

文章编号: 1007-4619(2006)01-0090-07

# 基于亮度相关矩的 MODIS 和 SPOT 影像融合研究

陈少辉, 张秋文, 王 乘, 周建中

(华中科技大学 水电学院遥感与空间信息应用研究所, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 针对 MODIS 影像空间分辨率较低的问题, 提出了一种基于亮度相关矩的多分辨率图像融合方法。该方法首先对 SPOT 影像进行小波分解, 将 MODIS 影像构成的 RGB 颜色系统变换到 HS 颜色系统; 然后, 根据强度分量和 SPOT 影像低频分量的均值和方差来定义图像亮度相关矩; 最后, HS 逆变换和小波逆变换得到包含更多信息和有效特征的融合图像。试验结果证明该方法得到的融合图像在保留地物光谱信息和提高空间分辨率上都具有很好的效果。

**关键词:** 小波分解; 亮度相关矩; 图像融合; MODIS; SPOT

**中图分类号:** TP751/TP391 **文献标识码:** A

## MODIS and SPOT Images Fusion Based on the Intensity Correlation Moment

CHEN Shao-hui ZHANG Qiu-wen WANG Cheng ZHOU Jian-zhong

(Institute of Remote Sensing & Spatial Information Science, Huazhong University of Science & Technology (HUST), Wuhan 430074, China)

**Abstract** In recent years many methods for fusing panchromatic and simultaneously multispectral (SM) images have been developed, however, there is little work concerning the fusion of images with significantly different spectral properties and pixel spacings, though existing techniques either cannot avoid distorting their spectral characteristics or introduce artifacts. As an application of the Intensity Hue Saturation (IHS) transform and the orthogonal wavelet decomposition (OWD) in order to enhance the spatial resolution of MODIS images, intensity correlation moment model (ICMM) has been proposed based on mean and the standard deviation of both the intensity component obtained by averaging three MODIS images and the approximate component of the SPOT image decomposed with an orthogonal wavelet basis to produce one new intensity component while minimizing the degree of resampling. This system uses a self-adaptive correlation response to determine that how much the corresponding wavelet coefficients contribute to the dominant features for accurately transferring visually chromatic emergent information from any number of the input images into a single fused image. Subsequently, the high spatial resolution MODIS images are achieved through reconstructing the fused OWD coefficients by using the modulated MODIS images obtained through an inverse IHS as the approximate component and the details of the SPOT image as high frequencies. By using the ICMM as fusion rule, texture and pattern details coming from the SPOT image can be modulated to MODIS images without altering their

收稿日期: 2004-10-19; 修订日期: 2004-12-31

基金项目: 国家 973 高新技术项目“长江流域水沙产输及其与环境变化耦合机理”(2003CB415200)、华中科技大学科技创新项目(2004014)支持和国家博士点基金项目资助(20040487016)。

作者简介: 陈少辉(1976—), 男, 河北保定定州市人。华中科技大学水电学院遥感与空间信息应用研究所 2003 级博士研究生, 主要进行图像处理以及目标识别学工作, 已发表论文 5 篇。E-mail: csh\_2000@mail.china.com; csh\_1976@163.com。

spectral properties and contrast because fusion in the correlation response domain significantly improves the reliability of the feature selection and information fusion process. This technique can be applied to improve spatial resolution for either colour composite or individual bands. By an image fusion experiment using MODIS and SPOT images of Dapeng bay area of Shenzhen, China, the visual evaluation and statistical analysis between the original MODIS images and the fused MODIS images confirm that ICMM overcomes the preservation tradeoff and can achieve better performance in terms of both preserving spectral information and improving spatial resolution of SM images. Finally, the influence of the decomposition levels on the result is also discussed.

Key words: OWD; ICMM; MODIS; SPOT; image fusion

## 1 引言

MODIS 全称为 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer 是美国 1999 年底发射的 Terra (EOS-AM1) 星上搭载的唯一进行直接广播的、当前世界新一代“图谱合一”的光学遥感仪器。MODIS 数据具有多光谱分辨率(共 36 个波段), 高时间分辨率(每天过顶 2 次), 多空间分辨率(具有 250m, 500m 和 1000m 3 种空间分辨率)等特点<sup>[1]</sup>。因此, MODIS 数据在监测资源、环境、灾害方面具有极好的应用前景。但如果将 MODIS 影像应用于城区规划、军事小目标监测以及大比例尺遥感制图时, 其空间分辨率就不能满足实际需要。

