

IHS 和小波变换结合多源遥感影像融合质量 对小波分解层数的响应

龚建周^{1),2)} 刘彦随¹⁾ 夏北成³⁾ 陈健飞²⁾

¹⁾(中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101) ²⁾(广州大学地理科学学院,广州 510006)

³⁾(中山大学环境科学与工程学院,广州 510275)

摘要 随着遥感技术的快速发展以及遥感数据的广泛应用,影像的融合处理已成为多源遥感影像信息聚合、获取高质量空间影像的有效途径。基于 SPOT 全色和多光谱、TM 多光谱遥感数据,运用 IHS 和小波变换相结合的融合方法,进行了不同来源影像融合、融合图像质量对小波分解层数的响应以及这种响应对研究区域面积的敏感性分析。结果表明,多源影像之间的 IHS 和小波变换相结合的融合方法明显地改善了影像的质量;融合图像质量与原始影像空间分辨率相关,如经 1 层小波变换融合, TM, SPOT 融合图像熵值的增幅分别为 20.95%, 0.19%。小波融合图像质量对小波分解的层数的敏感性较强,在小波分解层数为 2, 3 或 4 时,都能获得高质量的融合图像;小波分解层数等于或大于 5 时融合图像质量下降, 7 是大幅下降的临界层数。融合图像质量对小波分解层数的响应特性对面积大小变化是敏感的,特别是小面积图像,为此,实际应用中需特别注意最佳分解层数问题。

关键词 小波分解层数 图像融合 小波变换 IHS 遥感数据

中图法分类号: TP30116 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)08-1269-09

Response of Fusion Images to Wavelet Decomposition Levels of Integration of Wavelet Transform and IHS with Multiple Sources Remotely Sensed Data

GONG Jianzhou^{1),2)}, LIU Yansui¹⁾, XIA Beicheng³⁾, CHEN Jianfei²⁾

¹⁾(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

²⁾(School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

³⁾(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275)

Abstract Due to rapid development of remote sensing technology and worldwide application of remotely sensed data, image fusion is an effective way to incorporate data from different remote sensors to create an improved image containing much more spectral and spatial details, and could be used to facilitate visually interpreting of remotely sensed imagery or subsequent mechanism analysis. It has been proved that better fusion images, which contain the spatial information of the panchromatic data and details of the multispectral, might be produced by the integration of wavelet transform with IHS. But the influence of some important parameters has been neglected in the practice of integration, such as levels of wavelet decomposition. Most commercially remote sensor data are composed of hundreds and millions pixels with a number of bands. Thus, the applicability of research conclusions has previously been suspicious. Therefore it is helpful to have a deep study to explore those questions.

Different types of remote sensed data were used in the study. SPOT 2.5 × 2.5 m panchromatic data with SPOT 10 ×

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40635029);中国博士后科学基金项目(200902132,20080440511);广州市属高校科技计划项目(08C027)

收稿日期:2009-06-30;改回日期:2009-10-14

第一作者简介:龚建周(1970—),女,副教授,中国科学院地理科学与资源研究所站博士后。从事土地资源配置与 3S 应用、环境生态与生态环境管理研究。在学术刊物上发表研究性论文 30 余篇,出版专著 1 部。E-mail: gongjzh66@126.com

10 m multispectral data, and TM 15 × 15 m panchromatic band with 30 × 30 m multispectral data. The integration of wavelet transform with IHS was adopted and several aspects were considered, such as the response of fusion image performance to the levels of wavelet decomposition, and also the response of sensitivity to the study area size. The results showed that fusion images with different source data was a very useful technique to integrate wavelet transform with IHS to acquire better performance of the images with spectral and spatial details. The performance of fusion images was closely related to the difference of raw resolution. For instance, the increment rate of joint entropy of fusion images with TM and SPOT data were 20.95% and 0.19% respectively under 1 level of wavelet decomposition. But the deviation factor can't be deducted like above. Generally, 2, 3 and 4 levels of wavelet decomposition are the appropriate levels to meet application request, and oppositely higher levels could reduce quality of performance of fusion image. The results of this paper revealed greatly poor images were created under 7 or more than levels of wavelet decomposition for fusion. Here 7 levels could be considered as threshold level. Another result showed that this characteristic to be related to levels of wavelet decomposition was also sensitive to study area size. Therefore, when study area was selected in very small region, the optimal level of image fusion by wavelet must be considered as a very important factor for creating higher qualitative fusion images.

