

基于 TH-1 卫星全色影像的多源遥感数据融合评价

朱倩¹, 李霞¹, 刘玲玲²

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054; 2. 陕西测绘地理信息局, 陕西西安 710054)

摘要: 为寻求更加适合与天绘一号(TH-1)卫星全色影像融合的多光谱数据及融合方法, 运用 IHS, Wavelet, PCA, P+XS, Brovey 5 种变换方法, 分别将 TH-1 全色影像与 TH-1, TM, ETM 的多光谱影像进行融合, 从视觉和定量两个方面对融合效果进行分析. 结果表明: ①3 种融合组合方式中, TH-1 PAN 与 TH-1 MS 的融合质量最高; ②5 种融合方法中, Wavelet 变换光谱信息保持效果最佳, P+XS 和 Wavelet 变换的空间信息保持效果较佳, Brovey 和 IHS 融合的综合质量最佳.

关键词: TH-1; 影像融合; 融合质量评价

中图分类号: TP75; P627 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2013.05.003

引用格式: Zhu Qian, Li Xia, Liu Lingling. Image fusion quality assessment of multisource remote sensing for TH-1 PAN[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(5): 363-368.
朱倩, 李霞, 刘玲玲. 基于 TH-1 卫星全色影像的多源遥感数据融合评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(5): 363-368.

Image fusion quality assessment of multisource remote sensing for TH-1 PAN

ZHU Qian¹, LI Xia¹, LIU Lingling²

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. Shanxi Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to find suitable multispectral images and fusion methods for the pan-sharpening of TH-1 panchromatic images, IHS, Wavelet, PCA, P+XS, Brovey five transformation methods were used to separately fuse TH-1 PAN with TH-1 MS, TM MS and ETM MS, and the fusion results were assessed from visual and quantitative aspects. Results show that TH-1 PAN and TH-1 MS fusion combination have the best quality; Wavelet transformation can keep the best spectral information, P+XS and Wavelet transformation can keep the best spatial information, and Brovey and IHS can get the best overall quality.

Key words: TH-1; image fusion; fusion quality assessment

0 引言

从多源遥感数据中能获取到比单源遥感数据更丰富、可靠、有用的信息, 对更精确、完全、可靠地解

释对象或环境具有重要意义^[1]. 然而, 高空间分辨率的全色影像(PAN)缺少光谱信息, 高光谱分辨率的多光谱影像(MS)又不具有很高的空间分辨率. 因此, PAN 与 MS 的数据融合一直是学者关注的热

收稿日期: 2013-01-05; 修回日期: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(41101445)资助.

作者简介: 朱倩(通讯作者), 女, 1983 年生, 博士生. 研究方向: 遥感技术、地理信息技术等. E-mail: qian15086@st.chd.edu.cn

点. 通过多年的研究, 许多融合方法已经非常成熟, 如 IHS, PCA, Wavelet, Brovey 等. 但这些融合方法的试验研究多数是针对国外的一些卫星影像, 如 SPOT, IKONOS, WorldView, QuickBird 等, 对国产卫星数据的应用研究不够, 一定程度上影响到国产卫星影像的合理应用. 因此, 本文基于国产制图卫星 TH-1 的 PAN, 选取 TH-1, TM, ETM 的 MS, 通过 IHS, Wavelet, PCA, P+XS, Brovey 5 种常用的融合方法进行融合, 并对融合结果影像进行视觉和定量两方面的评估, 以期进一步拓宽 TH-1 卫星影像的使用渠道.

1 方法

1.1 融合方法

目前针对 PAN 与 MS 影像常用的融合算法主要包括 IHS 变换、Wavelet 变换、PCA 变换、P+XS 变换、Brovey 变换. 现将它们的基本理论概括如下:

(I) IHS 变换

IHS 变换是首先将 3 个波段的 MS 从 RGB 转换至 IHS 颜色空间, 其中 I 为亮度、H 为色度、S 为饱和度. 然后将 PAN 和 MS 的亮度分量 I 进行直方图匹配. 最后将修改过的图像作为新的 I 分量, 与 H 分量和 S 分量进行逆变换. IHS 变换公式如下^[2]:

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right), S = \sqrt{v_2^2 + v_1^2} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} R_{new} \\ G_{new} \\ B_{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{new} \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

具体步骤为: 首先将 MS 进行几何配准并重采样到 PAN 大小; 然后由式(1)将 MS 从 RGB 变换到 IHS 颜色空间, 获得 I, H, S 分量; 再用 PAN 全部或部分代替 I 分量, 得到 I'; 最后用式(3)将 I' 与 H, S 等分量逆变换到 RGB 颜色空间, 获得融合影像^[3].

