

文章编号: 0253-2239(2009)07-1807-05

一种具有噪声抑制功能的红外图像锐化算法

钱惟贤 陈 钱 顾国华 管志强

(南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要 锐化是图像增强中一项关键性的技术,但如果图像中包含噪声,噪声也会因为锐化而放大,最终导致信噪比的降低。探索了一种算法既可以对图像进行锐化滤波,又不降低图像的信噪比。采用模式识别的相关理论,基于隶属度和概率松弛技术对红外图像中由真实边缘和由各种噪声引起的亮度数值变化进行区分,对不同区域采用不同的锐化处理。该算法不同于传统图像锐化算法只基于局部对比度的缺点,在图像锐化过程中考虑图像边缘和噪声的空间分布的差异,改善了传统边缘增强算法对噪声放大的缺点。实验数据表明,该锐化方法未引起信噪比的降低,具有良好的前景和实用价值。

关键词 图像处理; 红外图像; 锐化; 隶属度; 概率松弛技术

中图分类号 TN216; TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1807

Infrared Image Sharpening Algorithm With Noise Inhibition

Qian Weixian Chen Qian Gu Guohua Guan Zhiqiang

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Sharpening is a key technology of infrared image enhancement, but the image's noise will be enhanced because of the sharpening, and the signal-to-noise ratio will decrease. The algorithm is researched to sharpen the image without increasing the noise. The distribution difference between random noise and the real edge is analyzed, and the definitions of the membership and the probability relaxation are advanced to distinguish the illumination changes caused by real edges or noise in the infrared image. An algorithm based on the two methods are introduced. Different from the traditional algorithms, this algorithm considers the spatial difference between the real edge and the noise. So this algorithm not only enhances the details, but also reduces the enhancement of random noise. As it is shown in experiments, the edge of the image is sharpened and the noise is suppressed. This algorithm has practicality and potential application value in the field of infrared images contrast enhancement.

Key words image processing; infrared image; sharpening; membership; probability relaxation

1 引 言

在红外图像处理中,为了增强图像的边缘和细节,常采用锐化技术。如美国 FLIR 公司的红外热像仪带有一种先进的锐化滤波器 DDE, DDE 能达到非常好的增强效果,但它却存在两大缺陷:(1) 系统对噪声敏感,图像的细节和噪声同时被增强,尤其是在图像的平坦区域,即使很小的噪声也非常明显;(2) 过冲现象,由于图像的高细节区域相对于其他区域增强更大,处理后的图像在边缘区域会出现明显的暗沟或亮沟^[1]。

对此, S. K. Mitra 提出了基于 Teager 算法的锐

化算子,这种锐化算子可近似为局部均值权重高通滤波器。根据 Weber 定律,人眼对图像黑色区域的细节更敏感,因此这种算子能减小噪声。G. Ramponi 提出了立方反锐化掩模技术,这种技术的实质是用一个对边缘敏感的平方滤波器算子乘以拉普拉斯算子,仅增强局部亮度变化区域的图像细节,相对减小噪声。Y. H. Lee 提出了基于序列统计拉普拉斯算法的算子,这个算子的输出和局部均值与局部中值之差成比例,能有效地去除高斯白噪声。A. Polesel 提出了自适应反锐化掩模技术,这种技术采用自适应滤波器对图像的细节增强程度大一

收稿日期: 2008-06-03; **收到修改稿日期**: 2008-11-14

作者简介: 钱惟贤(1980—),男,讲师,在职博士,主要从事红外图像工程方面的研究。

E-mail: Edeveloper_plus@163.com

导师简介: 陈 钱(1964—),教授,博导,长江学者,从事光电探测与成像技术方面的研究。

些,而对图像的平坦区域几乎不增强,因而能减小平坦区域的噪声。

上面提到的方法虽然一定程度上减小了噪声,但在平坦区域,噪声仍然比较明显,而且,为了使图像的中细节区域达到较好的增强效果,图像的高细节区域往往增强过大,导致过冲现象的出现。

本文针对之前锐化技术的一些缺点,提出一种新的解决方法。首先,采用模式识别的相关理论,将图像分为强细节、弱细节和处于强弱细节之间的中等细节三个区域,对强细节区进行增强,对弱细节区不进行增强,对中等细节根据其隶属度来确定其增强系数。最终通过自适应的模糊控制,实现边缘增强,同时避免噪声的放大。

