

# 基于小波域热红外降质图像滤波增强方法研究

张 燕

(电子科技大学成都学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 随着现代网络传输和视频通信技术的快速发展, 大大拓宽了热红外图像的应用领域。提出了一种基于小波变换的热红外降质图像滤波增强方法。该方法以受到不同强度高斯白噪声和脉冲噪声构成的混合噪声模型的热红外降质图像为研究对象, 首先对其进行二维小波变换, 从而获得高频和低频小波分解系数; 鉴于低频小波分解系数包含图像大部分信息, 基本不受噪声干扰的特点, 引入直方图均衡化法进行增强处理, 以改善图像低频信息的对比度; 根据各方向的小波高频分解系数中噪声的分布特征, 对经典数学形态学滤波算法进行研究, 分别设计出几类多尺度多方向的结构元素, 实现对各高频小波分解系数中噪声的三级串联滤波处理, 在此基础上进行自适应同态滤波增强, 以最大限度改善滤波后图像质量。最后进行小波分解系数重构。实验结果表明, 该算法对于热红外降质图像的处理效果优于单纯进行经典数学形态学滤波和已有的改进数学形态学滤波, 为该类型降质图像的滤波增强处理提供了一条可供借鉴的思路。

**关键词:** 热红外图像; 混合噪声; 小波变换; 直方图均衡化; 自适应同态滤波; 改进数学形态学滤波  
**中图分类号:** TN911.73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2014)05-0355-05

## Research on the Thermal Infrared Image Filtering and Enhancement Algorithm Based on Wavelet Transform Domain

ZHANG Yan

(Chengdu Collge of University of Eletronic Science And Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** With the rapid development of modern network transmission and video communication technology, the application field of thermal infrared image is broadened. A new thermal infrared image enhancement method based on improved wavelet transform is proposed. The algorithm in this paper takes the image that is distracted by the mixed noise (white Gaussian noise and salt & pepper noise) as the research object. Firstly, the noise image is conducted two-dimensional wavelet transform so as to obtain the high frequency and low frequency wavelet decomposition coefficient. Because the low frequency wavelet decomposition coefficient contains most of the image information and less affected by the mixed noise, the histogram equalization method is used to deal with it so as to improve the image contrast. According to the characteristics of noise distribution in high frequency wavelet decomposition coefficients, the research of classical mathematical morphology filtering algorithm is done. Several kinds of multi-scale and multi-direction structure elements are designed respectively. The noise in high frequency can be filtered in three-stage, then the adaptive homomorphic filtering is applied to improve the image quality to the largest extend. Finally, the wavelet decomposition coefficient is reconstructed. The experimental results indicated that the performance of the algorithm in this paper is better than classical mathematical morphology filtering algorithm, and the improved mathematical morphology filtering algorithm, and provides a train of thought for infrared image processing.

**Key words:** thermal infrared image, mixed noise, wavelet transform, histogram equalization, adaptive homomorphic filtering, improved mathematical morphology filtering

## 0 引言

随着现代视频通讯传输技术的日趋成熟,这使得热红外图像的应用领域愈加广泛。鉴于热红外图像具有隐蔽性好、穿透能力强、定位精度较高以及低能耗等优点,使得在军事目标探测、生物医学等领域得到广泛地研究应用。学术界针对热红外图像的处理研究主要集中在,图像增强<sup>[1-2]</sup>,图像去噪<sup>[3-6]</sup>,边缘检测<sup>[7]</sup>,图像融合<sup>[8]</sup>等。

一般情况下所获取的热红外图像为降质图像,这样的“降质”主要来源于两个方面:①热红外图像自身低对比度,分辨率低下,图像目标边缘易出现模糊;②由于成像条件的限制以及图像在拍摄,传输的过程中不可避免受到各类噪声的干扰,其中高斯噪声和脉冲噪声是典型的两类。因此,要实现对热红外图像的诸如特征提取、融合等后续研究,改善图像的视觉对比度提高图像质量则是首要任务。对此,王博等<sup>[8]</sup>提出基于 Retinex 的红外视频监控图像的监控算法,胡黎明<sup>[1]</sup>等将同态滤波算法应用于红外图像增强处理,王博<sup>[9]</sup>等提出一种结合自适应直方图均衡化的红外图像增强算法,张亚飞<sup>[10]</sup>等,龚昌来<sup>[11]</sup>等提出一种基于正弦灰度变换的红外图像增强方法。根据对已有的研究成果分析可知,由于热红外图像中或多或少参杂各类噪声,单纯采用增强算法对图像进行对比度改善效果不是很理想,因此,本文提出一种基于小波变换的热红外降质图像滤波与增强方法。

