

文章编号: 1007-4619(2007)01-0055-07

# 基于经验模态分解的高分辨率影像融合

王 坚<sup>1,2</sup>, 张继贤<sup>2</sup>, 刘正军<sup>2</sup>, 高 祥<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国测绘科学研究院 摄影测量与遥感研究所, 北京 100039)

**摘 要:** 文章提出基于经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 的特征层影像融合模型。对多光谱波段影像进行 IHS 变换获得强度影像, 采用行列分解实现一维经验模态分解的二维拓展, 并用于分离高分辨波段影像与强度影像的细节特征信息, 对高分辨率波段影像的高频与强度影像波段的低频进行重构获得融合后的强度影像, 再通过 IHS 反变换获得融合影像。文章介绍了经验模态分解的基本原理, 定义了经验模态分解的多尺度分解与合成结构, 提出融合模型的技术路线。选择 QUICKBIRD 影像的全色波段与多光谱波段进行融合实验, 根据典型行 (列) 的 EMD 分析, 确定经验模量的取舍尺度, 按提出的融合路线获得融合影像, 并与小波融合, IHS 融合, Brovey 融合模型获得的影像进行视觉及量化比较。选择信息熵、标准差指标对融合影像的空间细节信息进行评价, 同时选择平均灰度值、相关系数、偏差指数评价融合影像的光谱扭曲程度, 结果表明本融合模型最优。

**关键词:** 影像融合; 经验模态分解; 量化评价

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## High Resolution Image Merging Based on EMD

WANG Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-xian<sup>2</sup>, LIU Zheng-jun<sup>2</sup>, GAO Xiang<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Spatial Informatics of CUMT, Quanshan District, Jiangsu Suzhou 221008, China;

2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China)

**Abstract** Image fusion on high resolution image is one of the most important contents in remote sensing community. In this paper, image fusion algorithm based on Empirical Mode decomposition (EMD) is put forward for the first time. Firstly, intensity image is obtained by IHS transform on multi-spectral image. Secondly, high frequency component and low frequency component of high resolution image and intensity image are separated with 2D EMD realized by means of row and column extension of 1D EMD, which are applied to perform image fusion experiment of high resolution image. At last, fused intensity image is obtained by reconstruction with high frequency of high-resolution image and low frequency of intensity image and IHS inverse transform result in fused image.

After presenting EMD principle, multi-scale decomposition and reconstruction algorithm of 2D EMD is defined and fusion technique scheme is advanced based on EMD. Panchromatic band and multi-spectral band<sup>3, 2, 1</sup> of QUICKBIRD are used to assess the quality of the fusion algorithm. After selecting appropriate Intrinsic Mode Function (MF) for the merger on the basis of EMD analysis on specific row (column) pixel gray value series, the fusion scheme gives fused image, which is compared with generally used fusion algorithms (Wavelet, IHS, Brovey). The objectives of image fusion include enhancing the visibility of the image and improving the spatial resolution and the spectral information of the original images. For assessing quality of an image after fusion, information entropy and standard deviation are applied to assess spatial details of the fused images and

收稿日期: 2005-10-28; 修订日期: 2006-07-04

**基金项目:** 科技部科研院所社会公益研究专项 (编号: 2003DIA6N015, 2004DE100625)、教育部博士点基金“动态监测数据特征提取与变形预报理论研究”(编号: 20040290503)。

**作者简介:** 王 坚 (1980—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 滑坡地质灾害对地联合观测技术, 遥感图像处理。已发表论文 23 篇。  
E-mail: wjiancumt@163.com.

correlation coefficient bias index and warping degree for measuring distortion between the original image and fused image in terms of spectral information. For all the proposed fusion algorithm, better results are obtained when EMD algorithm is used to perform the fusion experience.

Key words image fusion; Experimental Model Decomposition(EMD); quantitatively evaluation

# 1 引 言

随着遥感技术的发展,影像数据的空间分辨率、光谱分辨率及时间分辨率都得到不断提高<sup>[1]</sup>,不同性质传感器获得的遥感图像不断增多,如何应用这些多源多分辨率影像进行信息融合增强就成为遥感应用的一个重要研究方向<sup>[2]</sup>。影像融合的目的是为了应用这些数据源有效增强信息量,为影像目标识别与信息提取提供基础。国内外学者已研究出多种高分辨率全色波段影像与低分辨率多光谱影像的融合方案。传统融合方案包括 IHS法<sup>[3,4]</sup>和 PCA法等<sup>[5]</sup>。近年结合金字塔或小波融合框架的多尺度融合模型得到广泛的应用并表现出优越性<sup>[6-8]</sup>。多尺度融合模型通过对不同尺度上的特征进行融合,达到提高融合效果的目的,具有明显的优越性。

