

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 9
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9月 第17卷 第9期(总第197期)

目次

图像处理和编码

- 自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建 朱虹, 刘薇, 姚杰, 欧阳光振, 刘小乾(1049)
- 亮度补偿变换矩阵的颜色恒常性算法 袁兴生, 王正志(1055)
- 小波变换和稀疏冗余表示的混合图像去噪 李慧斌, 刘峰(1061)
- 基于运动信息自适应的快速运动估计算法 李子印, 杨齐(1069)
- 融合纹理特征的两阶段聚类分割算法 王改华, 李德华(1075)
- 利用纹理和边缘特征的 Criminisi 改进算法 任澍, 唐向宏, 康佳伦(1085)

图像分析和识别

- 激光焊接对接拼缝测量的微景深方法 王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦(1092)
- 基于码本模型和多特征的早期烟雾检测 姜明新, 王洪玉, 蔡兴洋(1102)
- 结合局部特征和全局信息的自适应活动轮廓模型 朱晓舒, 孙权森, 夏德深(1109)
- 高斯颜色模型在瓷片图像分类中的应用 郑霞, 胡浩基, 周明全, 樊亚春(1115)
- 区域生长的轮对图像分割 史倩, 吴开华(1122)
- 图像搜索结果的滑动窗口多标记传播聚类 谷瑞军, 陈圣磊, 陈耿, 汪加才(1128)

图像理解和计算机视觉

- 中介相似性量度的图像匹配 周宁宁, 吕文杰(1135)
- 自适应字典学习的多聚焦图像融合 严春满, 郭宝龙, 易盟(1144)
- 摄像机几何约束及人体定位 陶霖密, 于亚鹏, 邸慧军, 孙洛(1150)

虚拟现实与增强现实

针对层次式累进网格模型的动态评估与调整 王丹华, 卢威, 潘金贵(1158)

医学图像处理

结合形状与纹理特征的椎间盘退化辅助诊断..... 郝世杰, 蒋建国, 郭艳蓉, 詹曙, 李鸿(1168)

改进的核磁共振图像分割与偏移场恢复耦合模型

..... 王顺风, 冀晓娜, 张建伟, 陈允杰, 方林, 詹天明(1175)

遥感图像处理

光学遥感图像低可观测区域舰船检测 周伟, 关键, 何友(1181)

非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合

..... 金星, 李晖晖, 时丕丽(1188)

“计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 (1196)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 9 期

2012 年 9 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:010-64807995 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 ZTTXFZ 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. 9 September 2012

Contents

Image Processing and Coding

- Adaptive threshold HMRF model for super-resolution reconstruction
..... Zhu Hong, Liu Wei, Yao Jie, Ouyang Guangzhen, Liu Xiaoqian(1049)
- Color constancy algorithms with luminance-compensation transform matrix Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi(1055)
- Hybrid image denosing method based on wavelet transform as well as on a sparse and redundant representations model
..... Li Huibin, Liu Feng(1061)
- Fast motion estimation algorithm based on motion information adaptation Li Ziyin, Yang Qi(1069)
- Texture feature fusion-based two-stage clustering segmentation algorithm Wang Gaihua, Li Dehua(1075)
- Improved Criminisi algorithm with the texture and edge features Ren Shu, Tang Xianghong, Kang Jialun(1085)

Image Analysis and Recognition

- Seam measurement based on micro depth of field lens for laser welding
..... Wang Pingjiang, Huang Yating, Qi Jiangfei, Peng Fangyu, Li Bin, Tang Xiaoqi(1092)
- Early smoke detection based on codebook model and multiple features Jiang Mingxin, Wang Hongyu, Cai Xingyang(1102)
- Adaptive active contour model integrating global and local image fitting energy Zhu Xiaoshu, Sun Quansen, Xia Deshen(1109)
- Porcelain shard images classification based on Gaussian color model Zheng Xia, Hu Haoji, Zhou Mingquan, Fan Yachun(1115)
- Image segmentation for wheel set measurement based on region growing Shi Qian, Wu Kaihua(1122)
- Sliding window multi-label propagation clustering for searched images
..... Gu Ruijun, Chen Shenglei, Chen Geng, Wang Jiakai(1128)

Image Understanding and Computer Vision

- Image matching based on the medium similarity measure Zhou Ningning, Lv Wenjie(1135)
- Multi-focus image fusion using adaptive dictionary learning method Yan Chunman, Guo Baolong, Yi Meng(1144)
- Geometric constraints of locating cameras and people Tao Linmi, Yu Yapeng, Di Huijun, Sun Luo(1150)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Dynamic evaluation and modification methods against aggressive mesh hierarchy models
..... Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui(1158)

Medical Image Processing

- Computer aided diagnosis on intervertebral disc degeneration with shape and texture features
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong(1168)
- Improved coupled model for MR images segmentation and bias restoration
..... Wang Shunfeng, Ji Xiaona, Zhang Jianwei, Chen Yunjie, Fang Lin, Zhan Tianming(1175)

Remote Sensing Image Processing

- Ship detection from low observable regions in optical remote sensing imagery Zhou Wei, Guan Jian, He You(1181)
- SAR and multispectral image fusion algorithm based on pulse coupled neural networks and non-subsampled Contourlet transform
..... Jin Xing, Li Huihui, Shi Pili(1188)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)09-1188-08

论文引用格式: 金星,李晖晖,时丕丽. 非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合[J]. 中国图象图形学报,2012,17(9):1188-1195.

