

# 结合光谱和尺度特征的高分辨率图像边缘检测算法

李 晖<sup>1</sup>, 肖鹏峰<sup>1\*</sup>, 冯学智<sup>1</sup>, 林金堂<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学 地理信息科学系, 江苏 南京 210093;

2. 厦门理工学 空间信息科学与工程系, 福建 厦门 361024;

3. 闽江学院 地理科学系, 福建 福州 350108)

**摘要:** 高分辨率遥感图像具有高度细节化的多尺度表达能力, 在有效表达地物边缘信息的同时, 目标内部几何细节常以噪声的形式出现. 提出将光谱相异性和小波变换相结合的边缘特征检测算法, 克服了小波变换导致的边缘变形, 并能够有效抑制噪声. 根据光谱角原理定义归一化光谱相异性模型, 并与二进小波变换结合, 同时利用梯度方向余弦值对各个波段的梯度幅值加权, 最后根据向量场模型计算多光谱图像的梯度幅值和梯度方向, 细化后获取由细到粗的多层次边缘特征. 实验结果与小波变换和传统检测算子的检测结果相比, 表明该算法利用光谱相异性信息增强边缘响应强度, 保证了所有尺度下获取的边缘轮廓不失真, 边缘点定位准确; 加权处理突出了多波段梯度主方向信息, 也有效抑制了高分辨率图像上目标内部精细几何细节形成的噪声.

**关键词:** 光谱相异性; 小波变换; 多尺度; 高分辨率图像; 边缘检测

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## Edge detection of high-resolution imagery by integrating spectral and scale characteristics

LI Hui<sup>1</sup>, XIAO Peng-Feng<sup>1\*</sup>, FENG Xue-Zhi<sup>1</sup>, LIN Jin-Tang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geographical Information Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Department of Spatial Information Science and Engineering, Xiamen 361024, China;

3. Department of Geography Science, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The highly detailed information of objects can be provided in multi-scale by high-resolution remotely sensed imagery. When edge feature are detected in high-resolution image effectively, the internal geometric details also come to light but as noise form. In order to detect multi-scale edge feature and suppress noise, a novel method to detect the edge feature integrated spectral difference with wavelet transform was developed. Firstly, based on the theory of spectral angle, spectral difference normalized model (NSD) was defined to picture the contour of the object. Secondly, the dyadic wavelet transform was applied for each band to produce the multi-scale edge detail coefficients which actually are the gradient, and then weight the gradient magnitude of each band by using the cosine of gradient direction to enlarge the edge feature in the main gradient direction. Thirdly, combined with NSD, first fundamental form was used for detecting the gradient magnitude and orientation of multispectral images at different levels. Experiment by using QuickBird multispectral images are presented to demonstrated the representation efficiently. Compared with the results from wavelet transform and traditional edge detection operator, the proposed method can guarantee the edge without distortion, depict edge points more accurately and suppress more noise.

**Key words:** spectral difference; wavelet transform; multi-scale; high-resolution image; edge feature detection

**PACS:** 95.75.Rs

收稿日期:2011-08-08, 修回日期:2012-02-08

Received date: 2011-08-08, revised date: 2012-02-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划课题(2008AA12Z106); 国家自然科学基金项目(40801166, 40771137); 高等学校博士学科点专项科研基金课题(200802841012)

Foundation item: Supported by National High Technology Research and Development Program of China(2008AA12Z106), National Natural Science Foundation of China(40801166, 40771137); and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(200802841012)

作者简介(Biography): 李 晖(1985-), 女, 湖北老河口人, 博士研究生, 主要研究邻域为遥感数字图像处理. E-mail: lih666@163.com.

\* 通讯作者( Corresponding author ): E-mail: xiaopf@mail.com.

## 引言

高分辨率遥感图像的边缘集中了图像的大部分信息,它的确定与提取对于整个图像的认识与理解是非常重要的<sup>[1]</sup>.边缘检测技术能够有效综合高分辨率多光谱图像丰富的光谱信息和地物的空间信息,得到局部的突变,形成边缘,从而进行图像中地物的识别.

