

# 基于小波前向后向扩散的红外图像降噪与边缘增强算法

倪超 李奇 夏良正  
(东南大学自动控制系 南京 210096)

**摘要:** 针对红外图像特点, 该文提出了一种基于小波前向后向扩散的红外图像降噪与边缘增强算法。小波前向后向扩散是建立在小波扩散理论的基础上, 其继承了小波扩散迭代降噪与边缘保持特性, 在此基础上实现了图像的边缘增强。为了克服传统小波扩散基于小波模值的边缘映射的不足, 该文利用小波模值与局部奇异性测度的联合概率分布对边缘映射进行初步估计, 结合几何约束进行修正, 获得准确的边缘映射, 并重新设计了小波前向后向扩散系数方程。实验证明算法能有效实现红外图像降噪的同时增强图像边缘。

**关键词:** 小波前向后向扩散; 红外图像; 图像降噪; 边缘增强

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2033-05

## Wavelet Forward and Backward Diffusion for Infrared Image Denoising and Edge Enhancement

Ni Chao Li Qi Xia Liang-zheng

(The Department of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** To achieve infrared image denoising and edge enhancement, a method based on wavelet forward and backward diffusion is introduced. Wavelet forward and backward diffusion is based on wavelet diffusion theory. It not only inherits iterative noise reduction and edge preserving features from wavelet diffusion, but also enhanced image edge at the same time. In order to solve the problem of using wavelet modulus, it uses both wavelet modulus and local regularity to get elementary edge map, then get accurate edge map with geometric consistency and redesign wavelet forward and backward diffusion equation. Experiment shows that the method can effectively realize infrared image denoising and edge enhancement.

**Key words:** Wavelet forward and backward diffusion; Infrared image; Image denoising; Edge enhancement

### 1 引言

与可见光图像相比, 红外图像具有对比度低、噪声大、边缘模糊等特点, 常用的降噪方法在降噪的同时导致边缘更加模糊, 不利于后续处理。因此针对红外图像的特点研究一种既能有效去除噪声, 又能很好保留与增强边缘等重要信息的处理方法是十分有意义的工作。

基于偏微分方程的非线性扩散技术是一种有效的图像降噪技术, 通常选用图像梯度作为边缘映射从而区分噪声与信号, 保留梯度较高的边缘区域, 平滑梯度较低的一致性区域, 在降低噪声的同时能有效保留图像细节。Shih 等人在文献[1]中证明非线性扩散方程可以转换为两带滤波器系统, 进而采用二进小波收缩过程进行求解, 文献[2]称此方法为小波扩散。小波扩散技术是小波技术与非线性扩散技术的融合, 继承了两者的优良特性(非线性扩散的迭代降噪与边缘保持的特性, 小波技术的多尺度特性与信噪分离特性), 是一种很有前途的图像降噪技术。

与非线性扩散类似, 小波扩散在大多数情况下都能取得令人满意的降噪效果, 然而对于那些对比度低、噪声大的红外图像, 当部分噪声信号的小波模值与图像信号的小波模值

大小相当时, 小波扩散中基于小波模值的边缘映射无法正确区分噪声与信号, 因此不能实现图像的有效降噪。本文在小波扩散基础上, 利用小波模值与局部奇异性测度的联合概率分布对边缘映射进行初步估计, 结合几何约束进行修正, 获得准确的边缘映射, 实现噪声与信号的有效区分。同时把前向后向扩散技术引入到小波扩散理论, 提出了小波前向后向扩散算法, 重新设计了前向后向扩散系数方程, 在红外图像降噪的同时, 实现了图像边缘的有效增强。

