

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **5**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年5月 第17卷 第5期(总第193期)

目次

综述

- 中国图像工程:2011 章毓晋(603)
- 植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展 田原,赵春江,陆声链,郭新宇(613)

图像处理和编码

- 高位有效位概率算术解码的图像密写改进算法 马丽红,吕先明,高小满(621)
- 滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法 熊波,尹周平(628)
- 提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中的应用 范有臣,李迎春,韩意,张来线(635)

图像分析和识别

- 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法 张桂梅,周明明,马珂(641)
- 均衡化特征匹配的非刚体细胞形态跟踪 陈莹,艾春璐(648)
- 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测 王志衡,刘红敏(656)
- 改进极化白化滤波的边缘检测 邓少平,张继贤,李平湘,黄国满(665)
- 联合特征在行人检测中的应用 杨阳,杨静宇(671)
- Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取 范春年,张福炎(676)

图像理解和计算机视觉

- 保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 蒋建国,郝世杰,郭艳蓉,詹曙,李鸿(682)
- 局部颜色映射的彩色夜视算法 钱小燕,张天慈,王帮峰,黄圣国(689)
- 结合分支定界法和线性规划的摄像机位姿估计 马文娟(694)

金字塔评分改进主方向模板匹配的实时目标检索 洪朝群,朱建科,李娜,卜佳俊,陈纯(700)

计算机图形学

类曲率在曲线相似性判定中的应用 于昊,赵乃良,陈小雕(707)

虚拟现实与增强现实

人机系统中视域评估的可视化 李倩,吉晓民,林文周(715)

遥感图像处理

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪 王相海,李放,王爽(721)

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价 孟天佑,汪云甲(729)

地理信息技术

点要素扇形缓冲区的设计与应用 侯景伟,孔云峰,张迪,吕可文(740)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第5期

2012年5月16日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 中国图象图形学学会
 北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
 北京9718信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn
 电话:010-68407995 010-82614429
 网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第0346号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京399信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail:jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 5 May 2012

Contents

Review

- Image engineering in China: 2011 Zhang Yujin (603)
- Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves
..... Tian Yuan, Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu (613)

Image Processing and Coding

- Most significant bits probability arithmetic decoding for improved image steganography
..... Ma Lihong, Lv Xianming, Gao Xiaoman (621)
- Fast non-local means for image de-noising on moving average and modified weight function Xiong Bo, Yin Zhouping (628)
- Weakening of smoke for homomorphic filtering Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, Zhang Laixian (635)

Image Analysis and Recognition

- Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke (641)
- Non-rigid cell contour tracking method for balanced feature matching Chen Ying, Ai Chunlu (648)
- Automatically detecting position and size of blob features in images Wang Zhiheng, Liu Hongmin (656)
- Improved polarimetric whitening filter for edge detection Deng Shaoping, Zhang Jixian, Li Pingxiang, Huang Guoman (665)
- Pedestrian detection based on compound feature Yang Yang, Yang Jingyu (671)
- Illumination invariant extraction on Gabor phase Fan Chunnian, Zhang Fuyan (676)

Image Understanding and Computer Vision

- Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model
..... Jiang Jianguo, Hao Shijie, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong (682)
- Color night vision algorithm based on local color mapping ... Qian Xiaoyan, Zhang Tianci, Wang Bangfeng, Huang Shengguo (689)
- Camera pose estimation using branch and bound method with linear programming Ma Wenjuan (694)
- Real-time object retrieval with dominant orientation template matching improved by pyramid scoring
..... Hong Chaoqun, Zhu Jianke, Li Na, Bu Jiajun, Chen Chun (700)

Computer Graphics

- Quasi-curvature and its application in similarity measurement of curves
..... Yu Hao, Zhao Nailiang, Chen Xiaodiao (707)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Visualization of the visual range assessment in man-machine system Li Qian, Ji Xiaomin, Lin Wenzhou (715)

Remote Sensing Image Processing

- Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband
..... Wang Xianghai, Li Fang, Wang Shuang (721)
- Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality Meng Tianyou, Wang Yunjia (729)

Geoinformatics

- Design and applications of sector buffers for point feature
..... Hou Jingwei, Kong Yunfeng, Zhang Di, Lv Kewen (740)

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)05-0721-08

论文引用格式: 王相海, 李放, 王爽. 小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 721-728

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪

王相海^{1,2,3}, 李放¹, 王爽¹

1. 辽宁师范大学计算机与信息技术学院, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室, 大连 116029;

3. 苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室, 苏州 215006

摘要: 针对小波阈值法在去除遥感图像高斯噪声时, 所存在的由于过度“扼杀”小波系数而引起的模糊边缘问题, 以及 P-M 模型通常会使得图像的灰度趋于分段常量而产生所谓的“块状”效应问题。提出小波域偏微分方程 (PDE) 遥感图像去噪模型, 该模型通过对遥感图像进行小波分解, 保持低频子带信息, 而只对含有噪声、图像边缘的高频子带进行基于子带方向特性的非线性异性扩散, 使模型在有效去除高斯噪声的同时, 能够很好地保护遥感图像中的边缘特征和细节纹理信息, 避免了去噪后的结果图像出现分段常量现象。实验结果表明, 对于相同的遥感图像高斯噪声, 基于所提出混合模型的去噪图像的 PSNR 较基于类零树的 Bayes 阈值法和 P-M 模型提高了 1~2dB。