## 1 自适应同态滤波算法

自适应同态滤波作为一种基于照度—反射模型的图像增强算法<sup>[7]</sup>,将图像看作受图像照度和物体表面反射率两类因素的制约,即图像是入射分量和反射分量的乘积,通过设定特定的滤波器实现对入射分量的减弱和反射分量的增强处理。对于任意一幅图像  $f(i, j)$ ,照度函数记为  $w(i, j)$ ,反射函数记为  $\phi(i, j)$ ,图像成像模型可描述成,  $f(i, j) = w(i, j) \times \phi(i, j)$  ( $0 < w(i, j) < \infty$ ,  $0 < \phi(i, j) < 1$ ),采用同态滤波算法对其进行增强处理,基本步骤如下:

Step1: 对上式取对数,可得:

$$\ln[f(i, j)] = \ln[w(i, j)] + \ln[\phi(i, j)] \quad (1)$$

Step2: 对式(1)实现正向傅里叶变换 (FFT), 即:

$$F\{\ln[f(i, j)]\} = F\{\ln[w(i, j)]\} + F\{\ln[\phi(i, j)]\} \quad (2)$$

若令:

$$\begin{cases} \phi(u, v) = F\{\ln[f(i, j)]\} \\ w'(u, v) = F\{\ln[w(i, j)]\} \\ \phi'(u, v) = F\{\ln[\phi(i, j)]\} \end{cases}$$

则, 式(2)可转换成:

$$\phi(u, v) = w'(u, v) + \phi'(u, v) \quad (3)$$

Step3: 设定一特定滤波器  $H(u, v)$  对  $\phi(u, v)$  处理,

$$\phi(u, v)H(u, v) = w'(u, v)H(u, v) + \phi'(u, v)H(u, v) \quad (4)$$

Step4: 记  $S(u, v) = \phi(u, v)H(u, v)$ , 对式(4)进行逆向傅里叶变换 (FFT<sup>-1</sup>),

$$F^{-1}[S(u, v)] = F^{-1}[w'(u, v)H(u, v)] + F^{-1}[\phi'(u, v)H(u, v)] \quad (5)$$

Step5: 对式(5)进行指数变换, 可获得最终的增强图像  $f(i, j)$ :

$$f(i, j) = \exp\{F^{-1}[S(u, v)]\} \quad (6)$$

该算法中的滤波器  $H(u, v)$  设计的是否恰当直接关系到最终图像增强效果的优劣, 通常情况下, 可采用高通滤波器来代替同态滤波函数中的滤波器来抑制图像中低频成分, 增强高频成分。关于高通滤波器的设计, 将在文章后续章节进行讨论。

## 2 改进数学形态学滤波算法

### 2.1 数学形态学滤波原理

灰度形态学采用结构元素  $B(x, y)$  对一幅灰度影像  $F(x, y)$  进行如下膨胀运算:

$$[F(x, y) \oplus B(x, y)](k, l) = \max\{F(x-k, y-l) + B(x, y) \mid (x, y) \in D_B, (y-l) \in D_F\} \quad (7)$$

灰度影像  $F(x, y)$  被结构元素  $B(x, y)$  腐蚀, 可如下定义:

$$[F(x, y) \ominus B(x, y)](k, l) = \max\{F(x-k, y-l) - B(x, y) \mid (x, y) \in D_B, (x+k)(y+l) \in D_F\} \quad (8)$$