经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition-EMD)方法是由 Huang等人在 1998年提出的新的时频分析工具,该方法属一种自适应的局部时频分析方法,它根据信号自身的特性将信号分解成有限个经验模量函数,特别适合非平稳信号的分析<sup>[9,10]</sup>,二维 EMD的研究与应用还刚刚起步<sup>[11]</sup>。遥感影像可以看成二维非平稳信号,采用基于行列分解的 EMD方法可以进行二维影像分频,并用于影像降噪<sup>[12]</sup>。本文综合多尺度融合思想与 EMD理论的优点提出一种新的影像融合模型,并针对高分辨率影像进行实验验证。

## 2 基本原理

### 2.1 经验模态分解

EMD 将信号分解为满足以下条件的模态函数<sup>[9,13]</sup> (Intrinsic Mode Function- MF): (1) 零点数目与极值点数目相同或至多相差 1; (2) 函数关于局部平均对称。最终将信号表示成若干 MF与单调残差函数的和,一维信号  $x(t)$ 的分解可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{imf}_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中,  $\text{imf}_i(t)$  表示  $i$  个 MF,  $r_n(t)$  是单调残差函数。EMD 算法采用所谓的“筛”完成,基本步骤为: (1)

求取信号  $x(t)$ 的极值点; (2)分别由极小值点与极大值点得包络线  $e_{\text{min}}(t)$ 和  $e_{\text{max}}(t)$ ; (3)计算上下包络线的平均值  $m(t) = (e_{\text{min}}(t) + e_{\text{max}}(t)) / 2$ ; (4)提取细节  $d(t) = x(t) - m(t)$ ; (5)重复细节  $d(t)$ 进行 (1) - (4)步骤,直到  $d(t)$ 为零均值,此时得到的  $d(t)$ 即为一个 MF; (6)计算残差  $m(t) = x(t) - \text{imf}_i(t)$ ; (7)重复运算直到残差不含 MF函数。

### 2.2 EMD 多尺度分解与合成结构

对 EMD 过程及多尺度描述能力进行解释。定义 EMD 求取 MF的算子与求取残差算子分别为  $F_{\text{mf}}(\cdot)$ 与  $F_{\text{residual}}(\cdot)$ ,则这两个算子定义了类似高频滤波与低频滤波的过程。 $F_{\text{mf}}(\cdot)$ 算子包括 EMD 过程的步骤 (1) - (5),获得该尺度的高频部分;  $F_{\text{residual}}(\cdot)$ 指步骤 (6)即计算对应分解尺度的残差,也即对应尺度的低频部分;对低频部分可以继续分解,从而实现多尺度的分解过程。原始第 0 层尺度信号  $x_0(t)$ 采用原始信号  $x(t)$ 表示,第  $i$ 尺度到第  $i+1$ 尺度的分解式可表示为:

$$\text{imf}_{i+1}(t) = F_{\text{mf}}(m_i(t)) \quad (2)$$

$$m_{i+1}(t) = F_{\text{residual}}(m_i(t)) \quad (3)$$

重构式为:

$$m_i(t) = F_{\text{mf}}^{-1}(\text{imf}_{i+1}(t)) + F_{\text{residual}}^{-1}(m_{i+1}(t)) \quad (4)$$

式中,  $F_{\text{mf}}^{-1}(\cdot)$ 和  $F_{\text{residual}}^{-1}(\cdot)$ 分别表示  $F_{\text{mf}}(\cdot)$ 与  $F_{\text{residual}}(\cdot)$ 的逆过程。