关键词: 遥感图像; 小波方向子带; 偏微分方程; P-M 模型; 高斯噪声

Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband

Wang Xianghai^{1,2,3}, Li Fang¹, Wang Shuang¹

1. College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

3. Provincial Key Laboratory for Computer Information Processing Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China

Abstract: The noise analysis and elimination in remote sensing images has attracted considerable attention, and has become an important research field for remote sensing image processing. In this paper, we propose a wavelet threshold method to de-noise the Gaussian noise in remote sensing image to make the edge fuzzy causing by over the existence of the “strangulation” of the wavelet coefficients, as well as P-M model usually tends to make the image gray sub-constant, resulting the so-called “massive” effect problem. This paper proposes a new remote sensing image denoising model based on wavelet partial differential equations (PDE) to address the above mentioned issue. This model decomposes remote sensing images by wavelets and maintain the low-frequency subband information. Only with noise and the edge’s high-frequency sub-band based on sub-band directional characteristics of the nonlinear anisotropic diffusion, this model can remove Gaussian noise well and, at the same time, can also protect the edge features and details of remote sensing image, and avoids to appear the piecewise constant phenomenon. Experimental results show that our model gains 1~2dB higher PSNR than the class of zero-tree based on Bayes model threshold and P-M model.

Key words: remote sensing image; wavelet directional subband; partial differential equation; P-M model; gaussian noise

收稿日期: 2011-05-10; 修回日期: 2011-11-17

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(20102123); 辽宁“百千万人才工程”项目(2008921036); 南京邮电大学图像处理与图像通信江苏省重点实验室开放基金项目(LBEK2010003); 计算机软件新技术国家重点实验室开放基金项目(KFKT2011B11)

第一作者简介: 王相海, (1964—), 男, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 1999 年在吉林大学获得计算数学专业博士学位, 主要研究领域为多媒体智能信息处理。E-mail: xhwang@lnu.edu.cn

0 引言

遥感图像在成像过程中所涉及的相干微波源照射及众多的电磁波相互干扰等复杂因素通常使所生成的图像包含噪声,这种噪声对遥感图像的可读和辨析产生很大的影响,因而一直以来如何有效地去除、评估和分析遥感图像的噪声成为遥感图像处理的一个研究热点^[1-3]。遥感图像的噪声主要由电噪声和光学噪声组成^[2],电噪声泛指热噪声、散粒噪声等,而光学噪声则指因结构引起的空间随机不均匀噪声,它主要由周期性噪声和高斯噪声(加性噪声)构成,其中周期性噪声一般可以由频域变换滤波有效地消除;对高斯噪声,传统的去噪方法有中值滤波、同态滤波和逆滤波等^[4-7],它们在一定程度上可以去除高斯噪声,但具有一个共同的弱点是在去噪的同时,会使图像的边缘模糊化,或使图像的细节纹理信息丢失。

近年来,基于小波分析(WA)和偏微分方程(PDE)两种数学工具的图像去噪方法受到关注并得到了一定的发展。前者最为典型的当推基于小波域的“阈值法”,该类方法主要有通用阈值法^[8]、极值阈值法^[9]、Stein 无偏风险阈值法^[10]和贝叶斯阈值法^[11-13]等,其中通用阈值法和极值阈值法具有简单快速的特点,但二者均存在着“过扼杀”小波系数的倾向;Stein 无偏风险阈值法是一种基于 Stein 无偏似然估计原理的自适应阈值选择,该方法整体上对小波系数存在着“过保留”倾向;贝叶斯阈值法是在假设图像的小波系数服从广义高斯分布的基础上,利用概率模型来确定最小化平均风险估计值,通常能够取得较为理想的去噪效果。但传统方法中所估计的噪声方差很难统一适用于子带中的每一个窗口。考虑到这个问题,文献^[13]提出一种基于“类零树”结构的 Bayes 阈值法,该方法首先通过 Bayes 阈值去噪法去除粗尺度内的噪声,并定位次外层子带中的噪声位置,然后利用类零树结构估计最外层噪声的分布,并进行去噪处理。该方法考虑了图像小波子带尺度内和尺度间系数的相关性,在一定程度上提高图像去噪的效果。但是,该方法在去噪的过程中需要将模块内的阈值与预先设定的阈值进行比较,同样也存在着过度“扼杀”小波系数的倾向。近年来,基于 PDE 的图像去噪方案因其所具有的局部