2 基于模糊集的自适应边缘增强^[2~6]

常用的锐化增强采用二阶拉普拉斯算子 T

$$T = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Z_{x,y}(\lambda) = F_{x,y} + \lambda F_{x,y} \otimes T, \quad (1)$$

式中 $F_{x,y}$ 为原始图像, $Z_{x,y}$ 为增强后图像, λ 为增强因子, λ 大小控制着增强强度。

为了防止过冲现象,本文对常用的锐化算法进行改进,引入了一个平滑算子 G

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1/8 & 0 \\ 1/8 & 4/8 & 1/8 \\ 0 & 18 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_{x,y}(\lambda) = G \otimes (F_{x,y} + \lambda F_{x,y} \otimes T). \quad (2)$$

算子 G 的基本原理是通过模糊效应弱化边缘的过冲现象, G 的引入虽然能有效抑制过冲,但会造成图像平坦区域的模糊现象,所以 G 必须分区域,有选择地加以利用。

理想的边缘增强算法是通过高通滤波器对边缘部分进行增强,抑制其中的噪声,达到增强边缘和抑制噪声的目的。但是图像的边缘细节和噪声都在高频部分,边缘增强的同时都可能将噪声放大。本文将图像的高频成分分为

$$f_{bp} = f_h + f_m + f_l, \quad (3)$$

其中 f_l 为弱细节区高频成分,即图像平坦区域的高频成分,多由噪声引起; f_m 为中等细节区高频成分; f_h 为强细节区高频成分。 f_m 和 f_h 主要是图像边缘区域所包含的高频成分。

而本文算法的主旨思想是对噪声为主的弱细节

区维持现有状态,强细节区应该得到最大限度增强,而中等细节区应得到适当增强,处理后的高频成分为

$$f_{eh} = f_l + f_m[\lambda(\mu_{x,y})] + f_h(\lambda_{\max}), \quad (4)$$

$$\lambda(\mu_{x,y}) \leq \lambda_{\max}$$

式中 λ_{\max} 为全局最高增强系数, $\mu_{x,y}$ 定义为像素 (x, y) 的细节成分对强细节区的隶属度, $\mu_{x,y}$ 及其定义将在下文中详细叙述, $\mu_{x,y}$ 越大,说明该像素属于强细节区的概率越大,则 $\lambda(\mu_{x,y})$ 越大,增强的力度也越大。

3 基于隶属度的边缘检测算法^[7~15]

图像边缘成分和图像噪声很难给出具体的划分定义,为此引入模糊集合理论的隶属度。隶属度的概念来源于模糊集合理论。模糊理论是在美国柏克莱加州大学电气工程系教授 Zadeh 于 1965 年创立的模糊集合理论的基础上发展起来的,主要包括模糊集合理论、模糊逻辑、模糊推理和模糊控制等方面的内容。模糊理论不对事物做简单的肯定和否定,而是用隶属度来反映某一事物属于某一范畴的程度。利用模糊集合理论描述事物比普通集合更合理。

为计算隶属度,采用具有一定噪声抑制功能的 Sobel 算子 T_1 和 T_2 进行边缘检测处理:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

处理后得图像 $L_{x,y}$

$$L_{x,y} = |T_1 \otimes F_{x,y}| + |T_2 \otimes F_{x,y}|. \quad (5)$$

$L_{x,y}$ 的像素值越大,对应的该像素所在区域所包含的高频成分越多, $L_{x,y}$ 的数值范围被限定在 $[0, 255]$ 区间,大于 255 的像素一律变为 255。将图像 $L_{x,y}$ 按灰度值大小分割为两个部分,采用最大类间方差法选择最佳阈值 D_T , M 定义为图像 $L_{x,y}$ 的最大灰度值,取阈值为 t , 类 1(对应灰度值大的类)像素数占总像素数的比率为 $\omega_1(t)$, 平均灰度值为 $\mu_1(t)$, 类 2(对应灰度值小的类)为 $\omega_2(t)$ 和 $\mu_2(t)$, 则阈值 D_T 的计算式为

$$D_T = \arg \max_{t \in G} \{ \omega_1(t) \cdot \omega_2(t) \cdot [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2 \}, \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned}\omega_1(t) &= \sum_{i=0}^t p_i, \quad \omega_2(t) = \sum_{i=t}^M p_i, \\ \mu_1(t) &= \frac{\sum_{i=0}^t i p_i}{\omega_1(t)}, \quad \mu_2(t) = \frac{\sum_{i=t}^M i p_i}{\omega_2(t)}.\end{aligned}\quad (7)$$

