

文章编号:1004-4213(2010)01-0169-4

# 基于小波变换的红外焦平面阵列图像 边缘保护处理法<sup>\*</sup>

胡红利<sup>1</sup>,白涛<sup>1</sup>,马采文<sup>2</sup>,张娟<sup>1</sup>

(1 西安交通大学 电气工程学院,西安 710049)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

**摘要:**针对红外焦平面阵列图像成像系统中的准确、清晰、无失真的要求,提出了一种基于小波变换的图像边缘保护处理方法,重点分析了将图像的二维小波变换与统计学中的最大后验概率估计算法结合来进行图像消噪的处理方式,介绍了该方法在红外焦平面阵列图像中的应用.仿真实验表明,这种方法明显减轻了失真度,使图像更加清晰,有效的扼制了“人工虚影”现象.

**关键词:**小波变换;消噪;红外焦平面阵列图像;边缘保护处理方法

**中图分类号:** TN215

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103901.0169

## 0 引言

随着先进固态探测器件技术的深入研究,高性能、低廉、紧凑的焦平面阵列探测器不断问世,焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)传感器成为红外和可见光成像系统中最有发展前景的探测器件,其在夜视系统、机载侦察和预警系统、天文成像系统、森林火警早期预警系统中都得到广泛的应用.

但由于制造工艺的限制,焦平面阵列探测单元响应度不完全一致,导致了叠加在图像上的空间噪声,即固定图案噪声(Fixed Pattern Noise, FPN),严重影响了红外系统的成像质量和辐射测量准确度<sup>[1-2]</sup>.因此,在红外成像系统中,图像的消噪处理是一个亟待解决的关键问题.

近年来,相继提出了许多基于场景的非均匀校正技术.如 HARDIE R C 等<sup>[3]</sup>提出基于场景的自适应最小均方算法(adaptive LMS algorithm), LAI Rui 等<sup>[4]</sup>提出基于改进神经网络的非均匀校正算法, ZHANG Chao 等<sup>[5]</sup>利用恒定统计(constant statistics)假设对增益和偏移的非均匀性进行连续补偿; TORRES S N 等<sup>[6]</sup>提出了基于卡尔曼(Kalman)滤波的自适应非均匀校正算法,算法基于恒定范围(CR-Constant Range)假设,有效跟踪固定图案噪声参量的飘移; HAYAT M M 等<sup>[7]</sup>利用 CR

假设和矩估计技术提出红外焦平面非均匀校正的统计算法(SA-Statistical Algorithm)和 RATLIFF B M 等<sup>[8]</sup>提出基于场景的代数校正算法(Algebraic Scene-Based Nonuniformity Correction)用于加性固定图像噪声参量的估计.

对图像进行过滤处理,是小波分析中的一个比较好的应用. CHOPA DE N B 等<sup>[9]</sup>提出采用小波变换压缩图像来达到消噪的目的; DAUBECHIES I 等<sup>[10]</sup>提出在小波消噪过程中引入线性迭代算法来提高消噪效果.

本文结合红外焦平面阵列图像,介绍了基于小波变换的图像消噪技术,提出了一种基于小波变换的图像边缘保护处理方法,以提高图像的信噪比,突出图像的边缘特征.

## 1 基于小波变换的边缘保护消噪法

在图像处理过程中,利用二维小波的分解、滤波和重构的过程,可以有效地实现图像的消噪.如果在二维小波分解后的滤波过程中引入线性加权或者 Bayes 阈值滤波<sup>[11]</sup>等方法,会有效地加强图像的消噪效果.在此基础上对上述两种方法做出改进,提出了边缘保护消噪的方法.