光谱特征是遥感图像与一般图像的重要区别,是地物光谱信息的表达<sup>[2]</sup>.高的空间分辨率和低的光谱分辨率常常导致地物边缘在不同波段图像之间在不同程度上存在不一致,因此采用传统的将多个波段的边缘特征进行合并<sup>[3]</sup>或先降维后检测<sup>[4]</sup>方法必然使得检测出的地物边缘出现较大的不确定性.因此,将多光谱图像作为整体进行边缘检测是一个重要的发展趋势.

高分辨率遥感图像体现出很强的层次特征.同时,具有高度细节化的表现能力<sup>[5]</sup>.小波变换能够提供多分辨率分析在大尺度下抑制噪声,在小尺度下精确定位<sup>[6]</sup>.然而小波变换时的边界条件采用镜面投影处理,边缘可能产生失真,且随着尺度增大,失真会变得严重.

提出一种结合光谱和尺度特征的多光谱图像边缘特征检测提取算法.首先,根据光谱角定义<sup>[7]</sup>,在光谱特征空间中建立像素点的归一化光谱相异强度模型,用以衡量该点光谱向量与相邻像素之间光谱相异强度,强度越大,表征为地物边缘点的可能性大,反之越小,该方法能够检测出较为完整的地物轮廓边缘;将多光谱图像看作整体,先对每个波段的图像分别进行二进小波变换,获取不同尺度的细节图像,同时利用梯度方向余弦值进行加权,削弱噪声影响,结合归一化光谱相异模型和小波细节系数;根据向量场模型,利用第一基本形式,计算获取梯度幅值和梯度方向;最后,利用 Canny 提出的非极大值抑制算法(NMS, Non-Maxima Suppression),沿规范化后的梯度方向,检测并提取梯度极大值点,即边缘点.最后以 Quickbird 多光谱图像为实验数据,实验结果与传统算法检测结果进行比较,证明了算法的有效性.

## 1 光谱向量空间和归一化光谱相异性模型

### 1.1 光谱向量空间和光谱向量夹角(SA, Spectral Angle)

多光谱和高光谱影像是地物光谱信息的表达,

地物在不同波段的灰度值构成了光谱空间.不同类型的地物,在多维光谱空间中构成不同的特征向量.在理想情况下,同一地物对应的多光谱图像上的像素点具有相同光谱响应.

单波段遥感图像记录的像元灰度值可以看作该像元的一维向量,多波段的遥感数据  $I_n, n = 1, \dots, N$  的像元向量维数是多维的,特定像元的向量表示为:

$$I_n(x, y) = [I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_n(x, y)]^T \quad (1)$$

其中,  $x, y$  为像元位置,  $n$  代表维数,即波段数,  $I$  表示像元灰度值.下文中  $I_n$  代表多光谱图像,  $I$  为单波段图像.

高光谱和多光谱图像的每一个像元构成一个光谱向量,即光谱曲线.曲线相似度越大,属于同一类地物的可能性就越大,反之亦然.分辨率图像波段数目不多,且波谱不连续,采用光谱向量夹角模型能够有效度量光谱向量相似性/相异性.

在光谱向量空间中,  $I_n$  上的两个像素  $A(x_A, y_A)$  和  $B(x_B, y_B)$  的光谱曲线(即向量)分别为  $A_n = (I_1(x_A, y_A), I_2(x_A, y_A), \dots, I_n(x_A, y_A))$  和  $B_n = (I_1(x_B, y_B), I_2(x_B, y_B), \dots, I_n(x_B, y_B))$ , 则  $A$  和  $B$  两个向量之间的夹角  $\theta$  即  $SA(A, B)$  的余弦定义为<sup>[7]</sup>

$$\cos\theta = \cos SA(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (2)$$

$\cos\theta$  越接近 1, 光谱向量相似性越高;越接近 0, 相似性越差;当  $\cos\theta = 0$  时,两个光谱向量相互垂直.