p_i 为 $L_{x,y}$ 对应灰度级的直方图, 最终分别得到高灰度值图像和低灰度值图像 $L_{x,y}^h, L_{x,y}^l$:

$$L_{x,y}^h = \begin{cases} L_{x,y}, & L_{x,y} \geq D_T \\ 0, & f_{hp} < D_T \end{cases} \quad (8)$$

$$L_{x,y}^l = \begin{cases} L_{x,y}, & L_{x,y} < D_T \\ 0, & f_{hp} \geq D_T \end{cases} \quad (9)$$

统计 $L_{x,y}^h, L_{x,y}^l$ 的均值 e^h, e^l 和均方差 σ^h, σ^l

$$e^h = \sum L_{x,y}^h / \sum U(L_{x,y}^h), \quad (10)$$

$$\sigma^h = \sqrt{\sum (L_{x,y}^h - e^h)^2 / \sum U(L_{x,y}^h)}, \quad (11)$$

$$e^l = \sum L_{x,y}^l / \sum U(L_{x,y}^l), \quad (12)$$

$$\sigma^l = \sqrt{\sum (L_{x,y}^l - e^l)^2 / \sum U(L_{x,y}^l)}. \quad (13)$$

其中

$$U(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

隶属度定义为

$$\mu_{x,y}^h = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(L_{x,y}^h - e^h)^2}{2(\sigma^h)^2}\right], & L_{x,y} < D_T + \sigma^h \\ 1, & L_{x,y} > D_T + \sigma^h \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{x,y}^l = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(L_{x,y}^l - e^l)^2}{2(\sigma^l)^2}\right], & L_{x,y} > D_T - \sigma^l \\ 1, & L_{x,y} \leq D_T - \sigma^l \end{cases} \quad (15)$$

$\mu_{x,y}^h$ 表示像素 (x,y) 对强细节区的隶属度, 简称强区隶属度, $\mu_{x,y}^l$ 表示像素 (x,y) 对弱细节区的隶属度, 简称弱区隶属度。隶属度取值介于 $[0,1]$ 之间。

4 基于概率松弛法的隶属度调整

图像边缘细节与噪声的一个重要区别在于边缘在空间上具有连通性, 表现在边缘不会只是孤立的一个点或两个点, 而是彼此直接相互衔接的连通区域, 在做边缘分割的时候, 分割出来的边缘连通域面积越大, 该区域是边缘的概率就越大。所以可以依据其连通状况重新调整隶属度, 以达到隶属度对噪声的免疫。

定义一幅 4 维隶属度图像 $U_{x,y}$:

$$U_{x,y} = U(x,y) = (\mu_{x,y}^h, \mu_{x,y}^l). \quad (16)$$

首先去除孤立的点噪声, 定义 $V_{(x,y)}$ 为与中心像素 (x,y) 连通的 8 邻域, 定义 $V_{(x,y)}(\mu_{x,y}^h - \mu_{x,y}^l)$ 为对中心像素 (x,y) 周围 8 个像素中每个像素都做高区隶属度与低区隶属度取差的运算, u_{th} 为阈值。

$$U_{x,y} = \begin{cases} (0,1), & (\mu_{x,y}^h - \mu_{x,y}^l) > \\ & u_{th} + \max[V_{(x,y)}(\mu_{x,y}^h - \mu_{x,y}^l)] \\ (\mu_{x,y}^h, \mu_{x,y}^l), & (\mu_{x,y}^h - \mu_{x,y}^l) \leq \\ & u_{th} + \max[V_{(x,y)}(\mu_{x,y}^h - \mu_{x,y}^l)] \end{cases} \quad (17)$$

对孤立噪声滤除后的 $U_{x,y}$ 图像做强区隶属度和弱区隶属度的取差处理, 得图像 $Q_{x,y}$:

$$Q_{x,y} = U_{x,y}(1) - U_{x,y}(2). \quad (18)$$

将图像 $Q_{x,y}$ 分为两类区域, 边缘区和非边缘区, 显然 $Q_{x,y}$ 值越大, 像素 (x,y) 是边缘的概率也就越大, 但同时噪声点的 $Q_{x,y}$ 也会很大。边缘用类 1 表示, 非边缘用类 0 表示。因图像中大量存在的区域为非边缘区域, 所以先将所有像素归为非边缘区。令 e_0 和 σ_0 表示第 0 类的均值和方差, 就是对整个 $Q_{x,y}$ 计算均值和方差。 e_1 和 σ_1 表示第 1 类的均值和方差, 取 $e_1=1, \sigma_1=0.2$ 。