式中:  $D_F$  和  $D_B$  分别是  $F(x, y)$  和  $B(x, y)$  定义域, 且  $(x-k, y-l) \in D_F$ ,  $(k, l)$  为灰度图像移动距离。开启运算是在对图像进行腐蚀运算的基础上再进行膨胀运算; 闭合运算则是先进行膨胀运算然后再次进行腐蚀运算, 二者可分别定义如下:

$$\begin{cases} F(x, y) \circ B(x, y) = [F(x, y) \ominus B(x, y)] \oplus B(x, y) \\ F(x, y) \bullet B(x, y) = [F(x, y) \oplus B(x, y)] \ominus B(x, y) \end{cases} \quad (9)$$

### 2.2 新型数学形态学滤波结构元素设计

图像经过小波分解之后, 分别得低频部分 (LL), 高频部分由水平细节分量 (HL)、垂直细节分量 (LH)、对角细节分量 (HH) 组成。低频部分包含图像绝大部分信息, 高频部分是图像边缘轮廓等细节信息的体

现, 对于 LL 分量而言, 信息大致成水平分布; 对于 HL 分量而言信息成垂直分布; 对角分量中信息基本成 45°或 135°分布。当图像受到噪声污染时, 经过小波分解之后, 低频部分几乎不受噪声影响, 噪声绝大部分集中于高频部分, 并且大致与各高频分量中图像信息分布相同。

就形态学滤波器而言, 小尺度结构元素能够检测图像细节部分, 对于噪声滤波效果不太理想; 大尺度结构元素滤波性能较好, 但对于边缘轮廓的保持效果不佳。对于小波域高频图像, 根据其噪声分布特征, 分别设计出与噪声分布类似的结构元素, 那么对于噪声滤波效果应当较为理想。具体来说, ①针对水平和垂直小波高频分量, 分别设计出一种平面线形结构元素, 如图 1 所示, 其中标有“\*”位置为结构元素的原点; ②小波域高频分量中, 细节信息并非严格 45°或 135°分布, 针对这一特点, 设计出多角度周期线形结构元素进行形态学多级滤波, 如图 2 所示, 其中标有“\*”位置为结构元素原点。

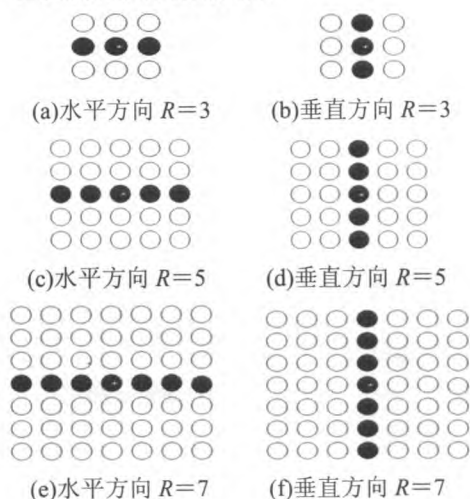


图1 数学形态学水平和垂直线形结构元素

Fig.1 The horizontal and vertical linear mathematical morphology structure elements