SPOT 卫星是法国于 1998 年发射升空的, 其携带的高分辨率可见光扫描仪 HRV 可提供波谱范围为 0.51—0.73 $\mu\text{m}$  和空间分辨率为 10m 的全色光学图像。SPOT 影像在土地利用与管理、土壤沙化监测以及城市规划等人与环境的关系研究方面, 发挥了重要的作用<sup>[2]</sup>。但 SPOT 影像没有陆地、云和气溶胶反映敏感的蓝光波段, 而融合后的 MODIS 影像可以弥补这一不足。

常用的多光谱图像融合方法有 IHS 变换法、PCA 法、HPF 法、SFM 法、BT 法、小波分解等。IHS 变换法的特点是高频信息丰富, 但光谱信息损失较大, 一次只能选择 3 个两两之间具有较低相关系数的波段而不能选择全部波段作为融合的数据, 降低了遥感数据的利用率<sup>[3-6]</sup>。PCA 法适用于多光谱图像的所有波段, 但用全色图像简单替换多光谱图像 PCA 变换后的第一主成分, 结果图像的光谱特性会受到影响<sup>[7-9]</sup>。

HPF 方法较好地保留了多光谱图像的光谱信息, 当滤波器尺寸取为高低分辨率图像分辨率比值的两倍时效果最好<sup>[10]</sup>。SFM 方法是基于光照和地表反射模型建立起来的, 它能避免在图像分解和重

建过程中引入的耗时性和复杂性, 但该方法对图像的校正精度比较敏感, 不适用于具有不同光照强度和成像机理的图像融合<sup>[11]</sup>。BT 法将多光谱图像的像方空间分解为色彩和亮度成分进行计算, 在一定程度上保留了多光谱信息, 但该方法对图像的预处理要求较高, 同时要求图像进行相关处理、噪声滤波等, 计算量较大<sup>[12, 13]</sup>。

小波理论是近年来兴起的一种崭新的多光谱图像融合时频域工具。但是, 传统小波变换的融合方法是将多光谱图像和具有高空间分辨率的全色图像进行小波分解, 获取各自的低频分量和细节分量, 然后用全色图像的细节分量替换多光谱图像的细节分量, 再进行小波逆变换以得到融合图像。传统小波变换方法能有效地增强多光谱图像的空间细节表现能力, 保持图像融合前后的光谱特性, 但用于 SPOT 和 MODIS 影像的融合, 容易出现分块效应, 严重影响融合后多光谱图像的应用<sup>[14]</sup>。

本文针对传统 IHS 增强方法和小波变换的缺点提出了一种改进的方法。该方法首先将高分辨率图像进行小波分解, 然后根据分解后的高分辨率的近似分量和多光谱图像的 IHS 颜色空间的亮度分量的相关性进行融合, 最后再进行小波重构。在小波分解尺度不变的情况下, 它不仅能较好地增强多光谱图像的空间细节表现能力, 保持多光谱图像的光谱信息, 而且也能有效避免融合结果出现高频噪声。

## 2 理论及融合算法

### 2.1 IHS 颜色模型

IHS 颜色系统的三分量亮度 I 色调 H 和饱和度 S 具有相互独立性, 并且能够准确定量地描述颜色特征和光照强度。色调 H 决定于光谱的主波长, 是光谱在质方面的区别, 饱和度 S 表征光谱的主波长在强度中的比例, 亮度 I 表示光谱的亮度大小。在 IHS 模型中, 光谱信息主要体现在色调和饱和度上,

强度的改变对视觉的影响较小,可分别对它们进行控制<sup>[15]</sup>。因此,HS变换技术可应用于强相关数据的彩色增强,质地特征增强,空间分辨率的改善及不同性质数据源的融合等。HS变换的公式及其在影像融合中的具体应用可参考文献[16]。