### 1.1 线性加权滤波

在一幅经过二维小波分解后的图像内部,以像素为单位,求周围相邻像素加权后的值赋值给中心像素,可以起到滤波的效果.线性滤波后的输出为

$$Z(i, j) = k_1 \times y(i-1, j-1) + k_2 \times y(i-1, j) + k_3 \times y(i-1, j+1) + k_4 \times y(i, j-1) + k_5 \times y(i, j) + k_6 \times y(i, j+1) + k_7 \times y(i+1, j-1) +$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(50777049)、国家高技术发展研究计划(2009AA042130)和国家重点基础研究发展计划(2005CB221206)资助

Tel: 029-82664249-119 Email: hlhu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2009-03-05

修回日期: 2009-04-08

$$k_8 \times y(i+1, j) + k_9 \times y(i+1, j+1) \quad (1)$$

式中

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 = 1 \quad (2)$$

线性加权滤波器实际上是一个低通滤波器.  $k$  值的选取可调节图像区域内各像素点对滤波器输出的影响, 确定消噪和保留图像细节的效果. 当需要更多地保留图像细节时,  $k_5$  的值应该取大些. 如果需要更多的去除噪音, 那么  $k_1 \sim k_9$  应尽量平均一些.

## 1.2 Bayes 阈值滤波

由试验可以证明, 对原始图像和含有噪音的图像进行一次小波分解后的系数分布都近似服从 Gaussian 分布或者近似 Laplace 分布, 即 GGD (General Gaussian Distribution) 分布<sup>[11]</sup>

$$GG_{\beta, \sigma_x}(x) = C(\beta, \sigma_x) e^{-\alpha(\beta, \sigma_x)|x|^\beta} \quad (3)$$

$$\alpha(\beta, \sigma_x) = \sigma_x^{-1} [\Gamma(\frac{3}{\beta}) / \Gamma(\frac{1}{\beta})]^{1/2} \quad (4)$$

$$C(\beta, \sigma_x) = \frac{\beta \alpha(\beta, \sigma_x)}{2\Gamma(1/\beta)} \quad (5)$$

$$\Gamma(t) = \int_0^\infty e^{-u} u^{(t-1)} du \quad (6)$$

式中,  $\sigma_x$  表示信号的标准差,  $\beta$  是分布决定参量.

显然在  $\beta=1$  时, 它是 Laplace 分布, 而在  $\beta=2$  时则为 Gaussian 分布. Laplace 分布分析起来更加简洁方便, 在图像处理中得到广泛应用. Laplace 分布情况下的阈值表达式为

$$T(\sigma_x) = r \times \sigma^2 / \sigma_x \quad (7)$$

式中  $\sigma$  是噪音的标准差,  $r$  是调节参量, 多次测试发现, 当  $r=\sqrt{2}$  时, 可以取得较好的消噪效果<sup>[11]</sup>. 但是由于 Bayes 估计法是用整个小波矩阵计算一个方差, 采用一个统一的阈值来进行软阈值消噪, 这种消噪方法必然会丢失图像细节, 因为统一阈值对每个小波系数不是最优的.

## 1.3 边缘保护消噪

线性加权滤波和 Bayes 阈值滤波方法都是采用了一个统一的阈值对图像进行消噪处理. 而在红外焦平面阵列线性响应模型中, 通常加性固定图像噪音起到了主导作用, 对图像使用统一的阈值来进行处理显然难以达到准确消噪的目的.

为了更好的进行图像的消噪, 期望针对于不同的像素点分别做处理, 也就是对每个像素点求出其像素值, 这样可以更多的保留图像的细节, 突出图像的细节特征.

定义图像中能量有限的信号  $f(t)$  代表某点的像素值. 含有噪音的信号  $\bar{f}(t)$  是不含噪音信号  $\hat{f}(t)$  和噪音  $e$  的集合, 即

$$\bar{f}(t) = \hat{f}(t) + e \quad (8)$$

对含有噪音的信号  $\bar{f}(t)$  和不含噪音信号  $\hat{f}(t)$  做离散的二维小波变换, 进行多分辨率分析, 即可得

$$C_{j,k}^r = W_2^r \bar{f}(k)$$

$$D_{j,k}^r = W_2^r \hat{f}(k) \quad (9)$$

式中,  $r=1, 2, k=1, 2, \dots, N^2$ .