像素点 (x,y) 与类 0 和类 1 的马氏距离定义为

$$d0_{x,y} = (e_0 - Q_{x,y})^2 / \sigma_0^2, \quad (19)$$

$$d1_{x,y} = (e_1 - Q_{x,y})^2 / \sigma_1^2. \quad (20)$$

所有像素初始都属于类 0, 则所有像素的初始概率为

$$P_{x,y}^{(0)} = \frac{1/d0_{x,y}}{1/d0_{x,y} + 1/d1_{x,y}}. \quad (21)$$

定义兼容性矩阵

$$R(0,0) = 1, R(1,1) = 1,$$

$$R(0,1) = R(1,0) = 0. \quad (22)$$

如果用 $T_{x,y}(0)$ 表示类 0 对 (x,y) 点兼容系数, $T_{x,y}(1)$ 表示类 1 对 (x,y) 点兼容系数, $V_{(x,y)}$ 表示 (x,y) 点的 8 邻域, 则

$$\begin{aligned}T_{x,y}(0) &= \frac{1}{8} \sum_{i,j \in V_{(x,y)}} [R(0,0)P_{i,j}^{(n)}(0) + \\ & R(0,1)P_{i,j}^{(n)}(1)],\end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}T_{x,y}(1) &= \frac{1}{8} \sum_{i,j \in V_{(x,y)}} [R(1,0)P_{i,j}^{(n)}(0) + \\ & R(1,1)P_{i,j}^{(n)}(1)].\end{aligned} \quad (24)$$

第 $n+1$ 步的概率矢量可如下计算:

$$P_{x,y}^{(n+1)}(0) = \frac{P_{x,y}^{(n)}(0)[1 + T_{x,y}^{(n)}(0)]}{P_{x,y}^{(n)}(0)[1 + T_{x,y}^{(n)}(0)] + P_{x,y}^{(n)}(1)[1 + T_{x,y}^{(n)}(1)]}, \quad (25)$$

$$P_{x,y}^{(n+1)}(1) = \frac{P_{x,y}^{(n)}(1)[1 + T_{x,y}^{(n)}(1)]}{P_{x,y}^{(n)}(0)[1 + T_{x,y}^{(n)}(0)] + P_{x,y}^{(n)}(1)[1 + T_{x,y}^{(n)}(1)]}. \quad (26)$$

在每次迭代过程中,如果出现原本属于 0 类,但 $P_{x,y}^{(n+1)}(1) > P_{x,y}^{(n+1)}(0)$,且 $P_{x,y}^{(n+1)}(1) > p_{TH}$, p_{TH} 为设定的阈值,则将该像素由类 0 变为类 1,如原本属于 1 类,但 $P_{x,y}^{(n+1)}(0) > P_{x,y}^{(n+1)}(1)$,且 $P_{x,y}^{(n+1)}(0) > p_{TH}$ 则将该像素由类 1 变为类 0。循环迭代,直到没有像素发生所属类别的改变。

最终得到分类图像 $Class_{x,y}$, $Class_{x,y}$ 内各像素的值非 0 即 1。

对 $Class_{x,y}$ 中为 1 的像素进行 8 邻域连通域标号,得标号图

$$T_{label} = BW_{label}(Class_{x,y}), \quad (27)$$

BW_{label} 为 8 邻域连通域标号操作,根据 T_{label} 得到连通因子

$$C_{x,y} = n_{x,y} \times 0.02, \quad (28)$$

$n_{x,y}$ 为像素 (x,y) 所在连通域所包含像素个数。

这样最终的隶属度调整为

$$\mu_{x,y} = \begin{cases} 1, & Q_{x,y} > 0, Coe_{x,y} + 0.3Q_{x,y} \geq 1 \\ Coe_{x,y} + 0.3Q_{x,y}, & Q_{x,y} > 0, Coe_{x,y} + 0.3Q_{x,y} < 1 \\ 0, & Q_{x,y} \leq 0 \end{cases} \quad (29)$$