### 1.2 归一化光谱相异性模型(NSD, Normalized Spectral Difference)

光谱相异性可用  $1 - \cos\theta$  来定义.利用比值法突出差异,定义综合相异性度量算子为  $(1 - \cos\theta) / \cos\theta$ .

对于多光谱图像上一像素点  $I(x, y)$ , 其向量表示为  $I = (I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_n(x, y))$ , 根据式(2), 定义像素点  $I(x, y)$  的归一化的综合光谱相异性模型  $NSD(x, y)$ :

$$1) NSD(x, y) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1 - \cos\theta_i}{\cos\theta_i} \right), \text{ 当 } I(x, y)$$

为图幅的四个角点,存在 3 邻域像素,见图 1(b);

$$2) NSD(x, y) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left( \frac{1 - \cos\theta_i}{\cos\theta_i} \right), \text{ 当 } I(x, y)$$

位于图幅四条边(除四个角点外),为 5 邻域,见图 1(c);

$$3) NSD(x, y) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \left( \frac{1 - \cos\theta_i}{\cos\theta_i} \right), \text{ 其他像素点}$$

为 8 邻域,见图 1(d).

$NSD(x, y)$  定量描述了像素  $I(x, y)$  与相邻元素光谱差异的归一化值. 值越大, 表明该像素点与相邻像素点差异越大, 不属于同一类地物的可能性越大, 表征为边缘特征的可能性越大; 反之亦然. 一般情况下, 多光谱图像中的噪点与相邻像素光谱有较大差异, 通过对 NSD 结果阈值化处理, 去除一部分噪点.

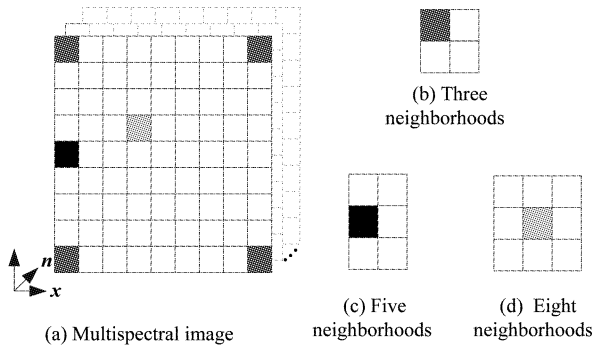


图 1 光谱向量空间和三种邻域模型  
Fig. 1 Spectral vector space and three neighborhood models

## 2 基于光谱改进的多尺度基本形式

### 2.1 第一基本形式和小波变换

对多光谱图像  $I_n$ , 在欧氏空间内定义作为向量图像的“第一基本形式 (FFF, First Fundamental Form)”, 即三维曲面上沿任一给定方向的弧长微分的平方的表达式为

$$\begin{aligned} \|dI_n\|^2 &= \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \sum_n \left(\frac{\partial I_n}{\partial x}\right)^2 & \sum_n \frac{\partial I_n}{\partial x} \cdot \frac{\partial I_n}{\partial y} \\ \sum_n \frac{\partial I_n}{\partial x} \cdot \frac{\partial I_n}{\partial y} & \sum_n \left(\frac{\partial I_n}{\partial y}\right)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}, \quad (3) \\ &= \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} G^{xx} & G^{xy} \\ G^{yx} & G^{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} \end{aligned}$$

FFF 只能提供一个尺度的边缘信息.

设  $\theta(x, y)$  为 2 维可微平滑函数, 对  $x$  和  $y$  的积分都是 1, 且在无穷远处收敛到 0, 定义小波函数为

$$\varphi^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x}, \varphi^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y}, \quad (4)$$

则在  $L_2(R^2)$  中, 图像  $I$  在尺度为  $Z^j$  的  $x$  和  $y$  方向上的二进小波变换为

$$\begin{aligned} L_{2^j} &= I(x, y) * \theta_{2^j}(x, y) \\ D_{2^j}^1 &= L_{2^j} * \varphi_{2^j}^1(x, y), D_{2^j}^2 = L_{2^j} * \varphi_{2^j}^2(x, y) \end{aligned}, \quad (5)$$

其中,  $*$  是卷积算子;  $L_{2^j}$ ,  $D_{2^j}^1$  和  $D_{2^j}^2$  分别是  $I$  的  $j$  级低通分量和两个高通分量 ( $x$  和  $y$  方向).