Keywords wavelet decomposition level, fusion, wavelet transform, IHS, Remotely sensed data

0 引言

遥感影像以缩小的影像真实记载地表环境,已成为获取地表资源与环境信息的重要手段。随着遥感技术的发展、多源遥感数据的混用以及民用遥感数据的普及,同区域相同(近)时相的多源遥感数据的聚合已成为该领域研究的热点^[1-2]。所谓多源遥感影像融合是指将来自不同遥感数据源的高空间分辨率影像数据与相对较低空间分辨率的影像数据基于模型进行合成处理,实质是低空间高光谱分辨率传感器的光谱信息和高空间低光谱传感器的空间结构之间进行平衡匹配^[3-5],从而获取较高质量空间影像的过程。已有资料表明,小波变换较容易实现这种控制平衡,成为多源遥感影像信息聚合并获得高质量图像的有效途径^[6-7]。

多源影像小波变换融合是对影像进行不同层数的小波正变换,分解为不同的频率通道,进行不同分辨率分解频率通道的替代,再经小波反变换重构信息增强的影像的过程^[8]。从理论上讲,小波变换可以对图像进行任意层数的分解,所有层次分解的信息总和逼近原始信息。但是,不同的小波分解层数决定在哪个层次上对多源遥感信息进行替代等综合处理^[4]。因此,分解到哪个层数时进行影像融合,直接影响到重构后的影像质量,即小波分解的层数直接影响到分解信息与原始信息的逼近程度,以及融合图像的质量。毕迎春等人^[9]基于灰度图像进行小波分解层数对影像质量影响的分析;杨飒^[10]则基于医学图像进行小波分

解层数对融合图像效果的影响研究。研究结果显示小波分解层次是影像影响质量的一个重要因素。但是,直接对多源遥感影像小波融合的层数问题的研究仍然鲜见,而已有的研究多针对固定小区域范围,其层数问题对于区域面积大小的敏感性则未得到重视,而这却是否可以将研究结果应用于遥感图像信息增强所必须面临的问题,因为一般的遥感影像都针对大的研究区域。

根据测不准原理,信息分解不可能在时间和频率两个空间同时以任意精度逼近被测信号。小波变换的图像融合方法包括对图像进行小波分解与重构,仍然存在如信息失真等一些问题。为此,各种改进方法被提出,如陈志强等人^[11]进行的 K-L 变换法、王红梅等人^[12]和胡子付等人^[13]进行的小波变换和 IHS(亮度、色度、饱和度)变换的融合方法。研究普遍认为,小波变换与 IHS 变换相结合的融合方法能得到比较满意的影像质量^[14-15]。但是,多源遥感影像融合效果与小波分解层数、原始图像本身的特性、滤波器等都有直接的关系。对于日益繁多的卫星源数据,多源影像的小波 IHS 变换融合效果的研究略显不足,不同参数对融合效果影响的研究还不能满足应用需求。

本文基于 SPOT(全色与多光谱波段)和 TM 遥感影像数据,IHS 和小波变换方法结合,用 SPOT 全色波段分别与两种多光谱影像进行融合,通过不同卫星源遥感影像融合质量的比较,重点探讨小波分解的层数对影像融合质量的影响。此外,基于 SPOT 全色波段与多光谱波段,进行分解层数对面积的敏感性研究,从而为简单快捷地选定遥感数据应用融

合方法提供参考,可以有效地提高遥感数据应用的时效性。

1 实验数据

所用原始影像为覆盖广州市东南部的 SPOT5 多光谱(10 m)和全色波谱(2.5 m)影像(2002-11-07)、Landsat 卫星 TM(30 m 多光谱)遥感影像(2003-01-10)。研究区域及数据范围如图 1 所示。两种多光谱数据分别与 SPOT 全色波谱影像进行融合。

