

# 受昆虫视觉启发的多光谱遥感 影像特征检测器模型

徐立中<sup>1,2</sup>, 李 敏<sup>1</sup>, 石爱业<sup>1,2</sup>, 汤 敏<sup>1</sup>, 黄凤辰<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学通信与信息系统工程研究所, 江苏南京 210098)

**摘 要:** 本文受昆虫视觉系统时空域特征交互作用机理的启发, 跳出传统遥感影像特征提取算法的研究思路, 在无需考虑局部窗口尺寸和参数估计的条件下, 提出利用波段交叉相关提取边缘纹理特征信息的多光谱遥感影像特征检测器模型. 通过频谱域分析证明该模型可以综合光谱信息和空间信息对边缘纹理特征产生响应, 具有较好的普适性和较强的抗噪能力. 本文还将该特征检测器模型带入遥感影像重构算法中, 获得了高频信息丰富的重构效果, 验证了特征检测器模型的有效性.

**关键词:** 遥感影像; 昆虫视觉系统; 特征提取; 空域特征; 光谱特征

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 11-2497-05

## Feature Detector Model for Multi-Spectral Remote Sensing Image Inspired by Insect Visual System

XU Li-zhong<sup>1,2</sup>, LI Min<sup>1</sup>, SHI Ai-ye<sup>1,2</sup>, TANG Min<sup>1</sup>, HUANG Feng-chen<sup>1,2</sup>

(1. College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Institute of Communication and Information System Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** Inspired by the theory of interaction between spatial feature and temporal feature in insect visual system, beyond the traditional feature extraction method, this paper proposes a feature detector model for multi-spectral remote sensing image, which is based on the cross correlation of multi-band, and without the limitation of the global window size and parameters. By the analysis in frequency domain, it showed that this feature detector model can respond to the edge and texture by integrating spectral information and spatial information. Beside this, the proposed feature detector model was effective and robust to the random noise. This paper also brings the feature detector model into reconstruction algorithm of remote sensing image. Reconstructed results validate the effectiveness of the feature detector model, which contains rich high-frequency information.

**Key words:** remote sensing image; insect visual system; feature extraction; spatial feature; spectral feature

## 1 引言

遥感影像中的边缘和纹理特征信息是识别和区分地物属性的重要依据, 是实现遥感影像分类、变化监测和目标提取的关键技术之一. 现有的特征提取算法大多采用空间变换、统计量分析及能量滤波等方法获取边缘和纹理特征. 例如基于灰度共生矩阵、基于能量滤波器算法、基于正交基的偏最小二乘法、基于核函数与非参数加权特征提取算法<sup>[1]</sup>以及非参数的特征提取算法<sup>[2,3]</sup>等. 国内利用 Gabor 变换<sup>[4]</sup>和小波变换等<sup>[5]</sup>多尺度分析方法提取影像中的高频信息也较为普遍, 除此以外近几年来肖鹏峰、冯学智<sup>[6,7]</sup>还提出利用频域相位特

征提取高分辨率遥感影像特征的方法. 然而以上算法均不能综合利用多波段提供的光谱信息; 同时基于局部窗口的检测方法不仅依赖于影像的空间分辨率, 还涉及到参数估计问题. 自然界中昆虫的视觉系统具有很强的适应性和稳定性, 可以对复杂的视觉环境进行快速的分析和理解, 这对于计算机视觉来讲是相当困难的. 研究发现, 昆虫视觉系统对目标的识别和理解是动态时域特征和静态空域特征综合作用的结果<sup>[8]</sup>. 然而目前大多数计算机视觉的目标识别方法或是基于静态空域特征、或是基于动态时域特征, 均没有考虑两类特征之间的交互作用.