### 2 小波扩散

#### 2.1 非线性扩散

基于偏微分方程的非线性扩散技术最早是由 Perona 和 Malik<sup>[3]</sup>将热传导方程加以修正得以提出, 其在图像降噪领域的应用由来已久<sup>[3-5]</sup>。给定  $t$  时刻的含噪图像  $f(x, y, t)$ , 其各向异性非线性扩散方程(PM 方程)如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} f(x, y, t) &= \operatorname{div}[c(x, y, t) \nabla f(x, y, t)] \\ f(x, y, 0) &= f_0(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $\nabla$  为梯度算子,  $\operatorname{div}$  为散度算子,  $c(x, y, t) \geq 0$  为扩散系数。扩散系数  $c(x, y, t)$  通常由边缘映射  $\eta(x, y, t)$  以及扩散率方程  $g(\bullet)$  两部分组成, 合适的扩散系数可以在平滑噪声的基础

上有效保持细节,反之不仅不能有效降噪,而且还会破坏图像的原有特征。

## 2.2 二进小波变换

Mallat和Zhong<sup>[6]</sup>提出了一种具有平移不变性的冗余小波变换——二进小波变换,由于能够有效避免非线性变换引起的视觉形变,其在图像处理中应用广泛。给定二元平滑可微函数 $\theta(x,y)$ ,定义小波函数 $\psi^1(x,y)$ , $\psi^2(x,y)$ 以及尺度函数 $\phi(x,y)$ ,其中 $\psi^1(x,y) = \frac{\partial\theta(x,y)}{\partial x}$ , $\psi^2(x,y) = \frac{\partial\theta(x,y)}{\partial y}$ 。则图像 $f(x,y)$ 在尺度 $2^j$ 上的二进小波变换的小波与尺度系数分别为

$$W_j f(x,y) = \begin{bmatrix} W_j^1 f(x,y) \\ W_j^2 f(x,y) \end{bmatrix} = 2^j \nabla(f * \theta_j)(x,y) \quad (2)$$

$$S_j f(x,y) = f * \phi_j(x,y) \quad (3)$$

此时小波系数在尺度 $2^j$ 上的小波模值与方向角分别为

$$M^j f(x,y) = \sqrt{|W_j^1 f(x,y)|^2 + |W_j^2 f(x,y)|^2} \quad (4)$$

$$A_j f(x,y) = \arctan \left[ \frac{W_j^2 f(x,y)}{W_j^1 f(x,y)} \right] \quad (5)$$

由文献[6]可知当滤波器组满足完全重构条件:

$$\widehat{H}(u)\widehat{H}(v)\widehat{H}(u)\widehat{H}(v) + \widehat{K}(u)\widehat{L}(v)\widehat{G}(u) + \widehat{L}(u)\widehat{K}(v)\widehat{G}(v) = 1 \quad (6)$$

以下等式成立:

$$f(x,y) = (f(x,y) * (HH)) * (\widetilde{H} \widetilde{H}) + (f(x,y) * (GD)) * (KK) + (f(x,y) * (DG)) * (LL) \quad (7)$$

其中一维滤波器 $D$ 为 $\delta$ 函数,低通滤波器 $H$ 与高通滤波器 $G$ 实现二进小波的分解,低通滤波器 $\widetilde{H}$ ( $H$ 的共轭滤波器)以及两高通滤波器 $K$ 与 $L$ 实现二进小波的重构。

## 2.3 小波扩散

文献[1]证明了一维情况下非线性扩散方程可以转换为两带滤波器系统,进而采用二进小波收缩过程来求解。Yong Yue等采用类似的方法把二维非线性扩散方程转换为如下所示的两带滤波器系统:

$$f(x,y,t+1) = (f(x,y,t) * A_1) * A_2 + (p(x,y,t) \cdot (f(x,y,t) * B)) * I + (p(x,y,t) \cdot (f(x,y,t) * E)) * F \quad (8)$$