非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合

金星, 李晖晖, 时丕丽
西北工业大学自动化学院, 西安 710072

摘要: 由于获取地物波谱信息的波段范围及成像方式的不同, SAR 与多光谱图像所得到的信息有很大差异, 而且 SAR 图像会受到严重的相干斑噪声干扰, 因此 SAR 与多光谱图像的融合很难获得满意的效果。考虑到非下采样 Contourlet 变换(NSCT)相比于其他多尺度几何分析方法的优点, 提出了一种 NSCT 与脉冲耦合神经网络(PCNN)相结合的 SAR 与多光谱图像融合方法。源图像首先经过 NSCT 分解获得不同尺度多个方向下的分解系数, 将分解系数的高斯拉普拉斯算子能量作为脉冲耦合神经网络模型的输入, 具有较大点火频率的系数将被选择作为融合图像的系数, 最后经过 NSCT 重构得到最终的融合图像。实验结果表明, 这种算法无论在主观视觉还是在客观指标上都要优于之前的许多算法。

关键词: 图像融合; 非下采样 Contourlet 变换; 脉冲耦合神经网络; SAR 图像; 多光谱图像

SAR and multispectral image fusion algorithm based on pulse coupled neural networks and non-subsampled Contourlet transform

Jin Xing, Li Huihui, Shi Pili

College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: SAR and optical images have large differences in imaging-mechanism and spectral characteristics. Moreover, SAR images are always severe contaminated by speckle noise. Consequently, it is very difficult to obtain satisfying results while fusing SAR and optical images. Considering the advantage of non-sampled Contourlet transform (NSCT) comparing with other multiscale decomposition methods, a method of image fusion based on pulse coupled neural networks (PCNN) and NSCT is proposed. The source images are first decomposed in the NSCT domain. Energy of log in the NSCT domain is the input to motivate PCNN and coefficients in NSCT domain with high firing frequency are selected as coefficients of the fused image. Then the final fused image is obtained by NSCT reconstruction. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm outperforms many other algorithms in both objective criteria and visual appearance.

Key words: image fusion; NSCT; PCNN; synthetic aperture radar (SAR) image; multispectral image

收稿日期:2011-11-21;修回日期:2012-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(60802084);教育部博士点新教师基金项目(200806991084);西北工业大学基础研究基金项目(JC20110266)

第一作者简介:金星(1988—),男,现为西北工业大学控制工程专业硕士研究生,主要从事图像融合、多尺度几何分析等方面的研究。

E-mail:nwpujinxing@163.com

0 引言

由于 SAR 图像在成像机理和光谱特性方面与多光谱图像存在很大差异,致使 SAR 与多光谱图像的融合很难获得令人满意的融合效果。目前针对 SAR 与多光谱图像的融合研究多集中在两个方向,即灰度调制的方法和多尺度几何分析的方法。文献[1]提出一种灰度调制的方法,首先利用全色图像对多光谱图像的空间信息进行增强,然后利用灰度调制方法将 SAR 图像中的较亮的区域(一般是感兴趣的目标,如城镇区域等)插入到多光谱图像中。这样得到的融合图像既加入了 SAR 图像中的目标,又很好保留了原始多光谱图像的光谱特性,但所加入的 SAR 图像目标多表现为离散的点状目标,造成 SAR 图像中重要目标丢失,如原文中 SAR 图像中左下角亮度较高的地下掩体目标在融合图像中未能体现。文献[2-5]都是有关这类方法的研究,一般是将 IHS 变换或 PCA 变换与小波变换相结合并进行灰度调制,但这类方法的思路与文献[1]相同,导致融合结果始终存在类似问题。在多尺度几何分析领域,文献[6]利用脊波变换实现 SAR 与可见光的图像融合,融合结果既保留了 SAR 与可见光图像的特征,而且取得了较好的抑制噪声的效果,这对以 SAR 作为源图像融合的场所是非常有利的。虽然脊波变换对图像中直线型特征可以有效表示,但对曲线型特征表示只相当于小波变换方法,因此,对于 2 维图像中的边缘以及曲线等则无法很好地表达其特征。文献[7]提出了一种基于 Curvelet 变换的 SAR 与可见光图像融合方法,由于 Curvelet 相比小波和 Ridgelet 更加适合分析 2 维图像中的曲线状边缘特征,对图像具有更高的逼近精度和更好的稀疏表达能力,所以融合效果更好。但是,由于 Ridgelet 和 Curvelet 分解所获得的图像尺寸不同,除了设计简单的基于像素点的融合规则外,很难根据变换后系数之间的特征去设计更为有效的融合规则,导致融合后一些区域仍存在较明显的噪声干扰,对可见光图像细节信息的保留也需要加强。非下采样 Contourlet 变换(NSCT)是在 Contourlet 变换^[8]的基础上提出的。相比于 Ridgelet 和 Curvelet,Contourlet 直接产生于离散域,是一种真正的 2 维图像表示方法,但是,由于 Contourlet 变换缺少平移不变性,造成奇异点周围容易出现伪吉布斯现象,因此 ArthurL

等人^[9]受构造非下采样小波的启发提出了 NSCT,该变换比 Contourlet 变换具有更灵活的多分辨率,多方向的图像表示能力,且以冗余度换取了平移不变性。此外,经过 NSCT 方法分解后得到的系数图像具有相同大小的尺寸,使得融合规则的设计更为方便,也为与其他系数判决方法的结合提供了可能。