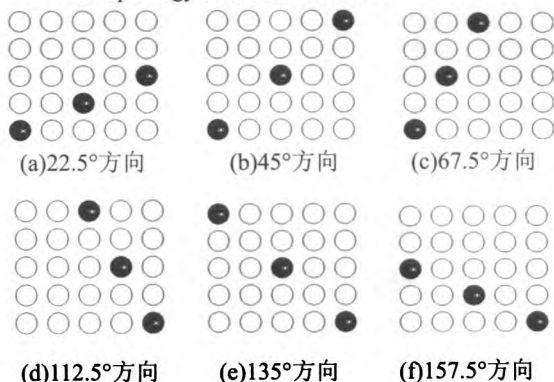


图2 数学形态学对角周期线形结构元素

Fig.2 The cycles of diagonal linear mathematical morphology structure elements

## 2.3 多尺度多方向串联数学形态学滤波器设计

开启和闭合运算, 对于图像噪声的滤除具有一定的优势。开启运算能有效滤除图像中更孤立的毛刺和区域, 对于比结构元素小的正峰值噪声有较强的抑制作用。从整体上看, 开启运算能够在基本保持目标大小不变的情况下对图像起到平滑的作用, 但如果低于邻域像素灰度值的噪声点分布过于密集, 且结构元素尺寸远大于噪声点之间距离时, 经过开启运算后的图像质量大幅度下降。闭合运算可用于对图像目标之间狭小裂缝进行填充, 连接临近目标物, 当出现高于邻域像素灰度值的噪声点且密度过大时, 闭合运算滤波效果也不理想。基于以上分析, 并结合 2.1 中设计的多尺度多方向形态学结构元素, 设计出如图 3 所示的针对小波域高频系数的新型形态学滤波器, 该滤波器对每一高频小波分解系数分别进行三个尺度的串联形态学滤波。

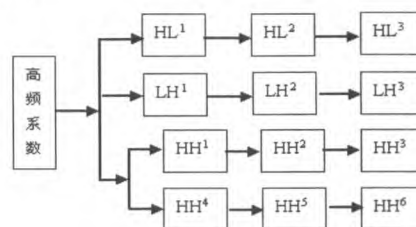


图3 本文形态学滤波器

Fig.3 The mathematical morphology filter in this paper

## 3 本文算法实现基本思路

Step1: 对降质的热红外图像进行二维小波变换, 获得高频和低频小波分解系数, 低频系数主要是图像低频信息 (如图像背景信息等) 的体现, 高频系数则是图像边缘、轮廓、突变点等细节信息的体现, 并且图像中的噪声绝大部分集中于此。

Step2: 对于高频小波分解系数采用本文第 2 节所提出的改进形态学滤波算法进行处理, 从而排除噪声的干扰。

Step3: 对滤波后的高频小波分解系数, 采用自适应同态滤波算法进一步改善图像对比度, 自适应同态滤波算法中的滤波器  $H(u, v)$  采用如下定义的 Butterworth 滤波器:

$$H(u, v) = 1 / \{1 + [D_0/D(u, v)]^{2n}\} \quad (10)$$

式中:  $D_0$  为滤波器截止频率;  $D$  为图像中任意一点  $(u, v)$  到滤波中心点  $(u_0, v_0)$  的距离。

Step4: 对小波低频系数采用直方图均衡化进行处理, 以改善其灰度信息分布。

Step5: 对经过 Step3 和 Step4 处理后的高频和低频小波分解系数进行重构, 从而获得增强后的图像。



4 实验结果及分析

4.1 实验方案设计

将脉冲噪声和高斯白噪声的混合噪声作为图像中的主要降质源，随机拍摄了日常生活中常见的目标物 30 幅图像作为测试数据，对该数据分别加入不同强度的混合噪声，以进一步测试本文算法的性能。限于篇幅，仅给出其中两组及其实验结果，原始图像如图 4 所示。

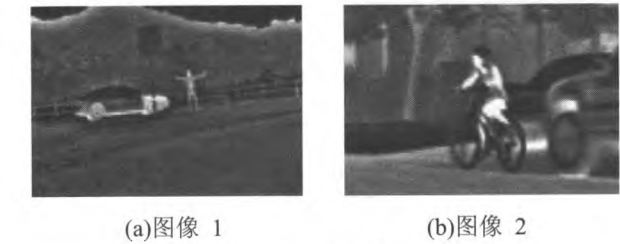


图 4 本文测试图像

Fig.4 The test images in this paper

通过对降质图像分别进行经典数学形态学滤波（棱形结构元素，半径为 1）（算法 1）与文献[3]所提出的红外图像滤波算法（算法 2）文献[12]改进数学形态学滤波（算法 3）处理，来对本文算法（算法 4）处理后的结果进行横向对比。引入峰值信噪比（PSNR）<sup>[12]</sup>和均方根误差（RMSE）<sup>[13]</sup>来对对比结果进行定量说明。PSNR 值越大则说明图像质量越好，RMSE 反之。

