

顾及光谱畸变的高分辨率图像融合方法研究

朱俊杰¹ 范湘涛² 赤飏¹ 李玉龙³

(1 中国科学院电子学研究所, 北京市北四环西路 19 号, 100080)
(2 中国科学院遥感应用研究所, 北京市大屯路 3 号, 100101)
(3 中国地质调查局发展研究中心, 北京市学院路 40 号, 100083)

摘 要: 使用高分辨率遥感图像进行像素级图像融合, 在图像小波分解时, 通过计算不同分解层数下得到的融合图像的熵来决定图像的小波分解层数; 在图像小波重建时, 引入局部相关系数, 并在不同的分解层上设置不同的阈值进行有选择的高频系数替换, 实现图像的像素级融合。并使用 Quickbird 全波段与多光谱数据进行试验, 得到了分辨率高、光谱畸变微小的彩色融合图像。
关键词: 高分辨率; 融合; 小波; 局部相关系数
中图法分类号: TP751; P237.3

数据融合可以增加图像的信息量, 提高图像的分辨率, 模拟那些光谱分辨率相同而空间分辨率更高的传感器所获取的图像^[1]。通过小波多尺度分析, 可以生成融合图像^[2,6], 其主要有两种方法^[3]: ① 将高分辨率图像的高频分量直接增加到低分辨率图像中; ② 高分辨率图像经过小波分解得到的高频系数直接替换低分辨率图像的高频系数, 再经过反变换后得到融合图像, 这种方法称为基本小波融合方法 (simple wavelet fusion)^[2]。本文在图像分解时, 根据不同分解层数下得到的融合图像的熵来确定图像分解层数; 在图像融合时, 分析局部相关系数 (local correlation coefficient, LCC)^[2,7], 对不同的层设定不同的阈值进行有选择的高频替换, 以减小因高频系数替换引起融合图像的光谱畸变。

1 融合方法

1.1 图像的小波融合原理

小波多尺度分析能够将图像分解成高频系数和低频系数, 对得到的低频系数再进行分解, 得到下一层的高频系数和低频系数。高频系数包含的频率范围是上一层低频系数的频率范围的一半, 且是其高频细节信号; 低频系数包含的频率范围

也是上一层低频系数的频率范围的一半, 是其近似信号。低频系数反变换得到原图像的低频部分, 高频系数反变换得到原图像的高频部分。如果进行 n 层分解, 那么全波段图像和多光谱图像的小波分解可表示为:

$$Pan = Pan_{nl} + \sum_{h=1}^n Pan_h \quad (1)$$

$$MUL = MUL_{nl} + \sum_{h=1}^n MUL_h \quad (2)$$

式中, Pan_{nl} 表示全波段图像第 n 层的低频部分; Pan_h 表示全波段图像第 h 层的高频部分; MUL_{nl} 表示多光谱图像第 n 层的低频部分; MUL_h 表示多光谱图像第 h 层的高频部分。

如果用全波段图像各个层的高频系数替换相应的多光谱图像的高频系数, 反变换后就可以得到多光谱图像的融合图像。基于 à trous 算法的小波多尺度分析有利于图像边缘信息的保持^[2,3,8], 因此, 本文以 db4 小波基进行图像融合试验。

从物理上讲, 全波段图像所利用的光谱范围比多光谱图像的光谱范围宽, 它们是地物对不同电磁波的反映所得到的图像。因此, 基本小波融合方法得到的融合图像必然有光谱畸变, 在融合时, 需要采用一些方法减小高频替换产生的图像

畸变。

1.2 分解层数的选择

一般认为,当图像融合时,分解 2~ 3 层比较合适^[3]。图像经过 1 层分解后得到的融合图像往往只能有限地提高分辨率和信息量,视觉效果较差。如果图像分解层数过多,则处理的速度降低,融合图像的光谱畸变大^[9]。为了选择一个合适的分解层数,引入了熵。本文用融合图像熵最大时采用的小波分解层数作为合适的分解层数。

1.3 降低光谱畸变的方法

基本小波融合方法得到的融合图像的分辨率有了极大的提高,但是全波段与多光谱波段所采用的电磁波段范围不同,在融合图像的一些像素位置存在大的光谱畸变。为了降低因融合引起的光谱畸变,在融合时,必须对高频系数的替换进行一定的控制。边缘是地物边界的反映,而地物边界是地物的材料、类型、拓扑关系等的反映^[10],同一地物对不同波段电磁波的光谱特征不同,可以说,全波段图像与多光谱波段图像的对应像素之间存在一定的相关性,因此,可以引入局部相关系数来控制高频系数的替换。