在此启发下, 本文针对多光谱遥感影像同时具有

空域特征和光谱特征的优势,提出一种利用光谱特征与空域特征交互实现特征提取的多光谱遥感影像特征检测器模型.该模型将单波段影像中不同地物光谱差异形成的空域特征映射为单波段包含的空域特征;将多波段影像中相同地物不同光谱强度形成的光谱特征映射为多波段包含的光谱特征,通过多波段光谱特征与单波段空域特征的相关提取影像中的边缘纹理特征.该特征检测器模型具有以下特点:首先该检测器模型无需参数估计和窗口选择,提取结果不受影像内容和空间分辨率的限制,表现出较好的普适性;其次基于二阶相关运算的特征检测器模型具有较好的抗噪声性能,为后续影像分类、配准和目标识别提供可靠的特征信息.本文还将特征检测器模型带入三种经典的遥感影像超分辨率重构算法中验证该模型对高频信息提取的有效性.

## 2 多光谱遥感影像特征检测器模型

遥感影像中不同地物在同一波段上的光谱强度差异与相同地物在不同波段上的光谱反射差异构成了由地物成分、纹理等决定的“图谱合一”的观测特性<sup>[9]</sup>.综合考虑多波段提供的地物波谱特性将有助于提取影像中的边缘纹理特征.按照空域信息与光谱信息交叉相关的思想,选择空间相邻两个像元的光谱强度值作为特征检测器模型的输入,采用对称交叉相乘的方式如图1所示.图1中白色圆点和灰色圆点分别标记了对应相乘的像元, $I_{k_1}(i,j)$ 和 $I_{k_2}(i,j)$ 分别为 $k_1$ 波段与 $k_2$ 波段在相同空间位置 $(i,j)$ 上的光谱强度值, $I_{k_1}(i+\Delta\phi,j)$ 为 $k_1$ 波段在水平方向上与第 $(i,j)$ 个像元间隔 $\Delta\phi$ 距离处的光谱强度值, $I_{k_2}(i+\Delta\phi,j)$ 同理.对于第 $(i,j)$ 个像元,特征检测器的输出 $R_h(i,j)$ 为 $k_1$ 波段与 $k_2$ 波段在水平方向上间隔为 $\Delta\phi$ 距离的光谱强度交叉相关后相减的结果:

$$R_h(i,j) = I_{k_1}(i,j)I_{k_2}(i+\Delta\phi,j) - I_{k_1}(i+\Delta\phi,j)I_{k_2}(i,j) \quad (1)$$

利用欧几里得距离计算点 $(i,j)$ 位置上的特征信息,当空间间隔为1个像元时,检测器输出为:

$$R_h(i,j) = I_{k_1}(i,j)I_{k_2}(i+1,j) - I_{k_1}(i+1,j)I_{k_2}(i,j) \quad (2)$$

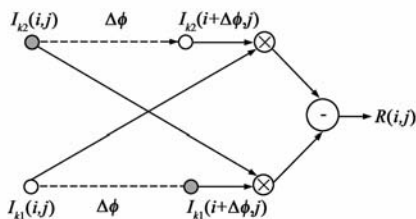


图1 多光谱遥感影像特征检测器模型

$$R_v(i,j) = I_{k_1}(i,j)I_{k_2}(i,j+1) - I_{k_1}(i,j+1)I_{k_2}(i,j) \quad (3)$$

$$M(i,j) = \sqrt{R_h(i,j)^2 + R_v(i,j)^2} \quad (4)$$

其中, $(R_h(i,j), R_v(i,j))$ 为第 $(i,j)$ 个像元在水平方向和垂直方向上的特征信息, $M(i,j)$ 的大小反映了第 $(i,j)$ 像元处的光谱强度变化情况,即该空间位置上的边缘纹理特征值.