EMD 方法提出后,在信号预测、突变检测和信号分解等方面取得成功的应用。EMD 过程提供了多尺度分析技术,本文将这一结构用图 1表示。

与基于滤波器的分析技术不同,此方法引入极值点距离进行局部尺度的确定,使得分解具有自适应和完全数据驱动的特征。EMD 结果表明这种分

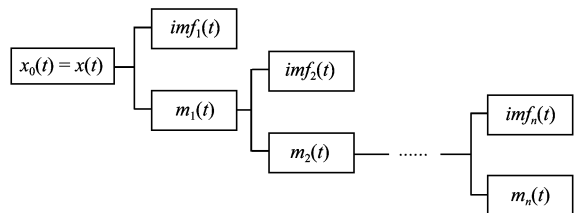


图 1 基于 EMD 多尺度分解结构的示意图

Fig 1 EMD based multi-scale decomposition structure

解过程是符合物理意义的,可以得到近似周期,分解的经验模态量满足瞬时频率特征(Hilbert谱)分析的条件,便于分析信号的瞬时特征,用于特征提取。

### 3 基于 EMD 的影像融合方案

影像的 EMD 多尺度分解首先对影像进行逐行 EMD,选择合适的高频模量重构获得第一分解尺度上的高频特征影像  $H_{high}^{row}$ ,并将剩余部分作为低频特征影像  $Low^{row}$ ,然后对  $Low^{row}$ 进行逐列 EMD 获得第二分解尺度上的高频特征影像 ( $H_{high}^{col}$ )与低频特征影像 ( $Low^{col}$ ),第三尺度通过对  $Low^{col}$ 进行逐行 EMD 获得,如此反复,先进行行分解,再进行列分解,实现影像的逐级多尺度分解。

基于行列分解的二维 EMD 改进的 IHS 影像融合方案可用图 2 表示。首先,以全色波段影像为基准对多光谱波段进行几何配准,并重采样成全色波段分辨率,然后对多光谱 RGB 影像 (MS) 实施 IHS 变换获得

强度波段影像 (I),色度波段影像 (H)与饱和度波段影像 (S),再按如下步骤进行影像融合实验:

(1)以 I 为基准进行全色波段 (PAN)的直方图调整,获得与 I 具有相同均值与方差的全色波段影像  $PAN^{MP}$ ;

(2)分别选择 I 与  $PAN^{MP}$ 的典型行 (列)进行 EMD,分析确定保留的高频模量层数,可采用统一的选择标准,也可根据各行 (列)实际情况分别选择不同的模量分离高频与低频影像特征信息;

(3)逐行 (列)对影像进行 EMD,获得行 (列)为主的高频影像特征信息  $H_{high}^{row}$  ( $H_{high}^{col}$ )与行 (列)为主要的低频影像特征信息  $Low^{row}$  ( $Low^{col}$ ),提取影像的多尺度高频与低频特征影像信息;

(4)选择高分辨率影像的高频部分  $H_{high}^{row}$  ( $H_{high}^{col}$ )与 I 波段影像的低频部分  $Low^{row}$  ( $Low^{col}$ )进行重构获得增强后的 I 强度波段影像 (FI),进行 IHS 逆变换获得融合后的 RGB 多光谱影像 (FMS)。

