

利用最优估计理论进行多光谱与全色影像融合

黄登山^{1,2} 杨敏华¹ 胥海威¹ 姚学恒¹

(1 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙市麓山南路 932 号,410083)
(2 湘潭大学能源工程学院,湘潭市高岭路 5 号,411105)

摘 要:应用小波变换分解遥感影像,利用遥感影像自身的先验信息——空间分辨率确定高频域融合过程中的权值,使用最小二乘估计与小波重构完成影像融合。实验结果表明,相对于参考的其他融合方法,此方法在注入全色影像空间细节和保持多光谱影像的光谱信息方面性能更佳。
关键词:遥感;影像融合;小波变换;最小二乘
中图法分类号:P237.3

将高空间分辨率的遥感全色影像(panchromatic image, Pan)与低空间分辨率的多光谱影像(multi-spectral image, MSI)进行融合,使融合影像在保持 MSI 光谱信息的同时,具备 Pan 的高空间分辨率信息^[1]。对此,人们提出了许多融合方法^[2-6]。基于小波变换的遥感影像融合方法,能够在提高 MSI 影像空间分辨率的同时,较好地保持原有光谱信息^[7-12]。

考虑到待融合 Pan 与 MSI 成像机理相同,且观测目标相同,虽然由于地物对不同波长电磁波的反射率不同,生成了不同的光谱信息,但影像中所含的空间信息却是相同的,可以形成一组针对同一目标的观测值。如果用影像的先验信息——空间分辨率关系来表征观测量间的协方差关系,就可以用最小二乘原理求解观测量的最优估值。根据这一思路,本文提出了一种基于小波变换与最小二乘原理的 MSI 与 Pan 融合方法。

1 融合方法原理

影像观测精度比值可以用空间分辨率比值来表示,如 QuickBird 的 Pan 与 MSI 空间分辨率比值为 1 : 4,就能够用最小二乘原理对空间信息进行最优估计。

最小二乘估计理论是一种求解静态参数估计问题的方法。假设被估计量 \mathbf{X} 是一个未知 n 维

矢量参数,不随时间变化,为了获得其估值,对其进行多次线性观测,则有:

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{C}_i \mathbf{X} + \mathbf{V}_i \tag{1}$$

式中, \mathbf{Y}_i 为 m 维观测向量; \mathbf{C}_i 为 $m \times n$ 维观测矩阵; \mathbf{V}_i 是平均值为 0 的 m 维观测向量,则其最小二乘估计值为:

$$\bar{\mathbf{X}}_{\text{LSW}}^{-1} = (\mathbf{C}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{Y} \tag{2}$$

公式详细推导见文献[11],其中, \mathbf{W} 是对称正定加权矩阵。

将 Pan 与 MSI 小波分解后,对其高频分量进行最小二乘估计。由于 QuickBird Pan 与 MSI 的空间分辨率之比为 1 : 4,可认为其观测中误差之比为 1 : 4,对应的方差比为 1 : 16,假设 Pan 的观测中误差为 r ,有一幅 Pan 与 3 幅 MSI 参与融合,由最小二乘原理有,

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{V} \\ \mathbf{Y} &= [\mathbf{Y}_1 \ \mathbf{Y}_2 \ \mathbf{Y}_3 \ \mathbf{Y}_4]^T, \mathbf{C} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \\ \mathbf{W} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{r^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{16r^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{16r^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{16r^2} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

则估计值为:

$$\bar{\mathbf{X}}_{\text{LSW}} = (\mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C} =$$

$$\frac{16}{19}Y_1 + \frac{1}{19}Y_2 + \frac{1}{19}Y_3 + \frac{1}{19}Y_4 \tag{4}$$

同理,当 Pan 与 MSI 空间分辨率之比为 1 : 3 时,

$$\text{其估值为 } \bar{X}_{\text{LSW}} = \frac{3}{4}Y_1 + \frac{1}{12}Y_2 + \frac{1}{12}Y_3 + \frac{1}{12}Y_4。$$

