

改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪

杨恢先¹ 王绪四¹ 谢鹏鹤¹ 冷爱莲² 彭友¹

摘要 为了更有效地去除红外图像中的噪声,提出一种基于改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪方法.一方面利用阈值修正方案和新阈值函数对通常的小波阈值去噪法进行改进;另一方面通过对阈值邻近的小波系数进行小波变换尺度间相关性估计,提高小波系数阈值判断的准确性.实验结果表明,与通常的小波阈值去噪法相比,该算法能更有效地去除红外图像中的噪声,获得更高的峰值信噪比(Peak signal-to-noise ratio, PSNR)、边缘保持指数(Edge preserved index, EPI)和更好的视觉效果,具有较好的实用性.

关键词 小波变换, 红外图像, 阈值函数, 相关性, 图像去噪

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.01167

Infrared Image Denoising Based on Improved Threshold and Inter-scale Correlations of Wavelet Transform

YANG Hui-Xian¹ WANG Xu-Si¹ XIE Peng-He¹ LENG Ai-Lian² PENG You¹

Abstract In order to remove noise in infrared images more effectively, an infrared image denoising method based on improved threshold and inter-scale correlations of wavelet transform is proposed. On the one hand, by using the threshold correction scheme and the new thresholding function, the wavelet threshold denoising method is improved. On the other hand, by utilizing inter-scale correlations to estimate wavelet coefficients near a threshold, the accuracy to estimate wavelet coefficients with threshold is increased. Experimental results show that compared to the wavelet threshold denoising method, the proposed method is more effective in infrared image denoising, achieves higher peak signal-to-noise ratio (PSNR), edge preserved index (EPI) and better visual quality, and has a good practicability.

Key words Wavelet transform, infrared image, thresholding function, correlation, image denoising

目前红外图像已广泛应用于军事和民用领域,但由于外界环境和探测仪器的干扰,与普通图像相比,通常所获取的红外图像噪声多,目标和背景之间灰度差小,边缘模糊^[1-2].噪声的存在非常不利于后续目标检测、识别和跟踪处理.

传统的红外图像去噪可分为空域去噪和频域去噪.传统的空域去噪法有邻域平均法、加权平均法以及中值滤波法等,它们通常利用模板进行卷积或者排序实现.传统的频域去噪是依据图像的信息在频域空间表现为不同频率的组合,其中图像的噪声对应傅里叶频谱中的高频部分,通过抑制或者消除高频部分实现图像去噪.传统的图像去噪方法仅具有空域或频域的局部化分析能力,因此在抑制图像噪声的同时,也会损害图像的边缘细节信息,使去噪后的图像变模糊^[3].

相对于传统去噪方法,小波变换具有多分辨率的特点,在时域和频域都有表征信号局部信息的能力,能有效地从正常信号中提取瞬态成分,可以应用于图像去噪^[4].基于小波变换的图像去噪法通常有阈值去噪法和尺度间相关去噪法.其中,Donoho等提出的阈值去噪法^[5-8]能有效地去除图像噪声并且实现较简单,因此广泛应用于图像去噪.

对于红外图像,采用目前通用的小波变换去噪算法去噪效果较差.阈值选择不当造成图像失真或者去噪效果差;阈值函数存在缺陷引起振铃、伪吉布斯(Gibbs)效应或者造成图像模糊;尺度间相关性估计算法运算量大,去噪效果较差.针对上述缺陷,提出改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪算法,它是以阈值去噪为主、尺度间相关去噪为辅相结合的去噪算法,即在改进阈值去噪的基础上,还利用小波变换尺度间相关性对阈值邻近的小波系数进行估计的红外图像去噪方法.

1 改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪

1.1 小波变换去噪

有用信号经小波变换后,其能量将集中在少数

收稿日期 2011-01-17 录用日期 2011-05-28
Manuscript received January 17, 2011; accepted May 28, 2011
海南省教育厅项目(Hj2009-135),湖南省教育厅项目(10C1263)资助

Supported by Scientific Research Fund of Hainan Provincial Education Department (Hj2009-135) and Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (10C1263)

1. 湘潭大学材料与光电物理学院 湘潭 411105 2. 湘潭大学能源工程学院 湘潭 411105

1. Faculty of Material and Photoelectronic Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105 2. Energy Engineering College, Xiangtan University, Xiangtan 411105

的小波系数上,而噪声点的小波系数互不相关,分布在各个尺度的所有时间轴上.保留小波变换的各尺度下的模极大值点,而将其他点置零或最大程度的减小,然后将处理后的小波系数做小波逆变换,即可达到抑制噪声的目的.

阈值去噪是通过对变换域系数与阈值进行比较判断,然后将处理后的系数进行逆变换重构去噪图像.小波阈值去噪法的具体步骤如下^[9]:

步骤 1. 图像的小波分解:确定小波函数和分解层次 N ,对图像进行 N 层的小波分解;

步骤 2. 阈值处理:对分解得到的各层系数选择阈值,并对细节系数进行阈值判断;

步骤 3. 图像重构:对阈值处理后的系数通过小波逆变换重建图像.