(II) Wavelet 变换

Wavelet 变化也称小波变换, 影像经小波分解后其频率特性得到分离, 利用 PAN 的高频成分和 MS 的低频成分组合进行小波重建, 从而得到融合影像. 其变换步骤如下^[4]:

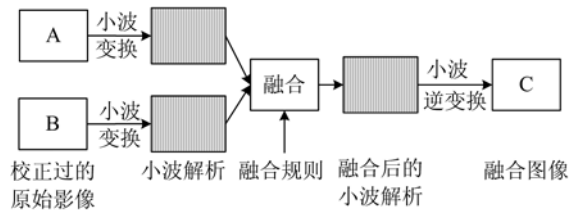


图 1 Wavelet 变换流程图

Fig. 1 Flow chart of wavelet fusion

(III) PCA 变换

即主分量变换, 是在统计特征基础上的多维(多波段)正交线性变换. 具体步骤为: 首先根据 MS 的相关矩阵计算特征值和特征向量; 再将特征向量按对应特征的大小从大到小排列并得到各主分量影像; 然后将 PAN 进行拉伸, 使之与第一主分量具有接近相同的均值和方差; 最后用拉伸过的 PAN 代替第一主分量, 并将它与其余主分量做主分量逆变换即可得到融合影像^[5].

(IV) P+XS 变换

P+XS 变换融合了调制解调函数和 PAN 和 MS 的光谱滤波, 其基本表达式为^[6]:

$$\left. \begin{aligned} XS_1^H &= \frac{2 * PAN * XS_1^R}{XS_1^R + XS_2^R} \\ XS_2^H &= \frac{2 * PAN * XS_2^R}{XS_1^R + XS_2^R} \\ XS_3^H &= XS_3^R \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, XS_1^H, XS_2^H, XS_3^H 为融合后的 1, 2, 3 波段; XS_1^R, XS_2^R, XS_3^R 为原始多光谱影像的 1, 2, 3 波段; PAN 为全色影像. 本文采用的是改进了的 P+XS 变换, 通过最小能量泛函计算融合影像^[7]. 边缘信息通过全色影像的梯度获取, 光谱信息通过将全色影像近似视为多光谱波段的线性组合获得.

(V) Brovey 变换

Brovey 变换假设 PAN 与 MS 的光谱响应范围相同, 通过归一化后的 MS 波段与 PAN 的乘积来增强影像的信息, 其表达式为^[8]:

$$\left. \begin{aligned} R &= [\text{band}_3 / (\text{band}_1 + \text{band}_2 + \text{band}_3)] * PAN \\ G &= [\text{band}_2 / (\text{band}_1 + \text{band}_2 + \text{band}_3)] * PAN \\ B &= [\text{band}_1 / (\text{band}_1 + \text{band}_2 + \text{band}_3)] * PAN \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

1.2 质量评价指标

(I) 光谱相关系数

光谱相关系数为光谱信息评价因子,反映了融合影像与原始多光谱影像在光谱特征上的相似性,相似度越高,表示融合后的影像对多光谱影像的光谱特征保持度越高.其计算式为

$$\gamma_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(F(i,j) - F(i+1,j))^2 + (F(i,j) - F(i,j+1))^2}{2}} \quad (7)$$

式中, $F(i, j)$ 为图像的第 i 行,第 j 列的灰度值; M , N 分别为图像的总行数和总列数.

(III) 结构相似度^[9]

结构相似度为结构信息评价因子,包括空间结构相似度、光谱结构相似度.结构相似度越大,表明影像融合效果越好.设 X 和 Y 表示待比较的两幅影像,则它们之间的结构相似度定义为

$$SSIM(X, Y) = \frac{(2\mu_X\mu_Y + c_1)(2\sigma_{XY} + c_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + c_1)(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + c_2)} \quad (8)$$

式中, μ_X 和 μ_Y 是 X 和 Y 的均值; σ_X^2 和 σ_Y^2 表示 X 和 Y 的方差; σ_{XY} 是 X 和 Y 的协方差; c_1, c_2 是小的常量,是为避免分母为 0 而设置的.在影像融合中,设 A, B, F 分别为全色影像、多光谱影像和融合影像,则总的结构相似度可以表示为

$$SSIM(F, A, B) = SSIM(F, A) + SSIM(F, B) \quad (9)$$

(IV) 通用图像质量评价指标 UIQI^[10]