## 2.2 小波理论

图像的小波分解是通过称为正交镜像滤波器的高通滤波器  $\tilde{g}(n)$  和低通滤波器  $h(n)$  来分解为不同分辨率的高频小波系数和低频小波系数。图像 A 的二进小波分解通过下面快速的 MALLAT<sup>[17]</sup> 算法来完成。

$$\begin{cases} A_r(i, j) = \sum_{m, n \in z} h(m)h(n)A_{r-1}(2i-m, 2j-n) \\ D_r^1(i, j) = \sum_{m, n \in z} h(m)\tilde{g}(n)A_{r-1}(2i-m, 2j-n) \\ D_r^2(i, j) = \sum_{m, n \in z} \tilde{g}(m)h(n)A_{r-1}(2i-m, 2j-n) \\ D_r^3(i, j) = \sum_{m, n \in z} \tilde{g}(m)\tilde{g}(n)A_{r-1}(2i-m, 2j-n) \end{cases} \quad (1)$$

小波分解完全可逆,其重构公式如下:

$$\begin{aligned} A_{r-1}(i, j) = & 4 \sum_{m, n \in z} h(m)h(n)A \left[ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right] + \\ & 4 \sum_{m, n \in z} h(m)g(n)D_r^1 \left[ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right] + \\ & 4 \sum_{m, n \in z} g(m)h(n)D_r^2 \left[ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right] + \\ & 4 \sum_{m, n \in z} g(m)g(n)D_r^3 \left[ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $r=1, 2, \dots, N$  表示小波分解层数,  $h(m)$  和  $g(m)$  是  $\tilde{h}(m)$  和  $\tilde{g}(m)$  的共轭滤波器。  $A_r$  表示 A 在分辨率  $2^{-r} \times 2^{-r}$  下的水平和垂直方向的低频分量;同理,  $D_r^1, D_r^2, D_r^3$  分别表示相同分辨率下 A 的水平低频和垂直高频分量、水平高频和垂直低频分量、水平和垂直高频分量。高频分量描述的是各分辨率下图像的边缘细节信息,低频分量描述的是各分辨率下图像的近似信息。

## 2.3 融合步骤

HS三分量相互独立,易于控制,因此可以通过调节三分量来获得不同的显示效果;小波变换可以将图像的空间特征和光谱特征进行分离,而且由于小波变换的多分辨率特性,不同尺度的空间特征也可以进行分离;在 HS和小波分解的基础上,可以归纳得到如下的融合步骤:

(1) 首先将 MODIS 的 3 个波段 MLJ( $J=1, 4,$

3) 和 SPOT 的 P 影像进行重采样,以使 P 在分辨率 N 下的近似分量和 MODIS 影像具有相同的尺寸。

(2) 对 P 进行 N 级小波分解。

$$P \Rightarrow P_N + w_1(P) + \dots + w_N(P) \quad (3)$$

式中  $P_N, w_r(P)$  分别表示 P 的近似分量和在尺度  $r$  下的小波系数,  $r=1, 2, \dots, N$ 。

(3) 将 MLJ( $J=1, 4, 3$ ) 指定为 RGB, 并转换到 HS 颜色系统。

(4) 将 I 参考  $P_N$  进行直方图匹配,以消除它们之间光照强度的差异。

(5) 融合图像的强度分量  $I_N$  由 I 和  $P_N$  按亮度相关矩计算得到。

(6) 将  $I_N$  HS 变换到 RGB 颜色空间,得到调制后的图像  $P_N(\#)$ ,  $\# = R, G, B$ 。

(7) 利用  $w_r(P)$  分别和  $P_N(\#)$  进行小波逆变换,就得到了高空间分辨率 MODIS 影像 (MHJ)。

$$P \Leftarrow P_N(\#) + w_1(P) + \dots + w_N(P) \quad (4)$$

## 3 亮度相关矩融合模型

### 3.1 亮度相关矩

以前的各种融合技术,大部分都没有考虑影像之间的相关程度而根据某种判断阈值对高频小波系数进行取舍来选取结果图像的特征。最大值准则和能量准则在选取小波系数时,容易受孤立噪声点的干扰,从而可能会选择错误的分解系数。对于局部方差准则和局部梯度准则来说,又都是对局部窗口内的分解系数作整体考虑,而对每个像素所包含的独立信息考虑不足。这些方法虽然在一定程度上提高了多光谱图像的空间分辨率,但又会引起光谱信息的丢失和失真,甚至导致噪音的出现。