自适应特性和模型建立的灵活性而成为继 WA 工具之后的另一类新型的数学工具,其中具有开创性的图像去噪模型是 P-M 非线性扩散方程^[14-15]。该模型首次利用各向异性扩散方程,将图像的去噪和边缘检测问题统一进行考虑,在区域内和目标边缘处采用不同的平滑策略,使之在区域内加速平滑,而在区域交界处抑制平滑,从而在一定程度上自适应地实现了图像的平滑和边缘的增强。然而,随后的研究发现该方程具有一种“病态”特性^[16],同时对图像中孤立强噪声和强边缘处的噪声不是很有效^[17]。此外,由于其是二阶 PDE,处理过程是使图像的一阶偏微分趋于 0 来达到在扩散的过程中图像的边缘位置扩散减弱的目的,这样在经过若干次的迭代后,图像的灰度会趋于分段常量,从而产生所谓的“块状”效应,并且这种“块状”效应随着迭代次数的增加而增强。之后人们对该方程进行了一系列的改进,文献^[18]提出一种“纯粹的”各向异性扩散方程,该模型对诸如椒盐类的孤立强噪声具有较好的去除效果,但在平滑区域因过度扩散而会产生阶梯效应;文献^[19]针对低阶 PDE 所存在的平滑区域过度扩散而易产生阶梯效应的缺点,提出了一种四阶 PDE 模型的改进算法,在一定程度上保护了一些细小的纹理信息并恢复了平滑区域,然而该算法在去噪效果和图像边缘信息的保护等方面还有待进一步改进。

首先对 P-M 非线性扩散模型进行了分析,针对其迭代次数过多的弱点,构建了一个新的基于对数的扩散函数,该扩散函数较传统的 P-M 扩散函数具有更慢的趋于 0 速度;同时对噪声小波系数的分布情况进行了讨论,在此基础上提出了一种新的基于小波变换子带方向性特征的 PDE 遥感图像去噪模型。该模型采用所提出的扩散函数,并根据噪声信息在小波系数中的分布特点,对遥感图像的高频细节子带进行基于方向性的非线性异性扩散。其在有效去除高斯噪声地同时,能够很好地保护遥感图像中的边缘特征和细节纹理信息,并且由于该模型具有较 P-M 模型较少的迭代次数,从而保证了在有效地去除图像噪声的同时避免图像产生“块状”效应,取得了较基于类零树的 Bayes 阈值法和 P-M 模型扩散法更好的去噪效果。实验结果验证了模型的有效性。

1 P-M 模型分析

P-M 模型的基本思想是采用非线性的各向异性扩散方程进行去噪,并构造一种与梯度成反比的扩散函数 $f(x) = k^2/(x^2 + k^2)$ (其中 k 为阈值),使其在图像边缘处减慢扩散速度,在平滑处加快扩散速度,进而在去噪的同时,较好地保持边缘细节。

设 u_0 表示原始图像, u 为变化中的图像, ∇u 是图像像素的梯度, $\zeta = \nabla u/|\nabla u|$ 为梯度方向上的单位向量, η 为与 ζ 垂直的切线向量,则有

$$\begin{cases} \zeta = \frac{1}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \\ \eta = \frac{1}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \begin{pmatrix} -u_y \\ u_x \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

进一步,令 $u_{\zeta\zeta}$ 表示 u 沿着边缘梯度方向的方向导数, $u_{\eta\eta}$ 表示 u 沿着边缘切线方向的方向导数,则有

$$\begin{cases} u_{\zeta\zeta} = \frac{u_x^2 u_{xx} + 2u_x u_y u_{xy} + u_y^2 u_{yy}}{u_x^2 + u_y^2} \\ u_{\eta\eta} = \frac{u_x^2 u_{yy} - 2u_x u_y u_{xy} + u_y^2 u_{xx}}{u_x^2 + u_y^2} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得

$$u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = u_{xx} + u_{yy} \quad (3)$$

P-M 的扩散模型为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \text{div}[f(|\nabla u|) \nabla u] = \\ &= \frac{\partial}{\partial x}[f(|\nabla u|) u_x] + \frac{\partial}{\partial y}[f(|\nabla u|) u_y] = \\ &= \frac{\partial f(|\nabla u|)}{\partial(|\nabla u|)} \cdot \frac{\partial(|\nabla u|)}{\partial x} u_x + \\ &= \frac{\partial f(|\nabla u|)}{\partial(|\nabla u|)} \cdot \frac{\partial(|\nabla u|)}{\partial y} u_y + \\ &= f(|\nabla u|) (u_{xx} + u_{yy}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\text{div}[\cdot]$ 表示散度算子。再令

$$\frac{\partial f(|\nabla u|)}{\partial(|\nabla u|)} = f'(|\nabla u|),$$

则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= f'(|\nabla u|) \left[\left(\frac{\partial(|\nabla u|)}{\partial x} \right)_x u_x + \left(\frac{\partial(|\nabla u|)}{\partial y} \right)_y u_y \right] + \\ &= f(|\nabla u|) (u_{xx} + u_{yy}) = \\ &= |\nabla u| f'(|\nabla u|) u_{\zeta\zeta} + f(|\nabla u|) (u_{xx} + u_{yy}) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(3)得