4.2 实验结果分析

图 5(a)为图 4(a)测试图像加入了均值为 0 方差为 0.03 与强度为 30%的脉冲噪声构成的混合噪声形成的降质图像，图 6(a)为图 4(b)测试图像加入了均值为 0 方差为 0.03 与 30%强度的脉冲噪声构成的降质图像。从两幅将质图像可以看出，图中目标由受噪声的干扰，基本难以辨认，采用算法 1（采用数学形态学开启、闭合加以串联构经典滤波器）对其进行处理，可以从图 5(b)和图 6(b)对比可以看出，图像与各自对应的降质图像而言，图像质量基本没有得到改善，这表明，针对受到噪声干扰的热红外图像，单纯采用该算法，难以实现改善图像质量的目的。算法 2 中，通过对噪声图像首先进行小波变换，对个尺度的小波分解系数进行数学形态学滤波，其性能相对于算法 1 而言有了一定程度的提高，但滤波后图像视觉效果仍不理想，这是由于图像中存留着相当程度的噪声以及滤波过程中模糊了部分图像信息所致，如图 5(c)和图 6(c)所示。算法 3 中，通过对红外图像实现两阶段多维滤波，相对于算法 1 和算法 2 而言，算法性能有了较大提升，如图 5(d)和图 6(d)所示。算法 4（本文算法）将图像