## 3 多光谱遥感影像特征检测器频域响应特性分析

根据离散信号互相关函数的定义,对于离散信号 $x(n)$ 与 $y(n)$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ),两信号的互相关函数 $C_{xy}(m)$ 为:

$$C_{xy}(m) = E[x(n)y(n+m)] \quad (5)$$

考虑到特征检测器模型水平方向输出 $R_h(i,j)$ 的行平均响应为:

$$R_h(i) = E[R_h(i,j)] = E[I_{k_1}(i,j)I_{k_2}(i+\Delta\phi,j) - I_{k_1}(i+\Delta\phi,j)I_{k_2}(i,j)] \quad (6)$$

由式(5)可知行平均响应可以表示为两个互相关函数之差:

$$\overline{R_h(i)} = C_{k_1,k_2}(\Delta\phi) - C_{k_1,k_2}(-\Delta\phi) \quad (7)$$

其中 $\overline{R_h(i)}$ 为 $R_h(i,j)$ 在水平方向上行平均响应, $C_{k_1,k_2}(\Delta\phi)$ 为第 $k_1$ 波段与 $k_2$ 波段在水平方向上相隔 $\Delta\phi$ 空间距离的互相关系数.将 $\overline{R_h(i)}$ 进行离散傅里叶变换得到特征检测器输出的功率谱密度为:

$$\overline{R_h(f_s)} = F\{\overline{R_h(i)}\} = F\{C_{k_1,k_2}(\Delta\phi)\} - F\{C_{k_1,k_2}(-\Delta\phi)\} \quad (8)$$

其中 $F\{\cdot\}$ 为傅里叶变换.根据傅里叶变换平移不变性:

$$F\{C_{k_1,k_2}(\Delta\phi)\} = F\{C_{k_1,k_2}(0)\}e^{j2\pi f_s \Delta\phi} \quad (9)$$

那么:

$$\overline{R_h(f_s)} = F\{C_{k_1,k_2}(0)\}e^{j2\pi f_s \Delta\phi} - F\{C_{k_1,k_2}(0)\}e^{-j2\pi f_s \Delta\phi} \quad (10)$$

互相关函数 $C_{k_1,k_2}(\Delta\phi)$ 的傅里叶变换为互功率谱密度函数,记为 $P_{k_1,k_2}(f_s)$ ,则有:

$$\overline{R_h(f_s)} = P_{k_1,k_2}(f_s) \cdot e^{j2\pi f_s \Delta\phi} - P_{k_1,k_2}(f_s) \cdot e^{-j2\pi f_s \Delta\phi} \quad (11)$$

$$\overline{R_h(f_s)} = P_{k_1,k_2}(f_s) [e^{j2\pi f_s \Delta\phi} - e^{-j2\pi f_s \Delta\phi}] \quad (12)$$

根据欧拉公式可以将上式简化为:

$$\overline{R_h(f_s)} = 2j \cdot P_{k_1,k_2}(f_s) \cdot \sin(2\pi f_s \Delta\phi) \quad (13)$$

由于 $\sin(2\pi f_s \Delta\phi) = \frac{2\pi f_s \Delta\phi}{1 + (2\pi f_s \Delta\phi)^2}$ ,因此检测器的行

平均响应频域表达式 $\overline{R_h(f_s)}$ 的角度为 $\frac{\pi}{2}$ ,幅度为:

$$|\overline{R_h(f_s)}| = P_{k_1, k_2}(f_s) \cdot \frac{4\pi f_s \Delta\phi}{1 + (2\pi f_s \Delta\phi)^2} \quad (14)$$

互相关函数  $C_{k_1, k_2}(\Delta\phi)$  为实函数, 其互功率谱密度函数  $P_{k_1, k_2}(f_s)$  也为实函数, 且互功率谱密度函数  $P_{k_1, k_2}(f_s)$  的大小表示空间频率为  $f_s$  的频率成分在  $k_1, k_2$  波段之间的相关程度. 由上式可知当波段组合和空间间隔  $\Delta\phi$  一定时, 特征检测器模型的频域响应输出  $\overline{R_h(f_s)}$  与影像中的空间频率成分  $f_s$  以及该频率成分在两波段之间的相关性大小有关.