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= |\nabla u| f'(|\nabla u|) u_{\zeta\zeta} + \\ &= f(|\nabla u|) (u_{\zeta\zeta} + u_{\eta\eta}) \end{aligned} \quad (6)$$

将扩散函数 $f(|\nabla u|) = \frac{k^2}{k^2 + |\nabla u|^2}$ 代入式(6),有

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{k^2}{k^2 + |\nabla u|^2} u_{\eta\eta} + \\ &= \frac{k^2}{k^2 + |\nabla u|^2} \cdot \frac{k^2 - |\nabla u|^2}{k^2 + |\nabla u|^2} u_{\zeta\zeta} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知,当 $k \neq |\nabla u|$ 时,即在 $|\nabla u|$ 值较小的地方,P-M 模型的扩散是沿着边缘的梯度方向和沿着边缘的切线方向同时进行的,因此具有较强的去噪能力;另一方面,在 $u_{\zeta\zeta}$ 前的系数存在着一种可能,就是当 $k = |\nabla u|$ 时,系数为 0,而在 $u_{\eta\eta}$ 前的系数不为 0,这就意味着 P-M 模型在图像去噪过程中,在 $|\nabla u|$ 值较大的地方,即图像的边缘处,由于图像中梯度方向通常即为其边缘方向,这样在图像去噪过程中,梯度方向就不进行扩散,而只会在边缘的切线方向进行扩散,因此就会在一定程度上保护图像的边缘信息,把由于扩散而对图像细节造成的伤害减到最低。而对于遥感图像,其包含的数据量大、稠密,且纹理丰富,所以当 k 值过大时,通常会使得去噪过程的迭代次数增多,从而产生“块状”效应;而 k 值过小又会影响图像的去噪效果。基于此,本文提出一种基于新扩散函数的非线性异性扩散模型,该模型能够在选取较小 k 值的情况下保证了遥感图像的去噪效果。

2 噪声小波系数的分布特性分析

图像经小波变换后的系数存在着 3 类相关性,即尺度内的相关性、尺度间的相关性以及尺度内和尺度间同时所存在的相关性^[13,20]。其中第 1 类尺度内的相关性表现为同一子带内的小波系数具有聚集特性;第 2 类尺度间的相关性表现为不同尺度下同一个方向的系数之间的关联性,即一个系数与其父系数之间是相关的;第 3 类尺度内和尺度间同时所存在的相关性是指系数不仅与其在同一个子带内的系数相关联,而且同时还与其父系数相关联。上述这种系数间的关联特性可通过“互信息”来度量,并且 3 类相关性的互信息由强至弱分别为第 3 类、第 1 类和第 2 类。此外,文献

[13]对包含高斯噪声的图像进行了三级小波分析,并对高斯噪声小波系数的分布情况进行了统计分析,发现大约有96%的噪声系数分布在最外两层的细尺度子带中。进一步,对图像小波分解后最外两层子带中噪声的分布规律进行了统计,发现若高层子带中位置 (i, j) 处的系数是高斯噪声系数,其对应同方向细节子带中位置 $(2i, 2j)$ 、 $(2i+1, 2j)$ 、 $(2i, 2j+1)$ 和 $(2i+1, 2j+1)$ 处的4个系数同时也为噪声点的概率为93%,并称这种分布模型为“类零树”结构。

3 新模型的建立

3.1 新扩散函数的构造

对文献[14]中所给出的P-M模型的扩散函数进行分析可以看出,扩散函数 $f(x)$ 为正的非增函数, $xf(x)$ 为非减函数,且有 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$ 。并且 $f(x)$ 的选取原则是使得在图像梯度较大的地方扩散较小,而在梯度较小的地方扩散较大,即 $f(x)$ 能够随着 x 的增大而减小,随着 x 的减小而增大,从而使模型在滤去噪声的同时,在边缘区域尽可能地终止平滑。据此以及前面对P-M模型的分析,构造扩散函数