脉冲耦合神经网络(PCNN)是模拟猫的视觉皮层细胞对视觉信号的处理机制而产生的一类新型神经网络模型^[10]。目前,PCNN 被广泛应用于图像分割、图像增强、图像去噪等方面,并被证明是一种十分有效的图像处理工具。对于 PCNN 在图像融合中的应用,文献[11]在空间域利用 PCNN 实现了多聚焦图像的融合,文献[12]在此基础上提出了一种双通道的 PCNN 模型并获得了更好的融合效果。文献[13]提出了一种将 PCNN 与小波相结合的图像融合算法,文献[14]在小波与 PCNN 结合的基础上,利用区域点火特征实现了对多聚焦图像中过渡区域信息的较好保持,但由于小波分析的局限性导致 2 维或更高维图像的信息不能够被有效的描述。文献[15-16]分别使用像素点的对比度和清晰度作为连接系数 β 的值,从而实现了自适应参数的设置。将 PCNN 应用于图像融合中的方法相比于以往的算法融合结果有了一定程度的增强。这些研究成果充分证明了 PCNN 在图像系数判决方面优越性。因此近年来,将 PCNN 与 NSCT 结合的方法已经被引入到多传感器图像融合领域。文献[17]将 NSCT 与 PCNN 的方法结合,并获得了比单独使用 NSCT 方法或 PCNN 方法更好的融合效果。然而所有的连接系数 β 均采用相同的值并被设置为常数,这既不符合实际情况也限制了方法的适用性。文献[18]克服了这一问题从而实现了参数的自适应设置。但这几种算法均是以 NSCT 变换域单个像素点的灰度值作为神经元的激励。实际上,人眼对于边缘、方向特征信息等更加敏感,所以单纯地使用单个像素灰度值是远远不够的。Qu 等人^[19]将 NSCT 域的空间频率引入作为 PCNN 神经元的激励并成功地应用于多聚焦图像和可见光与红外图像的融合之中并证明这种算法优于之前的许多算法。由于 SAR 图像的特殊性,单个像素点灰度值作为 PCNN 神经元激励的方法效果很不理想;空间频率虽能够很好地反映区域能量的活跃度,但对噪声敏感,缺乏对噪声的抑制作用,融合结果也很难令人满意。基于此,提出使用 NSCT 域高斯拉普拉斯算子^[20]能

量作为 PCNN 神经元的激励应用到 SAR 与多光谱图像的融合之中,并使用简化的 PCNN 模型以及连接系数 β 的自适应参数设置,实验结果表明,算法取得了较好的融合结果。

1 非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络

1.1 非下采样 Contourlet 变换

与 Contourlet 变换类似,NSCT 也是利用一个双滤波器组结构,将多尺度分解和方向分解结合到一起。首先利用非采样塔形滤波器组获取图像的多尺度分解,其思想来源于 *à trous* 算法可将图像分解为与原始图像大小一致的多尺度塔形结构;然后用非采样方向滤波器组对各尺度图像进行方向分解。NSCT 的分解结构框架图如图 1 所示。

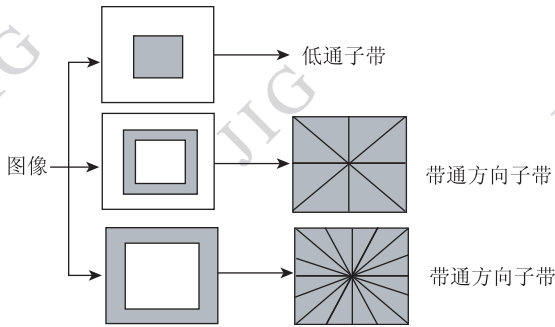


图 1 非下采样 Contourlet 分解结构图
Fig. 1 Decomposition structure of NSCT

1.2 脉冲耦合神经网络

PCNN 是利用神经元特性并由若干个神经元互联而成的单层、反馈型神经网络,它的基本构成单元即为 PCNN 神经元模型。由于 PCNN 神经元参数设置的复杂性,适用于一类图像的参数很可能就不适用于另一类图像,所以 PCNN 神经元参数的设置大都根据以往的经验设置为固定值。为了简化参数设置,在图像处理中通常使用简化的 PCNN 神经元模型,如图 2 所示,其中 F_{ij} 为输入激励, U_{ij} 为神经元内部活动项, θ_{ij} 为动态阈值, Y_{ij} 为神经元输出项, β 为连接系数。

为了进一步简化参数设置以及便于对整个网络脉冲传播行为的分析利用,在本文中使用 Unit-Linking PCNN^[21],即对于每个神经元,只要它邻域内有一个神经元点火其 L 通道的 $L_{ij}(n)$ 就为 1。在这种情况下,某个 Unit-linking PCNN 神经元点火时,其邻

域内任何一个未点火的且输入亮度与其输入亮度差别不大的神经元都会受其影响而点火,这样使网络的脉冲传播行为形象清晰,便于操控。Unit-linking PCNN 神经元 L 通道的信号为

$$L_{i,j}(n) = \begin{cases} 1 & \sum_{k \in N(i,j)} Y_k(n-1) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $N(i,j)$ 为神经元 (i,j) 的 3×3 邻域,注意神经元 (i,j) 的邻域不包括自身。