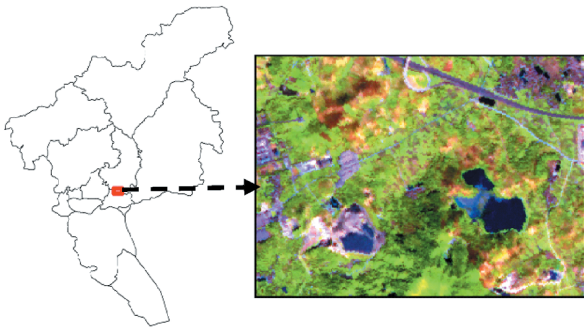


图 1 研究区域

Fig. 1 The area and data by cut operation

在进行小波分解层数对融合影像质量的影响分析时,研究区是以北二环高速公路和广园快速路交叉路口为中心,周围 104×72 个像素(30 m 分辨率)的矩形区域,实验数据通过遥感图像剪裁得到。

在进行层数响应对区域面积的敏感性分析时,面积不等的分析数据的生成方法为:基于以上研究区范围及 SPOT 数据,以中部一像元为起始点,向外围剪裁图像,面积分别为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$, $1\,000 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$, $1\,500 \text{ m} \times 1\,500 \text{ m}$, $2\,000 \text{ m} \times 2\,000 \text{ m}$ 的正方形区域。以细致地考察小波分解层数对图像融合质量影响,以及其研究结果的面积敏感性是否存在的问题。

2 融合原理、方法与评价

2.1 IHS 变换

通常而言,图像的颜色空间 RGB 不适合进行图像融合,而色度空间却正好相反^[16]。因此,影像融合需先进行空间变换,即 IHS 变换。所谓 IHS,就是将多光谱影像 3 个波段合成的 RGB 彩色图像,变换到特定的包括 3 个变量的彩色空间,并且能从所选

彩色空间变回 RGB(红、绿、蓝)获得质量改进的彩色合成图像的过程^[17-18]。3 个变量分别是亮度(I)、色度(H)和饱和度(S)。从本质上讲,从 RGB 变换到 IHS 空间,是对图像的 I,H 和 S 进行分离。生成相关性较小的 I,H 和 S 变量。其中,I 主要代表空间分辨力信息。为了增强图像对空间细节的表达能,常常用另一高分辨率数据替换 I 分量,使高分辨率影像的纹理信息被引入到低分辨率影像,从而使变回 RGB 图像的空间信息更为丰富,表现力更强。

2.2 小波变换

小波是近十几年发展起来并被广泛应用的一种数学工具。“小波”就是指小的波形,即具有衰减性,同时它又有波动性。实质是定义在有限间隔而且其平均值为零的一种函数。小波变换是运用小波函数对信号进行时间—空间频率的局部化分析,即通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化(多分辨率分析):高频处时间细分,低频处频率细分,从而实现信息的时频分离。小波变换同时还包括分解信息的反变换,完成图像的重构。因此,小波变换为多源遥感影像信息聚合提供可能。

影像由不同频率成分组成,一般可以简单地分为高频部分和低频部分。其中,高频成分对应于影像急剧变化的部分,而低频部分对应于影像灰度缓慢变化的部分,主要对应于影像地物的光谱特征。特别地,遥感影像的高频部分对应于影像的空间结构^[19]。通过小波变换,实现图像空间域和频率域的多层分解,将图像频率特征分离为可代表图像整体效果的低频信息,以及代表图像垂直、水平和对角线局部细节的高频信息。用高分辨率影像的高频信息替代低分辨率影像分解的高频信息,就可以实现既保持影像高频信息,又消除图像中的低频成分,突出了影像的空间结构,从而达到影像增强的目的。因而已成为多源影像融合的重要方法^[20]。

