

文章编号:1001-9014(2004)02-0119-06

一种红外图像对比度增强的小波变换法

张长江¹, 付梦印¹, 金梅², 张启鸿¹

(1. 北京理工大学信息科学技术学院自动控制系, 北京 100081;

2. 大庆石油学院电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:提出一种基于离散平稳小波变换和非线性增益的红外图像对比度增强方法. 对红外图像进行离散平稳小波变换后, 对分辨率较好的各高频子带直接利用所提出的去噪方法去噪; 对分辨率较差的各高频子带利用所提出的非线性增益法结合文中的去噪法进行增强; 并给出一种评价增强图像质量的准则. 实验结果表明, 本文提出的方法在有效的增强红外图像对比度的同时, 又能很好的抑制红外图像中相关噪声、加性高斯白噪声和乘性噪声.

关键词:平稳小波变换; 广义交叉确认; 阈值去噪; 对比度增强; 非线性增益

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

APPROACH TO ENHANCE CONTRAST OF INFRARED IMAGE BASED ON WAVELET TRANSFORM

ZHANG Chang-Jiang¹, FU Meng-Yin¹, JIN Mei², ZHANG Qi-Hong¹

(1. Department of Automatic Control, School of Information Science and Technology,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of electrics and information engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

Abstract: A new method to enhance the contrast of infrared image was given, which was based on discrete stationary wavelet transform and non-linear gain. After making discrete stationary wavelet transform to an infrared image, de-noising is done in the high frequency sub-bands with better resolution. Enhancement effect is obvious by combining de-noising method with non-linear gain method in the high frequency sub-bands with worse resolution. A new criterion to evaluate quality of image was given. Experimental results show that the new method can reduce colored noise, additive gauss white noise and speckle noise in infrared image effectively while it also enhances the contrast of infrared image well.

Key words: stationary wavelet transform; generalized cross validation; de-noising by threshold; contrast enhancement; non-linear gain

引言

对比度增强的常用方法有直方图均衡法、直方图规定化法和灰度变换法及反锐化掩膜法. 上述几种方法的共同缺点是在增强对比度的同时放大了噪声. 虽然众多学者提出了大量增强方法^[1-5], 但是要么没考虑噪声的影响^[2], 要么是利用噪声的统计特性来实现阈值去噪的同时进行增强, 而且大都假设噪声是加性高斯白噪声^[1]. 而在许多实际情况中, 这些假设都是很难满足的, 因为在实际应用中噪声的确切统计特性一般是未知的, 而且红外图像中不

但含有白噪声, 而且还含有一种重要的与频率成反比的相关噪(1/f 噪声), 去除这种噪声对于弱目标的检测具有重要意义, 而且这种相关噪声可以看成是一种加性噪声^[5]. 限于篇幅, 本文不再详细讨论红外图像中相关噪声(1/f 噪声)的特性, 只作如上简短说明, 关于红外图像中相关噪声(1/f 噪声)特性的详细讨论见文献[5].

基于此, 本文基于离散平稳小波变换和非线性增益^[6], 提出一种红外图像对比度增强方法. 对红外图像进行小波分解, 对分散后分辨率较好的高频子带直接进行去噪处理, 对分辨率较低的高频子带

收稿日期:2003-05-15, 修回日期:2003-09-25

基金项目:国防兵器预研基金资助项目(42001070304)

作者简介:张长江(1974-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 北京理工大学博士生, 主要从事复杂背景下的红外目标识别、小波分析、神经网络、优化理论及应用研究.

Received date: 2003-05-15, revised date: 2003-9-25

用所给出的去噪方法结合非线性增强算子进行增强. 实验结果表明, 本文所提出的方法在有效增强红外图像对比度的同时, 又能很好的抑制图像中的相关噪声(1/f 噪声)、加性高斯白噪声和乘性噪声. 在整体视觉效果上优于传统的直方图均衡法、反锐化掩膜法、文献[1]和文献[3]中的方法.

1 离散平稳小波变换

离散平稳小波变换在过去由于不同的应用目的而有许多不同的名称, 诸如平移不变小波变换、移位不变小波变换、冗余小波变换等^[6]. 与经典的离散正交小波变换相比, 离散平稳小波变换的主要特点是冗余性和平移不变性. 能对连续小波变换给出一个更为近似的估计. 其基本差别在于离散平稳小波变换变换矩阵不再是方阵, 变换后的结果也不再是正交的. 但是这个变换阵存在一个左逆, 这个左逆的计算复杂度为 $O(N \log N)$.