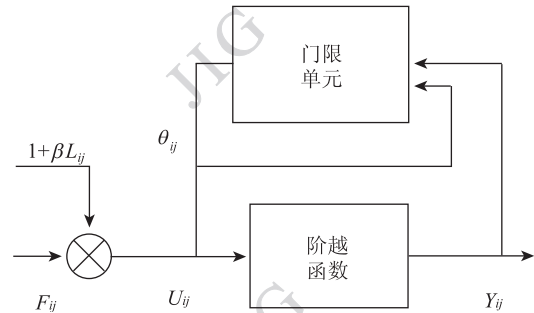


图 2 简化的 PCNN 神经元模型
Fig. 2 A simplified PCNN model

2 本文算法

2.1 基本原理

由于 SAR 图像的特殊性,为了更好地抑制噪声以获得最佳的融合结果,引入高斯拉普拉斯算子能量作为 PCNN 神经元的激励。高斯拉普拉斯算子是在拉普拉斯算子的基础上提出的,它得益于对人的视觉机理的研究,有一定的生物学与生理学意义。由于拉普拉斯算子对噪声敏感,为了减小噪声的影响,可先对图像进行平滑再使用拉普拉斯算子进行边缘检测。由于在成像时,一个给定像素所对应的场景点,它的周围点对该点贡献的光强大小呈正态分布,所以平滑函数应能反映不同远近的周围点对给定像素具有不同的平滑作用,因此平滑函数采用正态分布的高斯函数,即

$$h(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中, σ 是标准差,用 $h(x,y)$ 对图像进行卷积平滑可表示为

$$g(x,y) = h(x,y) \otimes f(x,y) \quad (3)$$

式中, $f(x,y)$ 为图像灰度函数,然后对图像 $g(x,y)$ 采用拉普拉斯算子进行边缘检测,可得

$$\nabla^2 g = \left(-\frac{r^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \right) e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \otimes f(x, y) \quad (4)$$

式中, $r^2 = x^2 + y^2$, 在 NSCT 域的高斯拉普拉斯能量定义为

$$S_{i,j}^{l,k} = \sum_{i \in M, j \in N} (f_{xx}^2 + f_{yy}^2) \quad (5)$$

式中, f_{xx} 与 f_{yy} 分别为对图像进行水平以及垂直滤波后所得的频率信息。在各个子带中高斯拉普拉斯能量以滑动窗口的形式计算。分别计算两幅图像 NSCT 分解系数中对应尺度下相同方向中的以 (i, j) 为中心的局部区域的高斯拉普拉斯能量, 并将其作为 PCNN 神经元模型的输入, 根据式(6)引发神经元点火。由式(7)计算脉冲耦合神经网络的点火频率图。

$$\begin{cases} F_{i,j}^{l,k}(n) = S_{i,j}^{l,k} \\ L_{i,j}^{l,k}(n) = \begin{cases} 1 & \sum_{k \in N(i,j)} Y_k(n-1) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ U_{i,j}^{l,k}(n) = F_{i,j}^{l,k}(n) * (1 + \beta L_{i,j}^{l,k}(n)) \\ \theta_{i,j}^{l,k}(n) = e^{-\partial_\theta} \theta_{i,j}^{l,k}(n-1) + V_\theta Y_{i,j}^{l,k}(n-1) \\ Y_{i,j}^{l,k}(n) = \begin{cases} 1 & U_{i,j}^{l,k}(n) > \theta_{i,j}^{l,k}(n) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ T_{i,j}^{l,k} = T_{i,j}^{l,k}(n-1) + Y_{i,j}^{l,k}(n) \end{cases} \quad (6)$$

$$T_{i,j}^{l,k} = T_{i,j}^{l,k}(n-1) + Y_{i,j}^{l,k}(n) \quad (7)$$

式(6)是 PCNN 的数学模型, 像素点 (i, j) 周围窗口区域范围内的高斯拉普拉斯能量作为 PCNN 神经元的输入激励 $F_{i,j}^{l,k}$, $L_{i,j}^{l,k}$ 为连接输入, $U_{i,j}^{l,k}$ 为神经元内部活动项, $\theta_{i,j}^{l,k}$ 为动态阈值, $Y_{i,j}^{l,k}$ 为神经元输出项, l 代表 NSCT 分解的尺度, k 代表方向。 T 为赋时矩阵, β 为连接系数, V_θ 为动态阈值的放大系数, 而 ∂_θ 为动态阈值的衰减系数。当内部活动项大于动态阈值时 PCNN 神经元将被激发, $Y_{i,j}^{l,k} = 1$, 也称为一次点火。所有 n 次迭代的点火次数之和将由赋时矩阵 T 记录下来, 最终得到图像各个子带中的 PCNN 点火频率图, 由于 PCNN 神经元的捕获特性和自动波特性, 使得 PCNN 点火频率图能够很好地反映图像所包含的信息。

2.2 本文算法

基于上述原理, 将 NSCT 域的高斯拉普拉斯算子能量作为 PCNN 神经元激励, 避免了 NSCT 域单个像素点灰度值不能很好地反映边缘、纹理等信息的缺点, 并且很好地抑制了 SAR 图像的噪声, 从而充分利用了 PCNN 模型在融合时对细节信息的提取增强特性, 使得图像的区域、纹理、边缘等重要信息

都保留到 PCNN 的点火频率图中。

本文算法的流程图如图 3, 其具体步骤如下:

- 1) 将源图像进行 NSCT J 尺度分解, 得到一个低频子带系数和 J 个高频子带系数;
- 2) 以滑动窗口的形式计算各高频方向子带分解系数的高斯拉普拉斯算子能量;
- 3) 对低频子带, 直接使用像素点的灰度值作为 PCNN 神经元的激励, 而对高频子带, 则将各个高频子带的高斯拉普拉斯算子能量作为 PCNN 神经元的激励输入到式(6), 然后通过式(7)计算点火频率图;
- 4) 点火频率较大的 NSCT 分解系数将作为融合图像的分解系数, 最后通过 NSCT 重构得到融合图像。

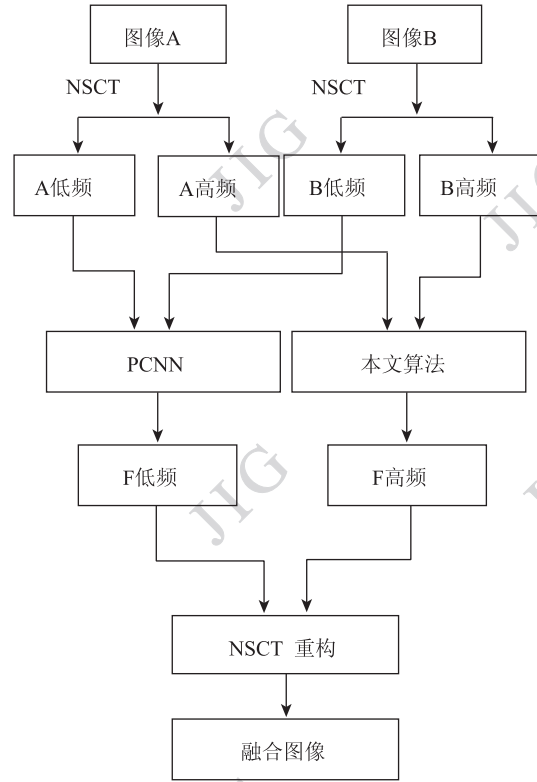


图3 本文算法流程图

Fig. 3 Schematic diagram of proposed algorithm

2.3 实验1

在实验中, 使用意大利 Pavia 城市的 Landsat 7 卫星多光谱图像与 Radarsat SAR 图像作为实验图像 (2000-10-20 获取), 这两幅图像为经过配准的图像, 具有相同的 12.5 m 空间分辨率。为了方便数据的比对, 将本文算法同 Curvelet 算法^[7]、NSCT 算法、SIDWT_PCNN 算法^[13]、Contourlet_PCNN 算法^[22]、

NSCT_PCNN 算法、NSCT_SF_PCNN 算法^[19] 进行对比。由于文献[19]曾使用 SIDWT_PCNN 和 Contourlet_PCNN 与 NSCT_SF_PCNN 进行对比,所以这里将这3种方法以及 NSCT_PCNN 方法的 PCNN 参数设置同文献[19]相同。同样 Curvelet 算法参数设置同文献[7]。基于像素点的 NSCT 算法低频和高频均使用像素点绝对值取大的融合规则。NSCT_PCNN 算法将 NSCT 域单个像素点的灰度值作为 PCNN 神经元激励。NSCT_SF_PCNN 算法将 NSCT 域的区域空间频率作为 PCNN 神经元激励,区域大

小为与本文算法相同的 5×5 。NSCT 分解尺度均为4层,尺度从粗到细的方向分解个数为4、4、8、16。PCNN 模型相关参数的设置为 $\partial_{\theta} = 0.2$, $V_{\theta} = 20$, 迭代次数 $n = 200$ 。对于连接系数 β 的设置,利用像素点的清晰度来实现自适应参数设置,详见文献[18]。Curvelet 算法、NSCT 算法、SIDWT_PCNN 算法、Contourlet_PCNN 算法、NSCT_PCNN 算法、NSCT_SF_PCNN 算法与本文算法获得的融合图像分别如图4(c)~(i)所示,原始的多光谱图像与 SAR 图像如图4(a)(b)所示。