$$f(x) = \frac{1}{\lg(10 + (x/k)^2)} \quad (8)$$

式中, k 为任一大于零的常数阈值,选取常数10可以在一定程度上简化后期对 $f(x)$ 的求导计算。该扩散函数与传统P-M扩散函数的图形如图1所示。

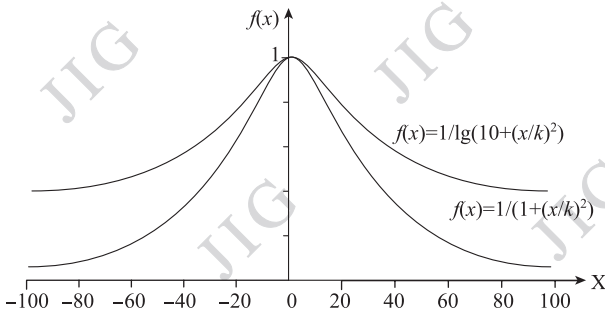


图1 扩散函数曲线图
Fig. 1 spread function curve

从图1可以看出本文构造的扩散函数较传统的P-M扩散函数具有更慢的趋于0速度。

下面对该扩散函数的有效性进行分析。

将式(8)代入式(6),可得

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{1}{\lg(10 + (x/k)^2)} \right)_x x u_{xx} + \frac{u_{xx} + u_{yy}}{\lg(10 + (x/k)^2)} = \left(\frac{1}{\lg(10 + (x/k)^2)} - [2x^2 / (k^2 \lg^2(10 + (x/k)^2)) \times (10 + (x/k)^2) \ln 10] \right) u_{xx} + \frac{1}{\lg(10 + (x/k)^2)} u_{yy}$$

由前面分析可知,要想在去噪地同时很好地保持边缘或纹理信息,就要使 u_{xx} 前的扩散系数为0,即有

$$\frac{1}{\lg(10 + (x/k)^2)} = \frac{2x^2}{k^2 \lg^2(10 + (x/k)^2) (10 + (x/k)^2) \ln 10}$$

两边求导后整理可得

$$x(x^2 - 10k^2) = 0$$

即

$$x^2 = 10k^2 \quad (9)$$

由式(9)可知,选取相对较小的 k 值即能与 x^2 相等,而 x 的值即为图像的梯度值,这样较小的 k 值可起到保护边缘的作用。由图1可知,本文构造的扩散函数的扩散值要大于P-M模型中扩散函数值,这样该扩散函数在扩散过程中有效去除噪声的同时,可以达到保护边缘的目的;同时由于 k 值较小,所以在求解扩散系数时,可减少迭代次数,缩短运行时间,即在遥感图像平坦的区域可以使平滑程度变大,减少平滑次数,从而具有更好的图像去噪效果。

3.2 基于方向的高频子带非线性扩散

图像小波分解的细节子带存在一定的方向性(图2),这样在对高频子带进行非线性异性扩散也应考虑到其方向性。

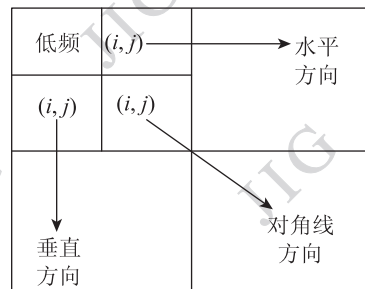


图2 小波分解子带的方向性
Fig. 2 The direction of the wavelet subbands

由第2节的分析可知,在基于小波子带的图像去噪过程中,只需重点考虑高频子带系数。由于不同的高频子带其方向性也不同,为此在对高频子带进行非线性异性扩散中采用了如图3所示的方向模板,即在表现为水平方向上的高频子带进行扩散时,采用水平模板进行移动;在表现为垂直方向上的高频子带进行扩散时,采用垂直模板进行移动;而在表现为对角线方向上的高频子带进行扩散时,则采用对角线模板进行移动。这样在对高频子带进行去噪过程中,不会对当前点的异向邻近点带来误差和漂移,保证了遥感图像的位置信息。

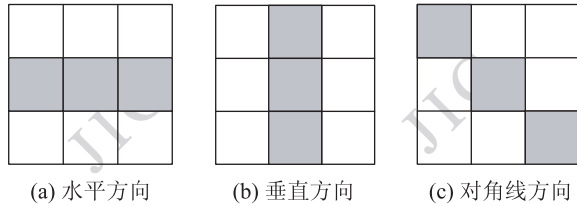


图3 模板示意图
Fig. 3 Template diagram

3.3 新模型的离散格式

所给出的模型的离散数值计算采用了如图4所示的四邻域结构来计算梯度。

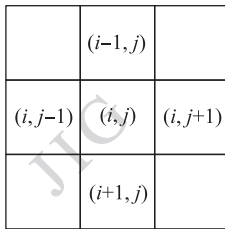


图4 离散计算的四邻域结构
Fig. 4 Domain structure neighbors

具体过程如下:

在中心点,离散化的 $|\nabla u|^2$ 为

$$|\nabla u|^2 = (u(i-1,j) - u(i,j))^2 + (u(i+1,j) - u(i,j))^2 + (u(i,j-1) - u(i,j))^2 + (u(i,j+1) - u(i,j))^2 \quad (10)$$

对应式(4)离散化后,迭代公式为

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t (\sum (g(|\nabla u|) \nabla u)) \quad (11)$$

式中, $g(x) = 1/\lg(10 + (x/k)^2)$, Δt 为离散化时间步长。

3.4 算法的实现

算法具体过程如下:

- 1)初始化 u 为原始含噪声图像;阈值 k 取值为1; Δt 表示离散化后的时间步长,初始值为0.1。
- 2)对原始遥感图像进行三级 Daubechies 小波变换。
- 3)根据第2节所给出的噪声小波系数分布的“类零树”结构,确定对小波最外两层的子带进行去噪处理。
- 4)用式(10)计算最外两层的子带中的梯度值 $|\nabla u|$ 。
- 5)按照不同子带的方向特性,依次按图3所对应的模板进行移动,并采用式(11)模型进行非线性异性扩散迭代计算。
- 6)如果最外两层子带均处理完毕,则对去噪后的小波系数进行小波逆变换,并转向步骤7);否则转向步骤3)。
- 7)算法结束。

4 实验结果与分析

4.1 实验

为了验证所提出模型的有效性,选取大小为 256×256 的3幅遥感图像作为测试图像,这3幅测试图像均是由 Landsat-7 ETM+ 传感器获取的全色波段图像,地物是由梯田、道路、河流、楼房等混合构成,它们在灰度上具有一定的差别。在多种强度的高斯白噪声下,将所提出的新模型与基于类零树的 Bayes 阈值法和 P-M 算子的去噪效果进行了比较,并采用峰值信噪比(PSNR)来度量去噪后的图像质量。实验平台的硬件环境为双核处理器(单核主频是1.73 GHz),1G内存,操作系统为 Window XP,编程环境采用 VC6.0。图5—图7分别为遥感图像平原、楼群和广场在分别加入均值为0、方差为0.02、0.05和0.10的高斯白噪声后,采用基于类零树的 Bayes 阈值法、P-M 算子和本文模型去噪后的结果。图8是相应峰值信噪比(PSNR)曲线图,表1为对遥感平原图像去噪时本文模型与 P-M 算子的时间对比,其中

$$PSNR = 10\lg(255^2/MSE)$$

MSE 为原遥感图像与去噪后图像的均方误差。

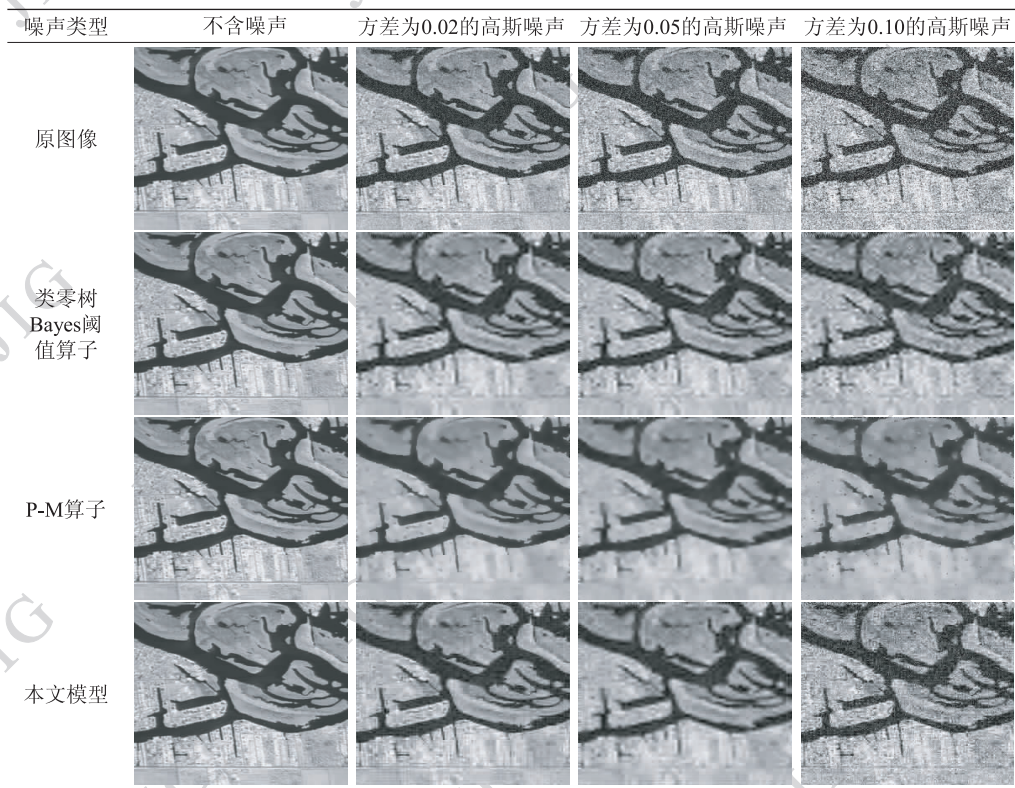


图5 3种方法对包含不同噪声平原图像的去噪结果比较

Fig.5 The de-noising results of three models for "Plain" image with different noises