2 去噪原理^[7]

相对相关噪声而言, 其小波变换是非平稳的, 若仍用传统的“通用阈值”法去噪, 势必影响去噪的效果. 所幸的是, I. M. Johnstone 等人已证明平稳相关噪声的小波变换在每一个分辨率层的各个子带仍是平稳的^[4]. 为此, 我们可以考虑在各个分辨率层的各子带分别计算阈值, 以达到去噪的目的.

考虑如下的离散图像信号模型:

$$\mathbf{g} = \mathbf{f} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{g} = \{g[i, j]\}_{i, j}$ 表示观测信号, $\mathbf{f} = \{f[i, j]\}_{i, j}$ 表示未经噪声污染的原始信号, $\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon[i, j]\}_{i, j}, i=1, \dots, M; j=1, \dots, N$ 表示平稳噪声信号.

对式(1)两边进行离散平稳小波变换

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} + \mathbf{V}, \quad (2)$$

其中 \mathbf{S} 是一个二维平稳小波变换算子, $\mathbf{X} = \mathbf{S}\mathbf{f}$, $\mathbf{V} = \mathbf{S}\boldsymbol{\varepsilon}$, $\mathbf{Y} = \mathbf{S}\mathbf{g}$. 本文中拟采用 Donoho 所提出的“软阈值”函数:

$$\mathbf{Y}_\delta = \mathbf{T}_\delta \circ \mathbf{Y}, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{T}_\delta = \text{diag}\{t[m, m]\}$,

$$t[m, m] = \begin{cases} 0, & |Y[i, j]| < \delta \\ 1 - \frac{\delta}{|Y[i, j]|}, & |Y[i, j]| \geq \delta \end{cases}$$

其中, $i=1, \dots, M, j=1, \dots, N, m=1, \dots, MN$. 同理, 我们有

$$\mathbf{X}_\delta = \mathbf{T}_\delta \circ \mathbf{X}, \quad (4)$$

由式(2)和式(3)可知, 输入信号的反变换为

$$\mathbf{g}_\delta = \mathbf{S}^{-1} \circ \mathbf{Y}_\delta, \quad (5)$$

则综合运算可以表示为

$$\mathbf{Z}_\delta = \mathbf{S}^{-1} \circ \mathbf{T}_\delta \circ \mathbf{S}, \quad (6)$$

在此考虑用广义交叉确认原理来估计最优阈值 δ ^[8]. 设原始信号 $f[i, j]$ 能用它邻近元素的线性组合表示. 考虑 $\tilde{g}[i, j]$ 是 $g[k, l]$ 的一个线性组合, 则我们可利用这些成分的邻域的加权平均来代替它们, 这样就能得到较纯净的信号成分. 令信号 \mathbf{g} 的第 i, j 个组分 $g[i, j]$ 用 $\tilde{g}[i, j]$ 来替代:

$$\tilde{\mathbf{g}} = \mathbf{Z} \cdot (g[1, 1], \dots, \tilde{g}[i, j], \dots, g[M, N])^T, \quad (7)$$

对所有的成分重复同样的过程并用下式求得适当的阈值:

$$OCV(\delta) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (g[i, j] - \tilde{g}_\delta[i, j])^2, \quad (8)$$

令 $\tilde{g}_\delta[i, j] = \tilde{g}[i, j]$, 则有:

$$g[i, j] - \tilde{g}_\delta[i, j] = \frac{g[i, j] - g_\delta[i, j]}{1 - \tilde{z}[i, j]}, \quad (9)$$

其中,

$$\tilde{z}[i, j] = \frac{g_\delta[i, j] - \tilde{g}_\delta[i, j]}{g[i, j] - \tilde{g}_\delta[i, j]} \approx z'[m, n] = \frac{\partial g_\delta[i, j]}{\partial g[k, l]}$$

但是在式(8)中, $z'[m, m]$ 或者为 0, 或者为 1, 于是引出小波域中“广义交叉确认”公式:

$$SGCV(\delta) = \frac{\frac{1}{MN} \cdot \|\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_\delta\|^2}{\left[\frac{\text{trace}(\mathbf{I} - \mathbf{Z}'_\delta)}{MN}\right]^2}, \quad (10)$$