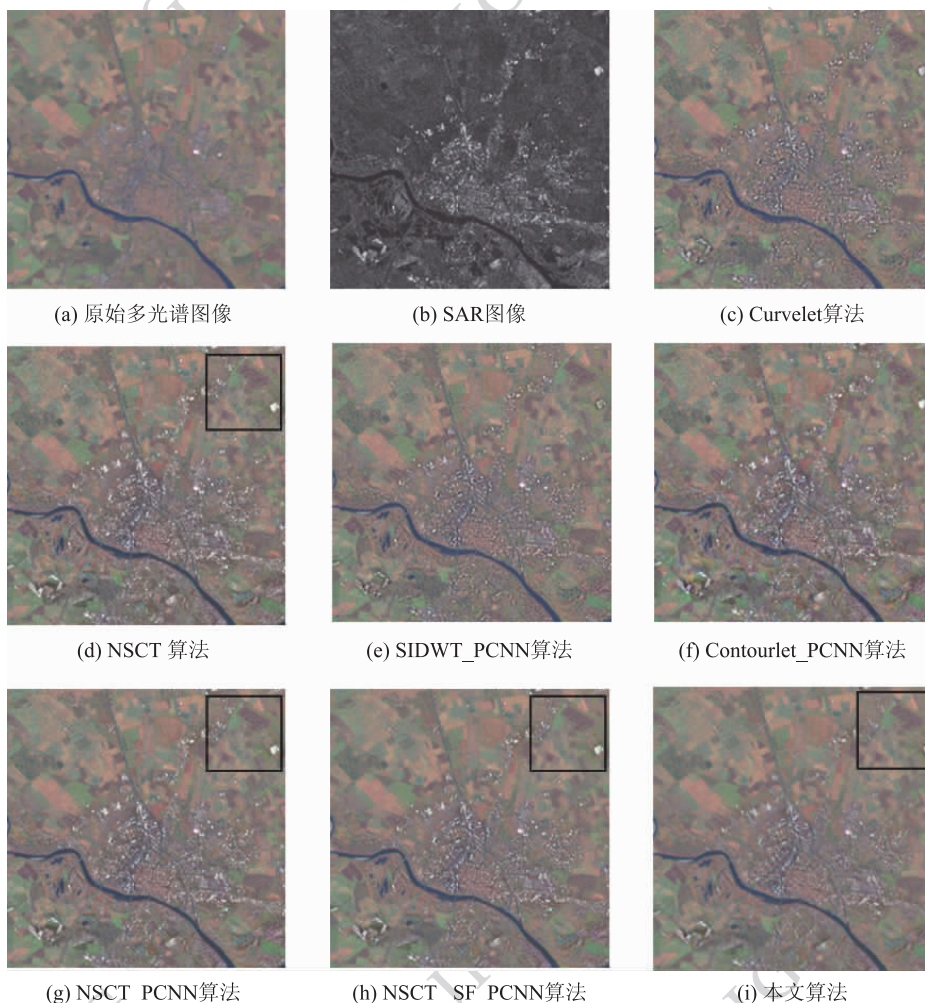


图4 SAR 与多光谱图像融合结果

Fig. 4 SAR and Multispectral image fusion results

由图4可以看出, Curvelet 算法与 SIDWT_PCNN 算法获得的融合结果视觉效果相近,光谱信息保持效果较好,但对于 SAR 图像中的纹理细节信息未能较好地引入,中心城市区域对比度不强,视觉效果较差。基于像素点的 NSCT 算法未能很好地保留原始多光谱图像中的地物光谱信息,虽然较好地引入了

SAR 图像中的细节纹理信息,但是噪声比较大,中心城市区域对比度不大,使得目标边缘等相对周围区域不够突出。Contourlet_PCNN 算法由于伪吉布斯现象的存在使得视觉效果较差,不仅存在较大的光谱失真,而且噪声较大。NSCT_PCNN 算法很好地保留了原始多光谱图像的光谱信息,并较好地引入

了 SAR 图像的细节纹理信息,噪声相对于 NSCT 算法、Contourlet_PCNN 算法有了明显的减少。Qu 等人^[19]提出的 NSCT_SF_PCNN 算法虽然较上述算法有了很大的提高,但融合图像中仍然存在较大的噪声,而本文算法不仅充分地保留了原始多光谱图像的光谱信息,并很好地引入了 SAR 图像的细节纹理信息,而且噪声最小,中心城市区域对比度较大,视觉效果最好,这也可以从图 5 看出。

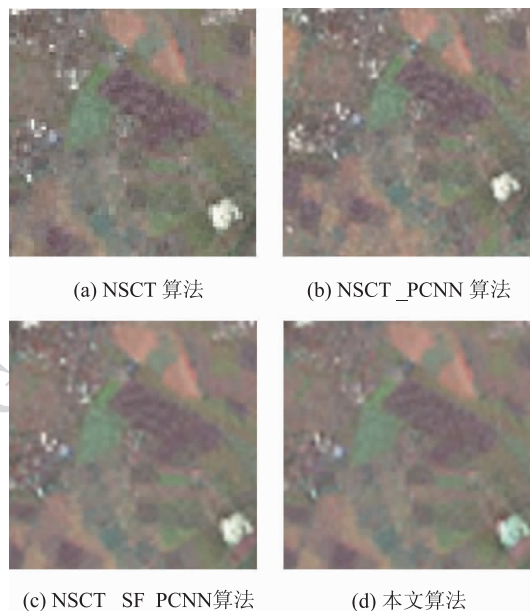


图 5 部分结果图右上角区域放大显示

Fig. 5 Enlarged view of top right corner of some fusion results

除了主观的视觉评价,还需要用客观的评价指标对融合效果进行评价,选择信噪比(SNR)、扭曲程度(WD)、交叉熵(CE)、相关系数(CORR)4种评价指标对融合结果进行评价。信噪比是图像去噪效果的评价指标,信噪比越大则说明融合图像的噪声抑制的越好。图像的光谱扭曲程度直接反映了多光谱图像的光谱失真度,扭曲程度越小则融合图像的光谱失真越小。交叉熵,直接反映两幅图像对应像素的差异,交叉熵的值越小说明两幅图像之间的差异越小。相关系数反映了两幅图像之间的相关性,相关系数越大则两幅图像的相似程度越高。由表 1 的客观评价指标可以看出与主观视觉分析一致,实验结果表明本文算法无论是主观视觉还是客观评价指标都要优于其他算法,充分保留了原始多光谱图像的光谱信息并很好地引入了 SAR 图像的细节纹理信息,是一种有效且可行的融合算法。

表 1 基于本文算法的融合评价

Table 1 Objective criteria of the proposed Algorithm

图 4	SNR	WD	CE	CORR
(c)	46.200 3	8.003 6	0.278 2	0.771 9
(d)	42.457 4	9.411 1	0.330 8	0.701 3
(e)	47.435 5	7.222 3	0.274 9	0.798 2
(f)	42.879 5	9.333 9	0.360 5	0.723 2
(g)	45.435 3	7.117 7	0.273 7	0.769 6
(h)	47.751 2	5.736 9	0.213 4	0.798 3
(i)	51.713 0	4.668 6	0.189 7	0.848 2

