

# 基于自适应加权的 MODIS 和 SPOT 影像融合研究

陈少辉 张秋文 王 乘 周建中

(华中科技大学数字化工程中心, 武汉 430074)

**摘 要** 针对 MODIS 和 SPOT 影像融合问题, 提出了一种基于自适应加权的亮度相关矩多分辨率影像融合方法。该方法首先对 SPOT 影像进行小波分解, 将 MODIS 影像由 RGB 颜色空间变换到 IHS 颜色空间; 然后, 根据强度分量和 SPOT 影像低频分量加权后的局部均值和方差来定义影像亮度相关矩, 以选择不同策略进行融合; 最后, 通过 IHS 逆变换和小波逆变换来得到包含更多信息和有效特征的融合影像。试验结果证明, 该方法得到的融合影像, 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 影像融合 中分辨率成像光谱仪 斯波特卫星

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)03-0349-04

## Fusing MODIS and SPOT Images Based on Self-adaptive Weighting

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

(Digital Engineering Research Center, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** In this paper, a fusion algorithm for enhancing the spatial resolution of MODIS images is proposed, based on the joint use of IHS representation and orthogonal wavelet decomposition (OWD). The basic idea consists of following steps represent the MODIS images in the IHS space, substitute the  $I$  with the high resolution intensity component obtained from the fusion with the approximate component of the SPOT image through an intensity correlation comment model based on the self-adaptively weighting (SCMM). Finally, three high-resolution MODIS images are achieved through an inverse OWD by using the three modulated MODIS images obtained by an inverse IHS transform as the approximate component and the details of the SPOT image as the high frequencies. Experiments confirm that the proposed algorithm can achieve better performance in terms of both preserving the spectral information and improving the spatial resolution of MODIS images visually and statistically.

**Keywords** orthogonal wavelet decomposition (OWD), intensity correlation moment, image fusion, moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS), SPOT

## 1 引言

MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 是美国 1999 年底发射的 EOS-AM1 Terra 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。由于 MODIS 数据具有 36 个波段, 以及 250m、500m 和 1000m 3 种空间分辨率等特点, 可以获取大量地表信息, 所以 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

基金项目: 国家“973”高新技术发展研究项目(2003CB415200); 华中科技大学科技创新项目(2004014)

收稿日期: 2005-03-15; 改回日期: 2005-07-05

第一作者简介: 陈少辉(1976 ~ ), 男。2003 年获中国地质大学(武汉)硕士学位, 现为华中科技大学数字化工程中心博士研究生。研究方向为影像处理、模式识别。E-mail: csh\_1976@163.com

时,则其空间分辨率就不能满足实际需要,而空间分辨率为 10m 的全色光学 SPOT (Sat. Probatoire d'Observation de la Terre) 影像虽已在土地利用与管理、土壤沙化监测以及城市规划等人与环境的关系研究方面都发挥了重要的作用<sup>[1]</sup>,但是 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 影像则可以弥补这一不足。

常用的融合方法有 IHS (intensity-hue-saturation) 法<sup>[2]</sup>、PCA (principal component analysis) 法<sup>[3]</sup>、HPF (high-pass filtering) 法<sup>[4]</sup>、SFM (smoothing filter-based intensity modulation) 法<sup>[5]</sup>、小波分解等。由于这些方法主要是针对输入影像空间分辨率相差不大的情况,因此如果直接应用于 MODIS 和 SPOT 影像的融合,则 IHS 法只能选择 3 个波段进行融合,且其光谱信息损失较大,这就降低了遥感数据的利用率;适用于多光谱影像所有波段的 PCA 法是用全色影像来简单替换多光谱影像变换后的第 1 主成份,其融合影像的光谱特性会受到影响;而 SFM 方法又不适用于具有不同光照强度和成像机理的影像融合。若用传统小波变换方法来对 SPOT 和 MODIS 影像进行融合,则将使结果影像容易出现分块效应,也影响其应用。

本文针对传统 IHS 增强方法和小波变换方法的缺点,提出了一种改进的方法。该方法首先将高分辨率影像进行小波分解,然后根据分解后的近似分量和多光谱影像 IHS 颜色空间亮度分量的相关性来对两个分量图像进行融合,最后对融合后的小波系数进行小波逆变换,就得到了高空间分辨率的多光谱影像。该方法不仅能较好地增强多光谱影像空间细节的表现能力和能保持多光谱影像的光谱信息,而且也能有效避免融合结果出现高频噪声。

## 2 融合步骤

由于 IHS 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;由于小波变换可以将影像的空间特征和光谱特征进行分离,而且由于小波变换具有多分辨率特性,因此不同尺度的空间特征也可以进行分离;在 IHS 和小波分解的基础上,融合步骤可以归纳如下:

(1) 首先对低空间分辨率 MODIS 的 3 个波段影像  $M_j^{low}$  ( $j=1,4,3$ ) 和 SPOT 的全色波段影像  $P$  进行重采样,以使全色波段影像  $P$  在分解层数  $N$  下的近

似分量影像  $P^{(N)}$  和  $M_j^{low}$  具有相同的尺寸;

(2) 对全色波段影像  $P$  进行  $N$  级小波分解:

$$P \Rightarrow P^{(N)} + \omega_1(P) + \dots + \omega_N(P) \quad (1)$$

式中,  $\omega_r(P)$  表示全色波段影像  $P$  在尺度  $r$  下的小波系数,  $r=1,2,\dots,N$ ;

(3) 将  $M_j^{low}$  ( $j=1,4,3$ ) 分别表示为 RGB 分量图像  $R, G, B$ , 再转换为 IHS 分量图像  $I, H, S$ ;

(4) 将亮度分量图像  $I$  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) 根据自适应加权的亮度相关矩,由亮度分量图像  $I$  和  $P^{(N)}$  来计算得到新的亮度分量图像  $I^{new}$ ;

(6) 将新的亮度分量图像  $I^{new}$ 、 $H$ 、 $S$  变换到 RGB 颜色空间,即得到调制后的影像  $P^{(N)}(\#)$ , # 代表红,绿和蓝;

(7) 利用  $\omega_r(P)$  分别和  $P^{(N)}(\#)$  进行小波逆变换来得到高空间分辨率 MODIS 影像的 3 个波段影像  $M_j^{high}$  ( $j=1,4,3$ )。

$$M_j^{high} \Leftarrow P^{(N)}(\#) + \omega_1(P) + \dots + \omega_N(P) \quad (2)$$

## 3 融合模型

已有的融合技术,大部分是根据某种判断阈值,通过对小波系数进行取舍来选取结果影像特征的。选取小波系数时,由于最大值准则容易受孤立噪声点的干扰,可能会导致选择错误的小波分解系数;对于局部方差和局部梯度准则来说,又都是对局部窗口内的小波分解系数进行整体考虑,而对每个像素所包含的独立信息则考虑不足。这些方法虽然在一定程度上提高了多光谱影像的空间分辨率,但又会引起光谱信息的丢失和失真,甚至会导致噪音的出现。

为克服以上融合准则中存在的问题,本文提出了一种基于自适应加权的亮度相关矩融合模型 SCMM (self-adaptive weighting correlation moment model)。亮度分量图像  $I$  和全色波段影像的近似分量影像  $P^{(N)}$  的亮度相关矩定义为

$$C(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in W} (\omega_I(i, j) - \mu_I(x, y)) (\omega_P(i, j) - \mu_P(x, y))}{\sigma_I(x, y) \sigma_P(x, y)} \quad (3)$$

其中,窗口  $W$  内小波系数的均值和方差分别为

$$\mu_I(x, y) = \sum_{(i, j) \in W} \omega_I(i, j) w(i, j)$$

$$\sigma_I(x, y) = \sqrt{\sum_{(i, j) \in W} (\omega_I(i, j) - \mu_I(x, y))^2}$$

$$\mu_P(x, y) = \sum_{(i, j) \in W} \omega_P(i, j) w(i, j)$$

$$\sigma_P(x, y) = \sqrt{\sum_{(i, j) \in W} (\omega_P(i, j) - \mu_P(x, y))^2}$$

$W$  表示以  $(x, y)$  为中心的奇数维小窗口, 其权值满足  $\sum w(i, j) = 1$ , 且  $w(i, j) \in [0, 1]$ , 则  $C(x, y)$  就为亮度分量图像  $I$  的小波系数  $\omega_I(x, y)$  和全色波段影像的近似分量影像  $P^{(N)}$  的小波系数  $\omega_P(x, y)$  在  $(x, y)$  处的 SCMM 值。

本文提出的 SCMM 有如下的优点: (1) 它同时考虑了小波系数的均值和方差, 并充分利用了小波的时频局部特性; (2) 融合影像的对比度较高, 可以避免因过采样而引入的高频噪声的干扰和颜色畸变; (3) 由于提高了全色影像低频分量与多光谱影像的相关性, 从而避免了增强结果出现分块效应。获得这些优点的原因是: (1) SCMM 融合过程避免了过采样, 由于输入影像的空间分辨率相差悬殊, 因此如果将 MODIS 影像的空间分辨率调整到和 SPOT 影像的分辨率一致, 将会扭曲 MODIS 影像的空间结构, 进而给融合过程带来误差; (2) 由于利用小波分解将 SPOT 影像不同尺度的空间信息进行分离, 因此就可保证 MODIS 和 SPOT 影像在相似的尺度上进行融合, 也就避免了尺度间的融合; (3) 根据亮度相关性, 采用不同策略进行融合, 可以消除 MODIS 影像亮度分量和 SPOT 影像的近似分量之间光照强度的差异。