### 3.1 波段之间互相关性的差异分析

经研究发现自然光照条件下不同图像具有较为规律的统计学特性, 即图像的自功率谱密度函数  $P(f_s)$  的幅度随空间频率  $f_s^{-(2+\eta)}$  衰减, 其中  $\eta$  为较小的正数. 即不同图像中同一频率成分的自相关性成正比例关系. 因此对于不同波段之间的互功率谱密度  $P_{k_1, k_2}(f_s)$  是否服从这样规律进行验证. 选择天津港地区和百家

湖地区的多光谱遥感影像, 绘出在不同波段组合下互功率谱密度函数与空间频率的关系曲线, 如图 2 所示. 其中  $B_1, B_2$  代表第 1 波段和第 2 波段,  $B_3, B_4$  同理. 图 2(a) 和 (b) 为两地区多光谱遥感影像的自功率谱密度曲线; (c) 和 (d) 分别为不同波段组合下互功率谱密度曲线; (e)、(f) 是归一化处理后的互功率谱密度曲线.

由图 2 可知: (1) 同一地区多光谱遥感影像, 其波段之间的互功率谱密度函数  $P_{k_1, k_2}(f_s)$  的幅度随空间频率  $f_s^{-(2+\eta)}$  衰减. 波段之间的互相关性强弱由空间频率  $f_s$  决定, 在低频部分相关性较强; 高频部分相关性较弱. (2) 不同波段组合下互功率谱密度函数的衰减特性成比例分布, 即特定空间频率  $f_s$  的互相关性(互功率谱密度函数的幅度)与波段选择无关; (3) 对各个单波段影像进行了归一化处理之后, 不同波段组合下互功率谱密度幅度差异明显降低.

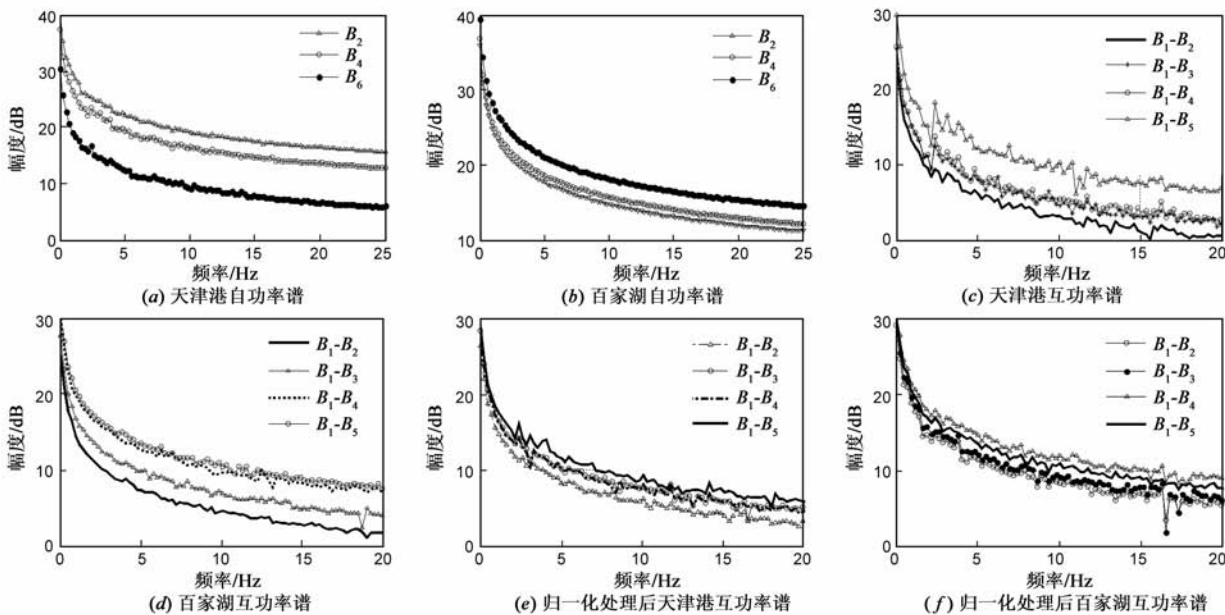


图2 功率谱密度曲线图

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验一

本实验选择美国路易斯安那州新奥尔良军用机场地区 Landsat 7 ETM+ 遥感数据, 截取大小为  $200 \times 200$  的局部区域作为研究对象. 图 3(a) 为该影像的第 2、3、4 波段合成的假彩色图像. 图 3(b) 为 Sobel 算子提取的边缘纹理特征, 提取结果明显存在断点. 图 3(c)、(d) 分别为第 3、5 波段影像进行 Gabor 变换提取的  $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ]$  四个方向边缘纹理特征之和. 可见基于 Gabor 变换获得的边缘纹理特征虽然较为清晰, 但由于 Gabor 变换仅利用了单波段影像提供的空域信息, 并没有考虑到

多波段提供的光谱信息, 因此存在一定的局限性.

