遥感地质

三种高保真遥感影像融合方法效果评价与分析

赵珍梅[1,2]， 马 伟[2]， 王润生[1]
（1. 中国地质大学（北京）北京 100083；2. 中国冶金地质总局矿产资源研究院，北京 100025）

[摘 要]图像融合是解决多源遥感图像信息综合的最有效技术手段，针对不同数据源选择最佳的融合方法是提高图像融合质量的关键。本文在介绍三种新的融合方法：Gram－Schmidt、Pansharp 和 Ehlers 融合基本原理和融合过程的基础上，选择广东新会郊区的 QuickBird 卫星影像为数据源进行试验。对融合结果从定性和定量角度进行综合评价。定性评价包括色调、纹理和清晰度等；定量评价指标包括均值、标准差、信息熵、平均梯度、相关系数和相对偏差等。所选指标能够反映空间分辨率、信息量和保持融合图像的光谱性质等，以便客观准确地评价融合效果。试验结果表明：三种融合方法都有较高的空间结构信息与光谱信息的保真度。其中，Pansharp 方法融合结果图像所含量信息最大，细节信息最丰富；而光谱保真方面：Gram－Schmidt 方法最好，其它两种融合方法次之。

[关键词]融合 保真 Gram－Schmidt 法 Pansharp 法 Ehlers 法
[中图分类号]TP751 [文献标识码]A [文章编号]0495－5331(2010)04－0705－06

Zhao Zhen－mei, Ma Wei, Wang Run－sheng. Evaluation and analysis of three methods of fusing remote sensing images with high fidelity of spectral information[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(4): 0705－0710.

1 引言

20 世纪 90 年代中后期，许多新型的卫星传感器相继升空，使同一地区的遥感影像数目日益增多。如何有效地利用不同传感器、不同时相、不同分辨率的多源遥感海量数据信息便成为目前遥感应用的瓶颈问题，而解决这一问题的关键技术就是遥感影像信息融合。

图像融合是指综合两个或多个源图像的信息，充分利用它们所包含的冗余与互补信息，以获得同一场景的“更高质量”的信息（Wald，1999）。在遥感应用中，全色波段图像具有相对高的空间分辨率，但其光谱分辨率较低；多光谱图像具有较高的光谱分辨率，但其空间分辨率较低。综合利用多光谱图像与全色图像，从而获得高空间分辨率的多光谱图像是当前遥感影像处理领域里的研究热点（吴连喜等，2004；赵书河等，2004；Tu，*et al.*，2007；Kalpoma，*et al.*，2007；陈思锦等，2004；李旭等，2009），而图像融合技术目前在许多遥感应用领域中发挥着极其重要的作用（王建梅等，2005；李均力等，2004；徐涵秋，2005；冯德俊等，2004；Hong，*et al.*，2002）。

随着卫星传感器技术的发展，LandSat－7，IKONOS，QuickBird，OrbView 以及 WorldView－1 等地球观测卫星提供的多光谱图像具有更高的光谱分辨率，同时也提供了更高空间分辨率的全色波段图像，新的全色图像具有更宽的光谱范围（从可见光到近红外），因此一些传统的常用遥感影像融合方法如 IHS（亮度（intensity）、色调（hue）、饱和度（saturation）变换、Brovey 方法、主成分变换（principal component transform，简称 PC 变换）、小波变换等在实际生产应用领域中已显弊端。即这些融合方法虽都能增加多光谱影像的空间纹理信息，但 IHS，Brovey，PC 等方法易使融合后的影像失真；小波变换光谱信息虽保真较好，但小波基选择困难，且在对高分辨卫星影像数据进行融合时，都存在不同程度的光谱失真。

为了克服传统融合方法中的不足，减小光谱信息在影像融合过程中的损失，近年来，国内外一些相关研究人员相继提出了一些新的融合算法，能够较好地弥补上述传统方法中的不足，融合效果有较大

[收稿日期]2010－05－14；[修订日期]2010－06－10；[责任编辑]郑 杰。
[基金项目]新疆与内蒙重点矿区遥感地质调查。
[第一作者简介]赵珍梅（1963 年－），女，硕士，教授级高工，主要从事遥感技术应用与研究作，E－mail：zhao4539@126.com.cn。