基于小波变换与最优估计的影像融合可以采用文献[2]的融合方式,在 Pan 与 MSI 配准后进行小波分解,对高频系数采用本文推荐的定权方式进行加权融合,与 MSI 的低频系数一起进行小波重构,完成融合。本文结合 HSI 方式来进行融合,具体步骤为:① 将 Pan 与 MSI 配准,并采样至与 Pan 同样大小;② 对 MSI 进行 HSI 变换,采用圆柱变换模式^[12];③ 将 Pan 与 MSI 的 *I* 分量进行直方图匹配,以保持色调一致;④ 用 db4 小波将匹配后的 Pan 与 *I* 分量进行 4 级分解,得到不同尺度的小波系数;⑤ 对分解后的高频系数采用本文推荐的方法进行加权融合,低频系数取 MSI 的低频系数,然后对各层小波系数进行反变换,生成新的 *I'*。由于 $I = (R + G + B) / 3$,在进行高频系数合成时应考虑这一变化,应用最小二乘原理对公式加以调整;⑥ 对 *I'* 分量与 *H*、*S* 分量进行 HSI 反变换,完成融合。

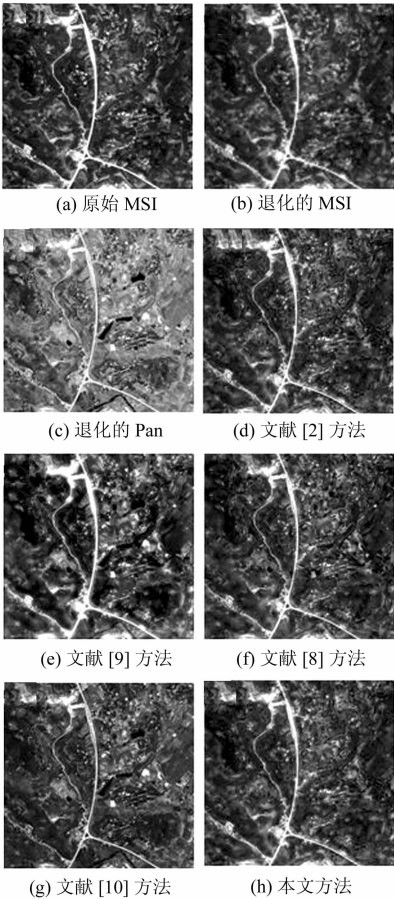


图 1 QuickBird Pan 与多光谱影像融合结果
Fig. 1 Fusion Results of Quick Bird Panchromatic and Multi-spectral Images

2 实验与分析

2.1 实验数据

本文选取了两组不同传感器、不同地区的 Pan 与 MSI 数据进行融合实验,并与其他几种基于小波变换的融合方法^[2, 8-10]的融合结果进行比较。第一组是中国湖南省张家界市永定区某区域的 QuickBird Pan 与 QuickBird 4、3、2 波段数据 (2 048×2 048, 512×512),空间分辨率为 0.6 m、2.4 m;第二组为英国伦敦地区的 SPOT Pan 与 TM 的 3 个 MSI (1 024×1 024, 366×366),空间分辨率为 10 m、28 m。为使融合结果评价更加符合实际状况,对原始影像均进行了退化处理,使融合影像与原始 MSI 的空间分辨率相同,应用融合结果与原始 MSI 进行比较以便评价影像融合的效果。其中,QuickBird 与 SPOT Pan 分别退化到 2.4 m 与 28 m 的分辨率,QuickBird 与 TM MSI 退化到 9.6 m 与 78.4 m 分辨率,融合影像将会是 2.4 m 与 28 m 空间分辨率的 MSI。图 1、2 为各种融合方法的融合结果。

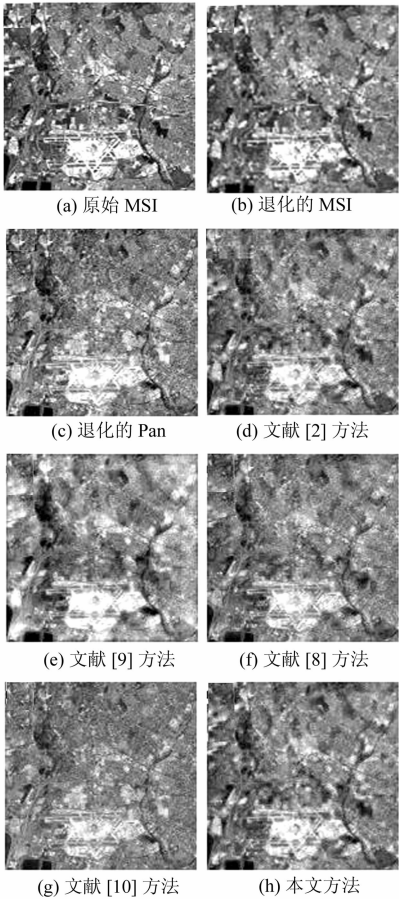


图 2 SPOT Pan 与 TM 多光谱影像融合
Fig. 2 Fusion Results of SPOT Panchromatic and TM Multi-spectral Images