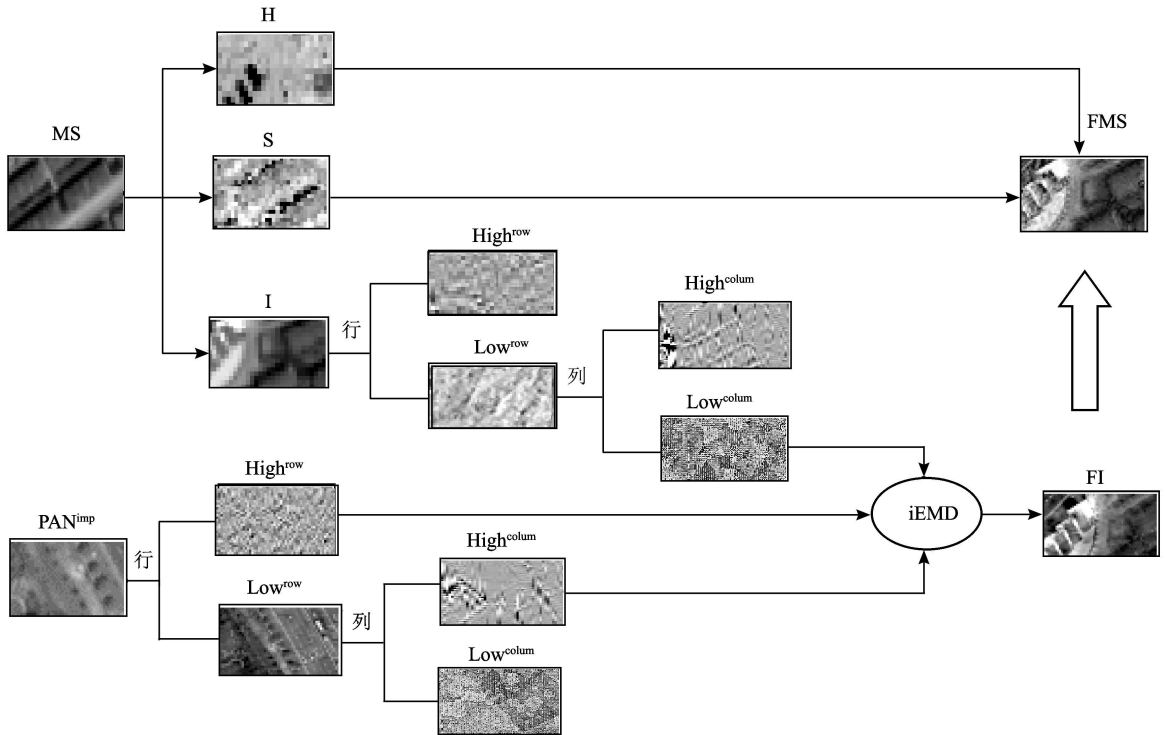


图 2 基于经验模态分解的影像融合流程

Fig 2 Flowchart of image fusion based on EMD

### 4 融合结果的评价

保持足够的多光谱特征用于地物识别与分类。评价方法可以采用视觉评价与量化评价。视觉评价通过目视对比的方法直接对融合优劣进行定性评价。图 3 可以看出不同的融合方案都显著提高了影像的空

间分辨率,除 BROVEY 算法有明显的光谱扭曲外,其余三种方案在视觉上不存在明显的光谱差异。由于主观评价存在一定的缺点,学者们提出多种影像量化评价方法,总的思想是评价融合过程中,多光谱特征信息与高分辨率空间信息的保持情况。本文选用如下 5 个量化指标<sup>[14, 15]</sup>。

#### ●信息熵

熵是影像信息丰富程度量化的一种重要方法,针对 8 位图像采用 Shannon 信息熵方法评定,定义:

$$H(x) = -\sum_{i=0}^{255} p_i \log_2 p_i \quad (5)$$

式中,  $p_i$  表示灰度级  $i$  的概率,近似取为灰度的频率:

$$p_i = \frac{f_i}{N} \quad (6)$$

式中,  $f_i$  表示灰度  $i$  的频数,  $N$  表示像素总数。

#### ●标准差

标准差定义为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \mu)^2 \quad (7)$$

式中,  $x_{ij}$  表示影像的像素值,  $\mu$  表示像素均值,  $m, n$  为影像的行列数。标准差用来表示灰度值与均值之间的偏离程度。

#### ●相关系数

相关系数可用来衡量融合影像与原始影像之间的相关程度,两图像的相关系数接近 1 时,说明它们的相关性很强,相关系数可定义为:

$$\text{corr} \left( \begin{matrix} A \\ B \end{matrix} \right) = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \mu(A))(x'_{ij} - \mu(B))}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \mu(A))^2 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x'_{ij} - \mu(B))^2}} \quad (8)$$

式中,  $A$  和  $B$  分别表示两幅影像,  $x_{ij}$  和  $x'_{ij}$  分别表示两幅影像  $A$  和  $B$  的像素值,  $\mu(A), \mu(B)$  表示  $A, B$  的灰度均值。

#### ●偏差指数

定义为融合波段与多光谱波段的差值的绝对值与多光谱波段影像值之比:

$$B_{\text{bias}} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{|x_{ij} - x'_{ij}|}{x_{ij}} \quad (9)$$

式中,  $x_{ij}$  和  $x'_{ij}$  分别表示原始多光谱影像与融合影像的像元值。该指数用于检查多光谱影像与融合影像之间的偏差程度,该值越大,表示影像的融合质量越差。

#### ●扭曲度

扭曲度用于描述融合后影像相对多光谱影像的变形情况,定义为:

$$W = \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |x_{ij} - x'_{ij}| \quad (10)$$