信号和噪声在小波域内具有不同的相关性.信号在尺度间相应位置上的小波系数具有很强的相关性,而噪声的小波系数则具有弱相关性或者不相关^[10].尺度间相关去噪是利用图像信号和噪声在小波变换域内的不同相关特性进行去噪.

比较上述两种去噪算法,它们对小波系数采用了不同的处理方式.阈值去噪采用的是“横向”处理,先选定阈值,然后让小波系数与之比较判断.而尺度间相关去噪采用的是“纵向”处理,它是对不同尺度相应位置上的小波系数进行估计.

在阈值去噪中,由于所选定的阈值通常固定,不会随着小波系数的不同而变化,这就不可避免地会对部分小波系数进行误判,当阈值选择适当时,误判的系数大多数落在阈值邻近.在阈值邻近区域,尺度间相关性估计误判的小波系数相对较少.如果对阈值邻近的小波系数采用尺度间相关性估计,那么可以提高小波系数阈值判断的准确性,从而更有效地进行图像去噪.

1.2 改进阈值的小波红外图像去噪

1.2.1 阈值修正方案

小波阈值去噪过程中需要进行阈值估计,Donoho 等提出通用阈值公式:

$$\delta = \sigma \cdot \sqrt{2 \ln(n)} \quad (1)$$

其中, σ 是噪声的标准方差, n 是信号的采样长度.通用阈值公式所估计的阈值在去噪过程中会出现“过扼杀”现象,往往会丢失一些图像的边缘细节^[11],为了更好地保护红外图像的边缘细节,需要在通用阈值公式中引入一个收缩因子,但如果引入的收缩因子的值过小,会导致获得的阈值太小,施加阈值后的小波系数中将包含过多的噪声分量,达不到有效去噪的目的.文献 [12] 提出了一种针对探地雷达 (Ground penetrating radar, GPR) 图像去噪的阈

值公式 $\delta = \sigma \cdot \sqrt{2 \ln(n)} / (1 + \lg j)$,其中 j 表示分解层次.以文献 [12] 中阈值公式为基础,考虑到红外图像本身特点,小波域中表示信号的小波系数偏小,阈值公式所确定的阈值也应偏小;另外为保证红外图像的去噪效果,收缩因子不宜太小.提出阈值修正方案,其数学表达式为

$$\delta_{\text{new}} = \delta \cdot \exp\left(-1 + \frac{1}{N}\right) \quad (2)$$

其中, δ_{new} 表示由阈值修正方案确定的阈值, N 表示总层数, δ 表示由通用阈值公式确定的阈值.

1.2.2 新阈值函数

小波阈值去噪过程中需要对小波系数进行阈值处理,通常有两种阈值法,即硬阈值法和软阈值法,式 (3) 和 (4) 分别是硬阈值函数 (Hard thresholding function, Hard-TF) 和软阈值函数 (Soft thresholding function, Soft-TF).

$$w_{\delta} = \begin{cases} w, & |w| \geq \delta \\ 0, & |w| < \delta \end{cases} \quad (3)$$

$$w_{\delta} = \begin{cases} \text{sgn}(w)(|w| - \delta), & |w| \geq \delta \\ 0, & |w| < \delta \end{cases} \quad (4)$$

其中, δ 表示阈值, w 表示小波系数的大小, w_{δ} 是施加阈值后的小波系数的大小.虽然硬阈值是自然的选择,能够很好地保留图像边缘细节,但由于硬阈值函数不连续,会引起去噪图像中出现振铃、伪吉布斯效应^[13];虽然软阈值处理时相对平滑,会减少振铃、伪吉布斯效应,但由于存在固有的偏差,会造成图像模糊^[13].针对硬阈值函数和软阈值函数的缺陷,文献 [14] 提出了软、硬阈值折衷的处理方法,给出了半阈值函数 (Half thresholding function, Half-TF) 为

$$w_{\delta} = \begin{cases} \text{sgn}(w)(|w| - \alpha \cdot \delta), & |w| \geq \delta \\ 0, & |w| < \delta \end{cases} \quad (5)$$

其中, α 的取值范围是 $0 \sim 1$,该方法估计出来的小波系数 w_{δ} 介于软、硬阈值方法之间,能够改善振铃、伪吉布斯效应等视觉失真和边缘模糊现象,但是由于参数 α 在实际操作中经常取值为某一常数,不具有自适应性,因此仍然会存在固有偏差和不连续.