2.2 比较分析

从视觉效果来看,图 1 中几种方法的融合结果相对于原始 MSI,空间细节上要显得清楚一些,色彩上与原始 MSI 接近,但有一定的扭曲,整体上要亮一些,在一些较小的区域丢失了一些色彩信息,如树林色彩变浅、房屋顶部的色彩丢失等。这是由于影像退化时下采样操作损失了一部分光谱信息,融合时仅仅添加了空间细节信息,却没有办法弥补损失的光谱信息,融合影像插值后必然会在色彩上变亮,存在一定的缺失。相比较之下,文献[10]方法融合结果的色彩扭曲最大,深灰色的田地、树林都变成了绿色,文献[2,8,9]方法和本文方法融合结果最优,除了损失的光谱信息,整体上调色与原始影像保持一致。

图 2 中的融合结果整体上有一种模糊的感觉,主要原因是空间分辨率比较低,其清晰度介于退化图像与原始图像之间,但从空间细节上观察,要比原始影像包含更多的空间细节。光谱特性方面,文献[10]方法的色彩扭曲同图 1 一样明显,文献[8]方法融合结果次之,但色彩的变化比图1(f)突出,原因是图 1(f)的色彩整体偏暗,人的视觉对小的变化不易发现。文献[2]方法和本文方法融合结果色彩变化最小。通过目视比较两组不同的数据可以发现,文献[2]方法和本文方法融合影像色彩保持性最好,空间细节注入方面各方法视觉上没有明显的差距。

为了更加全面衡量本文方法的有效性,采用相关系数、扭曲度、高频相关系数^[11]及结构相似度^[12]4 种客观评价指标作定量评价,其中,相关系数、扭曲度可表征融合影像对原始多光谱影像的光谱特性保持度,而高频相关系数、结构相似度反映融合影像与原始多光谱影像空间结构的接近程度。表 1 与表 2 分别给出了两组 MSI 与 Pan 融合影像的客观评价指标。

从表 1 可以看出:

1) 本文方法融合影像与原始多光谱影像的相关系数平均值高于另外 4 种方法,其中,文献[10]方法融合影像的相关系数最小,文献[9]方法与文献[8]方法融合影像的相关系数很接近。本文方法融合影像与标准影像的扭曲度平均值小于另外 4 种方法,从大到小依次是文献[10]方法、文献[9]方法、文献[8]方法、文献[2]方法及本文方法。这些都说明融合影像的光谱保持性方面客观指标比较结果与目视比较结果是一致的,即相对于其他方法,本文方法融合影像更好地保持了原多光谱影像的光谱特征。

表 1 QuickBird 全色与多光谱影像融合结果与原始影像的客观评价指标

Tab.1 Objective Evaluation Indexes Between Fused QuickBird Panchromatic and Multi-spectral Image and Corresponding Original Multi-spectral Image					
融合方法	波段	相关系数	扭曲度	高频相关系数	结构相似度
文献[2]方法	R	0.798	0.093	0.044	0.308
	G	0.797	0.088	0.040	0.304
	B	0.792	0.089	0.034	0.283
	平均值	0.796	0.090	0.039	0.298
文献[9]方法	R	0.735	0.122	0.040	0.259
	G	0.745	0.117	0.038	0.266
	B	0.731	0.121	0.033	0.237
	平均值	0.737	0.120	0.037	0.254
文献[8]方法	R	0.726	0.111	0.037	0.204
	G	0.736	0.103	0.033	0.229
	B	0.752	0.098	0.033	0.235
	平均值	0.738	0.102	0.034	0.222
文献[10]方法	R	0.521	0.145	0.025	0.154
	G	0.525	0.137	0.023	0.182
	B	0.555	0.127	0.021	0.194
	平均值	0.533	0.136	0.023	0.176
本文方法	R	0.828	0.085	0.063	0.346
	G	0.827	0.080	0.059	0.348
	B	0.835	0.078	0.057	0.351
	平均值	0.830	0.081	0.060	0.348
理想数值		1	0	1	1