UIQI 为图像质量综合评价指标,从相关信息损失、辐射值扭曲和对比度扭曲 3 个方面衡量融合前后影像的相似度,其值越大,表示融合质量越高:

$$UIQI = \frac{4\delta_{xy} \bar{x}\bar{y}}{(\delta_x^2 + \delta_y^2)[(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]} \quad (10)$$

式中, \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示原始多光谱影像和融合结果影像的均值; δ_x^2 和 δ_y^2 表示原始多光谱影像和融合结果影像的方差;而 δ_{xy} 表示它们的协方差.

2 融合实验

2.1 数据来源

以 2011 年 TH-1 星西安地区的 PAN 数据为基

式中, X_i 为原始影像像元灰度值; \bar{X} 为原始影像像元灰度平均值; Y_i 为融合影像像元灰度值; \bar{Y} 为融合影像像元灰度平均值; N 为像元个数.

(II) 平均梯度

平均梯度为空间信息评价因子,指图像的边界两侧附近灰度差异,即灰度变化率,这种变化率的大小可用来表示图像清晰度.它反映了图像微小细节反差变化的速率,即图像多维方向上密度变化的速率,表征图像的相对清晰程度.平均梯度越大,图像层次越多,也就越清晰.其定义为

础,分别选取同期 TH-1, TM, ETM 3 个传感器的 MS 数据参与融合,数据情况如表 1.

表 1 遥感数据基本参数

Tab. 1 Data resource information

数据类型	波段/ μm	空间分辨率 /m	量化等级 /bit	接收时间
TH-1 PAN	0.51~0.69	2	8	2011-04
	B1 0.43~0.52			
TH-1 MS	B2 0.52~0.61	10	8	2011-04
	B3 0.61~0.69			
TM MS	B1 0.45~0.52	30	8	2011-04
	B2 0.52~0.60			
ETM MS	B1 0.45~0.52	30	8	2011-04
	B2 0.52~0.60			
	B3 0.63~0.69			

2.2 数据融合

选用 3 种 MS 数据的可见光部分(即 1, 2, 3 波段),采用上述 5 种方法进行融合实验.融合步骤为:①ETM 去条带、所有数据进行严格的几何配准;②MS重采样到 PAN 的大小;③MS 数据分别与 PAN 进行 5 种融合变换,融合后影像均为标准真彩色.为了显示方便,只给出了部分场景,如图 2~4 所示.

3 分析与对比

由目视和定量两种方法评价影像的融合效果.