的改善。例如，刘博士提出的基于亮度调节的平滑滤波（smoothing filter-based intensity modulation，简称 SFIM）（Liu，2000），Laben *et al*（2000）等发明的 Gram-Schmidt 融合方法（Ehlers，1991），张云博士提出的 Pansharp 融合方法（Zhang，2002）和 Ehlers 教授提出的 Ehlers 融合算法。这些新的融合算法在保持高分辨率影像空间信息与光谱方面取得了较好的效果。鉴于国内对于上述三种新方法融合效果的对比分析研究还较少，本文在介绍 Gram-Schmidt、Pansharp 和 Ehlers 融合的基本算法和融合过程的基础上，选择广东新会郊区的 QuickBird 为数据源进行试验。对三种方法的融合效果进行定性和定量的综合分析评价。

2 融合的基本原理和融合过程

2.1 Gram-Schmidt 融合方法

Gram-Schmidt 变换的核心思想是利用投影原理对任一组线性独立的向量通过 Gram-Schmidt 变换获得该向量的一组正交基（Laben *et al*.，2000）。不妨设一组相互独立向量组 $\{V_1, V_2, \ldots V_n\}$，则 Gram-Schmidt 正交化过程如下：

$$\rho_1 = V_1, \quad \eta_n = \frac{\rho_n}{\|\rho_n\|} \tag{1}$$

$$\rho_n = V_n - \sum_{i=1}^{n-1} \langle V_n, \eta_i \rangle \eta_i \tag{2}$$

式中，$\langle V_n, \eta_i \rangle$ 为 V_n 与 η_i 的内积。这样就得到了正交基 $\{\rho_1, \rho_2, \ldots \rho_n\}$。该变换的一个特点是，变换后各矢量只是正交，而各矢量的顺序并非按照信息量大小排序，这也是与 PC 变换的主要区别之一（李存军等，2004；Clayton，1971）。Gram-Schmidt 融合方法的基本步骤是首先采用光谱重采样的方法模拟产生第一分量，通过 Gram-Schmidt 变换将多光谱图像转换到正交空间，再利用高空间分辨率图像替换第一分量，最后通过 Gram-Schmidt 反变换获得融合后图像。基于 Gram-Schmidt 变换的融合算法具有明确的数学意义，对待融合的遥感影像无波段数限制，并且具有较高的光谱信息保持度。

2.2 Pansharp（全色增强融合算法）

Pansharp 方法是由张云博士发明的融合算法，该方法基于最小二乘法来最佳近似原始多光谱、全色数据与融合后多光谱、全色数据之间的灰度值关系，并用统计方法解决融合过程的标准化和自动化问题，因而获得较高色调的保真效果。

该方法的优点：算法简单，易于实现工程化，融合过程可以一次完成，不受波段数限制。融合结果对人为主观因素与数据本身质量的依赖性较小，光谱和细节特征保真度高。

2.3 Ehlers 融合算法

Ehlers 融合算法是由德国 Osnabreck 大学的 Manfred Ehlers 教授提出，是基于快速傅立叶变换（FFT）滤波对全色波段锐化/分辨率融合的技术（Ehlers，1991）。针对不同区域图像，该算法提供了郊区、城区和城郊混合区三个预设滤波模型，以保持融合图像的空间特性与原图像一致。

2.3 融合过程

图像融合的目标在于增强图像的空间分辨率，同时丰富光谱分辨率，以提升融合结果图像的精确度和信息量。其过程主要包括两个阶段：数据预处理与融合变换，前者的关键是对图像的配准处理，精确的空间配准是融合处理的前提；而后者则主要采用不同的算法对图像进行特征融合处理。图像融合的基本过程如图 1 所示。

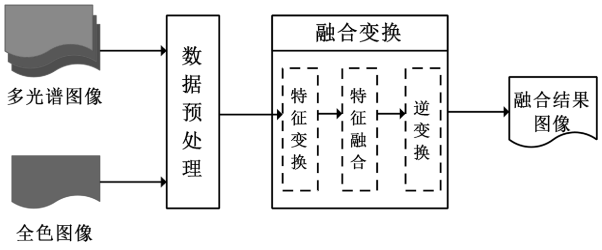


图 1 图像融合的基本过程

Fig. 1 Basic process of image fusion

3 融合效果评价与对比分析

本文将从定性和定量两个方面，对上述三种融合算法效果进行评价与对比分析。本次试验选择 2006 年 12 月 26 日广东新会某郊区的 QuickBird 卫星影像数据，由于区内地物大小和形状具有多样性，遥感数据的空间梯度大，不同光谱波段上也存在较大的变异，所以能较全面地反映影像融合算法的优缺点。数据源基本情况见表 1。