针对硬阈值函数、软阈值函数以及半阈值函数存在的缺陷,发现比较合理的阈值函数需满足: 1) 输入-输出曲线连续,处理时相对平滑,以减少振铃、伪吉布斯效应; 2) 表示信号的小波系数基本保持不变,较好地保留图像边缘细节.为此以半阈值函数为基础,使参数 α 具有自适应性,能根据小波系数

的不同进行变化, 当 $|w|$ 的值较小, 接近阈值时, 参数 α 的值趋于 1, 具有软阈值函数特点, 减少振铃、伪吉布斯效应, 当 $|w|$ 的值增大时, 参数 α 的值迅速趋于 0, 使之具有硬阈值函数特点, 保留图像边缘细节. 指数函数能满足 α 的这一要求. 自适应是通过 $|w|$ 与阈值 δ 比较实现的, 为了使阈值函数具有可推广性, 在指数部分引入一个可调的参数. 提出具有自适应特点的新阈值函数 (New thresholding function, New-TF):

$$w_\delta = \begin{cases} \operatorname{sgn}(w) \left(|w| - \frac{\exp(\beta \cdot \delta)}{\exp(\beta \cdot |w|)} \delta \right), & |w| \geq \delta \\ 0, & |w| < \delta \end{cases} \quad (6)$$

其中, β 的取值范围为非负数, β 的不同取值会影响新阈值函数的特性, 其中两种极端的情况是 $\beta = 0$ 和 β 趋于无穷大. 当 β 取 0 时, 新阈值函数转换成软阈值函数, 而当 β 趋于无穷大时, 新阈值函数转换成硬阈值函数. 极端情况下的新阈值函数对于克服软阈值函数或硬阈值函数存在的缺陷是没有任何帮助的, 所以新阈值函数中的 β 值要取一个适中的值. 给定一个合适的 β 值后, 新阈值函数可以根据小波系数 w 的大小进行不同处理, 当 $|w|$ 的值较小时, 具有软阈值函数特点, 当 $|w|$ 的值较大时, 具有硬阈值函数特点.

图 1 给出了不同阈值函数的比较, x 轴表示小波系数 w , w_m 是 w 的最大值, y 轴表示施加阈值后的小波系数 w_δ , $w_\delta m$ 是 w_δ 的最大值, δ 表示阈值,

通过对比, 可以发现新阈值函数确实满足输入-输出曲线连续, 信号的小波系数基本保持不变.

1.2.3 改进阈值去噪算法

基于改进阈值的小波红外图像去噪的具体步骤如下:

步骤 1. 小波分解: 对图像进行 N 层离散小波分解;

步骤 2. 阈值处理: 采用阈值修正方案确定阈值大小, 用新阈值函数对小波系数进行处理;

步骤 3. 图像重构: 通过小波逆变换重建图像.

1.3 小波变换尺度间相关性

为了提高小波系数阈值判断的准确性, 对阈值邻近的小波系数进行小波变换尺度间相关性估计.

文献 [15] 提出了一种比较经典的小波尺度间相关性去噪法, 即 SSNF (Spatially selective noise filtration) 算法, 其归一化相关量 $NCorr_L(j, m, n)$ 定义为

$$NCorr_L(j, m, n) = Corr_L(j, m, n) \sqrt{\frac{Pw(j)}{PCorr(j)}} \quad (7)$$

式中, $Corr_L(j, m, n) = \prod_{i=0}^{L-1} w_{(m,n)}^{(j+i)}$ 为相关系数, $Pw(j)$ 和 $PCorr(j)$ 分别是第 j 层小波系数和相关系数的能量, $w_{(m,n)}^{(j)}$ 是位置 (m, n) 尺度为 j 的小波系数, L 是计算乘积的尺度个数. 后续还需进行数据比较和迭代等运算, 计算量较大.