(I) TH-1 PAN 与 MS 的融合效果评价与分析

从图 2 可见, Wavelet 影像较亮,但信息不足,尤其对土地利用等细节信息完全无法辨认;其他

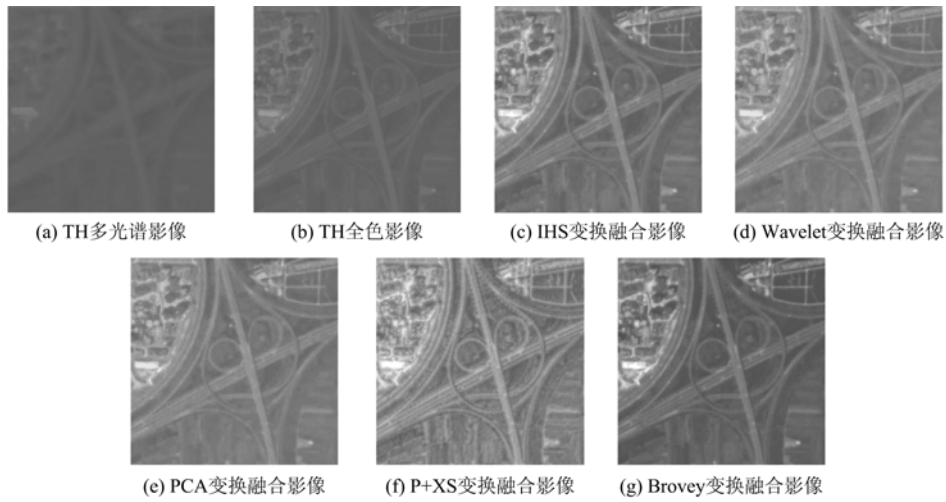


图 2 不同融合方法的 TH-1 影像

Fig. 2 Fused TH-1 PAN and TH-1 MS with different fusion methods

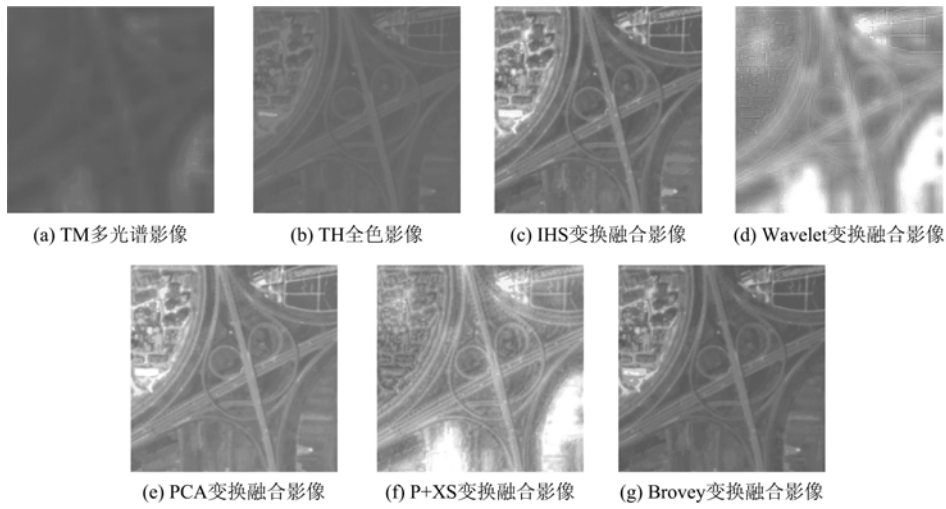


图 3 不同融合方法的 TM 影像

Fig. 3 Fused TH-1 PAN and TM MS with different fusion methods

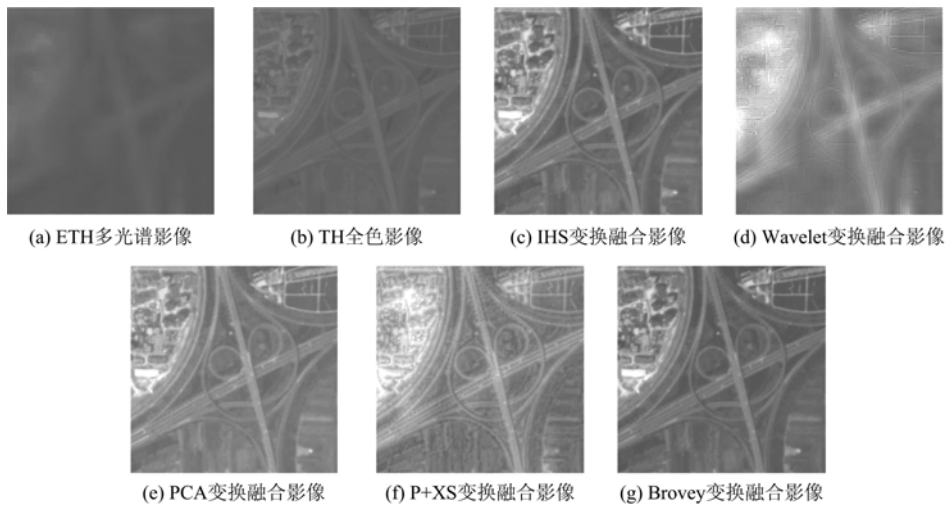


图 4 不同融合方法的 ETM 影像

Fig. 4 Fused TH-1 PAN and ETM MS with different fusion methods

融合方法空间分辨率较原始 MS 均有很明显的提高,但存在不同程度的光谱扭曲,依 PCA, P+XS, IHS, Brovey 的顺序,亮度由明亮到很暗,低频的光谱特征由依稀可见到几乎看不见. 光谱信息和空间分辨率综合起来的目视效果 Brovey 和 IHS 最佳,其次是 P+XS,最差的是 PCA.

表 2 中,从光谱相关系数看,光谱信息保持得最好的是 Wavelet,其次是 PCA 和 P+XS,再次是 IHS,最后是 Brovey;从平均梯度看,空间信息保持得最好的是 P+XS,其次是 Wavelet,再次是 Brovey,最差的是 PCA;从结构相似度看,结构性保持得最好的是 Brovey,其次是 IHS,再次是 PCA 和 Wavelet,最差是 P+XS;从 UIQI 看,效果最好的是 Brovey 和 IHS,居中的是 PCA,最差的是 P+XS 和 Wavelet. Brovey 在 3 个波段 UIQI 均较高,而其他融合方法均表现为在 R 波段的 UIQI 远远低于 G, B 两个波段.

