Y L, et al. SAR image edge detection using curvelet transform and Duda operator [J]. Electronics Letters, 2010, 46(2): 167-169.
- [17] Starck J L, Candes E J, Donoho D L. The curvelet transform for image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 670-684.
- [18] Candes E J, Demanet L, Donoho D L, et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. Multiscale Modeling & Simulation, 2006, 5(3): 861-899.
- [19] Bao Q Z, Gao J H, Chen W C. Local adaptive shrinkage threshold denoising using curvelet coefficients [J]. Electronics Letters, 2008, 44(4): 277-279.
- [20] Reddy G J, Prasad T J C, Prasad M N G. Lossy compression and curvelet thresholding for image denoising [J]. International Journal of Information and Communication Technology, 2009, 2(1-2): 41-49.