在计算时,分别在全波段图像的低频系数和多光谱图像的低频系数的对应像素位置上使用一个小矩形窗口内的像素计算两图像在此像素位置上的相关系数。局部相关系数构成了一个局部相关系数矩阵,这个矩阵与图像大小相同。

根据小波原理,分解到第一层得到的高频系数的频率最高,代表了原图像的最高细节部分,表示原图像像素值的微小细节变化,改变它们的值后再进行小波重建,对原图像的像素值改变较小,但是更能反映图像的边缘变化;分解到第二层得到的高频系数比第一层高频系数的频率低,代表了原图像的次细节部分,表示原图像像素值稍微大一些的细节变化,改变它们的值,再进行小波重建,对原图像的像素值改变稍大一些,图像失真稍微大一些;依次类推。这样就可以得到一个设定相关系数阈值的依据:尽量进行第一层高频替换,少量地进行第二层的高频替换,依次类推,也就是设置第一层的局部相关系数阈值尽量小,第二层的局部相关系数阈值要大一些,第三层的局部相关系数阈值更大。据此,在图像的小波重建时,每一层上的每一个像素的局部相关系数如果大于这个层上设置的局部相关系数阈值,就进行高频替换,否则不进行替换,这样就能得到分辨率提高、光谱畸变小的融合图像。

2 试验与分析

2.1 试验数据

本文采用光学卫星 Quickbird 图像,其全波段分辨率为 0.61 m,多光谱波段的分辨率为 2.44 m,图像为 16 bit 存储。试验区如图 1 所示,图像大小为 512 像素×512 像素,全波段图像比多光谱图像清晰,边缘更加明确,彩色多光谱图像虽然轮廓模糊,但是其具有彩色信息,地物目标更易于区分、识别和分类。

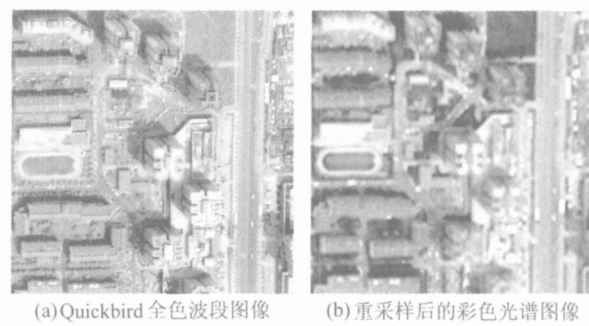


图 1 试验区的 Quickbird 图像
Fig. 1 Quickbird Image of Research Area

2.2 图像小波融合时分解层数的确定

根据融合图像的熵来确定图像小波分解时所需要分解的最佳层数。表 1 为原图像的熵,表 2 为基本小波融合方法得到的融合图像的熵。对比表 2 和表 1 可以看出,融合图像的熵比原图像的熵大,也就是融合图像的信息量增加了。由表 2 可以看出,随着分解层数增加到第三层后,融合图像的熵增加缓慢,红波段在分解五层后,融合图像的熵甚至变小了。因此,为了使每一个波段在尽可能大的程度上增加融合图像的信息量,并且还要保证整个算法运行的效率问题,将图像的三个

表 1 原图像的熵				
Tab. 1 Entropy of Original Image				
	全波段	红	绿	蓝
熵	7.328 7	7.258 8	7.052 1	6.062 4

表 2 基本小波融合方法得到的图像的熵(16 bit 数据)					
Tab. 2 Entropy of Image Obtained by Simple Wavelet Fusion					
	一层分解 融合	二层分解 融合	三层分解 融合	四层分解 融合	五层分解 融合
红	7.282 0	7.344 3	7.399 7	7.412 6	7.395 5
绿	7.076 2	7.142 8	7.216 9	7.260 3	7.307 4
蓝	6.156 0	6.387 2	6.644 0	6.867 4	7.056 8

波段的分解层数都设定为 3 层,这样就实现了通过熵来确定图像的小波分解层数。

2.3 局部相关系数的分析以及阈值的设定

为了更直观地显示融合图像像素值的变化,使用像素差描述图像融合前后对应位置像素的差值。在不同的分解层数下,在基本小波融合方法得到的融合图像上连续采样 256 个像素,计算红波段的融合图像与原红波段图像的像素差,如图 2 所示。