(II) TH-1 PAN 与 TM MS 的融合效果评价与分析

从图 3 可见, Wavelet 和 P+XS 均表现为影像较亮,但信息不足,尤其对土地利用等细节信息完全无法辨认,其中 P+XS 较之 Wavelet 更优一些;其

他融合方法空间分辨率较原始 MS 均有很明显的提高,但存在不同程度的光谱扭曲,其中 Brovey 和 IHS 最佳, PCA 居中.

表 2 中,从光谱相关系数看,光谱信息保持得最好的是 Wavelet,其次是 P+XS,再次是 Brovey 和 IHS,最差是 PCA;从平均梯度看,空间信息保持得最好的是 Wavelet 和 P+XS,其次是 IHS 和 PCA,最差的是 Brovey;从结构相似度看,结构性保持得最好的是 Brovey,居中是 IHS 和 PCA,最差是 Wavelet 和 P+XS;从 UIQI 看,效果最好的是 Brovey 和 IHS,最差的是 P+XS 和 Wavelet,居中的是 PCA. 所有融合方法均表现为在 G 波段的 UIQI 远远低于 R, B 两个波段.

(III) TH-1 PAN 与 ETM 的融合效果评价与分析

从图 4 的视觉效果看,情况与图 3 类似,不再赘述.

表 2 中,从光谱相关系数看,光谱信息保持得最好的是 Wavelet 和 P+XS,居中的是 IHS 和 Brovey,最差是 PCA;从平均梯度看,空间信息保持得最好的是 P+XS 和 Wavelet,居中是 Brovey 和 IHS,最差的是 PCA;从结构相似度看,结构性保持

表 2 融合影像定量评价结果

Tab. 2 Quantitative assessment results of fused images

评价指标	融合方法	TH				TM				ETM			
		R	G	B	均值	R	G	B	均值	R	G	B	均值
光谱相关系数	IHS	0.77	0.98	0.99	0.91	0.33	0.09	0.85	0.43	0.82	0.61	0.91	0.78
	Wavelet	0.93	0.99	0.99	0.97	0.99	0.60	0.89	0.83	0.99	0.73	0.96	0.89
	PCA	0.81	0.99	1.00	0.93	-0.07	-0.14	0.85	0.21	0.71	0.43	0.85	0.67
	P+XS	0.83	0.97	0.99	0.93	0.97	0.56	0.89	0.81	0.96	0.71	0.96	0.87
	Brovey	0.79	0.91	0.94	0.88	0.49	0.12	0.92	0.51	0.86	0.65	0.92	0.81
平均梯度	IHS	3.04	2.91	2.92	2.96	3.16	3.10	3.17	3.14	3.23	3.17	3.20	3.20
	Wavelet	3.98	4.01	4.10	4.03	4.07	3.94	3.94	3.99	3.85	3.78	3.81	3.81
	PCA	2.52	2.48	2.52	2.51	3.49	2.91	2.73	3.04	3.34	2.77	2.78	2.96
	P+XS	4.53	4.56	4.55	4.55	3.96	3.86	3.85	3.89	3.99	3.94	3.95	3.96
	Brovey	3.53	3.19	3.13	3.28	2.70	2.85	2.92	2.83	3.11	3.22	3.42	3.25
结构相似度	IHS	1.15	1.40	1.33	1.29	1.26	1.21	1.25	1.24	1.20	1.23	1.11	1.18
	Wavelet	1.14	1.29	1.28	1.24	1.14	0.93	1.20	1.09	1.36	1.23	1.12	1.24
	PCA	1.12	1.47	1.46	1.35	1.16	1.11	1.34	1.20	1.18	1.19	1.03	1.13
	P+XS	0.90	1.04	1.07	1.00	1.05	0.86	1.05	0.99	1.15	1.00	0.91	1.02
	Brovey	1.20	1.32	1.23	1.25	1.33	1.31	1.31	1.32	1.18	1.24	1.09	1.17
UIQI	IHS	0.71	0.90	0.89	0.83	0.85	0.61	0.92	0.80	0.86	0.75	0.70	0.77
	Wavelet	0.61	0.70	0.77	0.69	0.64	0.33	0.79	0.59	0.88	0.59	0.55	0.67
	PCA	0.58	0.86	0.94	0.80	0.80	0.43	0.88	0.71	0.88	0.57	0.49	0.65
	P+XS	0.65	0.74	0.84	0.74	0.67	0.33	0.82	0.61	0.87	0.55	0.54	0.65
	Brovey	0.90	0.91	0.84	0.88	0.86	0.70	0.91	0.83	0.80	0.80	0.75	0.78