式中,  $x_{ij}$  和  $x'_{ij}$  分别表示原始多光谱影像与融合影像的像元值。 $W$  增大说明光谱变形增加。

## 5 实例与分析

取上海某区域的 QUICKBIRD 影像 ( $512 \times 512$ ) 进行融合实验(图 4)。首先对全色波段与多光谱波段 3, 2, 1 进行 HS 变换后的强度波段影像进行分析。选择具有代表性的两行像元灰度值序列进行经验模态分解,分别得到 6 个经验模态(图 3),从图 3 中可以看出全色波段影像在前二个模量上对信息的描述明显比强度波段影像更为细腻,信息量也更为丰富。第三、四个模量上这种差别有所减弱,且主要为趋势信息。而在后三个模量上全色波段的分解模量对信息的描述与强度波段影像相当。因此,这里保留全色波段行、列分解的第一经验模态作为融合影像的高频信息,这是因为行列各进行一次多尺度 EMD 后,基本保留了全色波段的第一、二模态的信息。即首先对 I 波段影像逐行分解,保留第一模量,得到高频影像 ( $\text{High}^{\text{row}}$ ) 与低频影像 ( $\text{Low}^{\text{row}}$ )。然后对  $\text{Low}^{\text{row}}$  进行逐列分解,仍保留第一模量,得到高频影像 ( $\text{High}^{\text{colhm}}$ ) 与低频影像 ( $\text{Low}^{\text{colhm}}$ )。同时,对全色波段 PAN<sup>MP</sup> 进行类似的经验模态分解得行分解的高低频影像  $\text{High}^{\text{Pnw}}$  和  $\text{Low}^{\text{Pnw}}$ , 列分解高低频影像  $\text{High}^{\text{Pcolhm}}$  和  $\text{Low}^{\text{Pcolhm}}$ 。采用  $\text{Low}^{\text{colhm}}$ ,  $\text{High}^{\text{Pnw}}$  和  $\text{High}^{\text{Pcolhm}}$  三个部分的影像进行重构,获得融合后的强度影像波段 (FD); 最后,实施 HS 反变换,获得融合后的多光谱影像。

不同模型的融合结果如图 5 所示。为了比较保留不同模量获得的融合效果,同时保留全色波段行、列分解的第一、第二经验模态作为融合影像的高频信息进行融合。图 6 给出两种保留模量方式获得的融合结果对比(仅对图 5(d)的矩形区域放大)。可以看出模量选择不当带来了线状边缘效应,且在点状地物周围表现得更为明显,这是由于采用行列分解的 EMD 二维拓展方式时未考虑到局部二维空间的连续性所致,一旦选择融合的模量数不合理即会出现边缘现象。可采用基于其他二维拓展原理进行影像融合,达到融合影像在二维空间上的连续性,从而获得更优的融合效果。这将是进一步研究的内容。

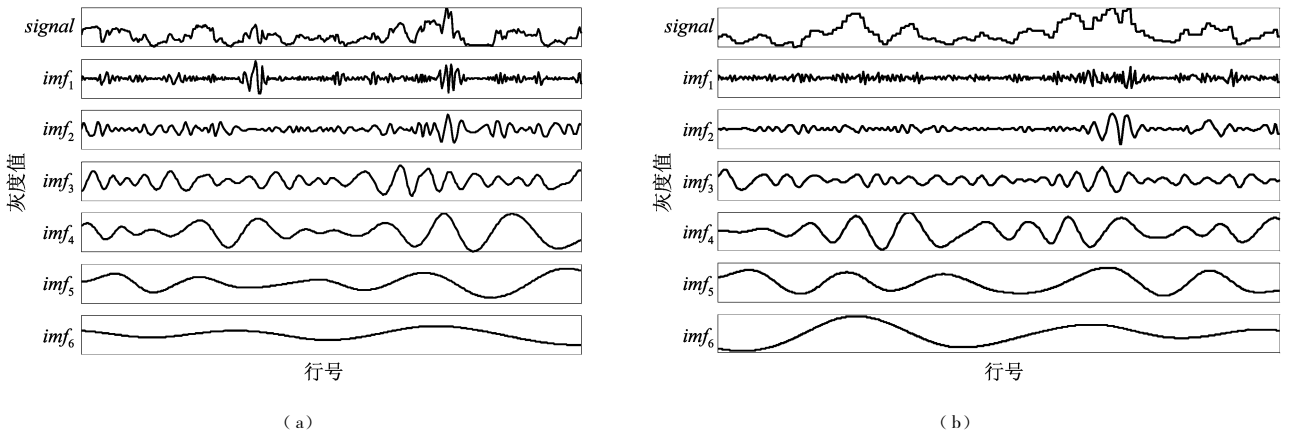


图 3 全色波段影像某行像元灰度值序列的经验模态分解 (a)与对应 I 波段影像某行像元灰度值序列的经验模态分解 (b)

Fig 3 Seven MF which are extracted from panchromatic band image and intensity image