评价所用的图像如图 2（a）所示。为获得较好的显示效果，文中所有 QuickBird 彩色图像都经过标准差拉伸增强。依次采用上述三种融合算法进行融合处理，所得融合结果图像如图 2（b，c，d）所示。

3.1 定性分析

为了便于目视定性比较，从研究区截取的一个子区域（图 2（a）中红色区域），大小为 334×241 像

表 1　融合试验数据

Table 1　Parameters of imgae fusion test

	波段	波段范围(nm)	空间分辨率(m)
多光谱	1	蓝:450-520	2.44
	2	绿:520-600	
	3	红:630-690	
	4	近红外:760-900	
全色	PAN	450-900	0.61

注:数据源为 QuickBird 卫星影像;地点为广东新会;影像大小为 1267×773 像素;获取时间:2006.12.26。

素,如图 3(a)所示。从图 3(b,c,d)中可看出,三种方法融合的图像无论是空间分辨率还是光谱信息量都比 QuickBird 原始图像有明显的增加。图像的空间纹理信息有了显著提升,不同种类的树木,建筑物屋的轮廓、公路和树冠的形状等清晰可见,其空间信息基本与全色波段(图 3(a))相当。从提高空间结构信息上来看,三种融合方法差异并不大,但从光谱保真性上比较,三种方法则有一定的差别。PANSHARP 方法光谱保真效果较好,但图像的对比度有所降低(图 2(b),图 3(b)),EHLERS 方法使光谱失真程度较大(见图 2(d),图 3(d)),GRAM-SCHMIDT 方法光谱保真效果最佳(见图 2(c),图 3(c))。

3.2　定量分析

为进一步客观评价上述三种融合方法融合效果,考虑从定量方面评价上述三种融合方法的效果。评价影像融合效果的统计参数较多(王海晖等,2003)。本文选用能够客观反映空间分辨率、信息量和保持融合图像的光谱性质的标准:图像均值、标准差、相关系数、信息熵、平均梯度和相对偏差六个参数。

(1) 均值

图像像素值 $Z(i,j)$ 均值 $\bar{Z}$ 是图像像素的灰度平均值,其对人眼则反映为平均亮度。其定义为

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} Z(i,j)}{M \times N} \tag{3}$$

(2) 标准差

标准差反映了图像像素灰度相对于灰度平均值的离散情况。在某种程度上,标准差也可用来评价图像反差的大小。当标准差较大时,则图像灰度级分布分散,则图像反映的信息量大。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} (Z(i,j) - \bar{Z})^2}{M \times N}} \tag{4}$$



图 2　融合结果图像(图 a 中红框区域为后续评价用的子区)

Fig. 2　Fusion results of three image fusion methods(The red box in the figure is a subregion for further evaluation)

a-Quickbird 原始多光谱图像;b-Pansharp 融合图像;c-Gram-Schmidt 融合图像;d-Ehlers 融合图像

a-Original Quickbird multispectral image; b-fusion image of Pansharp; c-fusion image of Gram-Schmidt; d-fusion image of Ehlers