在尺度  $2^j$ , 平滑后图像中尖锐变化的地方使梯度模函数沿幅角有极大值点, 该极大值点即为图像的边缘. 对于多值图像  $I_n$ , 根据 FFF 和公式 (5), 定义  $(I_n * \theta_{2^j})(x, y)$  微分形式的平方模为

$$\begin{aligned} \|d(I_n * \theta_{2^j})\|^2 &= 2^{-2j} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \sum_n (D_{n,2^j}^1)^2 & \sum_n (D_{n,2^j}^1 D_{n,2^j}^2) \\ \sum_n (D_{n,2^j}^1 D_{n,2^j}^2) & \sum_n (D_{n,2^j}^2)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}, \quad (6) \end{aligned}$$

表达式 (6) 称为第  $j$  尺度基本形式 (MFF, Multiscale Fundamental Form) [8].

### 2.2 基于光谱特征改进的边缘检测算法

多光谱图像中不同波段图像的梯度幅值和方向在不同程度上存在不一致, 因此直接对  $n$  个波段细节进行向量加法运算, 会引起多光谱图像边缘特征信息丢失 [9]. 根据式 (6), 小波变换后的两个细节分量同梯度矢量  $\nabla(I_n * \theta_{2^j})(x, y)$  的两个分量成正比, 梯度方向近似为

$$\alpha = \arccos \frac{D_{2^j}^2}{\sqrt{(D_{2^j}^1)^2 + (D_{2^j}^2)^2}}, \quad (7)$$

$\alpha$  范围为  $[-\pi/2, \pi/2]$ , 将之转换至  $[0, \pi]$ , 符合梯度方向的定义并满足第 4 节中梯度方向规范化的范围. 在  $j$  尺度, 计算图像  $I_n$  中所有  $n$  个波段的梯度方向  $\alpha_n = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ ,  $\max(\alpha_n)$  为梯度方向极大值. 定义

$$\omega_i = \cos(\max(\alpha_n) - \alpha_i), \quad (8)$$

假设  $\max(\alpha_n)$  反映了多个波段的梯度图像的主方向,  $\alpha_i$  为第  $i$  波段的梯度方向.  $\omega_i$  介于 0 和 1 之间,  $\omega_i$  越接近 1, 表明该波段梯度方向与主方向越接近, 权重越大, 反之亦然.

在多光谱图像中, 多个波段图像边缘的方向集中在一个主方向, 不同波段的方向存在微小差异, 此时  $\omega$  值较大, 利用  $\omega$  加权可以突出边缘方向信息; 而对于噪声来说, 其梯度的方向和幅值具有很大的不确定性, 根据假定的主方向, 不同波段的  $\omega$  大小不一, 差异较大, 计算的  $\omega$  值很小, 接近 0, 此时利用  $\omega$  加权可以削弱噪声.

根据 1.2, 因此, 可以利用 NSD 扩大边缘点特征, 减弱非边缘点信息. 据此, 定义结合光谱特征的多尺度基本形式为

$$\begin{aligned}
& \|d(I_n * \theta_{2j})\|^2 \\
&= 2^{-2j} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} SDN \times \sum_n (\omega_n D_{n,2j}^1)^2 & SDN \times \sum_n (\omega_n D_{n,2j}^1 D_{n,2j}^2) \\ SDN \times \sum_n (\omega_n D_{n,2j}^1 D_{n,2j}^2) & SDN \times \sum_n (\omega_n D_{n,2j}^2)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} \\
&= 2^{-2j} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} G_{2j}^{xx} & G_{2j}^{xy} \\ G_{2j}^{xy} & G_{2j}^{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}
\end{aligned} \quad (9)$$

结合光谱和尺度特征的边缘信息包含在非负矩阵  $G_{2j}$  两个特征值和对应的特征向量中. 根据文献 [10], 在第  $j$  尺度上, 对图像的给定像素点  $(x, y)$ , 取多光谱图像梯度向量的模为

$$Grad_{2j} = \sqrt{\lambda_{2j}^+ - \lambda_{2j}^-} \quad (10)$$

梯度的方向即相角取为  $\theta_+$ , 模  $Grad$  沿  $\theta_+$  的局部极大值点对应于平滑后图像灰度的剧变点(奇点), 即图像的边缘点.

