

· 图像与信号处理 ·

基于小波域的红外图像序列噪声分析与去噪

李计添¹, 何永强¹, 张 伟²

(1. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003; 2. 65581 部队, 吉林 四平 136001)

摘要: 由于相同的去噪方法对不同噪声类型的去噪效果不一样, 采用基于小波域的图像噪声类型识别方法, 利用小波高频子带系数的直方图识别了图像的两类主要噪声: 高斯噪声和椒盐噪声. 对红外图像系列的噪声进行了分析, 长波红外图像主要受到高斯噪声干扰, 中波红外图像主要受到椒盐噪声干扰. 提出了一种改进的小波全局阈值去噪方法. 仿真实验表明, 该方法较传统方法的 PSNR 提高了 2~3 dB, 处理速度较快.

关键词: 小波变换; 噪声方差; 红外图像; 阈值; 去噪

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)03-0067-05

Analysis and De-noising Infrared Image Series Based on Wavelet Domain

LI Ji-tian¹, HE Yong-qiang¹, ZHANG Wei²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. 65581 Army Unit, Siping 136001, China)

Abstract: The effectiveness of one de-noising method for different noise images is different, a method based on wavelet domain for identifying image noise types was used. The histogram of wavelet HH sub-band's coefficients was used to identify two types of main noise: Gaussian white noise and salt & pepper noise. After analyzing the infrared image series, it is found that the long-wave infrared images are mainly affected by the Gaussian white noise, the medium-wave infrared images are mainly affected by the salt & pepper noise. An improved wavelet global threshold de-noising method is reported. The simulation experiments indicate that the PSNR of this method is increased by 2~3 dB, processing speed is more faster, compared with traditional methods.

Key words: wavelet transform; noise variance; infrared image; threshold; de-noising

在红外成像探测系统中, 红外图像受到的噪声干扰主要有背景噪声、探测器噪声、放大器噪声、 $1/f$ 噪声和均匀性校正残留噪声等^[2]. 目前图像噪声的消除方法主要有两类: 一类是频域的方法, 主要通过图像进行频域变换以后, 根据噪声能量一般集中于高频, 采用低通滤波的方式进行滤波处理, 经逆变换后获得去噪声图像, 如傅里叶变换; 另一类是空间域方法, 主要采用各种图像平滑模板对图像进行卷积, 达到抑制或消除噪声的目的, 如均值滤波、中值滤波等.

红外图像受到的噪声干扰类型主要为高斯噪声

和椒盐噪声^[3]. 但是, 文献[3]同时指出, 红外图像还存在由探测器本身各个像元响应不一致性造成的图像固有噪声和图像均匀性校正造成的图像不均匀性噪声. 因此, 为了提高图像预处理的针对性和准确性, 对图像的噪声类型和大小进行判断和估计是很有必要的. 由于小波变换具有良好的时频特性和低熵性、多分辨率、去相关性、选基灵活的特点, 其在图像去噪领域得到了很好的应用, 并取得了非常好的效果. 文中将使用小波分析的方法进行红外图像噪声类型识别, 对噪声大小进行估计求取阈值, 并对红外图像序列去噪.

收稿日期: 2010-04-27

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20090461453)

作者简介: 李计添(1983-), 男, 福建漳州人, 硕士研究生, 研究方向为电子稳像和信息处理

1 小波阈值去噪原理和基于小波域的图像噪声描述

1.1 小波阈值去噪原理

小波去噪的方法,大体上可以分为 3 种,即:小波萎缩法、投影方法、相关方法.小波阈值萎缩法是其中研究和应用最为广泛的.小波阈值去噪的基本原理是在对图像进行小波变换的基础上,选用适当的阈值进行萎缩处理,然后利用处理后的小波系数重构获得去噪图像.小波阈值去噪效果的好坏主要取决于 3 个方面的因素:一是阈值函数的选择,目前主要有硬阈值函数、软阈值函数和半软阈值函数;二是阈值大小的估计,而阈值大小与噪声方差的大小有关,因此,对噪声方差进行尽可能精确的估计很有必要;三是由于同一去噪方法对不同的噪声类型处理效果不一样,红外图像主要受到高斯噪声和椒盐噪声的干扰,如何识别两类噪声并选用合适的噪声方差估计方法亦是去噪的关键.