增强技术与滤波算法有机结合，能够基本实现热红外降质图像噪声的有效滤波，从图 5(e)和图 6(e)中可以看出，人物和汽车等目标得到高清晰度的恢复。

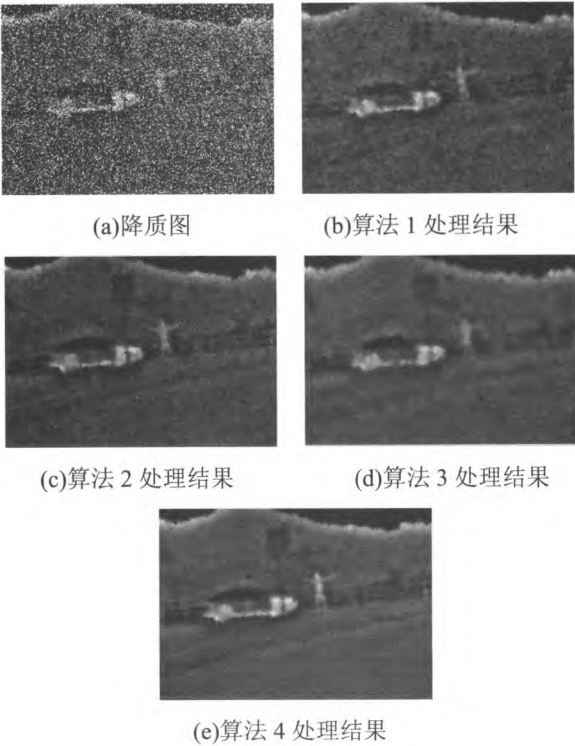


图 5 图像 1 处理效果对比

Fig.5 The image processing effect contrast of the first test image

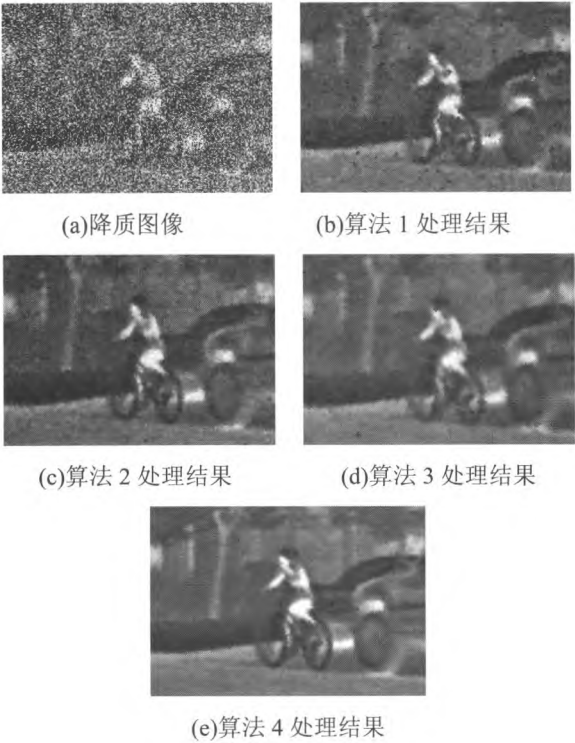


图 6 图像 2 处理效果对比

Fig.6 The image processing effect contrast of the second test image

表1 三种方法处理结果 PSNR 值比较

Table 1 Comparison of PSNR value between the three kinds of processing methods

		dB			
图像	噪声（密度，方差）	算法 1	算法 2	算法 3	算法 4
图像 1	10%,0.01	24.438	25.554	26.006	26.502
	20%,0.02	22.339	24.381	25.127	25.691
	30%,0.03	20.027	22.004	23.381	24.382
图像 2	10%,0.01	23.691	24.781	25.281	25.879
	20%,0.02	22.183	23.225	24.603	25.037
	30%,0.03	19.902	20.574	23.588	24.173

表2 三种方法处理结果 RMSE 值比较

Table 2 Comparison of RMSE value between the three kinds of processing methods

		dB			
图像	噪声（密度，方差）	算法 1	算法 2	算法 3	算法 4
图像 1	10%,0.01	0.238	0.173	0.128	0.085
	20%,0.02	0.402	0.257	0.238	0.156
	30%,0.03	0.677	0.472	0.327	0.257
图像 2	10%,0.01	0.308	0.241	0.195	0.147
	20%,0.02	0.468	0.383	0.276	0.266
	30%,0.03	0.724	0.652	0.352	0.295

从表1和表2中 PSNR 和 RMSE 计算值中可以看出，本文 PSNR 值远高于算法 1-3，RMSE 值远小于前三者，这与上述分析结果基本相同。综合以上分析可知，本文算法对于热红外降质图像复原处理效果较好，但本文仅将图像中常见的高斯白噪声和脉冲噪声这两类噪声作为混合噪声模型作为研究对象，而现实中热红外图像不仅仅受到这两类噪声的干扰，因此，本文算法在后续研究中要充分顾及多种噪声的影响，通过不断进行调试修正，以期提高算法普适性。

5 总结

提出了一种基于小波变换的热红外降质图像滤波增强方法。实验结果表明，该算法对于降质的热红外图像滤波增强具有较好的效果。

参考文献：

[1] 胡奕明, 赵海生, 李云川, 等. 一种基于同态滤波的红外图像增强新方法[J]. 红外技术, 2012, 34(4): 224-228.

[2] Liang Wang, Jie Yan. Method of infrared image enhancement based on histogram[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(3): 237-240.

[3] 康长青, 曹文平, 华丽, 等. 两阶段三维滤波的红外图像去噪算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 261-264.

[4] 袁丽英, 孙莉莉. 基于小波线性最小均方误差的红外图像去噪[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2012, 28(4): 439-443.

[5] 卢兆林, 李闰龙, 李涛, 等. 基于全辩分理论的红外图像去噪[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 194-197.

[6] Maria del C.Valdes, Minoru Inamura, J.D.R.Valera, et al. Multidimensional filtering approaches for pre-processing thermal images[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2006, 17(4): 299-325.

[7] 王慧丽, 齐异, 刘焕英. 舰船尾流红外图像边界检测方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 524-527.

[8] 周萧, 杨风暴, 蔺素珍, 等. 基于自适应滑动窗口的双色中波红外图像融合方法研究[J]. 红外技术, 2013, 35(4): 227-231.

[9] 王博, 刘丽萍, 汪西原. 红外视频监控图像增强算法的比较研究[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2012, 33(4): 350-353.

[10] 张亚飞, 谢明鸿. 基于分块 DCT 同态滤波的彩色图像增强算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(5): 1752-1756.

[11] 龚昌来, 罗斌, 杨冬青, 等. 基于正弦灰度变换的红外图像增强算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 200-203.

[12] 王小兵, 孙久运, 汤海燕. 一种基于数学形态学与小波域增强的滤波算法[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(7): 64-67.

[13] 韩得水, 王明泉, 王玉. 基于同态滤波与直方图均衡化的射线图像增强[J]. 电视技术, 2013, 37(7): 20-22.