为克服以上融合准则中存在的问题,本文提出了一种基于亮度相关矩的融合模型 (LCMM)。对 I 和  $P_N$  分量首先定义亮度相关矩为:

$$\begin{cases} C_{mp}(x, y) = \frac{|(G_m(x, y) - \mu_m)(G_p(x, y) - \mu_p)|}{\sigma_m \sigma_p} \\ C_m(x, y) = \frac{|(G_m(x, y) - \mu_m)|}{\sigma_m} \\ C_p(x, y) = \frac{|(G_p(x, y) - \mu_p)|}{\sigma_p} \\ C(x, y) = \frac{2C_{mp}(x, y)}{C_m^2(x, y) + C_p^2(x, y)} \end{cases} \quad (5)$$

$\mu_m, \sigma_m, G_m(x, y)$  和  $\mu_p, \sigma_p, G_p(x, y)$  分别为 I 和  $P_N$  分量的均值,标准差,像素  $(x, y)$  处对应的灰度值;

$C(x, y)$  为  $I$  和  $P_N$  在像素  $(x, y)$  处的亮度相关矩。

定义 LCMM 有如下的优点: (1) 它同时考虑了整体小波系数的均值和方差, 充分利用了小波的时频局部特性; (2) 融合图像对比度较高, 可以避免过采样引入的高频噪声的干扰和颜色畸变; (3) 提高了全色图像低频分量与多光谱图像的相关性, 避免了增强结果出现分块效应; (4) 时间复杂性低, 计算简单, 可以对未来多种传感器获得的影像进行融合。

### 3.2 基于亮度相关矩的影像融合

$C(x, y)$  表示在  $I$  和  $P_N$  分量中当前像素的相关程度, 如果  $C(i, j) < \alpha$ ,  $\alpha$  表示阈值。则两个分量在当前位置的特征明显不同, 匹配程度较低, 采用较大值准则融合会取的较好效果, 按下式计算得到  $I_k$ :

$$I_k(i, j) = \begin{cases} G_m(i, j) & C_m(i, j) \geq C_p(i, j) \\ G_p(i, j) & C_p(i, j) < C_p(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

如果  $C(i, j) \geq \alpha$ , 说明两个分量在当前位置所表现的特征都比较明显, 细节信息都很显著, 此时, 采用加权平均的方法进行融合, 会起到压制噪音, 消除方块效应的效果<sup>[18]</sup>。

$$\begin{cases} I_k(i, j) = \beta_m(i, j)G_m(i, j) + \beta_p(i, j)G_p(i, j) \\ \beta_m(i, j) = \begin{cases} \beta_{m1} & C_m(i, j) \leq C_p(i, j) \\ \beta_{m2} & C_m(i, j) > C_p(i, j) \end{cases} \\ \beta_{m1} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1 - C(i, j)}{1 - \alpha} \right) \\ \beta_{m2} = 1 - \beta_{m1} \\ \beta_p(i, j) = 1 - \beta_m(i, j) \end{cases} \quad (7)$$

## 4 试验结果

### 4.1 试验区数据预处理

为了验证 LCMM 的有效性, 选取深圳大鹏湾的 MODIS 和 SPOT 影像进行了试验, 并和 HS、过采样方法得到的结果进行了比较, 其中图 1(a) 是由原 ML1、ML4 和 ML3 组成的 RGB 彩色图像, 图 1(b) 为 SPOT 图像。

因为被作为尺度为 0 时近似分量的 MODIS 影像不包含尺度小于 250m 的空间信息, 所以只对 SPOT 影像进行五层小波分解。然后, 通过插值将 MODIS 影像的空间分辨率重采样到 320m, 这样, 两个分量所包含信息的尺度近似相近, 并且具有相同的大小。

试验中, 根据地面控制点和图像的空间分辨率

选取  $10240m \times 10240m$  的区域, 对 MODIS 多光谱数据和 SPOT 全色数据分别进行预处理, 包括几何校正等。在试验过程中和讨论小波分解层数对融合结果的影响时,  $\alpha = 0.25$ 。

### 4.2 客观定量分析

用于评价融合结果的统计参数包括各种方法结果图像的均值、熵、标准差、平均梯度、相关系数和偏差指数。图像的熵和标准差反映了图像包含信息量的多少; 平均梯度反映图像的清晰度以及细节反差与纹理特征的变化。相关系数和偏差指数分别反映了融合结果图像与原多光谱影像的相关程度和偏差程度。

从表 1 中可以看出, 用 LCMM 得到的 MHJ 相对于 MLJ 无论是熵还是平均梯度都有大幅度的提高, 而且和 MLJ 的相关系数较高。这些表明 LCMM 在尽量保留 MODIS 图像光谱信息的同时提高了它们的空间分辨率, 基本上继承了 SPOT 图像的边缘和细节信息。