1.2 基于小波域的图像噪声描述

图像的去噪模型通常表示为

$$g(i, j) = f(i, j) + n(i, j) \quad (1)$$

其中, $i, j = 1, 2, \dots, N$, N 为 2 的整数次幂; $g(i, j)$ 是含噪图像; $f(i, j)$ 是原图像; $n(i, j)$ 是独立同分布的噪声.对于二维小波而言,图像可分解为

$$\begin{aligned} A_s f(i, j) &= (f(i, j), \varphi_{sk1}(i) \varphi_{sk2}(j)) \\ D_s^{(1)} f(i, j) &= (f(i, j), \varphi_{sk1}(i) \Psi_{sk2}(j)) \\ D_s^{(2)} f(i, j) &= (f(i, j), \Psi_{sk1}(i) \varphi_{sk2}(j)) \\ D_s^{(3)} f(i, j) &= (f(i, j), \Psi_{sk1}(i) \Psi_{sk2}(j)) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, φ 和 Ψ 为相应的尺度函数和小波函数.对于第 s 层变换来说,图像被分解成 4 个 $1/4$ 大小的图像,每个都是图像与小波基的内积,每一层包含来自前一层的平滑逼近信息 $A_s f(i, j)$ 和水平、垂直和对角线信息: $D_s^{(1)} f(i, j)$, $D_s^{(2)} f(i, j)$, $D_s^{(3)} f(i, j)$. 设 W 为正交小波变换算子,则小波系数矩阵及关系可表示为

$$Y = Wg; X = Wf; V = Wn \Rightarrow Y = X + V \quad (3)$$

因此,小波系数具有可加性,这种特性使得利用小波系数进行噪声分析成为可能^[4].

2 噪声识别和噪声方差估计

对图像噪声类型进行识别的目的在于,相同的去噪方法对不同噪声的去噪效果差异较大,比如,线性均值滤波对于零均值高斯噪声有很好的抑制效果,但对于椒盐噪声的处理效果并不十分理想,而非线性中值滤波在保护图像细节的同时能有效地滤除椒盐噪声,但在高斯噪声的抑制上效果一般^[5,6].

小波变换后,图像的能量主要集中在尺度大的子带,而尺度小的高频子带系数的幅度较小、能量较低.因此,当噪声较大时,可以将最高频率子带的系数全部看成是噪声,由此来估计噪声的标准方差.图像的最高频率子带 HH 系数 ($D_s^{(3)} f(i, j)$) 不仅能反映噪声的大小,而且能反映噪声的类型.以 blood 图像为例,分别加入标准方差为 20 的高斯噪声和密度为 2% 的椒盐噪声,噪声图像及小波分解后 HH 高频系数的直方图如图 1 所示.图 1a 和图 1b 分别为加入高斯和椒盐噪声的含噪图像,图 1c 和图 1d 分别为其 HH 系数的直方图,横坐标为系数幅值(用 Amp 表示),纵坐标为相同系数幅值的统计个数(用 Ampnum 表示).从图 1 可以看出,受高斯噪声干扰图像的 HH 系数服从广义高斯分布,其中图 1c 中曲线边缘轮廓为高斯分布曲线轮廓,受椒盐噪声干扰图像的 HH 系数主要集中在零值附近,而且幅值较大的系数个数较少,利用 2 种噪声 HH 系数分布上的区别,可以识别出 2 种噪声.