其中 trace 表示矩阵的迹, $\|\cdot\|$ 表示基于内积的欧几里德范数, \mathbf{I} 表示 $M \times N$ 的单位阵, 其他符号意义如前面所述. 设 $\delta^* = \arg \min MSE(\delta)$, $\hat{\delta} = \arg \min GCV(\delta)$, M. Jansen 等人已经证明了利用“广义交叉确认”所求得的阈值 $\hat{\delta}$ 是一种渐近最优解^[9].

3 非线性增强方法^[10]

这部分给出一种基于非线性算子的红外图像对比度增强方法. 用下式表示各高频子带的增强:

$$u[i, j] = \text{MAG}\{v[i, j]\}, i=1, \dots, M, j=1, \dots, N$$

其中, $u[i, j]$ 表示增强后的子带图像, $v[i, j]$ 表示增强前的原始子带图像, MAG 表示非线性增强算子, M, N 表示子带图像的大小. 设计如下的非线性增强算子来完成上述功能:

$$\text{MAG}(x) =$$

$$\begin{cases} x, & |x| < T \\ a|\text{sigm}[c(x-b)] - \text{sigm}[-c(x+b)]|, & |x| \geq T \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$a = \frac{1}{\text{sigm}[c(1 - b)] - \text{sigm}[-c(1 + b)]},$$

$$\text{sigm}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$

其中, $0 < b < 1$, T 为所选择的各个子带图像的增强阈值. 对于增强前的图像 $v'_s[i, j]$ 而言, 设 $v'_s[i, j]$ 中所有像素灰度的绝对值最大值为 $\max v'_s$, 则可以通过 $\max v'_s$ 将增强前的图像 $v'_s[i, j]$ 的像素灰度范围从 $[-\max v'_s, \max v'_s]$ 映射到 $[-1, 1]$. 综上所述, 可以得到增强后的图像

$$u'_s[i, j] = \begin{cases} v'_s[i, j], \\ a \cdot \max v'_s \{ |\text{sigm}[c(y'_s[i, j]) - b] - \text{sigm}[-c(y'_s[i, j] + b)]| \}, \\ |v'_s[i, j]| < T'_s \\ |v'_s[i, j]| \geq T'_s \end{cases} \quad (12)$$

其中, $y'_s[i, j] = v'_s[i, j] / \max v'_s$, $s = 1, 2, \dots, L$, $r = 1, 2, 3$. T'_s 表示第 s 分解层的第 r 个子带图像的增强阈值.

4 评价增强后图像的质量准则

我们的目的是在增强红外图像对比度的同时抑制红外图像的相关噪声(1/f 噪声)、高斯白噪声和乘性噪声. 这就要求处理后图像的信噪比较大和对比较好, 基于此, 我们给出一种评价图像质量的准则, 以满足上述要求. 首先以文献[11]中提出的评

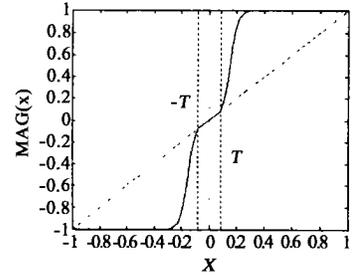


图1 非线性增强函数曲线($b = 0.15, c = 30$)

Fig.2 Curve of nonlinear enhancing function ($b = 0.15, c = 30$)

价图像对比度的测量函数来度量增强后的图像的对比度质量:

$$C_{\text{contrast}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f'^2(x, y) - \left| \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f'(x, y) \right|^2, \quad (13)$$

其中 M 和 N 分别为图像的宽和高, $f'(x, y)$ 为增强后图像, 式(13)的值越大, 则图像的灰度分布越均匀, 图像的对比度越好, 视觉质量也就越好. 再考虑信噪比的因素, 因而我们给出如下的综合评价准则:

$$C_{\text{total}} = \frac{C_{\text{contrast}} * C_{\text{snr}}}{\beta}. \quad (14)$$

其中 C_{snr} 为增强后的图像的信噪比, β 为一个常数. 可见, 当式(14)的取值越大, 增强后图像的整体效果越好.