其中 $p(x,y,t) = 1 - c(x,y,t)$ ,滤波器 $\widehat{A}_1 \cdot \widehat{A}_2 = 1 - u^2 - v^2$ , $\widehat{B} = ju$ , $\widehat{I} = -ju$ , $\widehat{E} = jv$ , $\widehat{F} = -jv$ 。式(8)表明图像 $f(x,y)$ 首先由低通滤波器 $A_1$ 与高通滤波器 $B$ , $E$ 进行分解,用 $p(x,y)$ 对参数进行调整,最终由对应的低通滤波器 $A_2$ 与高通滤波器 $I$ , $F$ 进行重构。显然式(8)与式(7)有同样的形式,且 $\widehat{A}_1 \cdot \widehat{A}_2 + \widehat{B} \cdot \widehat{I} + \widehat{E} \cdot \widehat{F} = 1$ 满足二进小波滤波器组完全重构条件,因此与一维情况类似,二维非线性扩散方程也可以由此二进小波近似求解,称该近似过程为小波扩散。定义 $p(x,y,t) \leq 1$ 为小波扩散系数,其扩散性能同样也由边缘映射 $\eta(x,y,t)$ 以及扩散率方程 $g(\bullet)$ 决定。考虑到小波扩散与非线性扩散的相关性,文献[2]选取小波模值 $M^j f(x,y)$ 作为边缘映

射,小波扩散系数 $p(|\eta|) = 1 - g(|\eta|)$ ,其中 $g(|\eta|)$ 为非负单调递减函数且 $g(0) = 1$ 。如图1为三级小波扩散示意图,通常为了获得满意的降噪效果,小波扩散可以多次迭代。

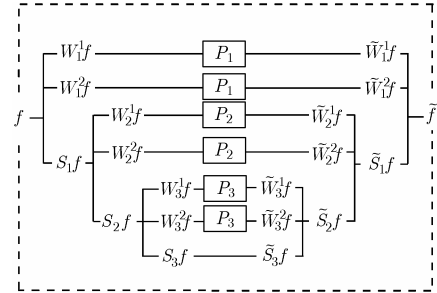


图1 三级小波扩散示意图

## 3 基于小波前向后向扩散的红外图像降噪与边缘增强

小波扩散可以看作是一种基于二进小波框架的非线性扩散,为了获得满意的处理结果,小波扩散的关键问题是选择合适的边缘映射以及扩散系数方程。

### 3.1 基于尺度、空间一致性的边缘映射的估计

文献[2]考虑到小波模值 $M^j f(x,y)$ 与 $|\nabla(\theta_j * f)(x,y)|$ 成正比,选取 $M^j f(x,y)$ 作为图像边缘映射。与图像梯度 $|\nabla f(x,y)|$ 相比,小波模值 $M^j f(x,y)$ 由于经过二次可微函数 $\theta(x,y)$ 平滑,抗噪性能有所提高。然而红外图像与一般光学图像相比具有对比度低、噪声大等特点,当部分噪声的小波模值与图像信号的小波模值大小相当时,采用小波模值作为边缘映射显然不能有效区分信号与噪声,因此本文提出了一种基于尺度、空间一致性的边缘映射。

#### 3.1.1 基于联合测度的边缘映射的初步估计

为了克服噪声的影响,采用联合测度对边缘映射进行初步估计。定义 $m_l^j = (\gamma_l^j, \alpha_l^j)$ ,作为边缘映射的测度,其中 $l$ 是位置索引, $\gamma_l^j, \alpha_l^j$ 分别表示 $j$ 尺度下位置 $l$ 处的小波模值与局部奇异性测度。文献[7]指出当图像被加性高斯噪声污染时,与噪声以及与边缘相关的小波系数都近似符合高斯分布,则对应小波模值 $M^j f(x,y)$ 可由瑞利分布近似,其中 $\sigma_{\text{noise}} \leq \sigma_{\text{edge}}$ 。

$$p(\gamma_l^j | \text{noise}) = \frac{\gamma_l^j}{[\sigma_{\text{noise}}^j]^2} e^{-\frac{(\gamma_l^j)^2}{2[\sigma_{\text{noise}}^j]^2}} \quad (9)$$

$$p(\gamma_l^j | \text{edge}) = \frac{\gamma_l^j}{[\sigma_{\text{edge}}^j]^2} e^{-\frac{(\gamma_l^j)^2}{2[\sigma_{\text{edge}}^j]^2}} \quad (10)$$