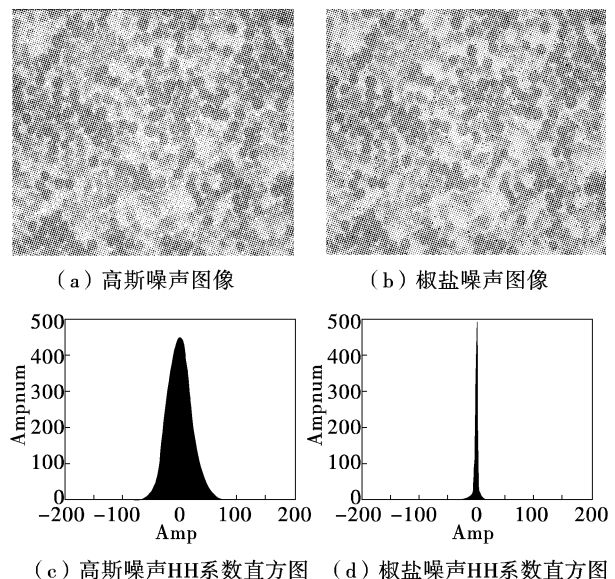


图 1 含噪图像和 HH 高频子带系数直方图

图像噪声大小是由噪声的方差决定的, 高斯噪声大小直接由方差表征, 椒盐噪声虽然由密度表征, 但是, 密度的大小同样与方差息息相关. Donoho 和 Johnstone 提出了使用小波系数估计高斯噪声标准方差大小的公式为

$$\sigma = Med / 0.674 5 \tag{4}$$

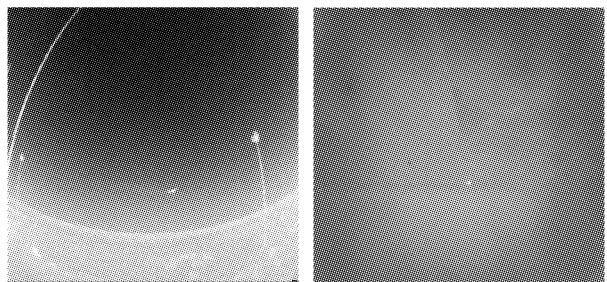
其中, Med 为 HH 高频子带小波系数幅值的中值. 椒盐噪声密度可由文献[7]提出的拟合公式得到

$$d(\sigma) = -1.346 2 + 0.099 995\sigma + 0.002 13\sigma^2 + 0.000 02\sigma^3 \tag{5}$$

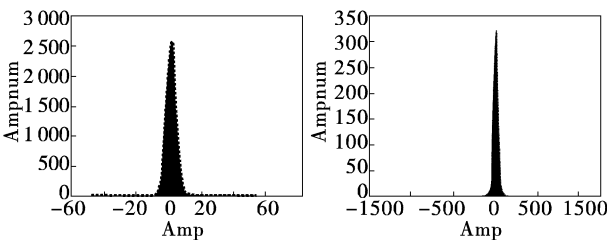
其中, σ 为 HH 高频子带小波系数的标准方差.

3 实际红外图像系列的噪声分析

图 2a 为飞机场中的一幅长波红外图像, 图 2b 为中波红外图像, 视场中间白斑点为热源. 分别对 2 幅图像进行小波分解, 分解尺度为 3, 其 2^1 (第一层) 尺度 HH 高频子带小波系数直方图如图 2c 和图 2d 所示, 通过上节分析可以得出, 图 2a 主要受到高斯噪声干扰, 图 2b 主要受到椒盐噪声干扰. 从红外图像序列第 100 帧开始, 分别对 2 个场景每隔 10 帧取一幅图像, 总共取 60 帧图像, 分析其所受噪声类型并计算噪声标准方差, 高斯噪声标准方差和椒盐噪声密度曲线如图 3a 所示. 计算飞机场场景 60 帧图像 3 层小波分解的 3 个 HH 高频子带小波系数的标准方差和所有 HH 高频子带小波系数的标准方差, 其曲线如图 3b 所示. 从图 3a 可以看出, 同一场景的