同时, LCMM 结果图像相对于其他方法, 熵相关系数和平均梯度较大, 这说明用 LCMM 得到的 MHJ 图像灰度分布的范围最广, 达到了富集表示的目的, 最大限度地将 SPOT 图像的信息含量融入到 MODIS 图像中。偏差指数小, 表明 LCMM 对 MLJ 光谱信息的扭曲程度很小, 对地物的色调保持的较好。

从以上分析可知, 本文提出的 LCMM 在保留 MODIS 图像光谱信息和 SPOT 图像空间信息上, 均好于 HS 和过采样方法。

### 4.3 主观评价

从视觉角度来看, 用 LCMM 得到的结果图像纹理最清晰, 可视效果最佳, 改善了影像反差。HS 方法得到的融合图像产生了颜色跳变, 在图 1(c) 中间偏下的街区出现了与周围色调不协调的红色, 而 LCMM 得到的结果图像却将街区的色调保持的很好。过采样方法修改了 SPOT 图像的对比度, 其融合图像中街道、池塘和小河的轮廓都比较模糊, LCMM 结果图像中各种地物的线条和形状清晰可见。

### 4.4 分解层数对融合结果的影响

本文还讨论了小波分解层数在 LCMM 对 MODIS 和 SPOT 图像融合中对特征提取的影响。小波分解层数分别选为 4, 5, 6, 实验数据见表 2。结果表明, 随着分解层数的增加, 标准差会降低, 而图像的熵和梯度则先升高, 再降低, 这说明图像的高频分

表 1 几种融合结果图像统计参数

Table 1 Statistical parameters of the fusion images produced by IHS, Over Sampling, ICMM

融合方法	波段	熵	均值	标准差	相关系数	平均梯度	偏差指数
原始图像	ML1	2.3876	127.47	65.067	1.000	0.9723	0.00
	ML3	2.3768	147.24	68.561	1.000	0.5273	
	ML4	2.3655	144.59	65.377	1.000	0.5656	
	SPOT	3.3576	106.59	75.908	—	7.7499	
IHS	MH1	2.8745	86.615	74.322	0.3501	6.0525	0.3162
	MH3	3.0428	100.31	77.108	0.4107	5.7214	
	MH4	3.0807	103.36	75.486	0.3972	6.9234	
Over Sampling	MH1	3.9977	117.33	87.543	0.4862	7.0144	0.3729
	MH3	3.8776	132.86	92.580	0.4048	6.6925	
	MH4	3.9302	128.62	91.016	0.3939	6.7690	
LCMM	MH1	4.1296	92.646	62.558	0.5819	7.6842	0.2534
	MH3	4.3879	137.21	59.505	0.4836	7.2789	
	MH4	4.6166	121.92	54.456	0.5824	6.5895	