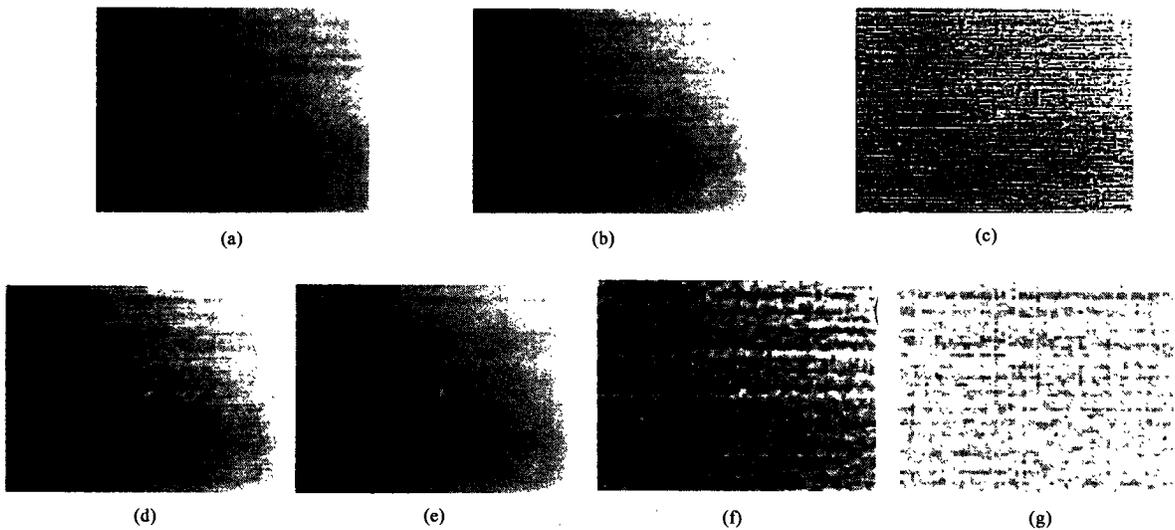


图2 被1/f 噪声污染的图像增强效果图(a)空中弱红外目标 (b)加相关噪声的图像($\sigma = 11.97$) (c)USM 增强 (d)直方图均衡增强 (e)离散平稳小波增强 (f)GWP 法增强 (g)WYQ 法增强

Fig.2 Enhancement results of image added with 1/f noise (a) Small infrared target in the air (b) image added with RN ($\sigma = 11.97$) (c) Enhancement by USH (d) Enhancement by HIS (e) Enhancement by SWT (f) Enhancement by GWP (g) Enhancement by WYQ