Lipschitz指数是常用的图像局部奇异性测度,然而李氏指数的计算却很繁琐,文献[8]提出了一种基于二尺度小波模值比的局部奇异性估计方法,其局部奇异性测度如下所示。

$$\alpha_j(x,y) \sim \log_2 \frac{M_{j+1}(x,y)}{M_j(x,y)} + 1 \quad (11)$$

文献[9]指出阶跃型边缘小波模值在不同尺度下都是相同的,规则信号的小波模值随着尺度减小而衰减,而噪声信号的小波模值却随着尺度增加而衰减,因此文献[8]的局部奇

异性测度能有效地区分边缘与噪声。为了获得  $\alpha_i^j$  的条件概率  $p(\alpha_i^j | \text{edge})$  与  $p(\alpha_i^j | \text{noise})$ ，选取若干红外图像分别加入不同方差的高斯白噪声进行统计仿真，统计结果表明条件概率  $p(\alpha_i^j | \text{edge})$  与  $p(\alpha_i^j | \text{noise})$  不随噪声方差变化而变化，其概率峰值分别位于 1 与 0 附近，如图 2 所示。

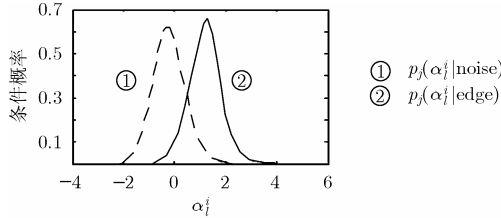


图 2  $p_j(\alpha_i^j | \text{edge})$  与  $p_j(\alpha_i^j | \text{noise})$  的分布曲线

为了计算的简便，不妨假设  $\gamma_i^j$  与  $\alpha_i^j$  二者的条件概率是独立的，则

$$p(m_i^j | \text{edge}) = p(\gamma_i^j | \text{edge}) \cdot p(\alpha_i^j | \text{edge}) \quad (12)$$

$$p(m_i^j | \text{noise}) = p(\gamma_i^j | \text{noise}) \cdot p(\alpha_i^j | \text{noise}) \quad (13)$$

于是由全概率公式得

$$\begin{aligned} p(m_i^j) &= \omega_{\text{edge}}^j p(m_i^j | \text{edge}) + (1 - \omega_{\text{edge}}^j) p(m_i^j | \text{noise}) \\ &= \omega_{\text{edge}}^j p(\gamma_i^j | \text{edge}) p(\alpha_i^j | \text{edge}) + (1 - \omega_{\text{edge}}^j) \\ &\quad \cdot p(\gamma_i^j | \text{noise}) p(\alpha_i^j | \text{noise}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $0 \leq \omega_{\text{edge}}^j \leq 1$  为与边缘相关的联合测度的先验概率。

为了获得参数  $\sigma_{\text{noise}}^j$ ， $\sigma_{\text{edge}}^j$  和  $W_{\text{edge}}^j$ ，最大化式(15)：

$$\ln L = \sum_{l \text{ in image}} \ln(p(m_l^j)) \quad (15)$$

显然式(15)的数值求解比较困难，但是由于小波系数的实际分布特性，与噪声相关的系数在子带中占绝大多数，含噪图像的小波模值  $M^j f(x, y)$  直方图很接近噪声相关系数的模值直方图，因此可以通过含噪图像的模值直方图的峰值计算  $\sigma_{\text{noise}}^j$  (瑞利分布曲线在  $\gamma_i^j = \sigma_{\text{noise}}^j$  时达到最大值)。此时式(15)的计算量大为降低，一旦获得全部参数，由贝叶斯定理可得：

$$\eta_i^j = p(\text{edge} | m_l) = \frac{\omega_{\text{edge}}^j p(m_l | \text{edge})}{\omega_{\text{edge}}^j p(m_l | \text{edge}) + (1 - \omega_{\text{edge}}^j) p(m_l | \text{noise})} \quad (16)$$