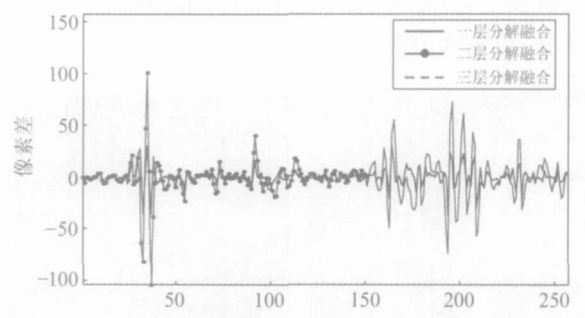


图 2 不同分解层数下的融合图像与原多光谱图像红波段像素差的曲线图
Fig. 2 Curve of Pixel Difference Between Fused Red-band Image and Original Red-band Image

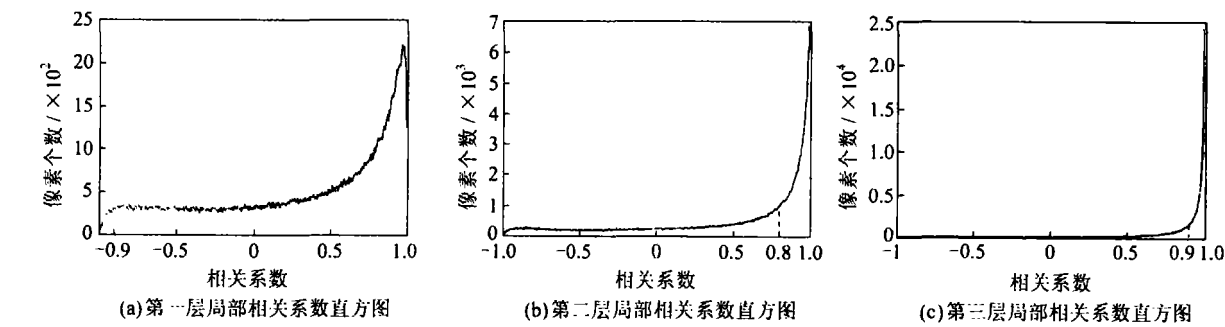


图 3 红波段各层低频系数局部相关系数直方图
Fig. 3 Histogram of Different Level LCC Between Low-Frequency Part of Red-band Image and that of Pan-band Image

2.4 图像融合结果

根据上面的试验和分析,对试验区的全波段图像和多光谱图像使用以上方法和设置进行了小波融合,得到了多光谱融合图像,见图 4。对比图 4 和图 1 可以发现,融合图像的空间分辨率与全波段图像的空间分辨率基本相同,也就是融合图像的空间分辨率得到了有效的提高;对比图 2 和图 4,从视觉上能够发现融合图像更加清晰,更接近真实的地表色彩,看不出图像的光谱畸变。

图 5 为原图像多光谱红波段的像素变化百分比,所采用的数据序列同图 2。可以看出,曲线相

由图 2 可见,随着分解层数的增加,融合图像畸变增大,一层分解后,得到的融合图像的像素差很小,分解到二层后,融合图像的一些像素点产生很大畸变。因此,需要引入局部相关系数,设定合适的阈值来减小光谱畸变。本文使用 3×3 的滑动窗口来计算局部相关系数,由于对原图像分解 3 层,所以有 3 个局部相关系数矩阵。从图 3(a) 可以看出,相关系数小于 -0.9 时,像素个数较少,将第一层的相关系数阈值设置为 -0.9 ,这样就在尽可能增加融合图像的最高细节信息、提高图像分辨率的同时,基本不产生大的光谱畸变。从图 3(b) 可以看出,相关系数小于 0.8 的所有像素的统计特征相似,且它们占有相当的比例。由于这一层的高频替换对融合图像的光谱畸变稍大,因此,这一层的阈值应当设置较大一些,这里设为 0.8 。从图 3(c) 可以看出,几乎各个对应的像素都有很高的相关性,由于这一层的高频替换会带来更大的光谱畸变,因此,必须设置一个很大的局部相关系数阈值,这里设置为 0.9 。同样,对于蓝波段多光谱图像和绿波段多光谱图像也采用同样的方式进行相关系数阈值的设置,并进行图像的融合重建,得到相应的融合图像。