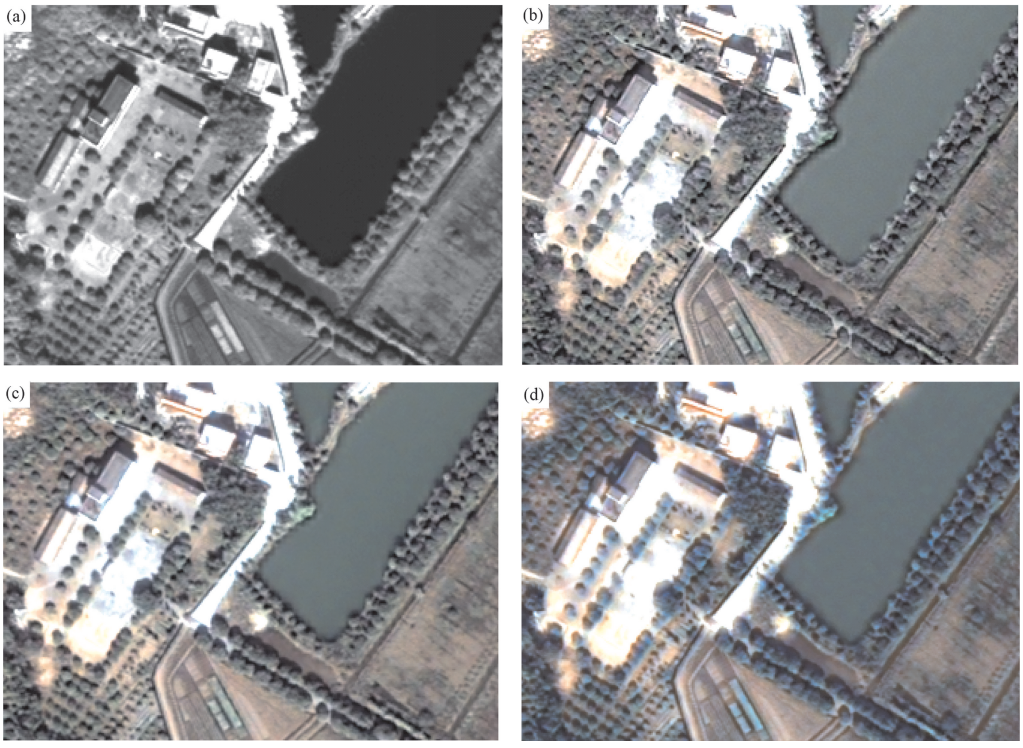


图 3 三种融合结果目视比较评价

Fig. 3 Visual comparison of results by three fusion methods

a-Quickbird 原始全色图像; b-Pansharp 融合图像;c-Gram-Schmidt 融合图像;d-Ehlers 融合图像;

a-Original Quickbird Pan image; b-fusion image of Pansharp; c-fusion image of Gram-Schmidt;d-fusion image of Ehlers

(3) 相关系数

融合图像与源图像的相关系数反映两幅图像光谱特征的相似程度,定义为:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}[F(i,j)-\bar{f}][A(i,j)-\bar{a}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}[F(i,j)-\bar{f}]^2[A(i,j)-\bar{a}]^2}} \quad (5)$$

(4) 信息熵

图像的信息熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标,因为通过对图像信息熵的比较可以对比出图像的细节表现能力。对于灰度$\{0,1,2,\cdots,i-1\}$的直方图,其信息熵定义为:

$$H = -\sum_{i=0}^{i-1} P_i \ln P_i \quad (6)$$

式中 P_i 为第 i 级灰度出现的概率。

若融合图像的熵越大,则表示融合图像所含的信息越丰富,融合质量越好。

(5) 平均梯度

图像像素值 $Z(i,j)$ 的平均梯度 $\bar{G}$ 可敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力,不仅可用来评价图像的清晰程度,还可反映图像中微小细节反差和纹理变化特征。其计算公式为:

$$\bar{G} = \frac{1}{(M-1)(N-1)}\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{N-1}\sqrt{\frac{\left[\frac{\partial z(i,j)}{\partial i}\right]^2+\left[\frac{\partial z(i,j)}{\partial j}\right]^2}{2}} \quad (7)$$

一般情况下,$\bar{G}$ 越大,图像层次越多,表示图像越清晰。

(6) 相对偏差

相对偏差的大小表示融合图像与源图像平均灰度值的相对差异,以反映融合图像与源图像在光谱信息上的匹配程度。

$$D = \frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\frac{|F(i,j)-A(i,j)|}{A(i,j)} \quad (8)$$

式中 $A(i,j)$ 是源图像灰度值,$F(i,j)$ 是融合图像灰度值。

本文选取 3 个可见光波段(1:蓝,2:绿,3:红)进行定量评价,评价结果见表 2:

为了便于评价和分析,对融合后的多光谱图像数据进行重采样处理,像元空间分辨率与原始多光谱图像相同。表 2 中的数据是根据融合结果图像重

表 2　三种融合方法的评价参数表

Table 2　Evaluation parameters of three image fusion methods

	波段	均值	标准差	信息熵	平均梯度	融合前后相关系数	相对偏差
原多光谱	1	254.74	41.98	6.75	10.23		
	2	347.58	81.63	7.91	22.34		
	3	213.31	86.40	7.95	23.09		
Ehlers 融合	1	279.93	39.81	6.87	22.30	0.86	0.114
	2	345.30	80.08	7.88	37.02	0.9	0.066
	3	210.78	83.46	7.86	28.74	0.93	0.086
Gram 融合	1	254.25	37.14	6.77	18.12	0.93	0.043
	2	347.08	73.05	7.88	38.29	0.92	0.065
	3	212.78	78.40	8.00	40.40	0.92	0.120
Pan-Sharp 融合	1	254.74	42.45	7.04	23.44	0.89	0.053
	2	347.59	82.56	8.07	46.28	0.89	0.075
	3	213.29	87.36	8.17	48.72	0.89	0.138