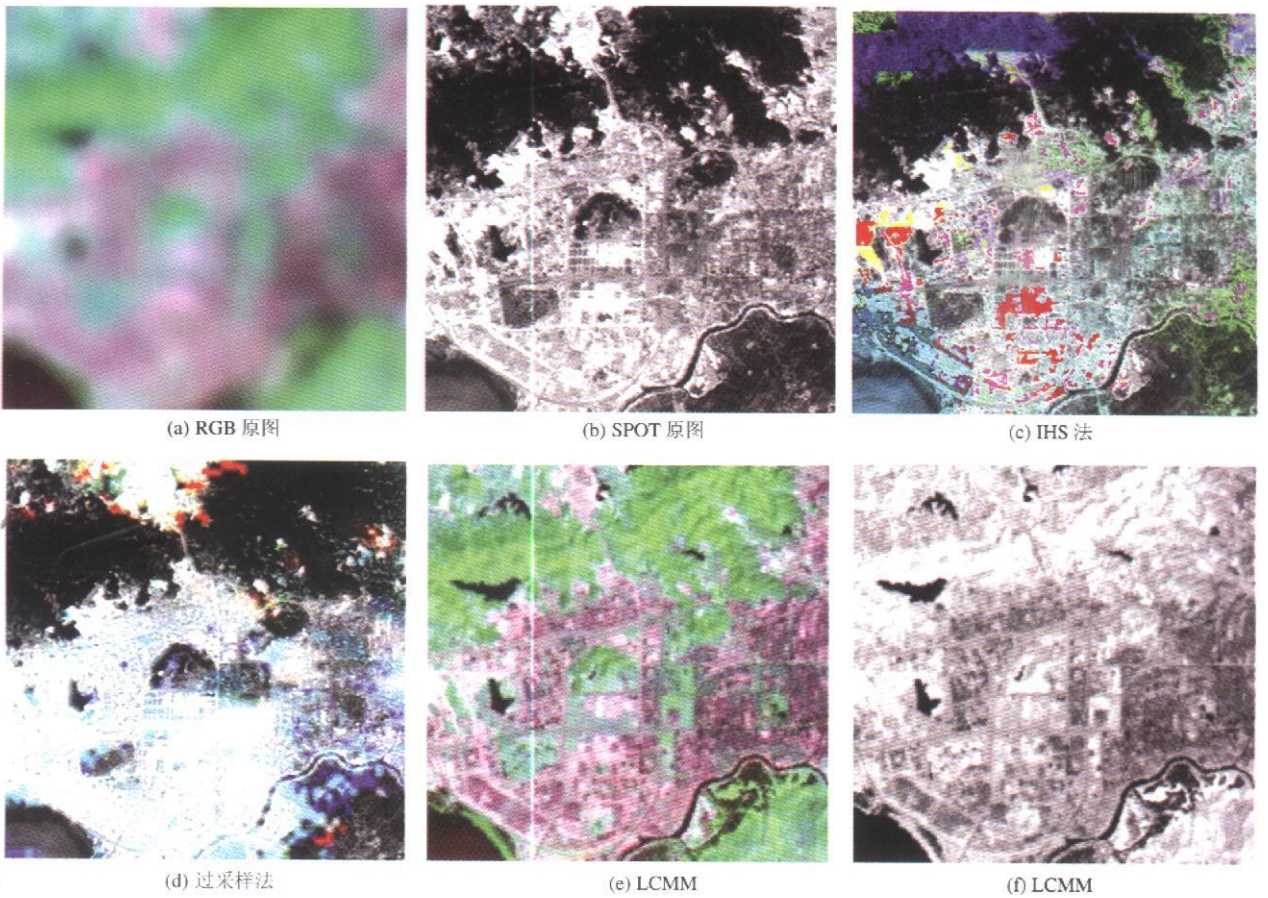


图 1 几种融合方法效果图比较

Fig 1 Comparison of IHS over sampling and ICMM

表 2 小波分解层数对融合结果的影响

Table 2 The influence of the decomposition levels on the result

分解层数	熵	梯度	标准差
4	4.18536	7.6522	63.7824
5	4.39261	7.8090	62.6381
6	3.96536	6.2439	61.8742

量大部分已包含在前 5 层,显然单纯增加分解层数,计算复杂性会提高,融合效果却不会随之增加。

#### 4.5 多光谱图像单个波段和全色图像的融合

LCMM 还可用于多光谱图像单个波段的增强。将多光谱图像的单个波段代替上述算法的强度分量,然后按照相同的步骤就可以实现融合。因为 IHS 颜色系统中的强度分量是 3 个多光谱图像平均的近似,在一定程度上会消除加性随机噪声的干扰,有利于选取更准确的融合特征。显而易见,单个波段的融合不具有这种优势,效果要差一点。克服这个缺点的办法是找到相同区域不同时期的影像加起来取平均作为单个波段的影像。图 1(d)为 ML1 和 SPOT 影像融合的试验结果,效果图像中小河的轮廓明显地被勾画出来。

从总体上来看,LCMM 结果影像尽量做到了空间分辨率和 SPOT 影像的一致,光谱分辨率和 MODIS 的一致。

## 5 结 论

特征选取是图像融合处理中的关键技术,本文提出的基于亮度相关矩的多分辨图像融合方法,把高空间分辨率的全色图像经小波分解后的低频分量和多光谱图像进行融合处理,能够较好地提取待融合图像中所含的有用信息,同过采样、IHS 方法相比,不仅提高了多光谱图像的空间纹理特性,而且更有效地保持了图像的光谱信息,为最终增强多光谱图像的信息可靠性及使用效率,改善解译精度,提供了技术上的支持。

#### 参 考 文 献 (References)

[1] Peng D Z, Xiong L H, Guo S L, et al. Advances in Applications of MODIS to Hydrology and Water Resources [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5): 683-688 [彭定志,熊立华,郭

生练等. MODIS 在水文水资源中的应用与展望 [J]. *水科学进展*, 2004, 15(5): 683-688.]