式(16)是一种小波系数边缘发生概率的置信度测量，可以作为边缘映射的初步估计。

**3.1.2 基于几何约束的边缘映射修正** 为了获得更加准确的边缘映射以及进一步降低噪声的影响，必须增加几何约束。通常边缘在图像中并不是孤立的，会形成轮廓线等几何特征。如果某  $M^j f(x, y)$  沿轮廓线方向有较小的边缘映射，则此  $M^j f(x, y)$  也应有较小的边缘映射，反之亦然。为了获得几何约束性能，首先把梯度方向角量化为  $0^\circ$ ， $45^\circ$ ， $90^\circ$ ， $135^\circ$ ，则此时轮廓角  $B_j[x, y]$  垂直于方向角  $A_j f(x, y)$ ，采用如下更新策略：

$$\eta_j^{\text{geom}}[x, y] = \begin{cases} \left[ \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N \eta^j[x+i, y]^r \right]^r, & B_j[x, y] = 0^\circ \\ \left[ \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N \eta^j[x+i, y+i]^r \right]^r, & B_j[x, y] = 45^\circ \\ \left[ \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N \eta^j[x, y+i]^r \right]^r, & B_j[x, y] = 90^\circ \\ \left[ \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N \eta^j[x+i, y+i]^r \right]^r, & B_j[x, y] = 135^\circ \end{cases} \quad (17)$$

当  $r = 1$  时，式(17)退化成为简单的均值函数；当  $r < 1$  时，小的边缘映射具有更大的权重；当  $r > 1$  时，小的边缘映射具有更小的权重。本文为了进一步克服噪声的影响，选取  $r = 0.8$ 。

### 3.2 小波前向后向扩散

小波扩散是非线性扩散的二进小波近似，其小波扩散系数  $p(x, y) \leq 1$  (对应非线性扩散的扩散系数  $C(x, y) \geq 0$ )，显然小波扩散通过小波系数收缩实现图像降噪。Gilboa等人认为在局部范围内使用逆扩散过程 ( $C(x, y) < 0$ ) 不会破坏式(1)解的稳定性，而且可以达到图像增强的目的，提出了前向后向扩散方程<sup>[5]</sup>，其基本扩散方程仍同式(1)，扩散系数方程如下所示。

$$C(|\eta|) = \frac{1}{1 + (|\eta|/kf)^n} - \frac{\alpha}{1 + ((|\eta| - kb)/w)^{2m}} \quad (18)$$

通常选取参数  $[kf, kb, w] = [2, 4, 1] \times \text{mean}(|\eta|)$ ， $n=4$ ， $m=2$ ， $\alpha = 0.2$ 。当  $|\eta|$  较小时，扩散系数  $C(|\eta|)$  取值较大，多平滑扩散；当  $|\eta| \in [kb - w, kb + w]$  时，扩散系数  $C(|\eta|)$  取负值，相当于高斯去卷积过程，实现图像边缘增强；当  $|\eta|$  较大时，少平滑扩散保护边缘。由于前向后向扩散方程与 PM 扩散方程具有同样的基本形式，因此前向后向扩散方程也可以采用二进小波方法近似求解，称该小波扩散过程为小波前向后向扩散。显然小波前向后向扩散是小波扩散的一种特例，不仅继承了小波扩散良好的收缩降噪特性，而且在局部范围小波扩散系数  $p(|\eta|) > 1$  ( $C(|\eta|) < 0$ )，在降噪的同时实现图像边缘的增强。