采样处理之后统计得到的。

从表 2 可以看出,在均值上,除 Ehlers 融合在波段 1 增大,2、3 波稍有降低外,Gram-Schmidt 与 Pansharp 融合均值基本与原图相同,而其它两种融合图像亮度与原图相差不大,反映在图像上 Ehlers 偏蓝,其它图像亮度与原多光谱图像相近。标准差、信息熵方面:Pansharp 明显增大, Ehlers 和 Gram-Schmidt 融合图像标准差均低于原图,且信息熵方面与原图相比变化不大。平均梯度方面:三种融合方法均远高于原多光谱图像,但以 Pansharp 变化最大,Gram-Shmidt 次之,Ehlers 最小。以上几方面说明 Pansharp 融合后的图像所包含的细节信息最丰富。从与源影像的相关系数来看,Gram-Schmidt 变换最大(均值为 0.923),Pansharp(均值为 0.89)和 Ehlers(均值为 0.897)相近。从相对偏差来看, Gram-schmidt 方法最小(均值为 0.069),Ehlers 与 Pansharp 方法相近(均值为 0.089),说明三种方法中 Gram-Schmidt 光谱保真效果最好。

综上所述,三种融合方法都有较高的空间结构信息与光谱信息的保真度。三种融合方法中,以 Pansharp 融合图像所含量信息最大,包含的细节信息最丰富;而光谱保真方面:Gram-Schmidt 最好,其它两种方法略次之。

4　结论

本文在分析 Gram-Schmidt、Pansharp 和 Ehlers 融合的基本算法和融合过程的基础上,选择广东省新会郊区的 QuickBird 为数据源进行试验,从图像色调、纹理和清晰度等定性方面,以及均值、相关系数和标准差、熵、平均梯度和光谱保真等定量统计方面,对三种新的高保真方法的融合效果进行评价与对比分析。结果表明: 三种方法各有优势,相比较而言,Pansharp 融合方法的信息量最丰富,而 Gram-Schmidt 方法的光谱保真度最高,Ehlers 方法的信息量和保真度侧介于前两者之间。

Pansharp 融合方法不仅信息保真度高,而且处理过程中所耗时间最短,所以适合大数据量的图像融合。由于在光谱保真方面是三种方法中最差的,所以在用于不同物理特性的数据融合时,会产生光谱失真。Gram-Schmidt 方法携带的信息量较丰富,图像清晰度也高,由于保真度高,虽然计算耗时虽比 Pansharp 稍长,但适合各类影像数据融合。Ehlers 方法虽然所含信息量、图像清晰度和光谱保真度均较好,但其在处理过程中耗时是三种方法中最长的,因此不太适用于大数据量的影像融合处理。

[References]

Chen Si-jin, Qin Qi-ming, Wang Wen-jun. 2004. An improvement of brovey RS image fusion by using wavelet signal analysis[J]. Journal of institute of surveying and mapping, 21(2): 118-120(in Chinese with English abstract)

Clayton D G. 1971. Gram-Schmidt orthogonalization[J]. Applied Statistics, 20(3): 335-338

EhlersM. 1991. Multisensor Image Fusion Techniques in Remote Sensing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 46(1): 19-30

Feng De-jun, Li Yong-shu, Lan Yan. 2004. Dynamic monitoring using image fusion by wavelet transform[J]. Remote Sensing Technology and Application, 19(3): 2159-2162(in Chinese with English abstract)

Hong-Gyoo sohn, Yeong-sun song, Hwan-hee yoo. 2002. Accurate classification of water area with fusion of Radarsat And Spot satellite imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1503-1505

Kalpoma K A, Kudoh JUN-ichi. 2007. Image fusion processing for IKONOS 1-m color imagery[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 45(10): 3075-3086

Laben C A, Brower B V. 2000. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening[J]. U. S. Patent 6 011 875

Li Cun-jun, Liu Liang-yun, Wang Ji-hua, Wang Ren-chao. 2004. Comparison of two methods of fusing remote sensing images with fidelity of spectral information[J]. Journal of Image and Graphics, 9(11): 1376-1385(in Chinese with English abstract)

Li Jun-li, Mao Xi, Sun Jia-bin. 2004. Approach of remote sensing image fusion in land use of change detection[J]. Nature Magazine, 26(5): 282-285(in Chinese with English abstract)

Liu J G. 2000. Smoothing filter-based intensity modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details[J]. International Journal of Remote Sensing,21:3461-3472