假定对图像进行 N 层小波分解,实质就是对图像以 2^N 为尺度进行抽样,最终形成原始图像的近似系数和细节系数。多源影像小波融合则将高空间分辨率的全色波段和多光谱合成图像同时进行小波 N 层分解,用前者分解的细节系数替代后者分解的细节系数,或者对这些细节系数进行代数运算;然后,与后者分解的近似系数一起,进行小波逆变换,完成图像的重构。小波变换过程可以通过图 2(b)形象地表达出来。

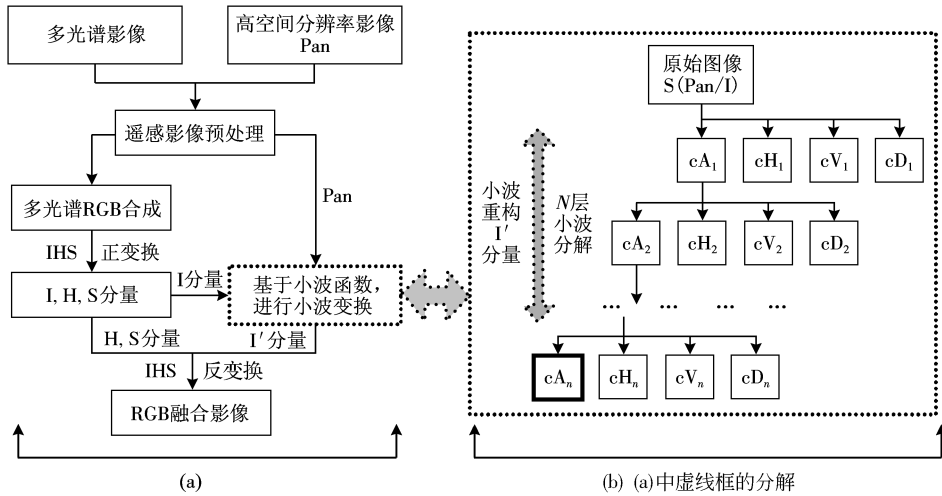


图 2 小波 IHS 变换影像融合流程图

Fig.2 Flow chart of fusion for remotely sensed imagery based on IHS transformation

2.3 IHS 和小波变换结合的图像融合

研究表明,在 IHS 变换中,直接用高分辨率替代 I 分量时,融合图像的灰度值与原来图像差异较大,光谱特征扭曲。而用高分辨率全色波段替换亮度分量之前,I 与全色波段都进行相同的小波变换,再将全色波段小波分解的高频分量替代 I 小波分解的高频分量,进行小波反变换的方法,这就是 IHS 和小波变换相结合的图像融合。

本文小波分解的层数响应研究中,小波与 IHS 变换相结合的融合处理技术流程如图 2(a)。具体过程如下:首先,进行彩色空间变换,将多光谱 RGB 图像变换到 IHS 空间,生成 I, H, S 3 个分量。其次,将高分辨率全色波段图像 Pan 和 I 分量分别进行小波正变换,分别都分解为 1 个低频的近似信息(如图 2(b)的粗体框图 cA_n (cA , 近似值)),以及 n 组分别包括水平、垂直和对角的 3 个高频的细节信息;然后,用 Pan 分解的高频信息代替 I 分解的高频信息,再与 I 分解的 1 个低频信息一起进行小波逆变换。即在图 2(b)的粗体框图 cA_n 处,以 I 分解的 cA_n 替代 Pan 的 cA_n ,再与 Pan 的 CH(水平)、CV(垂直)、CD(对角)分量一起进行图 2(b)的逆向合成,重构 I' 分量。最后, I' 与 H, S 分量进行 IHS 反变换,生成融合图像。

基于 IHS 变换和小波变换的原理,进行小波变换的图像融合处理时,两种分辨率图像的质量与小波分解层数是相关的。一般地讲,小波分解的层数越多,融合的细节也就越丰富。但层数越多,在原始

图像上进行 2^N 尺度上抽样形成的近似系数与原始图像信息差也越大,信息量损失也就越大。同时太多分解层数,还会带来计算量的增加。

2.4 融合图像质量评价

影像融合的一个重要环节还包括对融合效果进行评价。通常从信息量、清晰度、保光谱性等方面构建指标,对融合影像进行定量评价。选取熵(联合熵)、平均梯度、偏差指数等 3 个指标,分别从影像信息量、清晰度和保光谱性等 3 个方面,指标量化分析影像融合效果。并从这 3 个方面探讨融合效果的层数响应,以及这种响应的面积敏感性。评价指标详细信息参见文献[21-22]。