对信号进行二维小波变换, 需要用到基本小波函数  $\psi(t)$  的概念. 小波变换具有多分辨率 (multi-resolution) 的特点, 可以由粗到细的逐步观察信号. 适当的选取  $\psi_{j, ch}(M_{jk})$  基本小波, 可以使小波变换在时域上为有限支撑, 频域上也比较集中. 时域、频域都具有表征信号局部特征的能力, 有利于检测信号的瞬态或奇异点. 鉴于要突出图像的细节及边缘特征, 在此选取基本小波函数为<sup>[12]</sup>

$$\psi_{j, ch}(M_{jk}) = \mu_j (\sqrt{\mu_j^2 + M_{jk}^2} - \mu_j) \quad (10)$$

式中  $\mu_j$  代表由图像分辨率决定的对比系数,  $M_{jk}$  为图像中每个点所对应的梯度幅值, 在此我们对其定义为

$$M_{jk} = \sqrt{|W_{2j}^1 f(k)|^2 + |W_{2j}^2 f(k)|^2} \quad (11)$$

式中  $k=1, 2, \dots, N^2$ .

这样, 在基本小波函数中就明显包含了图像的像素信息, 图像的二维小波变换也就更加有针对性.

在实际的实验中, 图像的恢复或滤波问题可以等价为由观测图像信息来估计真实图像信息的问题. 而从观测图像求取真实图像的问题实际上是一个病态反转问题. Bayes 统计理论为解决这一病态问题提供了理论基础. 根据该理论, 在掌握关于真实图像的先验信息的基础上, 可以通过观测图像信息  $\bar{g}$  获得真实图像信息  $\hat{g}$  的后验概率<sup>[13]</sup>, 即

$$p(\hat{g}/\bar{g}) = p(\bar{g}/\hat{g}) p(\hat{g}) / p(\bar{g}) \quad (12)$$

假定条件概率  $p(\bar{g}/\hat{g})$  为高斯分布, 那么

$$p(\bar{g}/\hat{g}) = \frac{1}{c_1} \exp\left[-\sum_s \frac{(\hat{g}_s - \bar{g}_s)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (13)$$

式中,  $\sigma$  为高斯分布的标准方差;  $c_1$  为正则化常量.

先验概率  $p(\hat{g})$  可由统计模型给出

$$p(\hat{g}) = \frac{1}{c_2} \exp\left[-\beta \sum_{(r,s)} (\hat{g}_s - \bar{g}_s)^2\right] \quad (14)$$

式中,  $\beta$  为平滑因子;  $c_2$  为正则化常量; 求和遍及每个像素的邻域点.

将式(13)和(14)代入式(12), 即可得

$$p(\hat{g}/\bar{g}) = \frac{1}{z} \exp\left[-\sum_s \frac{(\hat{g}_s - \bar{g}_s)^2}{2\sigma^2} - \beta \sum_{(r,s)} (\hat{g}_s - \bar{g}_s)^2\right] \quad (15)$$

式中,  $z$  为分配函数, 是一个正则化常量.

根据统计学的最大后验概率估计算法 (MAP), 使式(12)获得最大值的  $\hat{g}$  即为真实图像的优化解.

整理后即可表达为

$$f = \operatorname{argmin} \left[ \sum_s \frac{(\hat{g}_s - \bar{g}_s)^2}{2\sigma^2} + \beta \sum_{(r,s)} (\hat{g}_s - \bar{g}_s)^2 \right] \quad (16)$$

于是,结合对图像信号所做的二维小波分析,将式(16)改写为

$$f = \operatorname{argmin} \left[ \sum_s \frac{(D_{j,k}^r - C_{j,k}^r)^2}{2\sigma^2} + \beta \sum_{(r,s)} (D_{j,k}^r - C_{j,k}^r)^2 \right] \quad (17)$$

这样,就实现了图像信号的二维小波变换和统计学中的最大后验概率估计算法的紧密结合,所得到的结果即为包含有细致图像特征的针对于图像每一点的像素值。

#### 1.4 边缘保护消噪法算法步骤

根据上文中对算法的阐述,可以归纳出算法步骤为:

1)定义图像中含有噪音的信号为  $\bar{f}(t)$ , 不含噪音信号为  $\hat{f}(t)$ . 将他们的二维小波变换表示为式(9)的形式;