### 3 Quickbird 图像及其光谱和尺度特征分析

#### 3.1 实验数据及预处理

选取南京幅 QuickBird 图像为实验图像, 成像时间 2004 年 11 月 21 日, 具有全色 (Pan) 和多光谱 (MSI) 波段. 限于篇幅, 文中所有图像均作缩小显示, 彩色图像为假彩色合成.

QuickBird 数据具有 11 bit 的位深, 但绝大部分像元值集中在 90 ~ 700 的低值区域. 选择直方图均衡化对原始图像进行拉伸, 增强图像反差, 并将 11 bit 的范围压缩到 8 bit 深度.

#### 3.2 光谱特征和尺度特征分析

根据 1.2 计算的 NSD 结果(图 2), 完整地反映了地物的轮廓信息. 噪声在 NSD 图像中为高亮的离散点, 将其去除后的 NSD 值域范围为  $[0, 0.55]$ . 因为高分辨率多光谱图像波段数目较少, 地物光谱曲线不够连续, 获取的 NSD 特征边缘特征非常非单个像素宽, 因此不能直接利用 NSD 结果进行图像边缘特

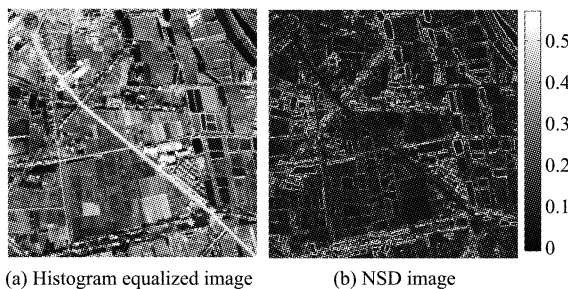


图 2 均衡化后图像及其 NSD 图像  
Fig. 2 Histogram equalized image and its corresponding NSD image

征提取.

图 3(a) 为局部放大图像, (b) 为对应的 NSD 图像. 同一地物类型光谱曲线相似, 不同地物类型差异较大. NSD 越大(即越亮), 与相邻像素差异越大, 越有可能为边缘点; 反之, 越不可能为边缘点, 利用 NSD 可以将 A、B、C 三类地物有效地进行区分.

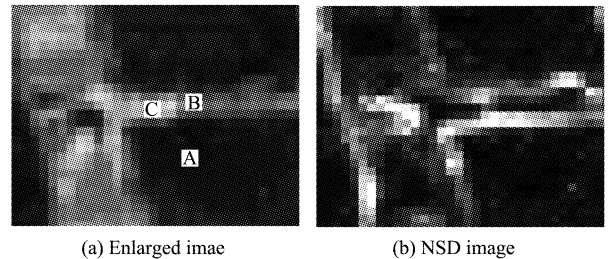


图 3 局部放大图像及其 NSD 和光谱曲线  
Fig. 3 A small piece of the images in Figure 2 enlarged and its corresponding NSD image and spectral curve

直方图表现了图像的背景信息与目标信息的分布. 图 5(a) ~ (c) 为根据式(6)进行多尺度边缘检测的结果; 图 4 为图 5(a)、(b)、(c) 对应的直方图. 在尺度增大的过程中, 检测结果突出了图像中背景信息即结构信息, 而精细结构被模糊.  $j=1$  检测出了图像中最精细尺度的边缘信息, 框 1 即为高亮度的道路及精细的房屋, 通过阈值化可将目标信息与背景清晰地分离. 在  $j=2$  尺度, 框 1 信息被平滑, 框 2 图中像素得到增强, 原图中具有较强辐射特征(道路、建筑物)的精细边缘特征被模糊, 而被抑制的地物信息(农田、河道)被检测出. 随着尺度增加, 框 3 内信息被增强.