扩散系数的选取很大程度上决定了图像处理的效果，由于光学图像的灰度范围为  $[0, 255]$ ，图像梯度作为边缘映射变化范围较大，式(18)扩散系数方程中各项分子、分母中的常数项为 1，使得扩散系数在噪声区域与边缘区域明显不同，从而有效实现图像的噪声抑制与边缘增强。然而本文选取的边缘映射实质上是一种边缘置信度概率，其取值范围  $[0, 1]$ ，此时若扩散系数方程中的常数项仍为 1，则扩散系数在噪声区域与边缘区域差异很小，难以实现噪声抑制与边缘增强的目的，因此引入  $u(\eta) = \text{mean}(\eta)$  取代常数项 1 更能满足图像处理的要求，构造扩散系数方程如下所示：

$$C(\eta) = \frac{u(\eta)}{u(\eta) + (\eta/kf)^n} - \frac{\alpha u(\eta)}{u(\eta) + ((\eta - m(\eta))/w)^{2m}} \quad (19)$$

其中  $m(\eta) = \max(\eta)$ 。本文选取  $[kf, w] = [2, 1] \times \text{mean}(|\eta|)$ ,  $n = 4, m = 2, \alpha = 0.2$ 。式(19)对应小波扩散系数  $p(\eta) = 1 - C(\eta)$  曲线如图 3 所示, 其中  $p(k_0) = 1$ 。当  $\eta$  较小时, 小波扩散系数  $p(\eta)$  取值较小, 快速收缩降噪; 当  $\eta$  较大且  $\eta < k_0$  时, 小波扩散系数  $p(\eta)$  接近于 1, 保护边缘与细节; 当  $\eta \geq k_0$  时, 由于本文边缘映射的良好特性, 变量  $m(\eta) = \max(\eta)$  使得小波扩散系数  $p(\eta) \geq 1$  非线性单调增加, 不仅不会放大图像噪声, 而且能够更加有效的增强图像边缘。

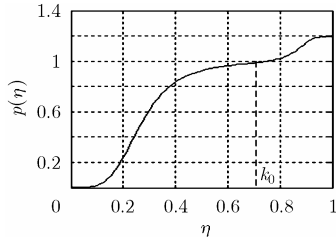


图 3 小波前向后向扩散系数曲线

3.3 红外图像降噪与边缘增强算法步骤

- (1) 对红外图像进行二进小波分解, 分别计算  $M^j f(x, y)$  与方向角  $A_j f(x, y)$ ;
- (2) 计算参数  $\sigma_{\text{noise}}^j$ 、 $\sigma_{\text{edge}}^j$  和  $W_{\text{edge}}^j$ , 然后利用式(16)获得初步边缘映射  $\eta_j^i$ ;
- (3) 应用式(17)几何约束更新策略对边缘映射进行修正, 获得准确的边缘映射  $\eta_j^{\text{geom}}[x, y]$ ;
- (4) 利用式(19)分别计算不同尺度位置的扩散系数  $C(\eta)$  从而获得对应小波扩散系数  $p(\eta)$ , 对细节系数  $W_j^d f(x, y)$  进行规格化调整:  $W_{\text{new}j}^d f(x, y) = p(\eta)W_j^d f(x, y)$  ( $d = 1, 2$ );
- (5) 利用规格化调整后的小波系数进行二进小波逆变换, 实现图像降噪与边缘增强。

本文算法作为一种迭代算法可以多次重复以上步骤, 从而最终获得满意的处理结果。

4 仿真结果分析

算法的目的是抑制红外图像噪声的同时保持与增强图像边缘, 分别采用加入高斯白噪声的红外坦克与直升机图像进行仿真实验, 并与PM扩散方法、小波扩散方法<sup>[2]</sup>相比较。本文采用二次样条二进小波实现图像的分解重构, 对所有图像采用图 1 所示的三级小波扩散结构进行处理。表 1 为红外坦克图像降噪结果, 此时本文算法选取的小波扩散系数  $p(\eta) \leq 1$ , 即只进行前向扩散平滑噪声, 当  $p(\eta) > 1$  时, 置小波扩散系数  $p(\eta) = 1$ 。从表 1 可以看出当噪声信号较弱时 3 种方法降噪性能大体相当, 但随着噪声信号的增强, PM 扩散方法由于采用图像梯度作为边缘映射, 无法正确区分边