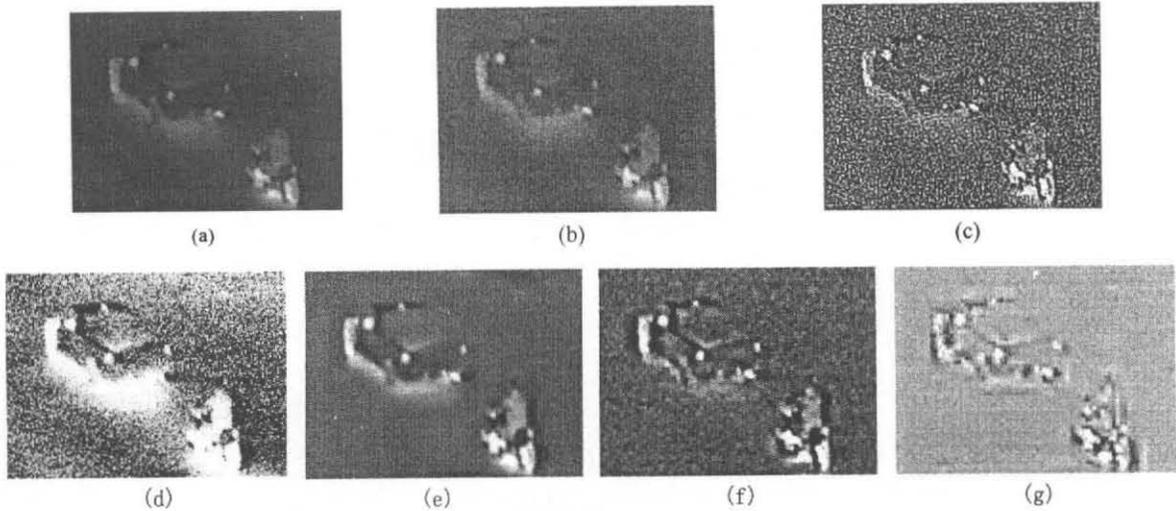


图3 被高斯白噪声污染的图像增强效果图 (a)红外车辆 (b)加高斯白噪声的图像($\sigma=6.46$) (c)反锐化掩膜增强 (d)直方图均衡增强 (e)平稳小波增强 (f)GWP法增强 (g)WYQ法增强

Fig.3 Enhancement results of image added with GWN (a)infrared ship (b)image added with GM ($\sigma=6.46$) (c)enhancement by USH (d)enhancement by HIS (e)enhancement by SWT (f)enhancement by GWP (g)enhancement by WYQ

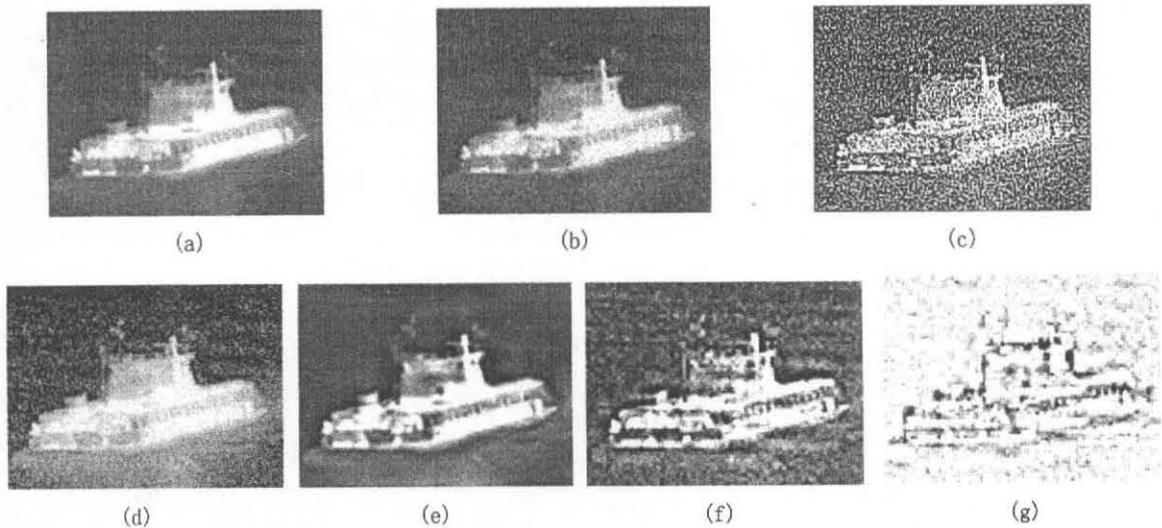


图4 被乘性噪声污染的图像增强效果图 (a)红外舰船 (b)加乘性噪声的图像($\sigma=0.0622$) (c)反锐化掩膜增强 (d)直方图均衡增强 (e)平稳小波增强 (f)GWP法增强 (g)WYQ法增强

Fig.4 Enhancement results of image added with MN (a)infrared ship (b)image added with MN ($\sigma=0.0622$) (c)enhancement by USH (d)enhancement by HIS (e)enhancement by SWT (f)enhancement by GWP (g)enhancement by WYQ

5 对比度增强算法步骤

本文的红外图像对比度增强算法步骤如下:

- 1)对红外图像进行离散平稳小波变换;
- 2)对变换后分辨率较好的高频子带利用第2节提出的去噪方法直接去噪;
- 3)对变换后分辨率较差的高频子带先用上述方法去噪,然后用式(12)增强;
- 4)利用离散平稳小波逆变换,重建增强后的图

像;

- 5)利用式(14)评价增强后的图像质量.