### 4 边缘检测实验及分析

B 样条小波边缘检测算子在边界检测综合性能指标上是较佳的<sup>[11]</sup>, 因此选用三次 B 样条函数作为小波函数. 由于小波变换时的边界条件采用镜面投影处理, 随着尺度的增大, 边缘失真严重. 本文经过多次实验, 此处将尺度定为 3. 具体步骤如下:

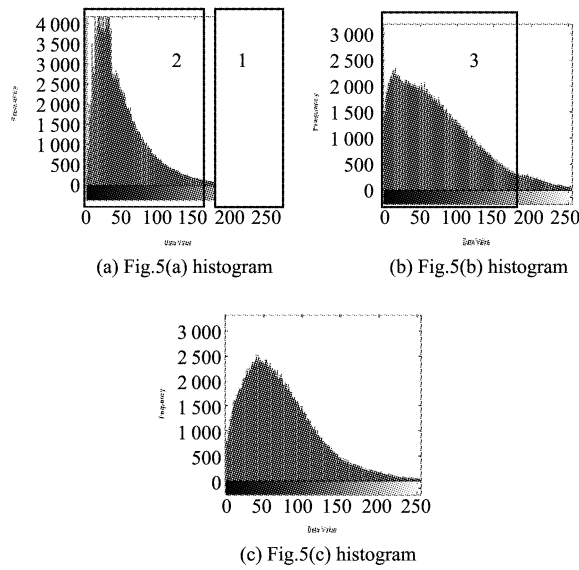


图4 3个尺度梯度幅值直方图(根据 MFF)  
Fig.4 Histogram of gradient at 3 scales(based on MFF)

1) 计算多尺度梯度幅值和方向. 根据式(9)、(10)和(11)计算多光谱图像 3 个尺度的梯度幅值和方向;

2) 规范化梯度方向. NMS 算法考虑像素的 8 邻域, 将计算的梯度方向进行规范化<sup>[11]</sup>.

3) 非极大值抑制.

实验获取了高分辨率多光谱图像的从精细到粗糙的多尺度边缘信息, 综合多个尺度的边缘信息是一个复杂且不确定的问题. 难以确定合适的尺度, 也难以作到在一个尺度上将各种边缘都提取出来同时避免伪边缘, 因此本文未进行多尺度边缘综合, 仅选用  $j=1$  尺度结果图像对比分析.

(1) 多尺度边缘特征分析

考察图 5, 两种算法均获得了复杂图像的多尺度的边缘特征信息. 在  $j=1$  上获取精细地物, 包括道路、精细建筑物等, 有利于边缘点定位; 随着尺度增大, 图像中的农田、水体等图像的结构信息得到增强, 噪声也得到了滤除. 但是小波变换导致地物边缘产生部分失真, 边缘点定位有所偏移, 尤其是图幅边缘部分失真严重, 在较大尺度的检测结果中表现的尤为突出. 本文方法保证了在任何尺度下地物轮廓不失真, 抑制了小波变换的轮廓失真现象, 细化后的前 3 个尺度的边缘点位移几乎可以忽略.