- [2] Zhang T, Mei A X, Cai Y L. Application of SPOT Remote Sensing Image in Landscape Classification of Chongming Dongtan [J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2004, 17(2): 45-47. [张彤,梅安新,蔡永立. SPOT 遥感数据在崇明东滩景观分类研究中的应用 [J]. *城市环境与城市生态*, 2004, 17(2): 45-47.]
- [3] Yan D M, Zhao Z M. Wavelet Decomposition Applied to Image Fusion [J]. *IEEE*, 2001, 291-295.
- [4] Harrison J R, Murray R, Hirose T. IHS Transform for the Integration of Radar Imagery with Other Remotely Sensed Data [J]. *PE&RS*, 1990, 56(12): 1631-1641.
- [5] Pellemans A, Jardans R, Alleeijn R. Merging Multispectral and Panchromatic SPOT Image with Respect to the Radiometric Properties of the Sensor [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1993, 12(1): 81-87.
- [6] Jin V. Multispectral Imagery Band Sharpening Study [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(9): 1075-1083.
- [7] Yesou H, Besnus Y, Rolet Y. Extraction of Spectral Information from Landsat TM Data and Merger with SPOT Panchromatic Imagery: A Contribution to the Study of Geological Structures [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, 48(5): 23-36.
- [8] Ehlers M. Multisensor Image Fusion Techniques in Remote Sensing [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1991, 46: 19-30.
- [9] Chavez P S, Stuart J, Sides C. Comparison of Three Different Methods to Merge Multispectral and Multiresolution Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic [J]. *PE&RS*, 1991, 57(3): 295-303.
- [10] Pohl C, Van Genderen J L. Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications [J]. *International Journal Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823-854.
- [11] Liu J G. Smoothing Filter-based Intensity Modulation: a Spectral Preserve Image Fusion Technique for Improving Spatial Details [J]. *Int J Remote Sensing*, 2000, 20(18): 3461-3472.
- [12] Wang J, Lu A X, Guo T T, et al. An Application of Brovey Image Fusion in Land Cover Investigation in Yinda Irrigated Region [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2001, 16(3): 173-177. [王建,鲁安新,郭庭天等. Brovey 图像融合在引大灌区土地覆盖调查中的应用 [J]. *遥感技术与应用*, 2001, 16(3): 173-177.]
- [13] Zhou J, Civco D L, Silander J A. A Wavelet Transform Method to Merge Landsat TM and SPOT Panchromatic Data [J]. *Int J Remote Sensing*, 1998, 19(4): 743-757.
- [14] Cheng Y L, Zhao R C, Jiang X Y, et al. An Optimal Algorithm of Multi-sensor Image Fusion Based on Wavelet Transform [J]. *Computer Applications*, 2004, 24(7): 30-32 [程英蕾,赵荣椿,蒋晓悦等. 一种基于小波变换的多传感器图像融合优化方法 [J]. *计算机应用*, 2004, 24(7): 30-32.]

- [15] Yang X, Liang JM, Yang W H, et al Fusion Multispectral and High Resolution Image Using Evolutionary Strategies and IHS Transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 10: 1388-1391. [杨焜, 梁继民, 杨万海等. 基于进化策略和 IHS 变换的图像融合方法 [J]. 电子学报, 2001, 10: 1388-1391.]
- [16] Jia Y H, Li D R. Comparison of IHS Transformation for Integrating SAR and TM Images [J]. Remote Sensing for Land & Resources 1997, 3: 34-39. [贾永红, 李德仁. SAR 与 TM 影像的 IHS 变换复合及其质量定量评价 [J]. 国土资源遥感, 1997, 3: 34-39.]
- [17] Gu Y F, Zhang Y, Zhang J P. Multiresolution Remote Sensing Image Fusion Based on the Normalized Correlation Moment [J]. Journal of Image and Graphics 2002, 7(A)(11): 1220-1224. [谷延锋, 张晔, 张钧萍. 基于归一化相关矩的多分辨率遥感图像融合 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(A)(11): 1220-1224.]
- [18] Li Z H, Jiang Z L, Liu G, et al. A Region-based Image Fusion Algorithm Using Multiresolution Segmentation [J]. IEEE, 2003, 96-101.