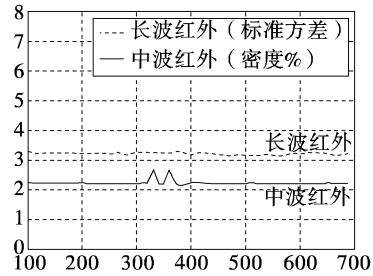
(a) 长波红外图像 (b) 中波红外图像



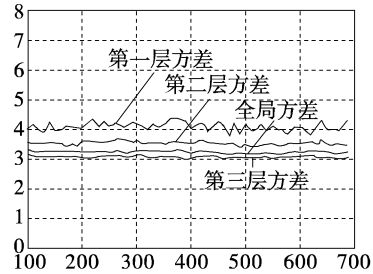
(c) 图(a)的HH系数直方图 (d) 图(b)的HH系数直方图

图 2 红外图像和 HH 高频子带直方图

图像序列中, 红外图像所受的噪声干扰大小相对比较稳定, 长波红外图像系列所受噪声干扰的方差维持在 3~4, 中波红外图像系列所受噪声干扰的密度保持在 2%~3%. 从图 3b 可以看出, 从 2^1 (第一层) 尺度到 2^3 尺度, 噪声的标准方差呈下降趋势, 红色曲线为所有 HH 高频子带小波系数标准方差.



(a) 图像序列噪声方差和密度曲线



(b) 图像序列全局方差和局部方差曲线

图 3 红外图像序列噪声方差和密度估计

4 红外图像系列的去噪方法

4.1 传统的噪声标准方差估计方法

小波阈值去噪可分为全局阈值法和局部阈值法, 全局阈值运算速度快, 但是去噪效果较差, 局部阈值运算速度慢, 但是去噪效果较好. 从图 3a 可以看出, 红外图像系列的标准方差估计值的标准差较小, 长波红外图像噪声方差大小变化较小, 其曲线近似成一条直线, 中波红外图像除了其中 2 个区域噪声方差突然增大外, 同样近似成一直线. 因此, 文中在小波分解的基础上, 提出了改进标准方差大小估计的小波全局阈值法. 确定全局阈值的关键在于噪声方差大小的估计.

噪声方差的估计方法有全局方差法和局部方差法. 图 3a 和图 3b 所估计方差为全局方差, 所谓全局方差就是求取阈值所用的标准方差在各个小波分解层的各高频子带上都是一样的, 利用小波系数的可加性, 即估计高斯噪声标准方差大小的中值 Med 和估计椒盐噪声密度大小的标准方差均由所有小波分

解层次的 HH 高频子带小波系数计算得到,这种方法求出的标准方差进行小波域图像去噪效果较好,但是运算速度较慢.所谓局部方差就是利用小波分解后,由于白噪声的噪声水平不随小波分解尺度的变化而变化,因此将 2^1 (第一层) 尺度上 HH 高频子带系数估计的噪声标准方差作为所有分解尺度的标准方差,估计得到全局阈值.但是, 2^1 尺度上的标准方差并不能很好地代表其他尺度的标准方差.实际上,通过对红外图像的小波分析后发现,随着分解层次的增加噪声水平在逐渐下降,其结果如图 3b, 第一层方差曲线(蓝色)、第二层方差曲线(黄色)、第三层方差曲线(绿色)3 条曲线分别表示 2^1 、 2^2 、 2^3 尺度上的标准方差.因此,用这种方法求出的标准方差进行小波域图像去噪,其效果没有全局方差好,但是运算速度较快.因此,为了进一步提高运算速度,同时改善图像的去噪效果,对噪声方差的估计方法进行了改进.

4.2 改进的标准方差估计方法

由于不同尺度小波 HH 高频子带系数所包含的噪声能量呈现一定的规律,可以给各层标准方差设定一个权重系数,代替直接估计的全局标准方差,以长波红外图像为例,其计算过程如下:

(1) 根据实际场景长波红外图像计算 3 个尺度上的局部标准方差和全局标准方差 分别求取 2^1 、 2^2 、 2^3 尺度上的 N 帧图像的标准方差为

$$x_j = [\sigma_{j1}, \sigma_{j2}, \sigma_{j3}, \dots, \sigma_{jN}]' \quad (6)$$

其中, $j = 1, 2, 3$. 计算 N 帧图像的全局方差为

$$y = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n]' \quad (7)$$

(2) 计算不同尺度的权重系数

设 2^1 、 2^2 、 2^3 尺度的权重系数分别为 A 、 B 、 C , 则局部方差和全局方差的关系可用矛盾方程组表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} & \sigma_{31} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{1n} & \sigma_{2n} & \sigma_{3n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, n 为帧序, 令 $P = [A \ B \ C]'$, 则相应的解 P 为矛盾方程组的最小二乘解. 以飞机场长波红外图像序列为例, 每隔 10 帧, 取 60 帧图像, 得权重系数为

$$P = [0.772 \ 9 \ 0.168 \ 8 \ 0.058 \ 3]' \quad (9)$$

得改进的全局方差为

$$\hat{\sigma}_n = 0.058 \ 3 \sigma_{jn} + 0.168 \ 8 \sigma_{jn} + 0.772 \ 9 \sigma_{jn} \quad (10)$$

其中, $j = 1, 2, 3$; n 为帧序.

4.3 小波阈值去噪步骤和实验结果

文中采用的小波阈值去噪方法其步骤为:

(1) 对含噪红外图像进行 3 层小波分解, 得到噪声图像的小波分解高频系数 HH;

(2) 统计第一层小波分解 HH 高频子带系数的直方图, 根据能量集中程度, 识别其噪声类型;

(3) 根据噪声类型选择噪声方差估计公式, 估计所有小波分解尺度的小波分解高频系数 HH 的标准方差, 利用式(10)计算 $\hat{\sigma}$, 作为计算全局阈值的标准方差;

(4) 利用确定的阈值对分解的小波系数进行处理, 获得新的小波系数, 并对新的小波系数进行逆变换, 得到去噪图像.

图 4 中图 4a~图 4f 6 幅图像分别为含噪红外图像和使用线性均值平滑、 3×3 中值滤波、全局方差法、局部方差法、文中所用小波阈值法进行去噪后图像. 使用图像为长波红外飞机场实拍场景视频图像.

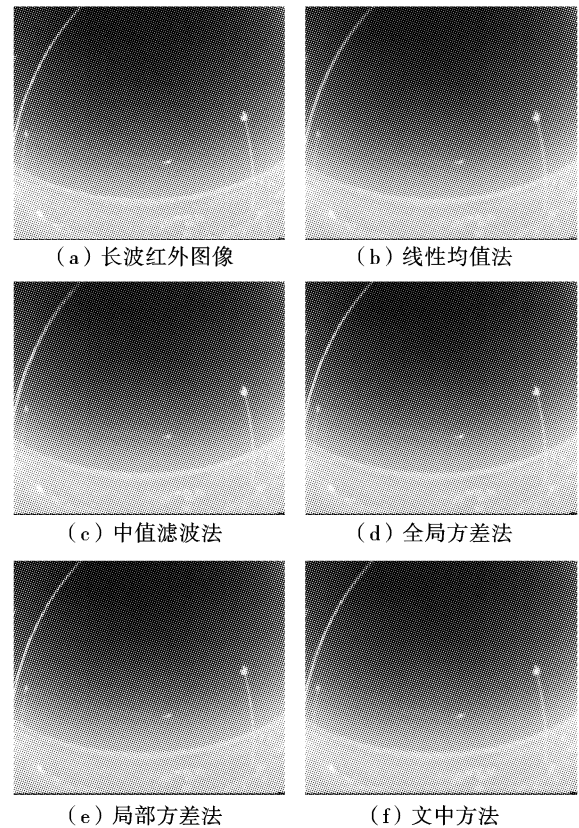


图 4 红外图像和几种去噪方法处理结果

使用 VC++ 6.0 进行仿真实验,运行环境为 Intel Core2 CPU,内存为 2 G 的计算机.含噪红外图像的峰值信噪比为 28.18 dB,分别计算 5 种方法的峰值信噪比 PSNR 和处理时间 t ,计算结果如表 1,从表 1 中可以看出,小波阈值去噪法较传统的均值平滑法和中值滤波法处理效果好,就小波阈值法而言,全局方差法的 PSNR 最高,但处理时间最长,局部方差法处理时间较短,但 PSNR 较大,改进的小波阈值法在 PSNR 和处理时间上得到了较好的平衡,PSNR 比传统方法提高 2~3 dB,较局部方差法提高 1.2 dB,时间比对全局方差法快 26 ms,该方法红外图像系列的处理效果较好.