(2) 边缘定位及噪声效应分析

图 6 为局部放大图像的边缘点定位及噪声现象. MFF 算法边缘定位精度较好, 并将图像地物内部精细的几何特征全部检测出, 但表现为噪声的形

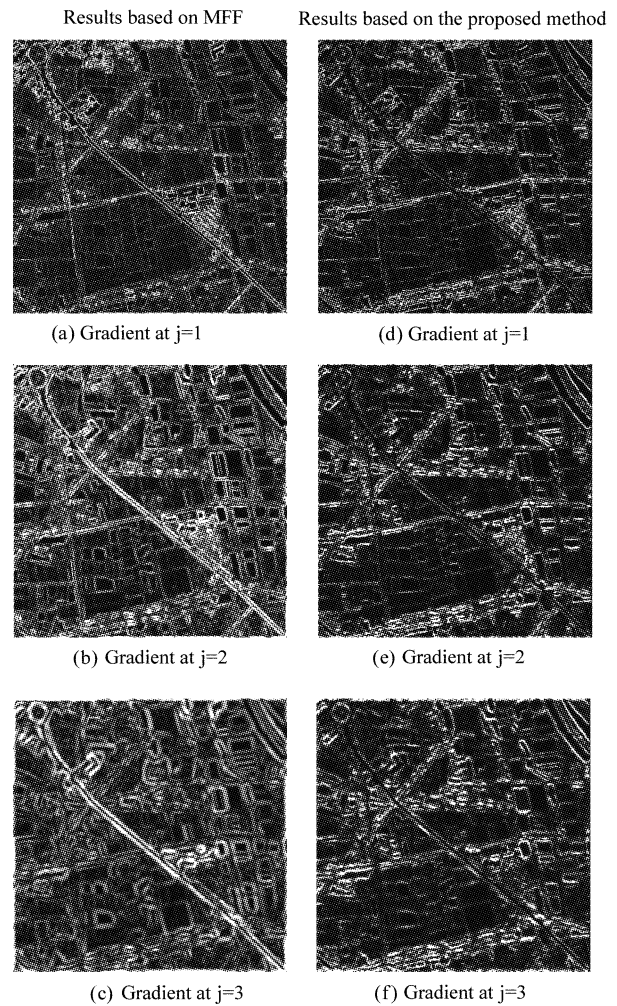


图5 多尺度边缘检测梯度幅值和边缘点图像(MFF 和本文方法)  
Fig.5 Multiscale edge feature detection results of Quick-bird multispectral image(MFF and the proposed method)

式; 本文算法利用 NSD 增强了边缘信息, 削弱了非边缘信息, 利用梯度方向余弦加权, 突出了多波段图像的梯度主方向上的梯度幅值, 抑制了地物内部噪声. 考察图中方框内的地物边缘, 对于左下角水体, 本文算法的边缘点定位准确且连续, MFF 算法存在噪声, Zero-crossing 检测边缘点定位有所偏移, 且响应不均一; 中间的水田边缘以及右上角的水体内部边缘都得到了有效检出及定位, 而 MFF 和 Zero-crossing 结果中均存在漏检及伪边缘现象.

5 结论

高分辨率遥感图像具有大尺寸、多波段、地物类型复杂多变的特点, 并呈现出明显的纹理特征和多尺度特征<sup>[12]</sup>. 在边缘特征检测的过程中, 综合考虑光谱特征以及尺度特性, 提出了一种结合光谱异

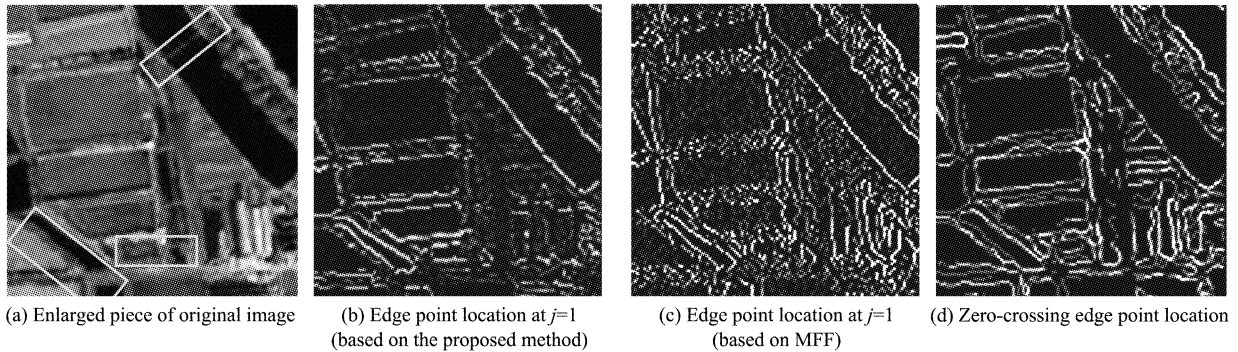


图6 放大的边缘点检测结果对比

Fig. 6 Edge point location results of an enlarged piece of Quickbird Multispectral image (the proposed method, MFF and Zero-crossing)