2)利用式(10)和(11)计算基本小波函数  $\psi_{j,ch}$  ( $M_{jk}$ )和图像中每点所对应的梯度幅值  $M_{jk}$ ;

3)将以上结果代入到最大后验概率估计法所得式(17)中,取得  $f$  所得最小值;

4)计算出针对于最大后验概率估计法所得式  $f$  的最小值的不含噪音的信号  $\hat{f}(t)$ , 即为所得解。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 仿真数据的产生

利用已有的  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  红外序列图像,通过加入模拟固定图形噪音参量,形成算法测试仿真数据。这里的图像尺寸为  $250 \times 160$ ,所用的图像序列共 100 帧。在图像中加入不同标准差的白噪音。

### 2.2 仿真结果的评价指标

可以从图像消噪之后的信噪比、所用算法的实现效率和视觉角度等方面来进行分析,从而定量和定性的对比线性加权滤波、Bayes 阈值滤波和边缘保护消噪法三种方法的消噪效果。

### 2.3 仿真结果

对已有的红外序列图像添加不同标准差的白噪音,使用三种不同的消噪方法处理后的结果如表 1 和图 1。

由表 1 可以看到,线性加权滤波方法对图像中  
表 1 三种方法消噪后的信噪比/dB

Denoising methods \ Noise deviation	Original image	Linear weighted filter	Bayes method	Edge preserving method
0.04	28.44	28.49	30.37	34.12
0.03	26.21	26.32	27.30	31.51
0.02	23.02	23.69	25.51	26.30
0.01	20.69	20.56	21.30	20.51

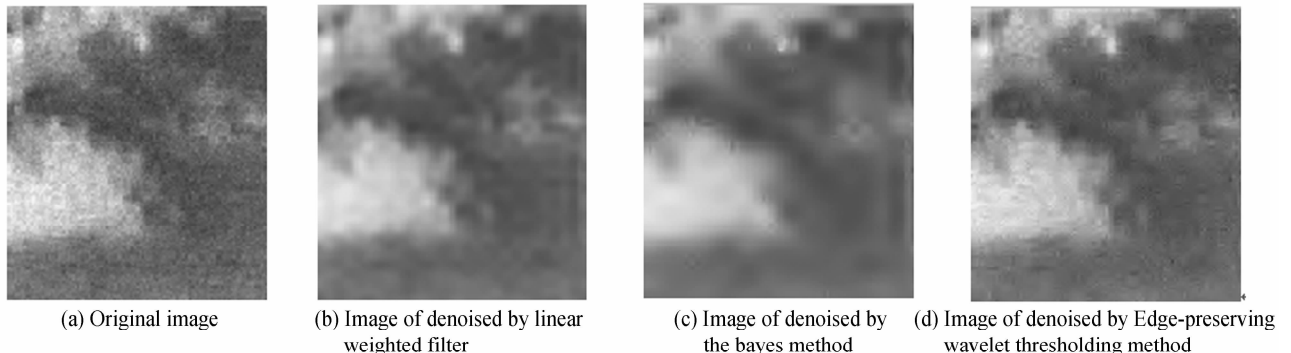


图 1 图像消噪效果

Fig. 1 Image of denoising

的噪音有所抑制,但不是很明显,噪音较小的情况下,滤波反而降低了图像的信噪比; Bayes 阈值滤波方法较之于线性加权滤波方法有所进步,对不同方差的噪音图像进行处理后信噪比都得到提高,噪音比较大时更加明显一些;边缘保护消噪法在三种方法中消噪效果最为显著,虽然图像噪音较小的情况下消噪效果一般,但对含有比较大噪音的图像,处理后图像的信噪比有显著提高,图像效果明显改善。而从几种算法的实现效率角度而言,线性加权滤波方法和 Bayes 阈值滤波方法的迭代次数都需要 400 次以上;而边缘保护消噪方法的迭代次数为 70 次左

右,大大提高了运行效率,节省了运行时间。

对红外焦平面阵列图像的几种消噪方法的效果对照如图 1。由图 1 可见,采用 Bayes 阈值估计处理后的图像“人工虚影”现象比较明显,局部存在像素的重叠;使用线性加权滤波,虽然图像在视觉上有更加平滑的感觉,但有比较明显的“过扼杀”现象,去除了图像很多的细节特征;而边缘保护消噪法则明显减轻了失真度,突出了图像边缘细节特征的同时使图像更加清晰,有效的扼制了“人工虚影”现象,得到比较好的图像质量。