2.4 实验 2

为了验证算法在不同地表类型条件下以及不同空间分辨率条件下的适用性,第 2 组实验选用鄱阳湖水域的遥感影像作为融合图像,包括 SAR 和 TM 两种传感器的图像数据。图像大小均为 180×180 像素,其中 TM 图像取了 7 个波段中的 5、4、3 这 3 个波段,并按照假彩色组成红、绿、蓝波段(图 6(a)(b))。其中 SAR 图像具有较高的空间分辨率和丰富的纹理信息,多光谱图像虽然空间分辨率不高,但具有丰富的光谱信息。由实验 1 的结论可知,Curvelet 算法、SID-WT_PCNN 算法以及 Contourlet_PCNN 算法由于方法本身的缺陷,在相同条件下很难获得比基于 NSCT 方法更好的融合结果,而且 Curvelet 算法以及 Contourlet_PCNN 算法对于实验图像的大小有一定的要求,即只能处理 2 的幂次方尺寸的图像,这又进一步限制了算法的应用范围。为了更有效地验证本文方法的适用性,实验中仅将 NSCT 算法、NSCT_PCNN 算法、NSCT_SF_PCNN 算法与本文算法进行对比,实验中参数的设置同实验 1 相同。NSCT 算法、NSCT_PCNN 算法、NSCT_SF_PCNN 算法与本文算法获得的融合图像分别如图 6(c)–(f)所示。

由图 6 可以看出,基于像素点的 NSCT 算法虽很好地引入了 SAR 图像中的细节纹理信息,但光谱信息扭曲严重,没有起到对噪声的抑制作用。NSCT_PCNN 算法在图像的光谱保持程度以及噪声的抑制方面都有一定增强,但视觉效果并不显著。NSCT_SF_PCNN 算法由于采用区域信息作为神经元的激励,相比于以上两种基于像素点的方法在纹理细节信息的引入以及光谱保持程度都有较大提高,但对噪声的抑制未能达到理想的效果。本文算法能够充分地保留原始多光谱图像的光谱信息,并很好地引

入了 SAR 图像的细节纹理信息,而且相比与其他算法噪声最小,视觉效果最好。尽管本组实验中所用的图像具有不同的空间分辨率,但从实验结果可以

看出,本文算法在很好地保持了光谱信息的同时,还保留了高分辨率图像的低频信息,而且图像边缘信息更丰富、更清晰。

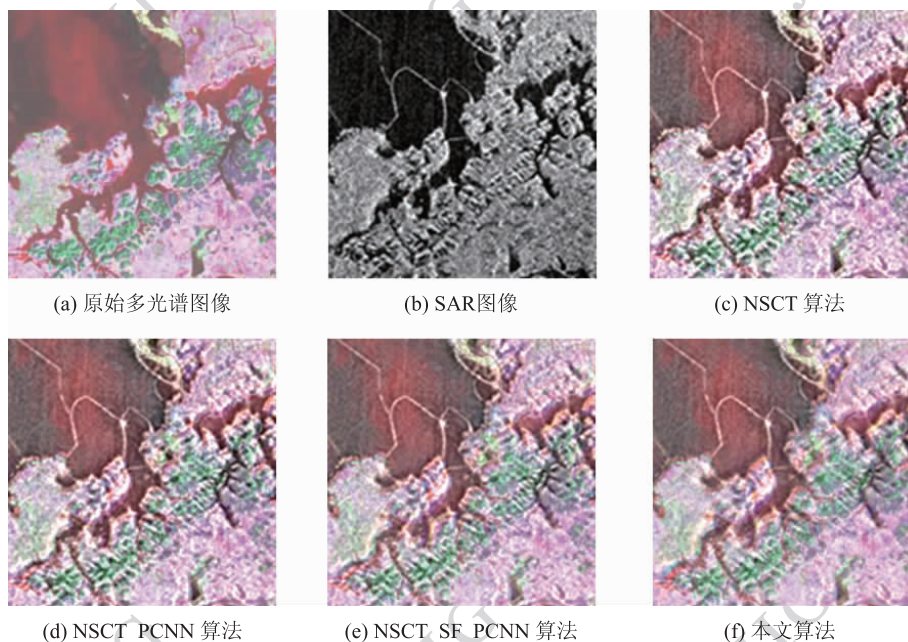


图 6 SAR 与多光谱图像融合结果

Fig. 6 SAR and Multispectral image fusion results

在客观评价结果上,仍选择 SNR、WD、CE、CORR 4 种评价指标对融合结果进行评价。由表 2 的评价结果可以看出与主观视觉分析一致,这更进一步表明了本文算法的可行性与有效性,同时也表明了本文算法在不同的地表类型条件以及空间分辨率条件下的适用性。

表 2 基于本文算法的融合评价

Table 2 Objective criteria of the proposed Algorithm

图 6	SNR	WD	CE	CORR
(c)	29.122 7	29.201 9	0.423 7	0.757 0
(d)	31.604 3	25.934 5	0.400 5	0.805 5
(e)	34.540 6	22.400 5	0.328 4	0.837 8
(f)	36.843 6	20.464 1	0.311 3	0.865 8