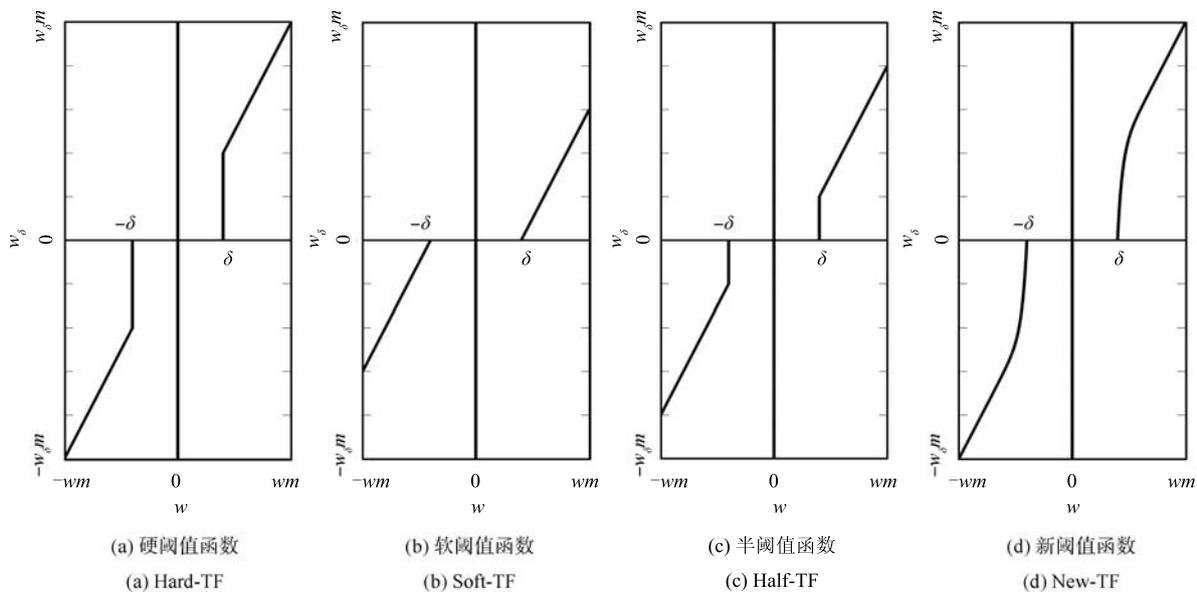


图 1 阈值函数的比较

Fig. 1 Comparison of different thresholding functions

由于小波变换尺度间相关性估计在算法中是进行辅助去噪,一方面要求计算量不是很大,另一方面对尺度间相关性估计准确度的要求降低.为了减小计算量,定义新的相关量 $K(m, n)$. 对于位置 (m, n) , 不同尺度的小波系数为 $w_{(m,n)}^{(1)}, w_{(m,n)}^{(2)}, \dots, w_{(m,n)}^{(N)}$, 其中 N 为小波变换分解层数. $\max w_{(m,n)}$ 为 $|w_{(m,n)}^{(1)}|, |w_{(m,n)}^{(2)}|, \dots, |w_{(m,n)}^{(N)}|$ 中的最大值, 而 $\min w_{(m,n)}$ 为最小值. $K(m, n)$ 为

$$K(m, n) = \frac{\max w_{(m,n)}}{\min w_{(m,n)}} \quad (8)$$

当 $K(m, n) \in [1, \gamma]$ 时, 则小波系数有较强的相关性, 为图像信号; 否则, 小波系数弱相关性或者不相关, 为图像噪声. 如果 γ 取值接近 1, $\max w_{(m,n)}$ 与 $\min w_{(m,n)}$ 相差较小, 对尺度间相关性估计过于严格, 会造成较多表示信号的小波系数漏选; 如果 γ 取值较大时, $\max w_{(m,n)}$ 与 $\min w_{(m,n)}$ 相差过大, 会造成较多的表示噪声的小波系数入选, 不能达到有效去噪的目的. 在选取 γ 值时, 可以采用稍偏向于严格的策略来保证去噪效果.

在相关量的计算过程中, 需要将不同尺度上相应子带系数扩充成相同尺寸. 小波域内粗糙层上每个系数对应于相邻精细层上同一子带中四个系数, 采用的是对粗糙层上每一系数 2×2 的复制扩充方式. 当分解层数增加时, 系数扩充难度增大, 因此本文提出的尺度间相关性估计更适用于分解层数不是太大的情况.

1.4 基于改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪

基于改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪的具体步骤:

步骤 1. 小波变换: 将红外图像进行 N 层离散小波变换, 得到小波系数 w .

步骤 2. 阈值判断: 采用阈值修正方案对小波系数进行阈值判断, 对于大于等于阈值 δ_{new} 的小波系数记为 w' , 而小于阈值 δ_{new} 的小波系数记为 w'' .

步骤 3. 尺度间相关性估计: 对处于 $[\delta_{\text{new}}(1-\eta), \delta_{\text{new}}(1+\eta)]$ 的小波系数进行尺度间相关性估计, 将具有较强的相关性的系数记为 w' , 而将弱相关性或者不相关的系数记为 w'' , 则 w' 为图像信号的小波系数, 而 w'' 为噪声的小波系数. 参数 η 的不同取值会影响到算法整体的运算量和准确度, 而当 $\|w - \delta_{\text{new}}\|$ 值越大时, 步骤 2 中阈值判断误判的可能性越小. 基于上述考虑, η 的取值通常较小.

步骤 4. 小波系数处理: 采用新阈值函数对小波系数进行处理. w' 按新阈值函数中 $|w| \geq \delta$ 的情况处理, 新阈值函数中用到的阈值由阈值修正方案确

定; 而 w'' 按新阈值函数中 $|w| < \delta$ 的情况处理, 将其置零.

步骤 5. 图像重构: 对处理后的小波系数进行离散小波逆变换, 重构得到去噪后的红外图像.

2 实验结果与分析

利用 Matlab 7.0 进行仿真, 实验中图像去噪算法所采用的小波函数与分解层数都相同, 小波函数为 Daubechies 系列的 *db5*, 分解层数 N 取值为 4. α 采用参考文献 [14] 中所取的值 0.5, 新阈值函数中的 β 取一个适中的值 5, 尺度间相关性估计时 γ 采取稍偏严格的策略, 取值为 2, η 取值为 0.1.

实验分为两组, 第 1 组实验是对不含噪声的红外图像进行掺杂, 对不同的红外图像去噪算法从定性和定量上进行去噪实验对比; 第 2 组实验是应用于实际, 对复杂环境下获取的含噪红外图像进行去噪.

采用通用阈值方案、硬阈值函数进行去噪的方法称为硬阈值函数去噪法; 采用通用阈值方案、软阈值函数进行去噪的方法称为软阈值函数去噪法; 采用通用阈值方案、半阈值函数进行去噪的方法称为半阈值函数去噪法; 采用通用阈值方案、新阈值函数进行去噪的方法称为新阈值函数去噪法.