除图像预处理及数据剪裁在 Erdas 9.1 下完成外,其余图像融合以及图像质量评价计算都在 Matlab 环境中通过用户自定义的编写函数完成。

3 结果与分析

3.1 遥感影像及其融合图像的质量分析

遥感影像及其 1 层小波融合图像的质量指标计算结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,融合图像质量与原始影像特性直接相关。SPOT 卫星多光谱影像的联合熵、平均梯度都较 TM 高,影像携带地物的光谱信息更为丰富,影像清晰度更高。当影像融合后,源于 SPOT 的融合图像仍然具有优势。但是,图像质量指标值的增幅不同,SPOT 影像的改进明显小于 TM 影像。

表 1 遥感影像及 1 层小波融合图像质量的指标值
Tab.1 Indices for remote images and fusion images under wavelet transform at one decomposition level

		熵(联合熵)	平均梯度	偏差指数
原始影像	Pan	5.30	14.11	/
	SPOT	14.76	6.30	
	TM	11.63	2.57	
融合图像	SPOT	14.79	11.39	2.82
	TM	14.07	10.33	2.59
差值比	SPOT	0.002	0.809	/
	TM	0.209	3.017	

注:差值比 = (融合后 - 原始) / 原始

表 1 还显示, SPOT 融合影像与其原始多光谱影像灰度值的偏差指数比 TM 略高, 表明从光谱特性保真度看, SPOT 影像的保光谱性略有优势。

3.2 融合图像质量的层数响应

1) 融合影像质量的层数响应

层数响应如图 3 所示, TM, SPOT 分别表示 TM, SPOT 多光谱影像与 SPOT 全色波段的融合图像; 数字 1~10 分别为小波分解的层数。从图 3 中可以看出, 联合熵和平均梯度两条指标曲线都对小波分解层数具有敏感性。

图 3(a) 显示, 联合熵曲线表现出对小波分解层次分段的特点。对 SPOT 融合影像, 曲线分 3 段变化。第 1 段是小波层数为 1~4, 融合影像的熵值一直略高或等于原始多光谱影像; 第 2 段是小波层数为 4~7, 融合影像的联合熵值小幅度下降, 而层数为 8 时联合熵值大幅度下降。层数为 8~10 是第 3 段, 这一段的熵值出现急剧减小, 融合影像的熵值接近全色波段的熵值。层数为 7 可认为是联合熵值变化的临界值。对 TM 融合影像, 联合熵值具有相似

的变化特征, 也是在分解层数为 7 时, 熵值大幅减少。另外, 至层数为 10 时, 两种数据源的融合图像的联合熵值趋于相等。

从图 3(b) 可以看出, 平均梯度的层数变化曲线类似于熵值变化曲线。在层数 2 或 3 时, 曲线平稳。随着小波分解层数增大, 平均梯度值单调地减少, 表明清晰度随着小波分解层数递减。当层数为 8 或 9 时, 清晰度降低的程度明显增加, 两种数据源的曲线相互靠近。尽管如此, 从曲线可以看出, 平均梯度的层数响应曲线平滑, 分段现象不明显。

图 3(c) 偏差指数曲线对小波分解层数响应不明显。仅 TM 影像到层数为 9 时, 指数才明显下降。经过 10 层小波融合后, TM, SPOT 对应的偏差指数曲线总的下降率分别仅为 4.3%, 1.88%。因此, 可以说, 融合影像保光谱性对层数的响应不大。

可见融合影像质量受小波分解层数的影响, 但影像不同方面的质量特征受到的影响是不等的。影像携带信息量对小波分解层数的响应最为明显, 呈现分段的特点; 清晰度次之; 保光谱性最低或者对层数变化不敏感。SPOT, TM 两种影像的融合图像质量对小波分解层数的响应十分相似。