最终的锐化算法定义为

$$Z_{x,y}(\mu_{x,y}) = \begin{cases} G \otimes (F_{x,y} + \mu_{x,y} F_{x,y} \otimes T), & \mu_{x,y} > 0.4 \\ F_{x,y} + \mu_{x,y} F_{x,y} \otimes T, & \mu_{x,y} \leq 0.4 \\ F_{x,y}, & \mu_{x,y} = 0 \end{cases} \quad (30)$$

5 仿真结果

从图 1~5 中可以看出,拉普拉斯锐化方法对噪声有很大的增强,锐化后图像质量很差;利用本文算法,无论是在边缘锐化方面还是图像噪声的抑制都有比较好的效果。

为了客观评价处理后图像的质量,本文用峰值

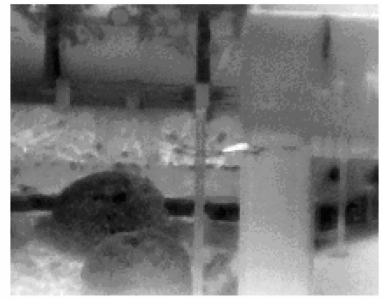


图 1 原始图像

Fig. 1 Original image

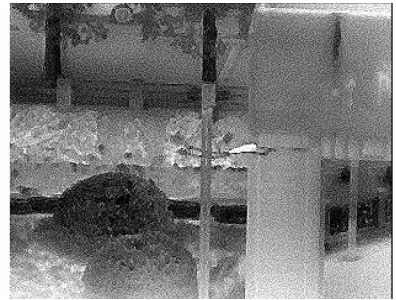


图 2 3×3 拉普拉斯锐化方法

Fig. 2 Laplace sharpening image



图 3 强细节区

Fig. 3 High-detail region

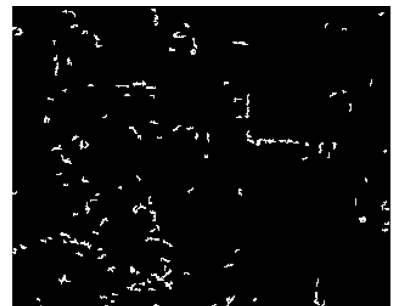


图 4 中等强度节区

Fig. 4 Median-detail region

信噪比来对图像进行评价。图像峰值信噪比反映处理后图像与原图像的差异。

计算图 1、图 2、图 5 的峰值信噪比 (PSNR) P_{SNR} , 计算公式如下:

$$P_{SNR} = 10 \cdot \lg\left(\frac{255^2}{M_{SE}}\right), \quad (31)$$



图 5 本文算法处理后效果

Fig. 5 The proposed algorithm's result

$$M_{SE} = \frac{\sum_{n=1}^{S_{frame}} (I_n - P_n)^2}{S_{frame}}, \quad (32)$$

式中 I_n 是原始图像第 n 像素值, P_n 是经过处理后第 n 个像素值, S_{frame} 是图像的像素数目, 如表 1 所示。

表 1 两种方法的峰值信噪比 (PSNR)

Table 1 Peak signal-to-noise ratio of the two algorithms

	Original image	3×3 Laplace method	the proposed algorithm
Peak signal-to-noise ratio	31.2451	15.7133	35.3711

以上数据可以看出, 本文算法方法在锐化边缘和抑制噪声上明显优于形态学方法和拉普拉斯锐化方法, 并且图像的边缘也得到了很好的增强。

6 结 论

由于马赫效应的影响, 人眼视觉主要对图像中各种边缘等突变成分感兴趣, 但如图 2 所示, 被增强后的噪声由于也具有高频突变的特点, 对人眼会形成强烈刺激, 严重影响视觉效果。采用本文算法处理后, 能够很好的对边缘进行锐化, 同时也抑制了噪声, 图像整体去除了模糊感, 明显地改善了视觉效果。从图像处理效果客观评价表也可以看出, 对原始红外图像进行其他边缘锐化处理, 其处理后的图像信噪比 (PSNR) 低于本文算法处理后的图像信噪比, 从图 5 也可以看出, 本文方法对不同幅度的噪声具有比较好的抑制作用, 说明本文提出的算法在进行边缘增强的同时能更好的抑制噪声。