表 1 5 种去噪方法峰值信噪比和处理时间对比

方 法	PSNR	t /ms
含噪图像	28.18	-
均值平滑	32.75	56
中值滤波	33.57	100
全局方差法	36.73	75
局部方差法	34.08	37
改进小波阈值法	35.24	49

5 结 束 语

通过小波分解后 HH 高频子带系数的直方图对

(上接第 66 页)

参考文献

- [1] 李俊山,李旭辉.数字图像处理[M].北京:清华大学出版社,2007:167-175.
- [2] M Unser, A Aldroubi, M Eden. B-spline signal processing: Part I -Theory[J]. IEEE Transactions on signal processing, 1993, 41(2): 821-832.
- [3] M Unser, A Aldroubi, M Eden. B-spline signal processing: Part II-Efficient Design and Applications[J]. IEEE Transactions on signal processing, 1993,41(2): 834-848.
- [4] R Panda, G Rath, B N Chatterji. Generalized B-spline signal processing[J]. Signal Processing, 1996,55: 1-14.
- [5] R Panda, B N Chatterji. Least squares generalized B-spline signal and image processing[J]. Signal Processing, 2001,81: 2005-2017.
- [6] B Forster, T Blu, M Unser. Complex B-splines. Applied and Computational Harmonic Analysis [J]. 2006,20(2):

红外图像的噪声类型进行了识别,使图像去噪更具针对性,方法简单有效.提出的改进标准方差估计方法综合了全局方差和局部方差估计的优点,通过理论分析和实验验证,表明该方法在去噪效果和处理速度上得到了较好的平衡.由于文中识别方法主要针对高斯噪声和椒盐噪声,而且权重系数必须根据实际场景先进行求取,下步的工作应包括:(1)探讨其他噪声类型的识别方法;(2)研究不同场景红外图像系列去噪的自适应算法.

参考文献

- [1] 王永仲.现代军用光学技术[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] 徐南荣,卞南华.红外辐射与制导[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [3] 邹前进,冯亮,汪亚.红外图像空间噪声分析和预处理方法改进[J].应用光学,2007,28(4):427-428.
- [4] Chang S Grace, Bin Yu, Martin Vetterli. Spatially adaptive wavelet thresholding with context modeling for image denoising[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(9): 1522-1531.
- [5] 宗思光,王江安.多量级多向梯度海空复杂背景红外弱点目标检测[J].应用光学,2005,26(5):25-28.
- [6] 张强,那彦,李建军.基于边缘几何特征和频域相关技术的图像匹配方法[J].应用光学,2006,27(4):285-288.
- [7] 张旗,梁德群,樊鑫等.基于小波域的图像噪声类型识别与估计[J].红外与毫米波学报,2004,23(4):283-284.
- [7] H S Hou, H C Andrews. Cubic splines for image interpolation and digital filtering[J]. IEEE Trans., 1978,26(6): 508-517.
- [8] 李开宇.基于 B-样条插值的图像边缘检测[J].南京航空航天大学学报,2007,39(2):198-203.
- [9] J Prades-Nebot, Albiol A, Bachiller C. Enhanced B-Spline Interpolation of Images[J]. Image Processing, 1998,3: 289-293.
- [10] I J Schoenberg. Spline functions and the problem of graduation[J]. Proc. Nat. Acad. Sci., 1964,52: 947-950.
- [11] C H Reinsh. Smoothing by spline functions[J]. Numer. Math.,1967,10: 177-183.
- [12] M unser, T Blu. Self-similarity: Part I -Spline and Operators[J]. IEEE Trans. On signal processing,2007, 55(4): 1352-1363.
- [13] 许景波.高斯滤波器基本理论与应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.