缘与噪声, 降噪性能明显降低。小波扩散由于结合小波信噪分离特性, 利用小波模值作为边缘映射, 降噪性能优于PM扩散, 本文算法综合利用小波尺度空间一致性信息获得更为准确的边缘映射, 降噪性能进一步提高。图 4, 图 5 为采用完整前向后向扩散系数方程式(19)与PM扩散法、小波扩散法进行对比实验的处理结果。对比实验 1 如图 4 所示, 4(a)为加入方差  $\sigma = 0.01$  高斯白噪声的红外坦克图像; 4(b)为PM扩散法迭代 10 次的处理结果; 4(c) 为小波扩散法迭代 3 次的处理结果; 4(d) 为本文算法迭代 3 次的处理结果。图 4(b) 图像噪声明显; 图 4(c)虽无明显噪点, 但图像有朦胧感, 边缘模糊; 图 4(d)红外坦克炮管、车身以及履带部分边缘清晰, 无明显噪点, 优于图 4 (b), 4(c)。对比实验 2 为加入方差  $\sigma = 0.02$  高斯白噪声的红外直升机图像的处理结果, 如图 5 所示, 随着噪声信号的增强, 此时PM扩散法与小波扩散法的结果图像噪声更加明显, 小波扩散法的结果图像更加模糊, 相比较而言本文算法仍保持了较好的降噪与边缘增强性能。从仿真结果可以看出本文算法由于采用新颖准确的边缘映射, 在不同噪声方差条件下都实现了噪声与边缘的有效区分, 降噪性能优于PM扩散法以及小波扩散法, 在此基础上引入前向后向扩散系数方程, 提出了小波前向后向扩散技术, 在降噪的同时增强了图像边缘是一种有效的红外图像降噪与边缘增强算法, 然而算法运行时间相对较长, 在P4 2.4G 内存 512M机器上运行matlab程序对大小为  $256 \times 256$  的红外图像进行处理, 每次迭代运行时间大约 35s, 时间主要花费在对边缘映射的估计, 相信采用编译型语言进行实现, 算法的执行效率会有很大提高。

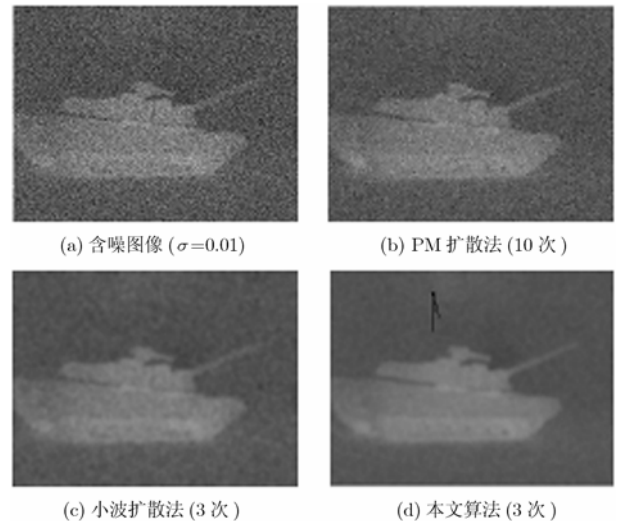


图 4 对比实验 1: 红外坦克图像处理结果

表 1 各种方法处理的 SNR

	$\sigma = 0.001$	$\sigma = 0.005$	$\sigma = 0.01$	$\sigma = 0.02$
含噪坦克图像	21.3165	14.3668	11.3429	8.3840
PM 扩散(10 次)	33.6312	25.4663	16.8026	10.3872
小波扩散(3 次)	33.9453	29.8680	26.7254	24.0971
本文算法(3 次)	33.9782	30.8094	28.9851	27.6789