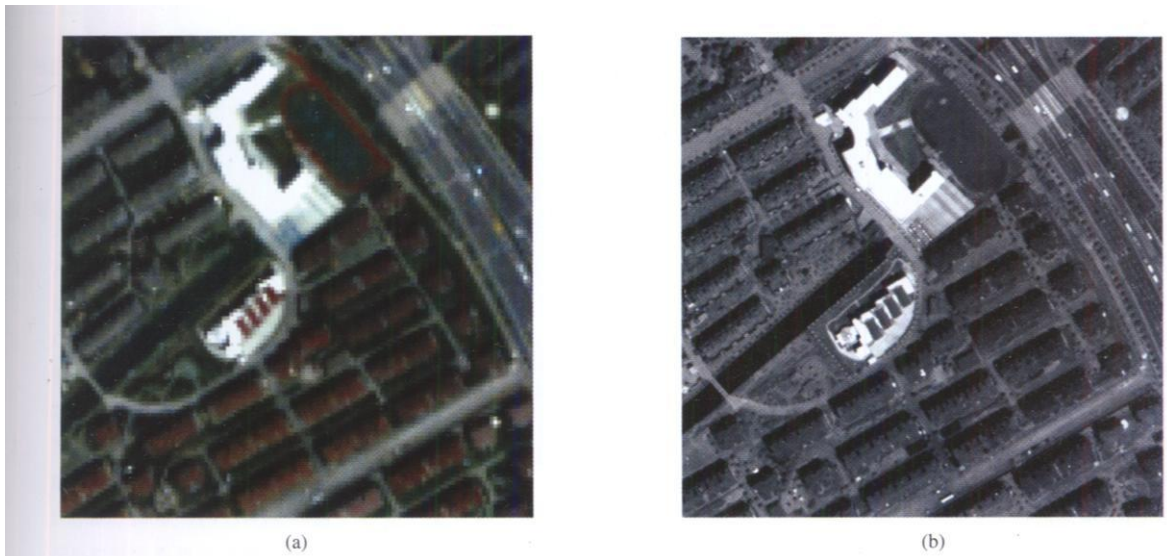


图 4 QUICKBRD 多光谱 3, 2, 1 波段彩色合成图 (a)与全色波段灰度影像图 (b)

Fig 4 Multi-spectral band 3, 2, 1 composite image (a) and panchromatic image (b)

表 1 给出了各种评价方法计算的量化指标值。可以看出,本文方法融合图像即图 5(d)的信息熵与标准差指标比原始图像相应值显然要大,介于小波变换融合方案与标准 IHS 融合方案之间,这说明本文方法融合后,图像的信息量得到明显提高,图像的清晰度也得到了很好的增强;改善图像清晰度方面优于 IHS 但低于小波变换改进的 IHS 融合方案。

本文方法获得的相关系数值明显大于其余三种方案,说明该方法对光谱特征的保持效果最佳。另外该方法具有最小的光谱扭曲度,偏差指数也小于小波改进的融合方案与 IHS 融合方案;而 Brovey 融合方案除偏差指数外,其他各项指标均比经验模态融合方案都要差。以上分析表明,基于经验模态分解的融合方案能很好地保持光谱特性,提高影像分

辨率与清晰度。

## 6 讨论

本文首次提出基于经验模态分解的影像融合模型。QUICKBRD 全色波段与多光谱影像的融合实验表明,基于经验模量分解的融合算法整体最优。实验中,经验模态的分解层次不当会带来线状边缘效应,对点状地物表现得更加明显,这是因为受到 EMD 行列拓展方式的局限,可采用其他二维拓展的经验模态模型进行影像融合,从而保证融合影像在二维空间上的连续性,获得更优的融合效果。EMD 理论的灵活性决定了本文融合方案具有很强的发展潜力,值得进一步研究。