性模型和小波变换的高分辨率多光谱图像边缘检测算法,在精细尺度下有效滤除噪声,在粗糙尺度下减小变形的影响,使多尺度的边缘特征提取结果有更优的表现.通过建立归一化光谱相异性模型,保持地物轮廓,有效减少了在尺度增加过程中地物轮廓失真现象,削弱了高分辨率图像目标中精细几何细节导致的噪声;将多光谱图像作为整体,利用向量场模型综合多波段边缘信息,减少了不同波段边缘存在的非一致性;利用梯度方向余弦加权,突出了多个波段梯度主方向信息,减弱了噪声影响.

本文定性地对算法检测的有效性与传统方法进行了对比.在后续研究中,将进行边缘点连接实验,实现基于边缘的图像分割,并对边缘检测精度进行定量评价.

## REFERENCES

- [1] XIAO Peng-feng, FENG Xue-zhi, ZHAO Shu-he, *et al.* Feature detection from high-resolution remotely sensed imagery based on phase congruency [J]. *Journal of Remote Sensing* (肖鹏峰,冯学智,赵书河,等.一种基于相位一致的高分辨率遥感图像特征检测方法. *遥感学报*), 2007, **11**(3): 304-311.
- [2] SHU Ning. On the texture of multi-spectral and super-dimensional images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (舒宁.关于多光谱和高光谱影像的纹理问题. *武汉大学学报·信息科学版*), 2004, **29**(4): 292-295.
- [3] Kung S Y, Hu Y H. A highly concurrent algorithm and pipelined architecture for solving toeplitz systems [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1983, **31**(1): 66-76.
- [4] CHENG H D, JIANG X H, Sun Y, *et al.* Color image segmentation: advances and prospects [J]. *Pattern Recognition*, 2001, **34**(12): 2259-2281.
- [5] GONG Peng. Some essential questions in remote sensing science and technology [J]. *Journal of Remote Sensing* (宫鹏.遥感科学与技术中的一些前沿问题. *遥感学报*), 2009, **13**(1): 13-23.
- [6] HOU Biao, LIU Fang, JIAO Li-chen. Automatic segmentation and recognition of ports in high resolution SAR images [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (侯彪,刘芳,焦李成.基于小波变换的高分辨率 SAR 港口目标自动分割. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(5): 385-389.
- [7] XU Wei Dong, YIN Qiu, KUANG Ding-Bo. Comparison of different spectral match models [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (许卫东,尹球,匡定波.地物光谱匹配模型比较研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4): 296-300.
- [8] Scheunders P. A multivalued image wavelet representation based on multiscale fundamental forms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **10**(5): 1204-1211.
- [9] Rydberg A, Borgefors G. Integrated method for boundary delineation of agricultural fields in multispectral satellite images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(11): 2514-2520.
- [10] Sapiro G, Ringach D L. Anisotropic diffusion of multivalued images with applications to color filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, **5**(11): 1582-1586.
- [11] WANG Yu-ping, CAI Yuan-long. Multi-scale spline wavelet edge detection operator [J]. *Science in China (Series A)* (王玉平,蔡元龙.多尺度样条小波边缘检测算子. *中国科学:A 辑*), 1995, **25**(4): 426-437.
- [12] TAN Yu-min, HUAI Jian-zhu, TANG Zhong-shi. Edge-guided segmentation method for multiscale and high resolution remote sensing image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谭玉敏,槐建柱,唐中实.一种边界引导的多尺度高分辨率遥感图像分割方法. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(4): 312-315.