参 考 文 献

1 Xie Mingguo, He Jianguang, Xu Zhongyou *et al.*. An unsharp masking technique for image enhancement with noise suppression [J]. *Multimedia Technology*, 2005, **2**: 76~80
 谢明果, 何剑光, 徐中佑等. 带噪声抑制的反锐化掩模图像增强算法[J]. *多媒体技术*, 2005, **2**: 76~80
 2 Li Shaoda, Yang Jia, Liu Hanhu. An improved method of adaptive fuzzy image enhancement [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(8): 1339~1343

李少达, 杨佳, 刘汉湖. 一种改进的自适应模糊图像增强方法 [J]. *中国图像图形学报*, 2007, **12**(8): 1339~1343
 3 Li Xiaoman, Lei Yingji. An image enhancing method based on wavelet transform and rough sets [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, **14**(6): 30~32
 李晓漫, 雷英杰. 小波变换和粗糙集的图像增强方法 [J]. *光电与控制*, 2007, **14**(6): 30~32
 4 Zhang Hailing, Wang dialin, Wu diansheng *et al.*. Application of rough sets theory to image enhancement processing [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, **36**(2): 254~257
 张海玲, 王家林, 吴建生等. 粗糙集理论在图像增强处理中的应用 [J]. *同济大学学报*, 2008, **36**(2): 254~257
 5 Zhang Ling, Huang Fenping, Zheng Enrang. Image enhancement based on rough sets and wavelet unsharp masking [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1285~1288
 张玲, 黄粉平, 郑恩让. 基于粗糙集与小波反锐化掩模的图像增强 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1285~1288
 6 Wang Gang, Xiao Liang, He Anzhi. Algorithm research of adaptive fuzzy image enhancement in ridgelet transform domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1184~1190
 王刚, 肖亮, 贺安之. 脊小波变换域模糊自适应图像增强方法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1184~1190
 7 Yang Lijun, Geng Wanzhen, Jiang Linzhe *et al.*. Simulation of a novel method for noise reduction in infrared imaging testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3): 321~326
 杨黎俊, 耿安祯, 姜玲珍等. 红外成像检测中一种新型噪声抑制方法的理论模拟 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(3): 321~326
 8 Yu Yong, Guo Lei. Ant colony search for edge extraction in noise image [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, **30**(6): 1271~1275
 于勇, 郭雷. 噪声图像中边缘提取的蚁群搜索算法 [J]. *电子与信息学报*, 2008, **30**(6): 1271~1275
 9 Wang Hongmei, Li Yanjun, Zhang Ke. An improved impulse noise filtering method [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2008, **19**(1): 107~110
 王红梅, 李言俊, 张科. 一种改进的图像中脉冲噪声滤除方法 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(1): 107~110
 10 Zhang Daming, Ni Youcong. Improved algorithm of mathematical morphological edge detection for noisy image [J]. *Computer Technology and Development*, 2007, **17**(9): 68~70
 张大明, 倪友聪. 噪声图像形态边缘检测的改进算法 [J]. *计算机技术与发展*, 2007, **17**(9): 68~70
 11 Dong Hongyan, Li Jicheng, Shen Zhenkan. Noisy image enhancement algorithm based on the contourlet transform [J]. *Signal Processing*, 2007, **23**(6): 836~840
 董鸿燕, 李吉成, 沈振康. 基于 Contourlet 变换的带噪声图像增强方法 [J]. *信号处理*, 2007, **23**(6): 836~840
 12 Wang Xianghui, Zeng Ming. A new metric for objectively assessing the quality of enhanced images based on human visual perception [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2008, **19**(2): 258~262
 王湘辉, 曾明. 基于视觉感知的图像增强质量客观评价算法 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(2): 258~262
 13 Fu Shujun, Ruan Qiuqi, Mu Chengpo *et al.*. Feature preserving bidirectional fuzzy flow for image sharpening [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(11): 2172~2175
 付树军, 阮秋其, 穆成坡等. 基于双向模糊扩散的保持特征的图像锐化 [J]. *电子学报*, 2007, **35**(11): 2172~2175
 14 Fu Shujun, Ruan Qiuqi, Mu Chengpo *et al.*. Feature preserving coupled bidirectional flow for edge sharpening and image enhancement [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, **31**(3): 530~535
 付树军, 阮秋其, 穆成坡等. 基于双向耦合扩散的保持特征的边缘锐化和图像增强 [J]. *计算机学报*, 2008, **31**(3): 530~535
 15 Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 866~869
 白俊奇, 陈钱. 基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 866~869