### 3 结论

提出并重点分析了将图像的二维小波变换与统计学中的最大后验概率估计算法结合来进行图像消噪的图像边缘保护处理方法. 仿真实验的结果表明, 相比已有的几种小波消噪方法, 该方法确实能明显减轻红外焦平面阵列图像的失真度, 更加突出图像的边缘细节特征, 并有效扼制了“人工虚影”现象. 这种方法同样适用于其它类型图像的消噪处理中.

#### 参考文献

- [1] XU Tian-hua, ZHAO Yi-gong. Analysis of scene-based techniques for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Journal Infrared Millimeter and Waves*, 2004, **23**(4):257-261.  
徐田华, 赵亦工. 基于场景的红外焦平面非均匀校正技术分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(4):257-261.
- [2] SUI Xiu-bao, CHEN Qian, GU Guo-hua. Influence of environment temperature on IR image nonuniformity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12):2572-2575.  
隋修宝, 陈钱, 顾国华. 环境温度对红外图像非均匀性影响的研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12):2572-2575.
- [3] HARDIE R C, BAXLEY F, BRYNS B, HYTLA P. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. *Opt Express*, 2009, **17**(17):14918-14933.
- [4] LAI Rui, YANG Yin-tang, ZHOU Duan, LI Yue-jin. Improved neural network based scene-adaptive nonuniformity correction method for infrared focal plane arrays[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(24):4331-4335.
- [5] ZHANG Chao, ZHAO Wen-yi. Scene-based nonuniformity correction using local constant statistics[J]. *Journal of the Optical Society of American A- Optics Image Science and Vision*, 2008, **25**(6):1444-1453.
- [6] TORRES S N, HAYAT M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays[C]. *SPIE*, 2000, **4030**:196-205.
- [7] TORRES S N, HAYAT M M, ARMSTRONG E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**:772-780.
- [8] RATLIFF B M, HAYAT M M, HARDIE R C. Algebraic scene-based nonuniformity correction in focal plane arrays[C]. *SPIE*, 2001, **4372**:114-124.
- [9] CHOPADEV N B, GHATOL A A. Analysis of discrete wavelet based image compression technique; a review[J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2009, **68**(11):915-919.
- [10] DAUBECHIES I, DEFRISE M, MOL C D. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint[J]. *Comm Pure Appl Math*, 2004, **LVII**:1413-1457.
- [11] CHANG S G, YU B, VETTERLI M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, **9**(9):1532-1546.
- [12] ROMENY T H, FLORACK L, KOENDERINK J, et al. Scale-Space theory in computer vision [M]. *Lecture Notes in Computer Science*, Berlin:Springer, 1997:3-28.
- [13] BRATSOLIS E, SIGELLE M. Fast SAR image restoration, segmentation and detection of high reflectance regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(12):2890-2899.

## An Image Edge-Preserving Disposal Method for Infrared Focal Plane Arrays Using Wavelet Transform

HU Hong-li<sup>1</sup>, BAI Tao<sup>1</sup>, MA Cai-wen<sup>2</sup>

(1 Department of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** An image edge-preserving disposal method using wavelet transform is presented and analyzed in detail. The method combines 2-D wavelet transform with maximum a posteriori estimation algorithm. The application of the method to the infrared focal plane Arrays image is described in order to meet the demands of accuracy, clarity, no distortion in the processing of image. The experimental results show that this method ease the image distortion, yoke the “artificial ghost”, and make the image more clarity indeed.

**Key words:** Wavelet transform; Denoising; Focal plane array; Edge-preserving denoising method



**HU Hong-li** was born in 1964. He received his Ph. D. degree in power engineering from Xi'an Jiaotong University in 2005. Now he is a professor and his research interests focus on ECT and image reconstruction, smart transducer and interface circuit, gas/solid two-phase flow measurement and combustion control.