2.1 第 1 组实验

图 2 是红外图像仙后座 A 去噪结果比较, 图 3 是红外图像蝌蚪星云 (部分) 去噪结果比较. 图 (a) (注: 图 (a) 表示图 2 (a) 和图 3 (a), 其他类似表达如 “图 (b)、图 (c) ...” 表示含义相同) 是不含噪红外图像; 图 (b) 是加入了均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声的含噪图像; 图 (c) 是硬阈值函数去噪法去噪结果图; 图 (d) 是软阈值函数去噪法去噪结果图; 图 (e) 是半阈值函数去噪法去噪结果图; 图 (f) 是新阈值函数去噪法去噪结果图; 图 (g) 是改进阈值去噪法去噪结果图; 图 (h) 是本文综合算法去噪结果图.

1) 图 (c) ~ (f) 由于是采用通用阈值方案确定阈值, 在去噪过程中边缘轮廓部分丢失, 较小孤立细节图像丢失严重; 而图 (g) 和图 (h) 是采用阈值修正方案进行阈值估计, 减少了图像边缘轮廓和图像弱细节的丢失. 说明阈值修正方案有利于保护图像边缘细节.

2) 图 (c) 是采用硬阈值函数进行阈值处理, 出现了较严重的振铃和伪吉布斯效应; 图 (d) 是采用软阈值函数进行阈值处理, 出现图像模糊, 部分边缘轮廓甚至无法辨认; 图 (e) 和图 (f) 是分别采用半阈值函数和新阈值函数进行阈值处理, 减少了振铃和伪吉布斯效应同时也改善了图像的清晰度, 相比图 (e), 图 (f) 的整体效果更好. 说明新阈值函数改善了图像

的视觉效果. 需要注意的是阈值函数对阈值的依赖比较强, 只有在选择较为合适阈值的情况下, 阈值函数的优劣性比较才是有意义的.

3) 相比图 (g), 图 (h) 区分图像弱细节与噪声的能力更强, 更好地保护了点状细节. 说明尺度间相关性估计提高了小波系数阈值判断的准确性.

4) 本文综合算法去噪结果图无论是去噪效果, 还是图像视觉效果都优于其他去噪法. 说明阈值修正方案、新阈值函数和尺度间相关性估计三者进行优势互补, 形成整体, 提升了对红外图像的综合去噪能力.