Li Xu, He Ming-yi, Michel Roux, Wei Bao-guo. 2009. A new algorithm for fusing very high resolution remote sensing images[J]. Journal of Electronics & Information Technology,3(12):2886-2991(in Chinese with English abstract)

Tu T M, Cheng W C, Chang C P, Huang P S, Chang J C. 2007. Beat tradeoff for high-resolution image fusion to preserve spatial details and minize color distortion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,4(2):302-306

Wald L. 1999. Some terms of reference in data fusion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,37(3):1190-1193

Wang Jian-mei, Li De-ren. 2005. A study of fusion algorithms of QuickBird Pan and multispectral images for land cover classification[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,10:37243(in Chinese with English abstract)

Wang Hai-hui, Peng Jia-xiong, Wu Wei, Li Feng. 2003. A study of evaluation methods on performance of the multi-Source remote sensing image fusion[J]. Computer Engineering and Applications,39(25):33-37(in Chinese with English abstract)

Wu Lian-xi, Wang Mao-xin. 2004. A new method of RS image fusion preserving spectrum[J]. Journal of Remote Sensing,8(4):356-360

Xu Han-qiu. 2005. Study on data fusion and classification of Landsat 7 ETM$^+$ imagery[J]. Journal of Remote Sensing,9(2):186-194(in Chinese with English abstract)

Zhang Yun. 2002. Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite, Landsat 7 images, and initial solutions[A]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), Ottawa [C]. Vol 34, Part 4, Working Group IV/7, unpaged

Zhao Shu-he, Zhang Xin-ming, Qu Hong-jian. 2004. Fusion of multispectral remote sensing image and high resolution spatial panchromatic image[J]. Wtusm Bulletin of Science and Technology,29(5):4-5(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

陈思锦,秦其明,王文君. 2004. 利用小波分析改进 Brovey 遥感影像融合方法[J]. 测绘学院学报,21(2):118-120

冯德俊,李永树,兰 燕. 2004. 基于小波变换的影像融合在动态监测中的应用[J]. 遥感技术与应用,19(3):2159-2162

李存军,刘良云,王纪华,王人潮. 2004. 两种高保真遥感影像融合方法[J]. 中国图像图形学报,9(11):1376-1385

李均力,毛 曦,孙家炳. 2004. 土地利用遥感变化监测中影像融合方法研究[J]. 自然杂志,26(5):282-285

李 旭,何明一,Michel Roux,卫保国. 2009. 一种超高分辨率遥感图像融合新算法[J]. 电子与信息学报,3(12):2886-2991

王建梅, 李德仁. 2005. QuickBird 全色与多光谱数据融合方法用于土地覆盖分类中的比较研究[J]. 测绘通报,10:37243

王海晖,彭嘉雄,吴 巍,李 峰. 2003. 多源遥感图像融合效果评价方法研究[J]. 计算机工程与应用,39(25):33-37

吴连喜,王茂新. 2004. 一种光谱保持型的图像融合方法[J]. 遥感学报,8(4):356-360

徐涵秋. 2005. Landsat ETM$^+$影像的融合和自动分类研究[J]. 遥感学报,9(2):186-194

赵书河,张新明,曲鸿建. 2004. 多光谱遥感影像与高分辨率全色影像融合研究[J]. 测绘信息与工程,29(5):4-5

Evaluation and Analysis of Three Methods of Fusing Remote Sensing Images with High Fidelity of Spectral Information

ZHAO Zhen-mei[1,2], MA Wei[2], WANG Run-sheng[1]

(1. *China University of Geosciences, Beijing* 10083;

2. *Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing* 100025)

Abstract: Image fusion is the most effective technological means to deal with multi-source remote sensing images. Choosing the best fusion method is a key to improve the picture quality according to different data sources. This paper presents basic principles of three kinds of fusion algorithms: Gram-Schmidt, Pansharp and Ehlers fusion. Using the QuickBird satellite image data, a test has been made for the suburb of Xin hui, Guanngdong Province. Then the fussing results by the three methods are analyzed and compared in qualitative and quantitative ways, respectively. The qualitative analysis includes hue, texture and definition etc., while quantitative evaluation includes average values, standard errors, entropy, average gradient and spectrum authenticity. The test result shows that the three fusing methods have relatively high resolution and better fidelity of spectral information. The Pansharp method can contain the largest amount of information and details. In terms of spectral information fidelity, Gram-Schmidt is the best, while both the Pansharp and Ehlers are slightly inferior.

Key words: fusion, fidelity, Gram-Schmidt method, Pansharpmethod, Ehlersmethod