表 2 SPOT 全色与 TM 光谱影像融合结果与原始影像的客观评价指标

Tab.2 Objective Evaluation Indexes Between Fused SPOT Panchromatic and TM Multi-spectral Image and Corresponding Original Multi-spectral Image					
融合方法	波段	相关系数	扭曲度	高频相关系数	结构相似度
文献[2]方法	R	0.673	0.149	0.153	0.328
	G	0.655	0.139	0.157	0.329
	B	0.673	0.147	0.152	0.324
	平均值	0.667	0.145	0.154	0.327
文献[9]方法	R	0.622	0.173	0.153	0.298
	G	0.592	0.168	0.154	0.290
	B	0.626	0.171	0.151	0.294
	平均值	0.613	0.171	0.153	0.294
文献[8]方法	R	0.639	0.152	0.155	0.299
	G	0.559	0.160	0.152	0.264
	B	0.647	0.148	0.152	0.302
	平均值	0.615	0.153	0.153	0.288
文献[10]方法	R	0.540	0.168	0.153	0.285
	G	0.408	0.181	0.152	0.246
	B	0.543	0.164	0.151	0.286
	平均值	0.497	0.171	0.152	0.272
本文方法	R	0.743	0.126	0.162	0.392
	G	0.686	0.131	0.159	0.357
	B	0.741	0.124	0.159	0.388
	平均值	0.723	0.127	0.160	0.379
理想数值		1	0	1	1

2) 从高频相关系数指标看,本文方法融合影像与原始多光谱影像的高频相关系数平均值最大,文献[9]方法、文献[8]方法融合影像次之,文献[10]方法融合影像最小。结构相似度平均值的排序与高频相关系数的排序一样,两项指标均表明本文方法获得的融合影像在空间特征方面更加接近于原始多光谱影像。

表 2 与表 1 的结果基本一致,结合视觉比较的结果可以得出结论:本文方法在有效注入 Pan 影像空间细节的同时,能够很好地保留 MSI 的光谱信息,其效果要优于其他几种方法,可以获得更加符合 ARSIS 概念的高空间分辨率多光谱融合影像;且由于两组实验影像属于不同的数据源,证明本文方法具有一定的普适性。

3 结 语

本文方法在有效注入影像空间细节的同时,能够很好地保留源影像的光谱信息,获得了更为理想的高空间分辨率多光谱融合影像。在融合影像严格配准的情况下,可以认为本文方法在空间细节方面获得了相对于真实地面情况的最优估计。

参 考 文 献

[1] Piella G. A General Framework for Multiresolution Image Fusion: from Pixels to Regions[J]. Information Fusion, 2003, 4(4):259-280

[2] Garguet-Duport B, Girel J, Chassery J, et al. The Use of Multiresolution Analysis and Wavelets Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Images Data [J]. Photogrammetric Engineer & Remote Sensing, 1996, 62:1 057-1 066

[3] 邢帅, 谭兵, 徐青, 等. 基于复数小波变换的遥感图像融合新算法[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2007, 32(1):75-77

[4] 狄红卫, 陈木生. 一种自适应的多光谱图像与全光

图像融合新方法[J]. 光子学报, 2005, 34(3):452-454

[5] Yang Xuhong, Jing Zhongliang, Liu Gang, et al. Fusion of Multi-spectral and Panchromatic Images Using Fuzzy Rule[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2007, 12(7): 1 334-1 350

[6] Ranchin T, Wald L. Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images: the ARSIS Concept and Its Implementation[J]. Photogrammetric Engineer & Remote Sensing, 2000, 66:49-61

[7] 朱俊杰, 范湘涛, 丁赤飏, 等. 顾及光谱畸变的高分辨率图像融合方法研究[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2006, 31(10):858-861

[8] González-Audicana M, Saleta J L, Catalán R G, et al. Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved IHS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004, 42(6):1 291-1 299

[9] Nunze J, Otazu X, Fors O, et al. Multiresolution-based Image Fusion with Additive Wavelet Decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37:1 204-1 211

[10] Zhang Y, Hong G. An IHS and Wavelet Integrated Approach to Improve Pan-sharpening Visual Quality of Natural Colour IKONOS and QuickBird Images [J]. Information Fusion, 2005, 6(3):225-234

[11] Zhou J, Civco D L, Silander J A. A Wavelet Transform Method to Merge Landsat TM and SPOT Panchromatic Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4):743-757

[12] Wang Zhou, Bovik A C. A Universal Image Quality Index[J]. IEEE Singal Processing Letters, 2002, 9(3):81-84

第一作者简介:黄登山,博士生,主要从事遥感影像处理方面研究。
E-mail:huangds_em@163.com

Fusion of Multi-spectral and Panchromatic Images Using
Optimal Estimation Theory

HUANG Dengshan^{1,2} YANG Minhua¹ XU Haiwei¹ YAO Xueheng¹

(1 School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)
(2 Energy Engineering College, Xiangtan University, 5 Gaoling Road, Xiangtan 411105, China)

Abstract: Considering panchromatic image and multi-spectral images contain different spec-
(下转第 1072 页)