当相关矩  $C(x, y)$  小于某个阈值  $\alpha$  时, 表明在当前位置上两个分量的相关程度比较低, 其刻画局部信息的表现形式明显不同, 为了克服污染带来的误差和增加有用的边缘信息, 采用较大值准则进行融合会更好描述该点特征, 具体融合形式如下:

$$\omega_F(x, y) = \begin{cases} \omega_I(x, y) & \mu_I(x, y) \geq \mu_P(x, y) \\ \omega_P(x, y) & \mu_I(x, y) < \mu_P(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

$\omega_F(x, y)$ 、 $\omega_I(x, y)$ 、 $\omega_P(x, y)$  分别表示融合影像  $F$ 、亮度分量图像  $I$ 、全色影像近似分量影像  $P^{(N)}$  在  $(x, y)$  像素处的小波系数。当相关矩  $C(x, y)$  大于阈值  $\alpha$  时, 则表明在当前位置上两个分量的相关程度比较高, 为了提高局部纹理描述的准确程度, 以便使融合算法具有较强的实用性和适应性, 可采用加权合成的形式, 以有利于继承重要信息。加权合成的准则如下:

$$\omega_F(x, y) = \beta_I(x, y)\omega_I(x, y) + \beta_P(x, y)\omega_P(x, y) \quad (5)$$

其中,  $\beta_P(x, y) = \sigma_I^2(x, y) / (\sigma_I^2(x, y) + \sigma_P^2(x, y))$

$$\beta_I(x, y) = \sigma_P^2(x, y) / (\sigma_I^2(x, y) + \sigma_P^2(x, y))$$

式中,  $\beta_I(x, y)$  和  $\beta_P(x, y)$  为  $\omega_I(x, y)$  和  $\omega_P(x, y)$  的自适应加权值。

## 4 试验结果

### 4.1 试验区数据预处理

为了验证 SCMM 的有效性, 选取深圳大鹏湾的 MODIS 和 SPOT 影像进行了试验, 并和 IHS、过采样方法得到的结果进行了比较, 其中图版 I 图 1(a) 是由原  $M_1^{low}$ 、 $M_4^{low}$  和  $M_3^{low}$  合成的 RGB 彩色影像, 图版 I 图 1(b) 为 SPOT 全色影像。

因为被作为尺度为 0 时的近似分量的 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 5 层小波分解。如果通过插值将 MODIS 影像的空间分辨率重采样到 320m, 那么不但两个分量所包含信息的尺度近似, 并且具有相同的大小。在试验过程中, 阈值取为  $\alpha = 0.25$ , 计算加权亮度相关矩的窗口大小采用  $3 \times 3$ , 其权值矩阵设置如下:

$$\begin{bmatrix} 0.0518 & 0.0732 & 0.0518 \\ 0.0732 & 0.5 & 0.0732 \\ 0.0518 & 0.0732 & 0.0518 \end{bmatrix}$$

### 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影像的熵、交叉熵、清晰度和空间频率, 其中影像的熵反映了影像包含信息量的多少; 清晰度和空间频率反映了影像细节反差与纹理特征的变化; 交叉熵反映了融合结果影像与原多光谱影像的偏差程度。

从表 1 可以看出, 用 SCMM 得到的高空间分辨率 MODIS 影像  $M_j^{high}$  相对于低空间分辨率 MODIS 影像  $M_j^{low}$  来说, 无论是熵、空间频率, 还是清晰度都有大幅度的提高, 而且和低空间分辨率 MODIS 影像  $M_j^{low}$  的相关系数较高。这些均表明, SCMM 在尽量保留 MODIS 影像光谱信息的同时, 不仅提高了它们

表 1 融合结果的统计参数比较

Tab. 1 The statistical comparison of the fusion result

| 融合方法 | 评价参数   |        |        |         |
|------|--------|--------|--------|---------|
|      | 熵      | 交叉熵    | 清晰度    | 空间频率    |
| 原影像  | 1.6237 | —      | 3.5489 | 35.7128 |
| 过采样  | 3.8692 | 1.2348 | 7.2423 | 81.7665 |
| IHS  | 4.3572 | 1.4078 | 7.2583 | 86.0146 |
| SCMM | 4.4769 | 0.9587 | 7.8214 | 79.6350 |