图 3(e) 和 (f) 分别第 3、4 波段与第 4、5 波段组合下特征检测器模型获得的特征信息, 空间间隔为  $\Delta\phi = 1$ . 比较图 3(e) 和 (f) 可知, 虽然不同波段组合下特征检测器获得的特征功率谱相同, 但在能量分布上存在一定的差异, 因此本文将两种具有代表性的波段组合提取结果进行叠加, 消除由于能量分布不均导致的纹理差异. 图 3(g) 为叠加 (e)、(f) 获得的边缘纹理特征, 图 3(h) 为选择空间间隔为  $\Delta\phi = 2$  时叠加 3、4 波段与 4、5 波段组合下获得的特征信息. 可见特征检测器模型提取的特征信息充分利用了地物在多波段反射特性的差异弥补单波段遥

感影像对比度低的特点,实现完整的边缘提取效果.并且无需考虑参数估计以及局部窗口选择的问题.

但是比较图 3(g)、(h)可知空间间隔影响了边缘纹理的清晰度.空间采样间隔  $\Delta\phi$  不同,检测到的边缘纹理特征不同.选择较大的采样间隔将有利于较宽边缘纹理的感知,但过大的空间采样间隔将导致较细边缘纹理的模糊.针对遥感影像中边缘纹理密度较高的情况,应主要选择较小的空间间隔.因此自适应的选择

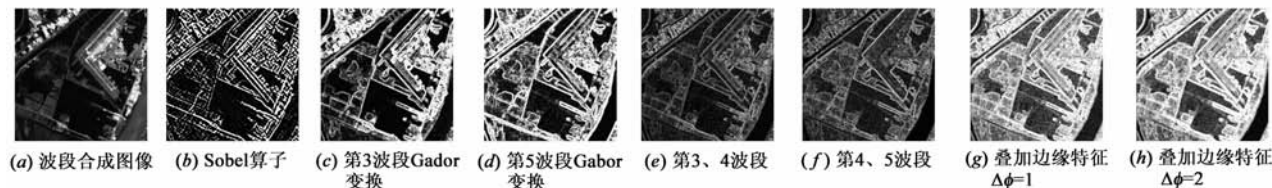


图3 新奥尔良军用机场地区多光谱遥感影像边缘检测结果

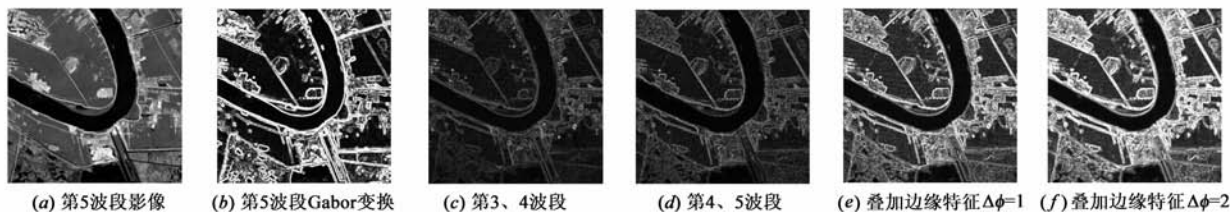


图4 密西西比河地区多光谱遥感影像边缘检测结果

基于 Gabor 变换的特征检测结果在边缘处的提取效果很理想,但是对于植被和河流区域在纹理上的区别却无法反应,而本文的特征检测器模型可以明显的区分这两种地物的纹理差异,有利于后续的分类和识别处理.