对平滑,相邻像素之间变化平缓,这意味着图像的边缘不清晰,分辨率低,也就是说,原多光谱图像的分辨率是比较低的,图像边缘是模糊的。图 6 为融合后红波段图像的像素变化百分比,可以看出,曲线的相邻像素之间变化较大,这意味着图像细节信息丰富,边缘清晰,图像分辨率高。

图 7 为采用多光谱图像的红波段像素差描述融合图像像素值的变化,所使用的数据序列同图 2。对比两条曲线可以看出,使用本文方法得到的融合图像的光谱畸变减小,大的光谱畸变得到有效的抑制,图像的光谱特征得到良好的保持。

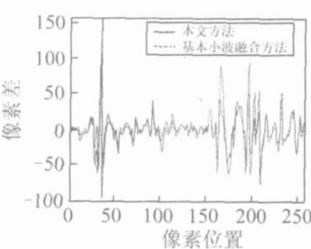
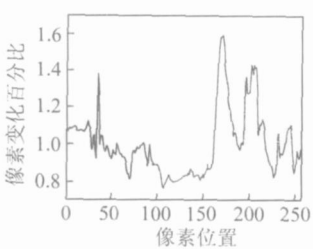
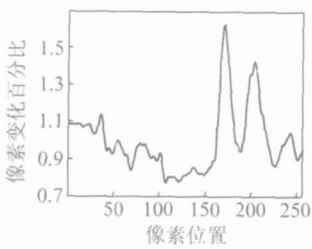
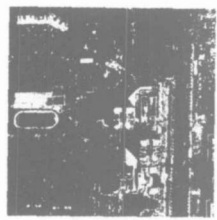


图 4 融合多光谱图像

图 5 原多光谱图像红波段的像素变化百分比

图 6 融合图像红波段的像素变化百分比

图 7 多光谱红波段融合图像像素差曲线对比图

Fig. 4 Fused Multi-Spectral Image

Fig. 5 Change of Pixel Value by Comparing Original Red-band Image Pixel Value

Fig. 6 Change of Pixel Value by Comparing Fused Red-band Image Pixel Value

Fig. 7 Curves of Pixel Difference of Fused Red-band Image

参 考 文 献

[1] Thierry R, Bruno A, Luciano A, et al. Image Fusion—the ARSIS Concept and Some Successful Implementation Schemes[J]. Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 58: 4-18

[2] Bruno A, Luciano A, Stefano B, et al. 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: 2 300-2 312

[3] Jorge N, Xavier O, Octavi F. Multiresolution-based Image Fusion with Additive Wavelet Decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 1 204-1 211

[4] 吴艳, 杨万海, 李明. 多光谱与高分辨率图像融合算法研究[J]. 光子学报, 2003(2): 174-178

[5] 李晓春, 陈鲸. 一种基于小波变换的图像融合新方法[J]. 空军工程大学学报, 2003(4): 55-59

[6] 胡召玲, 侯飞. Landsat7 卫星多光谱图像与全色图像的数据融合[J]. 中国矿业大学学报, 2004(5): 37-40

[7] Hill J, Diemer C, St ver O, et al. A Local Correlation Approach for the Fusion of Remote Sensing Data with Different Spatial Resolutions in Forestry Applications[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 32: 167-174

[8] Teggi S, Cecchi R, Serafini F. TM and IRS-1G-PAN Data Fusion Using Multi-resolution Decomposition Methods Based on the ‘à trous’ Algorithm[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24: 1 287-1 301

[9] 杨焯, 裴继红, 杨万海. 小波变换方法在高分辨率多光谱图像融合中存在的问题[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21: 77-80

[10] Wald L, Ranchin T, Mangolini. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997, 63: 691-699

第一作者简介: 朱俊杰, 博士。研究方向为微波遥感与图像处理。
E-mail: njdxzjj@sina.com

A Fusion Method of High-resolution Images Considering Spectral Distortions

ZH U Junjie¹ FAN Xiangtao² DING Chibiao¹ LI Yulong³

(1 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 19 West Beisihuan Road, Beijing 100080, China)
(2 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 3 Datun Road, Beijing 100101, China)
(3 Development and Research Center of China Geological Survey, 40 Xueyuan Road, Beijing 100083, China)

Abstract: The local correlation coefficient is introduced and the different thresholds at different levels of wavelet decomposition are set up, in order to reduce the spectral distortions of the fusion image, fuse multi-spectral images with a panchromatic image of Quickbird data by the proposed method. The result demonstrates that the proposed method is a good fusion method to increase information, improve resolution and reduce spectral distortions.
Key words: high-resolution; fusion; wavelet; local correlation coefficient