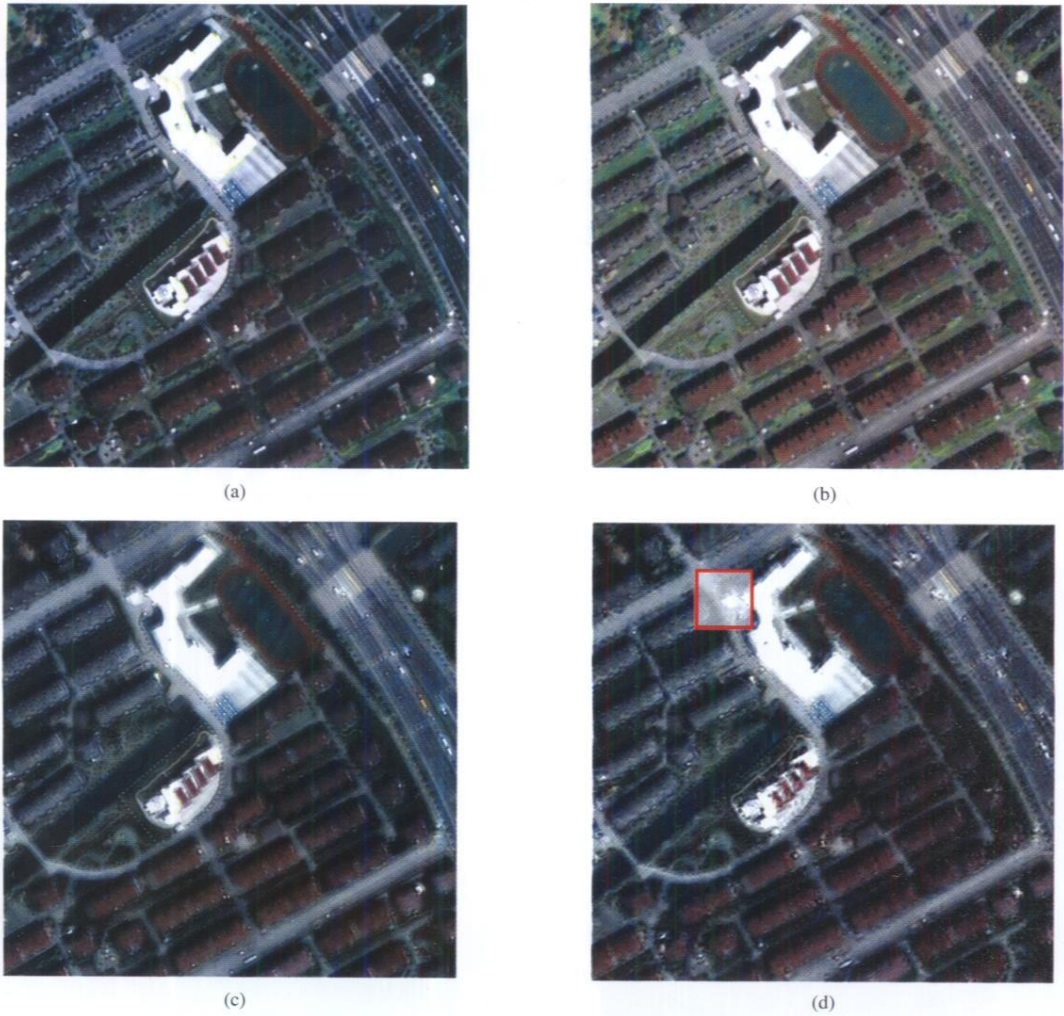


图 5 融合后多光谱 3, 2, 1 波段影像彩色合成图

(a) 标准 IHS 融合算法; (b) BROVEY 融合算法; (c) 小波变换改进的 IHS 融合算法; (d) EMD 改进的 IHS 融合算法

Fig.5 Fused QUICKBIRD multi-spectral band3,2,1 color composite image

(a) Standard IHS fusion algorithm; (b) BROVEY fusion algorithm; (c) wavelet transformation improved IHS fusion algorithm; (d) EMD improved IHS fusion algorithm

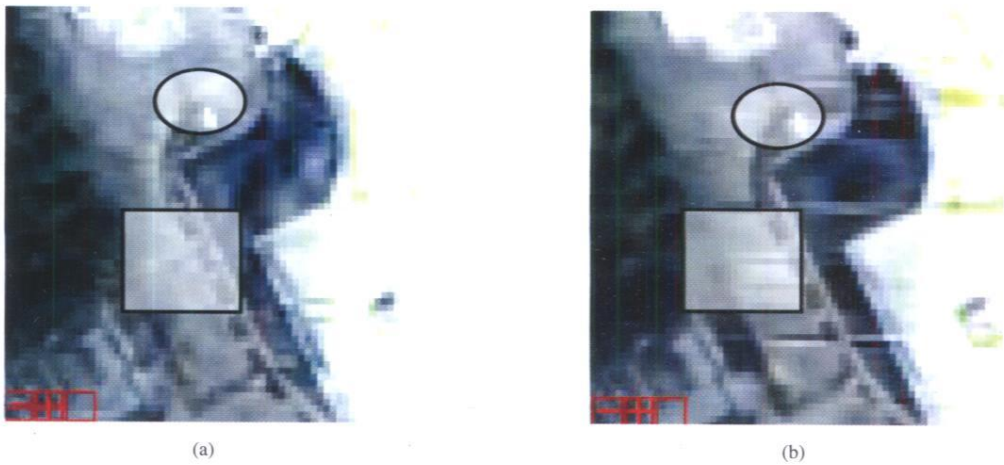


图 6 取全色波段影像第一模量融合(a)与取第一、第二模量融合(b)的结果比较

Fig.6 Comparison of fusion schemes using one mode function(a) and using the first two mode function(b) results comparison