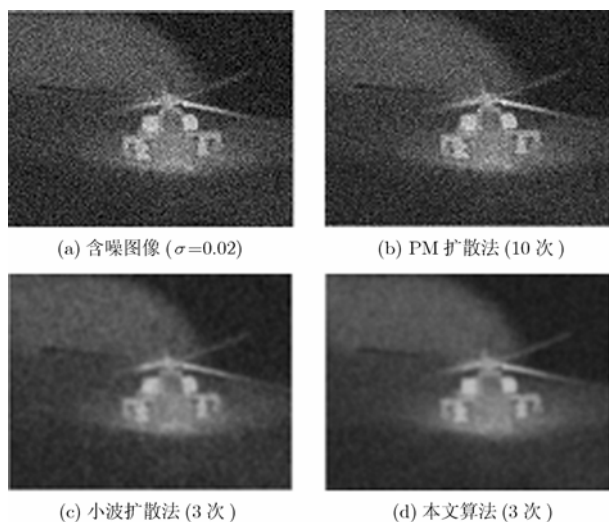


图5 对比实验2: 红外直升飞机图像处理结果

## 5 结束语

针对红外图像特点, 本文提出了一种基于小波前向后向扩散的红外图像降噪与边缘增强算法。小波前向后向扩散是建立在小波扩散理论的基础上, 其不仅继承了小波扩散良好的降噪特性与边缘保持特性, 而且同时实现了图像边缘的增强。为了克服传统小波扩散基于小波模值的边缘映射的不足, 算法利用小波模值与局部奇异性测度的联合概率分布对边缘映射进行初步估计, 结合几何约束进行修正, 获得准确的边缘映射, 重新设计了小波扩散前向后向扩散系数方程。实验证明本文算法不仅实现了红外图像降噪, 而且有效增强了图像边缘, 是一种有效的红外图像降噪与边缘增强算法。

## 参考文献

- [1] Arthur Chun-Chieh Shih, and Hong-Yuan Mark Liao. A new iterated two-band diffusion equation: theory and its application[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, 12(4): 466-476.
- [2] Yue Y, Croitoru M M, and Bidani A *et al.* Nonlinear

multiscale wavelet diffusion for speckle suppression and edge enhancement in ultrasound images[J]. *IEEE Trans. on Medical Imaging*, 2006, 25(3): 297-311.

- [3] Perona P and Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell.* 1990, 12(7): 629-639.
- [4] Acton S T. Edge enhancement of infrared imagery by way of the anisotropic diffusion pyramid[C]. *International Conf. on Image Processing 1996*, Lausanne, Switzerland, 16-19 Sep, 1996: 865-868.
- [5] Gilboa G, Sochen N A, and Zeevi Y. Forward and backward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 11(7): 689-703.
- [6] Mallat S and Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. *IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1992, 14(7): 710-732.
- [7] Scharcanski J, Jung C R, and Clarke R T. Adaptive image denoising using scale and space consistency [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 11(9): 1092-1101.
- [8] Zhong Junmei and Ning Ruola. Image denoising based on wavelets and multifractals for singularity detection[J]. *IEEE Trans. on Image Pprocessing*, 2005, 14(10): 1435-1447.
- [9] Hsung T C, Lun D P K, and Siu W C. Denoising by singularity detection[J]. *IEEE Trans. on Signal Process*, 1999, 41(11): 3139-3144.

倪超: 男, 1979年生, 博士生, 从事红外目标图像的跟踪识别方面的研究。

李奇: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事过程控制、模式识别与智能系统方面的研究。

夏良正: 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机视觉方面的研究。