6 实验结果

实验图像大小均为 146×108 . 实验中分别给3幅图像加相关噪声($1/f$ 噪声)、加性高斯白噪声和乘性噪声. 为简化说明,用 HIS 表示直方图均衡, USH 表示反锐化掩膜, SWT 表示离散平稳小波变换, GWP 表示文献[1]的方法, WYQ 表示文献[3]

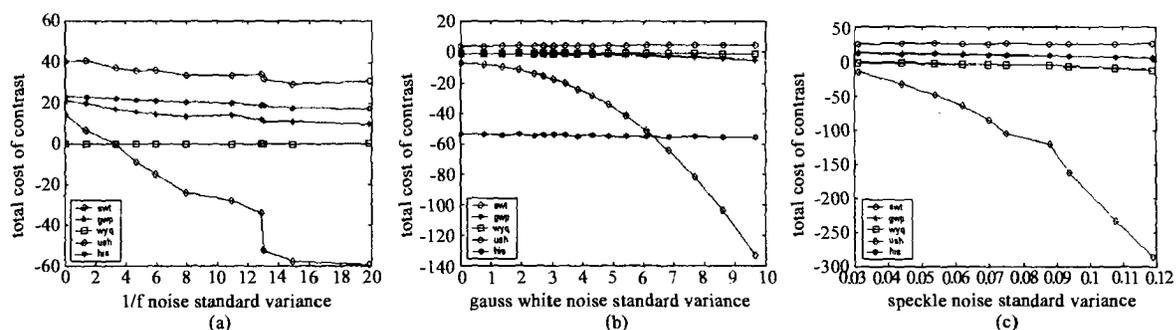


图5 被3种噪声污染的图像综合代价图(a)被 $1/f$ 噪声污染的图像代价(b)被高斯白噪声污染图像代价(c)被乘性噪声污染的图像代价

Fig. 5 Total cost of image added with three kinds of noise (a) cost of image added with RN (b) cost of image added with GWN (c) cost of image added with MN

表1 在3种噪声条件下各种增强方法的综合代价
Table 1 Total cost of three enhancement methods added with three kinds of noise

增强方法	RN($\sigma=11.97$)	GWN($\sigma=6.46$)	MN($\sigma=0.0622$)
SWT	34.338 0	4.093 6	21.062 2
GWP	11.909 6	-2.282 3	-13.041 9
WYQ	-0.220 3	-0.765 0	-54.801 3
USH	-34.159 4	-51.516 8	-1461.000 0
HIS	18.933 7	-55.014 8	-4.107 2

的方法. PN 表示相关噪声($1/f$ 噪声), GWN 表示加性高斯白噪声, MN 表示乘性噪声.

图1是非线性增强函数曲线, 实验中在添加3种噪声时均取 $b=0.15, c=30$. 图2(a)~图2(g)分别是空中弱红外目标图像、加相关噪声的图像、反锐化掩膜、直方图均衡、本文方法、文献[1]和文献[3]增强的结果. 图3(a)是添加高斯白噪声的红外车辆目标图像, 图3(c)~图3(g)分别是利用反锐化掩膜、直方图均衡、本文方法、文献[1]和文献[3]方法增强的结果. 图4(a)是红外舰船目标图像, 图4(b)是添加乘性噪声的图像, 图4(c)~图4(g)分别是利用反锐化掩膜、直方图均衡、本文方法、文献[2]和文献[3]增强的结果. 表1给出了图2~图4各种增强方法的综合代价.

由以上实验结果可见, 经典的直方图均衡法和反锐化掩膜法由于没有考虑噪声的影响, 在增强对比度的同时也放大了图像中的噪声. 文献[1]和文献[3]中的方法虽然在增强对比度的同时也考虑了噪声的抑制问题, 但是文献[1]中的方法虽然整体对比度较好, 但是对噪声的抑制效果并不理想, 而且在一定程度上还放大了背景的杂波. 文献[3]中的方法虽然对图像中的噪声抑制较好, 但是图像整体偏亮, 而且目标的细节部分失真. 与上述4种方法相

比, 本文所给出的方法在有效抑制了红外图像中的相关噪声、高斯白噪声和乘性噪声的同时, 大大增强了红外图像的对比度, 抑制了图像中的噪声和部分背景杂波, 而且目标的细节信息被很好的保留.

为了进一步说明本文方法在不同噪声强度下的有效性, 图5(a)~图5(c)分别给出了利用第4节给出的评价准则在三种不同噪声条件下的各种增强方法的综合代价曲线. 其中横坐标分别表示三种噪声的标准均方差, 纵坐标表示各种增强方法的综合代价. 图5中符号说明同前面. 由图5明显可见本文方法在整体效果和对噪声的鲁棒性等方面要优于其余四种方法, 从图5的分析结果与图2~图4得出的结论是一致的, 都充分说明了本文方法的优越性.