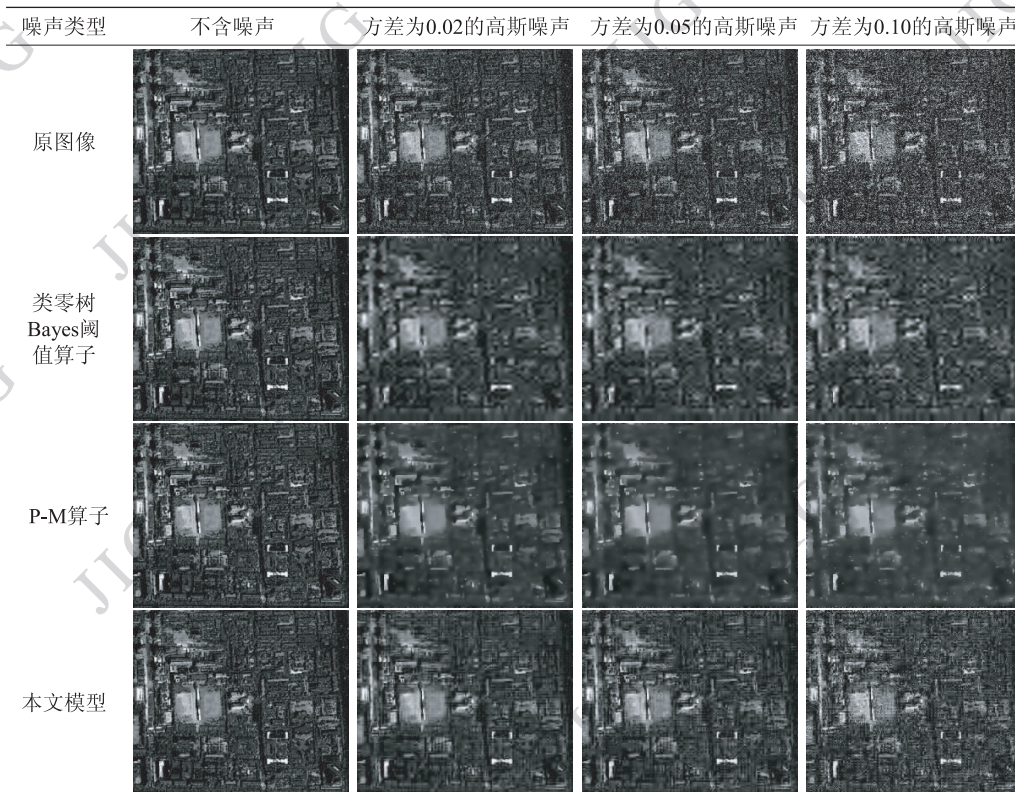


图6 3种方法对包含不同噪声楼群图像的去噪结果比较

Fig.6 The de-noising results of three models for "House" image with different noises



图 7 3 种模型对包含不同噪声广场图像的去噪结果

Fig. 7 The de-noising results of three models for “Pan” image with different noises

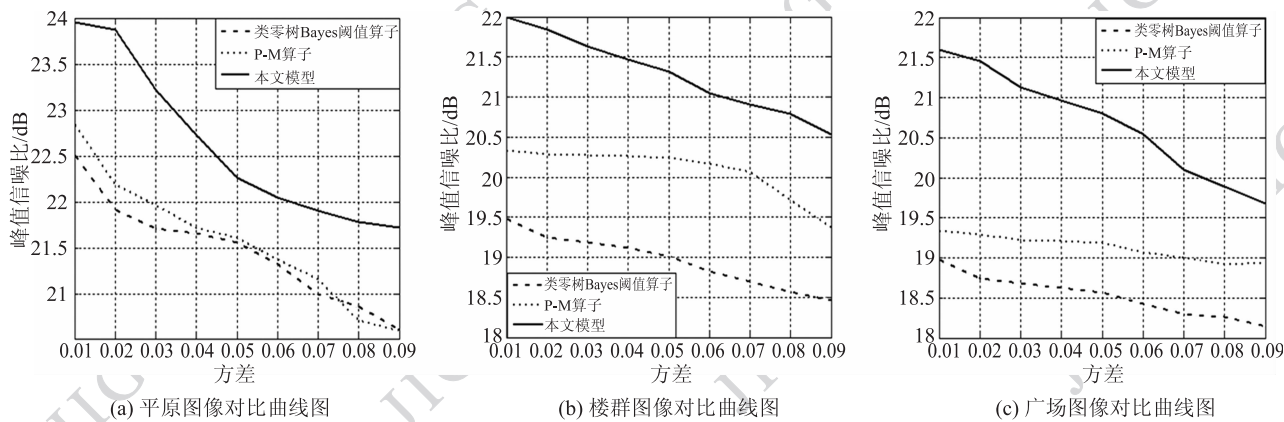


图 8 3 种模型去噪的 PSNR 曲线图比较

Fig. 8 PSNR comparison among three models

表 1 本文模型与 P-M 模型对遥感平原图像不同噪声去噪的时间对比

Table 1 Time comparison between proposed model and P-M model

噪声类型	方差 0.02 高斯噪声	方差 0.05 高斯噪声	方差 0.10 高斯噪声
P-M 算子	4.53	4.72	5.22
本文模型	3.67	3.90	4.31