的空间分辨率,还基本上继承了 SPOT 影像的边缘和细节信息。

同时,SCMM 融合影像相对于其他方法,其熵、清晰度、空间频率较大,这说明用 SCMM 得到的  $M_j^{\text{high}}$ ,其影像灰度分布的范围最广,已达到了富集表示的目的,可最大限度地将 SPOT 影像的信息含量融入到 MODIS 影像中,而交叉熵小,则表明 SCMM 对  $M_j^{\text{low}}$  的光谱信息扭曲的程度很小,即对地物的色调保持得较好。

#### 4.3 主观评价

从视觉效果来看,用 SCMM 得到的融合影像纹理最清晰,可视效果最佳,因为它改善了影像反差,而 IHS 方法得到的融合影像则产生了颜色跳变,如在图版 I 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 SCMM 得到的融合影像却将街区的色调保持得很好。过采样方法,由于修改了 SPOT 影像的对比度,因此其融合影像中街道、池塘和小河的轮廓都比较模糊,而 SCMM 融合影像中各种地物的线条和形状则均清晰可见。

#### 4.4 多光谱影像单个波段和 SPOT 全色影像的融合

SCMM 还可用于多光谱影像单个波段的增强,融合时,可先将多光谱影像的单个波段代替上述算法的亮度分量,然后按照相同的步骤就可以实现融合。因为 IHS 颜色空间中的亮度分量是 3 个多光谱影像平均的近似,所以其可在一定程度上消除加性随机噪声的干扰,进而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通过找到相同区域不同时期的影像加起来取平均来作为单个波段的影像。图版 I 图 1(f) 为  $M_j^{\text{low}}$  和 SPOT 影像融合的效果图,该影像中小河的轮廓明显地被勾画出来。

从总体上来看,SCMM 融合影像不仅空间分辨

率和 SPOT 影像的大致相同,而且光谱分辨率和 MODIS 一致。

## 5 结 论

特征选取是影像融合处理中的关键技术,本文针对 MODIS 和 SPOT 影像的融合,提出了 SCMM 影像融合方法。该方法在特征级融合过程中,能够较好地提取待融合影像中所含的有用信息,其同过采样、IHS 方法相比,不仅提高了多光谱影像的空间纹理特性,而且能更有效地保持影像的光谱信息,从而为最终增强多光谱影像的信息可靠性及使用效率和改善解译精度提供了技术上的支持。

### 参考文献 (References)

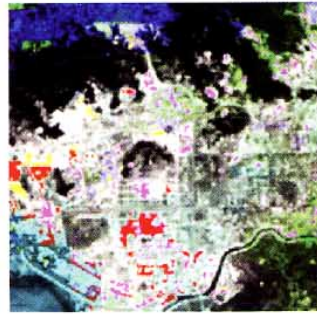
- 1 ZHANG Tong, MEI An-xin, CAI Yong-li. Application of SPOT remote sensing image in landscape classification of Chongming Dongtan[J]. Urban Environment & Urban ecology, 2004, 17(2): 45 ~ 47. [张彤,梅安新,蔡永立. SPOT 遥感数据在崇明东滩景观分类研究中的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2004, 17(2): 45 ~ 47.]
- 2 YAN Dong-mei, ZHAO Zhong-ming. Wavelet decomposition applied to image fusion[J]. Proceedings of IEEE, 2001: 291 ~ 295.
- 3 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]. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1993, 48(5): 23 ~ 36.
- 4 Pohl C, Van Genderen J L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5): 823 ~ 854.
- 5 LIU Jian-guo. Smoothing filter-based intensity modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21 ( 18 ): 3461 ~ 3472.



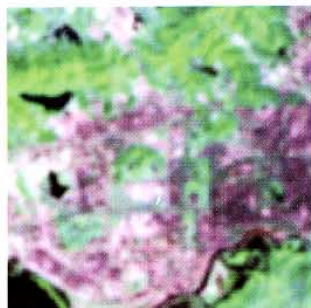
(a) MODIS 1,4,3波段影像合成的RGB原图



(b) SPOT全色影像



(c) IHS法融合结果



(d) 过采样法融合结果



(e) SCMM融合结果



(f) SCMM融合结果的效果图

图1 几种融合方法融合效果比较  
Fig.1 The comparison of the result images

### 王向阳等:一种新的小波域彩色图像压缩编码算法



(a) 本文算法( $PSNR=29.18$ )



(b) CZW算法( $PSNR=28.66$ )



(c) CEZW算法( $PSNR=28.22$ )



(d) 本文算法( $PSNR=24.66$ )



(e) CZW算法( $PSNR=24.38$ )



(f) CEZW算法( $PSNR=23.57$ )

图1 标准图像(Lena、Barbara)重构复原效果对照  
Fig.1 The recovery image for standard test image(Lena、Barbara)