表 1 是在不同去噪法下, 红外图像仙后座 A 与

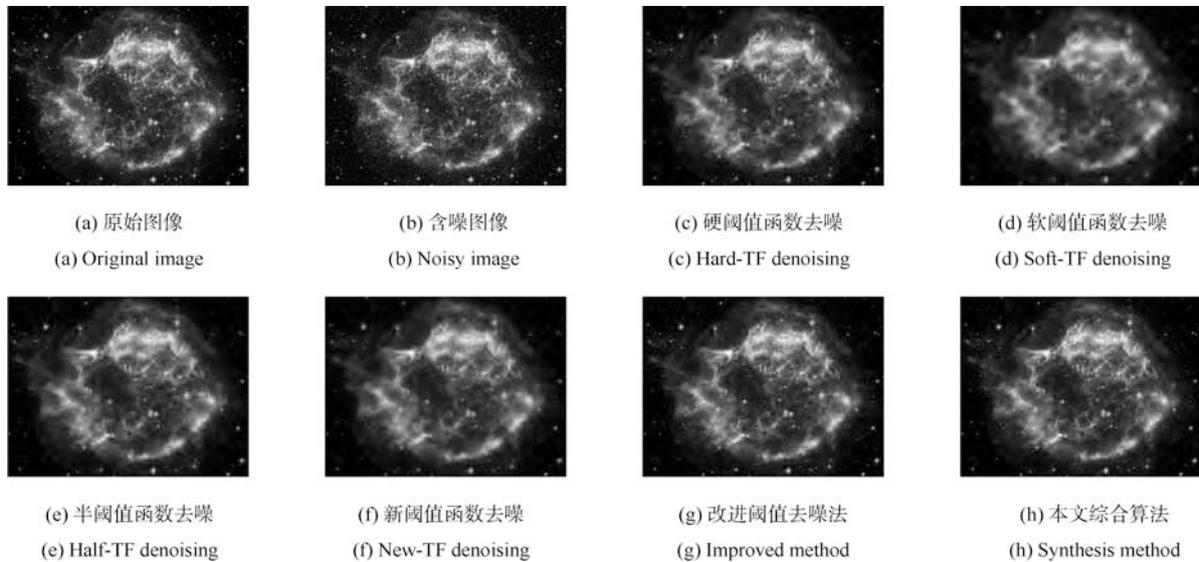


图 2 红外图像仙后座 A 去噪结果比较

Fig. 2 Comparison of different infrared image denoising methods for Cassiopeia A

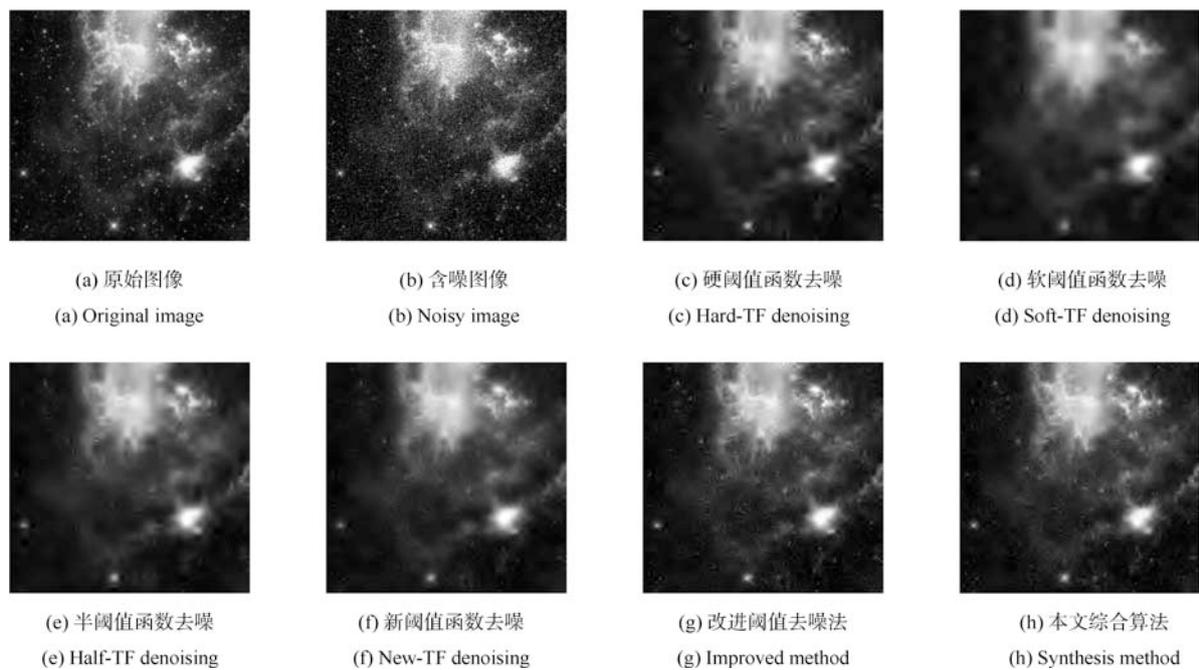


图 3 红外图像蝌蚪星云去噪结果比较

Fig. 3 Comparison of different infrared image denoising methods for Tadpole Nebula

蝌蚪星云的峰值信噪比 (Peak signal-to-noise ratio, PSNR)^[16] 的比较. 从表中可知新阈值函数去噪法比硬阈值函数去噪法、软阈值函数去噪法和半阈值函数去噪法的 PSNR 高, 而改进阈值去噪法比新阈值函数去噪法的 PSNR 高, 说明本文提出的阈值修正方案和新阈值函数在去除红外图像噪声上是有效的; 基于改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪法比改进阈值去噪法的 PSNR 高, 说明兼顾小波系数尺度间相关性估计有利于提高对红外图像的去噪能力.

边缘保持指数 (Edge preserved index, EPI)^[17] 反映了原始图像与降噪后图像边缘对比度之比, 降噪后图像的边缘细节保持得越好, EPI 的值就越接近 1.

EPI 定义为

$$EPI = \frac{\sum |P_s - P_{sn}|}{\sum |P_o - P_{on}|} \quad (9)$$

式中, P_s 为降噪处理后的像素点的灰度值, P_{sn} 为

P_s 相邻像素点的灰度值, P_o 为原始图像的像素点的灰度值, P_{on} 为 P_o 相邻像素点的灰度值. 表 2 是不同去噪法下红外图像仙后座 A 与蝌蚪星云的 EPI 的比较, 表中显示, 基于改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪法的 EPI 更接近于 1, 说明了此去噪算法能较好地保护图像边缘.

2.2 第 2 组实验

图 4 和图 5 是分别对实际复杂环境下获取的含噪红外图像车和飞机进行去噪结果比较. 从图 4 中可以看出, 与通常的小波阈值去噪算法 (硬阈值函数去噪法、软阈值函数去噪法和半阈值函数去噪法) 相比, 本文综合算法对含噪的红外图像车进行了更有效地去噪, 基本上滤除了图像中的噪声; 取得了更好的视觉效果, 不仅车的轮廓变得清晰可见, 而且对比度较低的路的轮廓也能较好地识别. 从图 5 中发现, 相比其他去噪算法, 本文综合算法去噪效果更好, 飞机的轮廓和底部分界处的轮廓更为清晰, 同时更有效地抑制了振铃、伪吉布斯效应.