2) RGB 各通道图像质量的层数响应

对 RGB 通道原始及 1 层小波分解融合图像进行质量指标值的计算, 结果如表 2。从表 2 可见, 影像融合后, 不同通道中图像质量改善情况不一样。如图像熵值, TM, SPOT 原始多光谱图像中, 熵值大小顺序为 $G > B > R, R > G > B$, 融合后大小顺序都为 $R > B > G$ 。又如平均梯度, TM, SPOT 各自对应值的大小顺序分别为 $G > B > R$, 而融合后又都为 $G > R > B$ 。另外, 偏差指数值也表明融合图像质量在各通道的差异, 如在各通道中的顺序为 $B > R > G$ 。

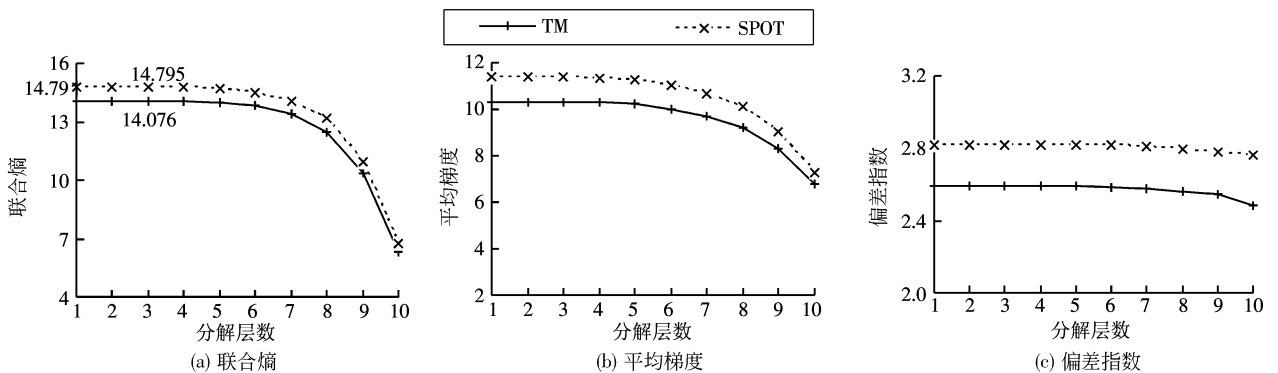


图 3 多光谱数据融合图像质量对小波分解层数的响应曲线

Fig. 3 Response curve of indices for fusion images from different source to decomposition levels of wavelet

表 2 RGB 各通道及 1 层小波变换融合图像质量的指标值
Tab.2 Indices for image evaluation in RGB channels for raw data and fusion data at one decomposition level

	TM 影像			SPOT 影像			
	原图	融合	差比	原图	融合	差比	
熵	R	4.17	6.83	0.64	6.61	6.99	0.06
	G	5.39	6.00	0.11	6.01	6.42	0.07
	B	5.21	6.76	0.30	5.93	6.58	0.11
	A	4.92	6.53	0.35	6.18	6.67	0.08
平均梯度	R	2.38	9.65	3.05	4.33	12.18	1.81
	G	2.90	13.11	3.52	7.85	13.11	0.67
	B	2.43	8.23	2.38	6.71	8.89	0.32
	A	2.57	10.33	2.99	6.30	11.39	0.94
偏差指数	R	/	2.42	/	/	1.65	/
	G	/	1.08	/	/	1.20	/
	B	/	4.28	/	/	5.60	/
	A		2.59			2.82	

注：A 表示平均值

对各融合图像的 RGB 各通道, 分别进行质量指标值的计算, 绘制成图 4。比较图 4 和图 3 可知, 融合后各通道图像与其彩色图像质量对层数总的响应特征十分相近。如各图像熵值在层数 1~4 范围时比较平稳。当层数增大到 8 或 9 时, 各曲线下滑幅度都较大, 到层数为 10 时, 曲线收敛, 并趋向一个相近的值, 而该值比各对应原多光谱波段的熵值小。