3 结 论

本文提出将 NSCT 域的高斯拉普拉斯算子能量作为 PCNN 神经元的激励,并且使用了简化的 PCNN 模型,对于连接系数 β 的设置采用基于像素点清

晰度的自适应参数设置方法,最后成功地将其应用于 SAR 图像与多光谱图像的融合之中。理论分析与仿真实验结果都表明了本文算法能够获得比之前许多算法更好的融合效果,不仅能够很好地保留多光谱图像的光谱信息与 SAR 图像的重要目标特征,而且充分地抑制了 SAR 图像的噪声,表明了这一算法应用于 SAR 与多光谱图像融合的可行性、有效性以及适应性。

参考文献 (References)

- [1] Garzelli A. Wavelet based fusion of optical and sar image data over urban area [J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002,34(3): 59-62.
- [2] Alparone L, Baronti S, Garzelli A. Landsat ETM+ and sar image fusion based on generalized intensity modulation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004,42(12): 2832-2839.
- [3] Alparone L, Facheris L. Fusion of multispectral and SAR images by intensity modulation [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion. Stockholm, Sweden: International Society of Information Fusion, 2004:637-643.

- [4] Chen S H, Zhang R H, Su H B. SAR and multispectral image fusion using generalized IHS transform based on a trous wavelet and EMD Decompositions[J]. *Sensors Journal IEEE*, 2010,10(3): 737-745.
- [5] Han N L, Hu J X, Zhang W. Multi-spectral and SAR images fusion via mallat and aTrous wavelet transform[C]// *Proceedings of the 18th International Conference on Geoinformatics*. Beijing: IEEE, 2010:1-4.
- [6] Li H H, Guo L, Li G X. Is ridgelet transform better than wavelet transform in SAR and optical image fusion? [J] *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2006, 24(4): 418-422. [李晖晖,郭雷,李国新. 基于脊波变换的 SAR 与可见光图像融合研究[J]. *西北工业大学学报*,2006, 24(4): 418-422.]
- [7] Li H H, Guo L, Liu K. Remote sensing image fusion based on curvelet transform [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, 19(3): 400-403. [李晖晖,郭雷,刘坤. 基于 Curvelet 变换的 SAR 与可见光图像融合研究 [J]. *光电子激光*, 2008, 19(3): 400-403.]
- [8] Minh N D, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005,14(12):2091-2106.
- [9] Arthur L D C, Zhou J P, Minh N D. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10):3089-3101.
- [10] Eckhorn R, Reitboeck H J, Arndt M. Feature linking via synchronization among distributed assemblies: simulations of results from cat visual cortex[J]. *Neural Computation*, 1990, 2(3): 293-307.
- [11] Huang W, Zhang L J. Multi-focus image fusion using pulse coupled neural network [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(9): 1123-1132.
- [12] Wang Z B, Ma Y D, Gu J. Multi-focus image fusion using PCNN [J]. *Pattern Recognition Letters*,2010, 43(6):2003-2016.
- [13] Li W, Zhu X F. A new algorithm of multi-modality medical image fusion based on pulse-coupled neural networks[C]// *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 995-1001.
- [14] Qu X B, Yan J W. Multi-focus image fusion algorithm based on regional firing characteristic of pulse coupled neural networks [C]// *Proceedings of International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*. Zhengzhou: IEEE, 2007:62-66.
- [15] Miao Q G, Wang B S. A novel image fusion algorithm based on local contrast and adaptive PCNN[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(5):875-880. [苗启广,王宝树. 基于局部对比度的自适应 PCNN 图像融合 [J]. *计算机学报*,2008, 31(5):875-880.]
- [16] Wang M, Peng D L, Yang S Y. Fusion of multi-band SAR images based on nonsubsampling contourlet and PCNN [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Natural Computation*. Washington DC, USA:IEEE Computer Society, 2008:529-533.
- [17] Xiao W, Wang R F. Image fusion algorithm based on nonsubsampling contourlet transform and pulse coupled neural network [J]. *Journal of Computer Applications*, 2008,28(S2):164-167. [肖伟,汪荣峰. 基于非下采样 contourlet 变换与脉冲耦合神经网络的图像融合算法 [J]. *计算机应用*, 2008, 28(S2):164-167.]
- [18] Yang S Y, Wang M, Lu Y X. Fusion of multiparametric SAR images based on SW-nonsampling contourlet and PCNN [J]. *Signal Processing*, 2009,89(12):2596-2608.
- [19] Qu X B, Yan J W, Xiao H Z. Image fusion algorithm based on spatial frequency-motivated pulse coupled neural networks in nonsubsampling contourlet transform domain[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008,34(12):1508-1514.
- [20] Rafael C, Gonzalez R E, Woods S L E. *Digital Image Processing Using MATLAB* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:289-295. [Rafael C, Gonzalez R E, Woods S L E. *数字图像处理(MATLAB)* [M]. 阮秋琦,等译.北京:电子工业出版社,2005:289-295.]
- [21] Gu X D, Zhang L M, Yu D H. Automatic image segmentation using Unit-linking PCNN without choosing parameters [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2007,12(6):54-59. [顾晓东,张立明,余道衡. 用无需选取参数的 Unit-linking PCNN 进行自动图像分割[J]. *电路与系统学报*, 2007,12(6):54-59.]
- [22] Liu S P, Fang Y. Infrared image fusion algorithm based on contourlet transform and improved pulse coupled neural network [J]. *Infrared Millim. Waves*, 2007,26(3):217-221. [刘盛鹏,方勇. 基于 Contourlet 变换和 IPCNN 的融合算法及其在可见光与红外线图像融合中的应用[J]. *红外与毫米波学报*,2007, 26(3):217-221.]