表 1 不同去噪法下红外图像仙后座 A 与蝌蚪星云的 PSNR 的比较

Table 1 Comparison of different denoising methods on PSNR for Cassiopeia A and Tadpole Nebula

实验图像	含噪图像	硬阈值去噪	软阈值去噪	半阈值去噪	新阈值去噪	改进阈值去噪	本文综合算法
仙后座 A	19.9339	24.9480	24.1092	25.3090	25.7439	26.5070	26.8737
蝌蚪星云	19.8787	25.4568	24.8958	25.6902	26.1336	26.4899	26.7965

表 2 不同去噪法下红外图像仙后座 A 与蝌蚪星云的 EPI 的比较

Table 2 Comparison of different denoising methods on EPI for Cassiopeia A and Tadpole Nebula

实验图像	硬阈值去噪	软阈值去噪	半阈值去噪	新阈值去噪	改进阈值去噪	本文综合算法
仙后座 A	0.4038	0.2334	0.3490	0.4061	0.7028	0.7216
蝌蚪星云	0.2584	0.1735	0.2286	0.3261	0.5952	0.6025

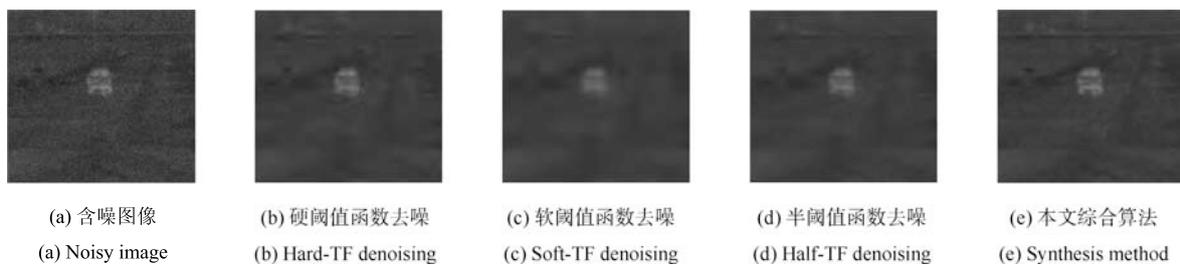


图 4 红外图像车去噪结果比较

Fig. 4 Comparison of different infrared image denoising methods for the car

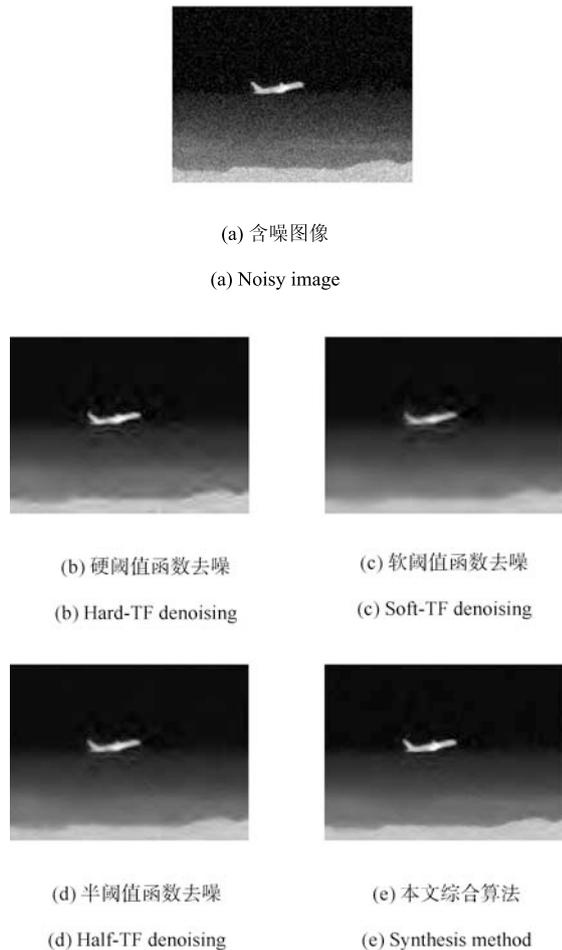


图 5 红外图像飞机去噪结果比较

Fig. 5 Comparison of different infrared image denoising methods for the plane

3 结论

本文提出的改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪的方法提高了对红外图像的去噪能力, 得到了更高的 PSNR, EPI 和更好的视觉效果, 为后续的目标检测、识别和跟踪提供了较清晰可靠的红外图像, 具有较好的实用性。但去噪后的图像仍然有边缘细节受损、清晰度变差的问题, 这就需要对小波变换去噪进一步优化或引入更有效的去噪方式。