## 4.2 实验二

为了验证多光谱遥感影像特征检测器模型在特征提取上的优越性,本文将特征检测器模型引入多光谱遥感影像的超分辨率重构算法中,分别对快速鲁棒迭代反投影算法、经典的 MAP 重构算法以及小波重构算法进行比较.通常情况下,多光谱遥感影像中第 5 波段的地物信息丰富,本实验分别采用三种改进重构算法对该波段影像进行重构.

图 5(a)为原始单波段高分辨率遥感影像,将其进行下采样和模糊处理后获得了仿真的低分辨率遥感影像,图 5(b)~(g)为三种算法及其改进算法的重构结果.在图 5 的实验结果中提取每幅图像第 120 行的灰度

采样间隔还有待于进一步的研究.

图 4 采用美国路易斯安那州密西西比河附近区域 Landsat 7 ETM+ 遥感数据作为研究对象,拍摄时间为 2000 年 4 月,截取大小为  $256 \times 256$  区域进行特征提取.图 4(a)为第 5 波段影像,(b)为 Gabor 变换获得的特征信息,(c)、(d)分别为 3、4 波段和 4、5 波段组合下特征检测器获得的结果.与图 3 同理,图 4(e)、(f)为不同空间采样间隔下叠加不同波段组合获得的特征信息.

值进行比较,如图 6 所示.

图 6(a)为真实的高分辨率遥感影像(°线)和本文改进的小波重构结果(粗实线)进行比较.小波重构算法仅对影像中的高频系数进行估计,与真实高分辨率遥感影像相比,改进的小波重构算法具有更高的对比度.图 6(b)为快速鲁棒的重构结果(°线)、带入特征检测器模型的改进鲁棒算法重构结果(粗实线)与真实高分辨率遥感影像(△线)进行比较.可见鲁棒重构算法的对比度较低,而改进的鲁棒重构算法很好的拟合了真实高分辨率影像的光谱变换特征,因此基于特征检测器模型的重构算法有效的恢复了高频成分.图 6(c)为 MAP 重构结果(\*线)、带入特征检测器模型的改进 MAP(粗实线)结果与真实高分辨率遥感影像(°线)比较.可见两种算法获得的重构结果与真实高分辨率影像相近,都可以较好的恢复影像中的边缘和纹理细节.其中改进 MAP 算法具有较高的对比度,从而细节更加明显.

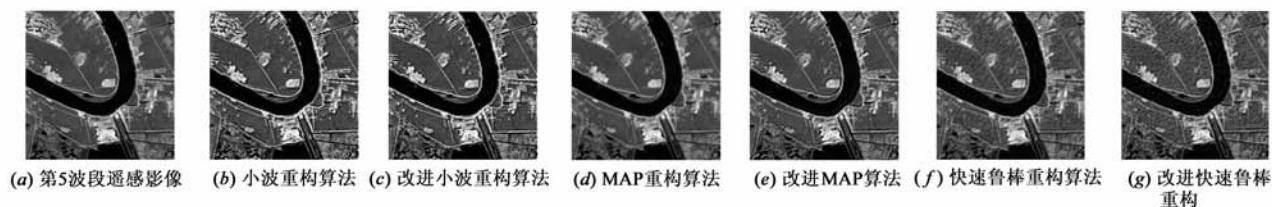
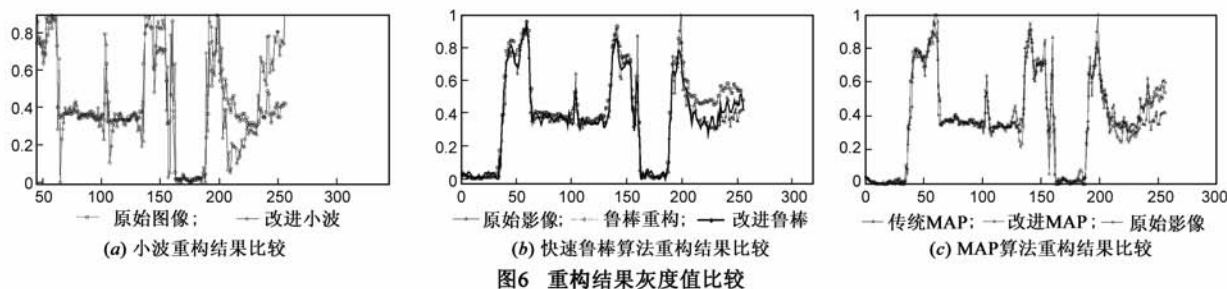