表 1 不同融合结果的量化评价结果  
Table 1 Quantitative evaluation of distinct fusion schemes

		Quickbird 原始影像	小波变换改进的 HS融合方案	HS融合方案	Broyer融合方案	Emd改进的 HS 融合方案
信息熵	TM Band1	3.84	3.99	3.80	2.77	3.92
	TM Band2	4.65	4.80	4.70	3.64	4.73
	TM Band3	4.48	4.61	4.47	3.35	4.54
标准差	TM Band1	17.21	20.30	17.24	5.17	18.03
	TM Band2	37.57	41.01	38.04	11.66	38.59
	TM Band3	29.63	32.84	29.60	9.04	30.55
相关系数	TM Band1		0.84	0.83	0.86	0.94
	TM Band2		0.88	0.86	0.81	0.96
	TM Band3		0.88	0.86	0.84	0.95
偏差指数	TM Band1		0.15	0.25	0.02	0.07
	TM Band2		0.10	0.20	0.01	0.04
	TM Band3		0.11	0.20	0.01	0.04
扭曲度	TM Band1		5.72	6.33	14.73	3.46
	TM Band2		12.18	14.40	33.54	7.34
	TM Band3		9.72	11.03	26.68	5.88

参考文献 (References)

[ 1 ] Zhong Z Y, Chen Y. On Application of Wavelet Transformation to Multisource Information Fusion [ J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31 (sup): 56-60. [钟志勇, 陈鹰. 多源信息融合中小波变换的应用研究 [ J]. 测绘学报, 2002, 31(增刊): 56-60.]

[ 2 ] Wang H H, Peng J X, Wu W. Remote Sensing Image Fusion Using Wavelet Packet Transform [ J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(9): 932-936 [王海晖, 彭嘉雄, 吴巍. 基于小波包变换的遥感图像融合 [ J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(9): 932-936.]

[ 3 ] Pohl C, Van Genaderen J L. Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications [ J]. Int J Remote Sensing, 1998, 19(5): 823-854.

[ 4 ] Carper W J, Lillesand T M, Kiefer R W. The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging Spot Panchromatic and Multispectral Image Data [ J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(4): 459-467.

[ 5 ] Maria G A, José L S, Raquel G C. Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved HIS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition [ J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(6): 1291-1299.

[ 6 ] Yocky D A. Multiresolution Wavelet Decomposition Image Merger of Landsat Thematic Mapper and Spot Panchromatic Data [ J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(9): 1067-1074.

[ 7 ] Welch R, Ahlers W. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data [ J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, 53(3): 301-303.

[ 8 ] Bruno A, Luciano A, Stefano B. Context Driven Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images Based on Oversampled Multiresolution Analysis [ J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(10): 2300-2312.

[ 9 ] Huang N E, Shen Z, Long S R. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis [ J]. Proc R Soc Lond A, 1998, (454): 903-995.

[ 10 ] Yu D J, Cheng J S, Yang Y. Application of EMD Method and Hilbert Spectrum to the Fault Diagnosis of Roller Bearings [ J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, (19): 259-270.

[ 11 ] Liu Z X, Peng S L. Directional Empirical Mode Decomposition and its Application of Texture Segmentation [ J]. Science in China Ser E Information Sciences, 2005, 35(2): 113-123. [刘忠轩, 彭思龙. 方向 EMD 分解与其在纹理分割中的应用 [ J]. 中国科学 E 辑, 2005, 35(2): 113-123.]

[ 12 ] Han C M, Guo H D, Wang C L. Speckle Suppression Using the Empirical Mode Decomposition [ J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(4): 266-271. [韩春明, 郭华东, 王长林. 利用经验模态分解方法抑制 SAR 斑点噪声 [ J]. 遥感学报, 2002, 6(4): 266-271.]

[ 13 ] Coughlin K T, Tung K K. 11-year Solar Cycle in the Stratosphere Extracted by the Empirical Mode Decomposition Method [ J]. Advances in Space Research, 2004, (34): 323-329.

[ 14 ] Shi W Z, Zhu C Q, Tian Y. Wavelet-based Image Fusion and Quality Assessment [ J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, (6): 241-251.

[ 15 ] Maria G A, José L S, Raquel G C. Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved HIS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition [ J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(6): 1291-1299.