References

- Feng Zhen, Ma Qi-Shuang. Research on infrared image non-linear enhancement algorithm based on wavelet analysis. *Laser and Infrared*, 2010, **40**(3): 315–318
(冯贞, 马齐爽. 基于小波分析的红外图像非线性增强算法. *激光与红外*, 2010, **40**(3): 315–318)
- Gao Shi-Bo, Cheng Yong-Mei, Zhao Yong-Qiang, Pan Quan, Wei Kun. Infrared image denoising based on stationary wavelet transform using tensor. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1818–1823
(高仕博, 程咏梅, 赵永强, 潘泉, 魏坤. 基于张量的平稳小波变换红外图像去噪. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1818–1823)
- Li Zuo-Sheng, Li Wen-Li, Yao Jian-Gang, Yang Ying-Jian. On-site detection of pollution level of insulators based on infrared-thermal-image processing. *Proceedings of the CSEE*, 2010, **30**(4): 132–138
(李佐胜, 李文利, 姚建刚, 杨迎建. 应用绝缘子红外热像处理的现场污秽等级检测方法. *中国电机工程学报*, 2010, **30**(4): 132–138)
- Weng Xiao-Guang, Wang Hui-Nan, Li Hong, Tao Ling, Li Wei-Tao. Noise reduction algorithm for MRI images based on dyadic wavelet transform. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **41**(6): 753–756
(翁晓光, 王惠南, 李虹, 陶玲, 李魁韬. 基于二进小波变换的磁共振图像去噪新算法. *南京航空航天大学学报*, 2009, **41**(6): 753–756)
- Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, **41**(3): 613–627
- Donoho D L, Johnstone I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage. *Journal of the American Statistical Association*, 1995, **90**(432): 1200–1224
- Donoho D L, Johnstone I M, Kerkycharian G, Picard D. Wavelet shrinkage: asymptopia? *Journal of Royal Statistical Society Series B*, 1995, **57**(2): 301–369
- Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika*, 1994, **81**(3): 425–455
- Ren Huo-Rong, Zhang Ping, Wang Jia-Li. Novel wavelet image denoising method. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(6): 643–646
(任获荣, 张平, 王家礼. 一种新的小波图像去噪方法. *红外与激光工程*, 2003, **32**(6): 643–646)
- Yu Mei, Yi Wen-Juan, Jiang Gang-Yi. Image denoise based on inter-scale correlations of Contourlet transform. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(6): 73–77, 83
(郁梅, 易文娟, 蒋刚毅. 基于 Contourlet 变换尺度间相关的图像去噪. *光电工程*, 2006, **33**(6): 73–77, 83)
- Zheng De-Zhong, Cui Fa-Yi. New algorithm for image denoising using node threshold wavelet packet transform. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 330–333
(郑德忠, 崔法毅. 结点阈值小波包变换图像去噪新算法. *光学技术*, 2009, **35**(3): 330–333)
- Zou Hai-Lin, Sui Ya-Li, Xu Jun-Yan, Ning Shu-Nian. Study on methods of GPR image de-noising based on multi-wavelets transform. *Journal of System Simulation*, 2005, **17**(4): 855–858, 862
(邹海林, 隋亚莉, 徐俊艳, 宁书年. 基于多小波变换的 GPR 图像去噪方法研究. *系统仿真学报*, 2005, **17**(4): 855–858, 862)
- Jiang Ke-Rong, Tang Xiang-Qing, Zhu De-Quan. Automobile wheel speed signal processing based on wavelet algorithm of improved threshold. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(4): 736–740
(蒋克荣, 唐向清, 朱德泉. 基于改进阈值小波算法的汽车轮速信号处理. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(4): 736–740)
- Li Ying-Chun, Sun Ji-Ping, Fu Xing-Jian. Infrared image denoising based on wavelet transform. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(10): 988–991
(李迎春, 孙继平, 付兴建. 基于小波变换的红外图像去噪. *激光与红外*, 2006, **36**(10): 988–991)
- Xu Y S, Weaver J B, Healy D M, Lu J. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, **3**(6): 747–758

- 16 Guo Qiang, Yu Song-Nian. Shearlet-based image denoising using trivariate prior model. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(8): 1062–1072
(郭强, 郁松年. 基于三变量模型的剪切波去噪方法. 自动化学报, 2010, **36**(8): 1062–1072)

- 17 Li He, Qin Zhi-Yuan, Zhou Li-Ya. Study on SAR image speckle noise smoothing algorithm with TV-PDE. *Journal of Image and Graphics*, 2010, **15**(6): 910–914
(李贺, 秦志远, 周丽雅. SAR 图像斑点噪声整体变分偏微分方程滤波算法研究. 中国图象图形学报, 2010, **15**(6): 910–914)



杨恢先 湘潭大学材料与光电物理学院教授. 主要研究方向为图像处理和人工智能. 本文通信作者.

E-mail: yanghx@xtu.edu.cn

(**YANG Hui-Xian** Professor at the Faculty of Material and Photoelectronic Physics, Xiangtan University. His research interest covers image processing

and artificial intelligence. Corresponding author of this paper.)



王绪四 湘潭大学材料与光电物理学院硕士研究生. 主要研究方向为图像处理.

E-mail: wxswdj444@163.com

(**WANG Xu-Si** Master student at the Faculty of Material and Photoelectronic Physics, Xiangtan University. His main research interest is image processing.)



谢鹏鹤 湘潭大学材料与光电物理学院硕士研究生. 主要研究方向为数字信号处理. E-mail: xiepenghe3376@163.com
(**XIE Peng-He** Master student at the Faculty of Material and Photoelectronic Physics, Xiangtan University. His main research interest is digital signal processing.)



冷爱莲 湘潭大学能源工程学院讲师. 主要研究方向为数字信号处理和智能控制. E-mail: 517128654@qq.com

(**LENG Ai-Lian** Lecturer at the Energy Engineering College, Xiangtan University. Her research interest covers digital signal processing and intelligence control.)



彭友 湘潭大学材料与光电物理学院硕士研究生. 主要研究方向为数字信号处理. E-mail: pengyou@live.cn

(**PENG You** Master student at the Faculty of Material and Photoelectronic Physics, Xiangtan University. His main research interest is digital signal processing.)