得最好的是 Wavelet, 居中是 IHS, Brovey 和 PCA, 最差是 P+XS; 从 UIQI 看, 效果最好的是 Brovey 和 IHS, Wavelet, PCA 和 P+XS 均较差. Brovey, IHS 在 3 个波段的 UIQI 均较高, 而其他融合方法均表现为在 R 波段的 UIQI 远远高于 G, B 两个波段.

总起来看, 3 种融合组合方式中, TH-1 PAN 与 TH-1 MS 的综合质量指标 UIQI 在各种融合方式下均最高, 为最佳的组合方式. 5 种融合方法中, 在光谱信息保持上 Wavelet 变换效果最佳, 在空间信息保持上 P+XS 和 Wavelet 表现均较佳, 通过 UIQI 综合指标结果指示 Brovey 和 IHS 在各方面的平衡效果最好, 而在结构性保持上没有统一的定论. 且目视效果与 UIQI 的指标评价结果一致.

实际应用中, 需视要求和不同的影像数据源选取最适宜的融合方法. Wavelet 变换的光谱继承度较好, 如果工作中需要图像有更好的光谱特征时, Wavelet 变换融合的方法是适用的, 比如在水环境监测、矿物探测领域, 应用范围主要是以光谱分析、特征提取、神经网络分类为主. IHS, Brovey 方法在光谱继承方面并不太理想, 如果是光谱分析为主, 比如在水环境监测等领域, IHS 变换并不是最佳选择, 但对于图像的综合质量要求较高的领域, 如制图, IHS, Brovey 方法是适用的.

4 结论

本研究基于国产卫星影像 TH-1 PAN, 采用多种 MS 影像组合、多种变换方法进行融合实验, 并对结果进行定性与定量评价, 得出以下几点有关 TH-1 PAN 融合特征及应用方面的结论:

(I) TH-1 PAN 与 TH-1 MS, TM MS, ETM MS 的 3 种融合组合中, 最佳组合效果为: TH-1 PAN 与 TH-1 MS.

(II) 不同融合方法在融合结果中表现出的优势特征为: Wavelet 变换光谱保持度最佳, P+XS, Wavelet 变换空间保持度最好, IHS, Brovey 综合质量最高.

(III) 不同融合方法可能的应用范围为: Wavelet 变换可用于环境监测、矿物探测等侧重光谱分析的领域. IHS, Brovey 变换可用于制图等对图

像综合质量要求较高的领域.

参考文献 (References)

- [1] Jia Yonghong, Li Deren, Sun Jiabing. Data fusion techniques for multisources remotely sensed imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 15(1): 41-44.
贾永红, 李德仁, 孙家柄. 多源遥感影像数据融合[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(1): 41-44.
- [2] Castleman K R. Digital Image Processing [M]. Newsey: Prentice Hall Press, 1996.
- [3] Ling Y, Ehlers M, Usery E L, et al. FFT-enhanced IHS transform method for fusing high-resolution satellite images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 61(6): 381-392.
- [4] Strait M, Rahmani S, Markurjev D. Evaluation of Pan-Sharpening Methods[R]. UCLA Department of Mathematics, 2008.
- [5] Yang Liping, Chen Fahu, Xie Yaowen. Advances of multisource remote sensing image fusion techniques in China [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(1): 116-122.
杨丽萍, 陈发虎, 颜耀文. 国内多源遥感影像信息融合技术的新进展[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(1): 116-122.
- [6] Bretschneider T, Kao O. Image fusion in remote sensing[C]//Proceedings of the 1st Online Symposium of Electronic Engineers. 2000: 1-8.
- [7] Ballester C, Caselles V, Igual L, et al. A variational model for P + XS image fusion [J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 69(1): 43-58.
- [8] Xu Rongfeng, Xu Hanqiu. Evaluation on image fusion algorithms of Landsat-7 ETM + PAN band and multispectral bands [J]. Geo-Information Science, 2004, 6(1): 99-104.
许榕峰, 徐涵秋. ETM+全色波段及其多光谱波段图像的融合应用[J]. 地球信息科学, 2004, 6(1): 99-104.
- [9] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(1): 600-613.
- [10] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.