7 结语

本文基于离散平稳小波变换和非线性增益方法, 在预先不知道噪声方差的情况下, 能够找到去噪的近似最优阈值和增强阈值. 实验结果表明, 本文提出的方法在有效增强红外图像对比度的同时, 又能很好的抑制红外图像中的相关噪声($1/f$ 噪声)、高斯白噪声和乘性噪声, 而且能够很好的保留红外图像的细节部分信息. 算法在视觉质量上优于传统的反锐化掩膜法、直方图均衡法、文献[1]和文献[3]等增强方法, 是一种很有前途的红外图像对比度增强算法.

REFERENCES

- [1] GONG Wu-Peng, WANG Yong-Zhong. Contrast enhancement of infrared image via wavelet transform[J]. *Chinese Journal of National University of Defense Technology* (宫武鹏, 王永仲. 一种基于小波变换的红外图像对比度增强技术. *国防科技大学学报*), 2000, 22(6): 117-119
- [2] YANG Bi-Wu, GUO Xiao-Song, WANG Ke-Jun, et al.

- New algorithm of infrared image enhancement based on nonlinear extension [J]. *Chinese J. Infrared and Laser Engineering* (杨必武, 郭晓松, 王克军, 魏皖宁. 基于直方图非线性拉伸的红外图像增强新算法. *红外与激光工程*), 2003, **32**(1): 1—4
- [3] WU Ying-Qian, SHI Peng-Fei. Approach on image contrast enhancement based on wavelet transform [J]. *Chinese J. Infrared and Laser Engineering* (吴颖谦, 施鹏飞. 基于小波变换的低对比度图像增强. *红外与激光工程*), 2003, **32**(1): 4—7
- [4] Johnstone I M, Silverman B W. Wavelet threshold estimators for data with correlated noise [J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 1997, **59**: 319—351
- [5] ZHU Meng-Yu, ZHAO Bao-Jun, HAN Yue-Qiu. A method of removing $1/f$ noise based on wavelet transform [J]. *Chinese J. Journal of Beijing Institute of Technology* (朱梦宇, 赵保军, 韩月秋. 用小波变换去除红外图像中 $1/f$ 噪声的方法. *北京理工大学学报*), 2001, **21**(5): 641—644
- [6] Lang M, Guo H, Odegend J E, et al. Nonlinear processing of a shift-invariant DWT for noise reduction [R]. In *SPIE Conference on wavelet applications*. Orlando; FL, April, 1995, 2491
- [7] ZHANG Chang-Jiang, FU Meng-Yin, ZHANG Qi-Hong. Infrared image de-noising based on discrete stationary wavelet transform [J]. *Chinese J. Optical Technique* (张长江, 付梦印, 张启鸿. 基于离散平稳小波变换的红外图像去噪. *光学技术*), 2003, **29**(2): 250—253
- [8] Hall P, Koch I. On the feasibility of cross-validation in image analysis [J]. *SIAM J. Appl. Math.*, 1992, **52**(1): 292—313
- [9] Maarten Jansen, Geert Uytterhoeven, Adhemar Bultheel. Image de-nosing by integer wavelet transforms and generalized cross validation [R]. Technical Report TW264, Department of Computer Science, Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium, 1997
- [10] ZHANG Chang-Jiang, FU Meng-Yin, JIN Mei. Contrast enhancement of infrared image based on discrete stationary wavelet transform [J]. *Chinese J. Laser & Infrared* (张长江, 付梦印, 金梅. 基于离散平稳小波变换的红外图像对比度增强. *激光与红外*), 2003, **33**(3): 221—224
- [11] Azriel Rosenfeld, Avinash C K. *Digital Picture Processing* [M]. New York; Academic Press, 1982; 154—167

《光学手册》简介

顾 问: 龚祖同

主 编: 李景镇

16 开 1541 页

定价 100 元

我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容, 查阅公式、数据省时省力。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部段家喜、张雁、葛晓红联系。电话: 021-69918427, 69918198



光学期刊联合编辑部

2004 年 4 月