图5 三种重构算法结果的比较



## 5 结论

本文在昆虫视觉系统的时空域信息交互感知机理的启发下提出一种基于波段交叉相关的特征检测器模型,该模型充分利用了遥感影像中丰富的光谱信息,避免了基于单波段影像特征分析方法易受波段变化影响的缺点.而利用该特征检测器模型改进的重构算法也获得了高频信息丰富的重构结果,从而证明了该模型的有效性.然而,该模型还需在以下几点进行完善,首先寻找自适应的采样间隔选择策略,以适应不同地物特征的清晰提取;其次该模型还无法克服对于椒盐噪声引起的光谱值突变问题,从而增加适当的后处理进一步提高模型的抗噪性能仍有待于进一步的研究.

## 参考文献

- [1] Arenas-Garcia J, Camps-Valls G. Feature extraction from remote sensing data using kernel orthonormalized PLS [A]. Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. Barcelona, 2007. 258 – 261.
- [2] Kuo B C, Li C H, Yang J M. Kernel nonparametric weighted feature extraction for hyperspectral image classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 1139 – 1155.
- [3] Yang J M, Yu P T, Kuo B C. A nonparametric feature extraction and its application to nearest neighbor classification for hyperspectral image data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1279 – 1293.
- [4] 雷琳,王壮,栗毅.基于多尺度 Gabor 滤波器组的不变特征点提取新方法[J].电子学报,2009,37(10):2314 – 2319. Lei L, Wang Z, Su Y. A new invariant feature detector based on multi-scale gabor filter bank [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2314 – 2319. (in Chinese)
- [5] 陈捷,陈标,许素芹.基于二维连续小波变换的 SAR 图像海洋现象特征检测[J].电子学报,2010,38(9):2128 – 2133. Chen J, Cen B, Xu S Q. Detection of ocean features in SAR images with 2D continuous wavelet power spectrum [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2128 – 2133. (in Chinese)

- [6] 肖鹏峰,冯学智.高分辨率遥感图像频域特征提取与图像分割研究[J].测绘学报,2008,37(3):401 – 401. Xiao P F, Feng X Z. Segmentation of high-resolution remotely sensed imagery based on features in frequency domain [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 401 – 401. (in Chinese)
- [7] 王珂,肖鹏峰.基于二维希尔伯特变换的相位一致模型图像特征检测方法[J].测绘学报,2010,39(6):605 – 617. Wang K., Xiao P. F. The algorithm of image features detection from phase congruency model based on 2-D hilbert transform [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(6): 605 – 617. (in Chinese)
- [8] Watt R J, Phillips W A. The function of dynamic grouping in vision [J]. Trends in Cognitive Sciences, 2000, 4(12): 447 – 454.
- [9] 贺霖,潘泉,邸■,等.高光谱图像目标检测研究进展[J].电子学报,2009,37(009):2016 – 2024. He L, Pan Q, et al. Research advance on target detection for hyperspectral imagery [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(009): 2016 – 2024. (in Chinese)

## 作者简介



徐立中(通信作者) 男,1958 出生,山东东营人,博士,河海大学计算机与信息学院教授、博士生导师、副院长,研究方向:遥感遥测信息处理、信息系统集成、系统建模与优化。  
E-mail: lzhu@hhu.edu.cn, hhice@126.com



李敏 女,1982 出生,山西大同人,河海大学计算机与信息学院博士研究生,研究方向:遥感信息处理、仿生系统建模与信息处理。  
E-mail: lm\_0711@163.com