/s

4.2 结果分析

本文构造的新模型针对噪声小波系数的“类零

树”结构特性,对包含噪声和边缘信息的高频子带进行去噪处理,避免了直接对原图像进行模型去噪

处理所带来的低频成分直流现象,同时由于该模型考虑了高频子带的方向特性,并可“自适应”地对边缘信息处进行调解,从而保证了在有效去除噪声信息的同时较好地保护了边缘及纹理信息。实验结果表明,对于高斯白噪声,本文所提出的模型较另外两种算法具有更好的去噪效果,特别随着图像噪声的加大,效果越明显,平均 PSNR 提高了 1~2 dB。

5 结 论

本文提出了一种新的基于小波变换域的偏微分方程遥感图像去噪模型。该模型首先将图像进行小波分解,随后对图像的高频成分进行改进的 P-M 去噪,最后进行小波重构。此方法由于在图像的扩散过程中保留其低频成分,而只对高频成分进行扩散,所以能够避免其低频成分直流,从而避免产生“块状”效应,提高滤波效果。这样在有效去除噪声的同时,有效地保护了图像的边缘纹理信息,使图像的清晰度得以提高。实验结果验证了所提出模型的有效性。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Z Y, Zhang J L, Lu Y J, et al. A new method for SAS images speckle reduction[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(2):208-211.
- [2] Gao L R, Zhang B, Zhang X, et al. Study on the method for estimating the noise in remote sensing images based on local standard deviations [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2):201-208. [高连如,张兵,张霞,等.基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究[J].*遥感学报*,2007,11(2):201-208.]
- [3] Chen Z C. A research on the technology of on-orb it calibration and validation of china dmc microsatellite [D]. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2005. [陈正超.中国 DMC 小卫星在轨测试技术研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2005.]
- [4] Sun T, Neuvo Y. Detail-preserving median based filters in image processing[J]. *Patt. Recogn. Lett.*, 1994, 15(4):341-347.
- [5] Lin H, Willson A N. Median filters with adaptive length [J]. *IEEE Transactions on Circuits Syst.*, 1988, 35(6):675-690.
- [6] Shih A C, Liao H M, Liu C. A new iterated two-band diffusion equation: theory and ita application[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, 12(4):466-476.
- [7] Alvarez L, Lions P L, Morel J M. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion II [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1992, 29(3):845-866.
- [8] Donoho D L, Johnstone I M, Kerkyacharian G, et al. Wavelet shrinkage: asymptopia [J]. *Journal of Royal Statistics Society Series*. 1995,57(2):301-369.
- [9] Vidakovic B. *Statistical modeling by wavelets* [M] // *Wiley Series in Probability and Statistics*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [10] Qu T S, Dai Y S, Wang S X. Adaptive wavelet thresholding denoising method based on SURE estimation [J]. *Acta Electronica Sinica*. 2002, 30(2):266-268. [曲天书,戴逸松,王树勋.基于 SURE 无偏估计的自适应小波阈值去噪[J].*电子学报*,2002,30(2):266-268.]
- [11] Abramovich F, Sapatinas T, Sliverman B W. Wavelet thresholding via a bayesian approach[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*. 1998,60(4):725-749.
- [12] Wang H X, Cheng L Z, Wu Y. A complex wavelet based spatially adaptive method for noised image enhancement [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*. 2005, 17(9):1911-1916. [王红霞.基于复数小波变换增强带噪图像的空间自适应方法[J].*计算机辅助设计与图形学学报*,2005,17(9):1911-1916.]
- [13] Fu B, Wang X H. Image denoise algorithm based on inter correlation of wavelet coefficients at finer scales [J]. *Computer Science*, 2008, 35(10):246-249 [傅博,王相海.一种基于细尺度间小波系数相关性的图像去噪方法[J].*计算机科学*,2008,35(10):246-249.]
- [14] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7):629-639.
- [15] Wang D K, Hou Y Q, Peng J Y. *Image processing based on PDE* [M]. Beijing: Science Press, 2008. [王大凯,侯榆青,彭进业.图像处理的偏微分方程方法[M].北京:科学出版社,2008.]
- [16] Catte F, Lion P L, Morel J M, Coll T. Image selective smothing and edge detection by nonlinear diffusion [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1992, 29(1):182-193.
- [17] Zhu X, Zhou M Q, Zhu C X, et al. Image filtering by combination of the curvature-driven and edge-stopping nonlinear diffusion [J]. *Acta Photonica Sinica*. 2008,37(3):609-612. [祝轩,周明全,朱春香,等.曲率驱动与边缘停止相结合的非线性扩散及其在图像去噪中的应用[J].*光子学报*,2008,37(3):609-612.]
- [18] Alvarez L, Morel J M. *Formalization and Domputational Aspects of Image Analysis* [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1994. 1-59.
- [19] You Y L, Kaveh M. Fourth-order partial differential equations for noise removal [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000,9(10):1723-1729.
- [20] Liu J, Pierre M. Information-theoretic analysis of interscale and intrascale dependencies between image wavelet coefficients [J], *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(11):1647-1658.