图 4(a) 还显示, 融合图像的熵值对分解层数的响应因 RGB 通道而异。图 4(a), (b) 都显示图像融合后 RGB 通道图像质量高低顺序有趋同之势, 并不因原始数据源而异。如 TM, SPOT 各原始 RGB 通道, 图像熵值从大到小依次为 $G > B > R$, $R > G > B$, 而融合后的图像都为 $R > B > G$ 。平均梯度各 RGB 排序如下: TM 为 $G > R > B$, SPOT 为 $G > B > R$; 融合后, TM 排序不变, 而 SPOT 的排序变为 $G > R > B$ 。

图 4(c) 的各偏差指数曲线平稳, 对层数响应的敏感性差; 只是在层数为 9 时, SPOT-R 通道的图像的偏差指数略增加。

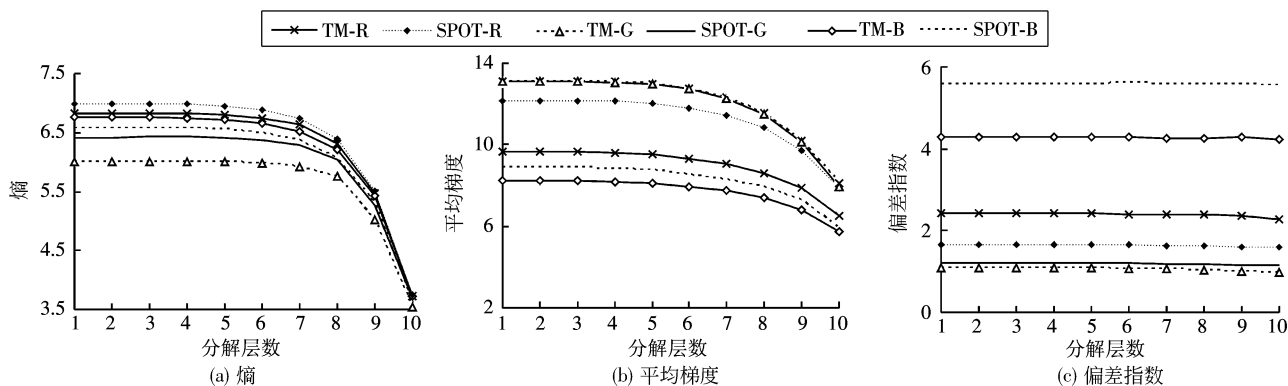


图 4 RGB 各通道的图像质量对小波分解层数的响应曲线

Fig.4 Response curve of indices for fusion image at RGB to decomposition level of wavelet

综上所述, 小波分解层数对融合影像质量的影响是明显的。表现在影像信息量与图像清晰度两个方面。适当增大小波分解层数, 有利于增加光谱信息量, 提高影像清晰度; 但是, 小波分解层数并非越多越好, 因为小波变换实质是对原始信息的划分与合成, 即首先生成 $3n + 1$ 个子频信息, 用高空间分辨率影像分解划成的 $3n$ 个子频信息 (高频信息) 代替多光谱影像的对应信息, 再与多光谱影像分解划成的 1 个低频信息一起进行逆变换的过程。分解层数越多, 所用的滤波器总数也越多, 造成信息位移越大, 小波逆变换生成的影像质量也得以改变。研究

显示, 在层数 3 或 4 之前, 影像信息量已经很大程度地增加, 同时也能得到较高清晰度的图像。层数继续增大时, 融合图像携带的信息量不是继续增大, 而是呈现出下降趋势。此外, 融合图像的信息保光谱性对小波分解的层数不敏感。

3.3 融合图像对小波分解层数响应的面积敏感性

由于融合图像质量受小波分解层次的影响, 为了使研究结果能够广泛应用, 需对研究区域面积的响应关系进行深入研究, 即小波分解层数对融合图像质量影响是否具有面积响应敏感性? 基于本文的研究区域及 SPOT 数据, 计算融合图像的联合熵、平

均梯度两个指标,结果绘制成图 5(图中数字 500, 1 000, 1 500, 2 000 表示 4 个区域的面积 /m², M, P 分别为 RGB 多波段、全色波段)。

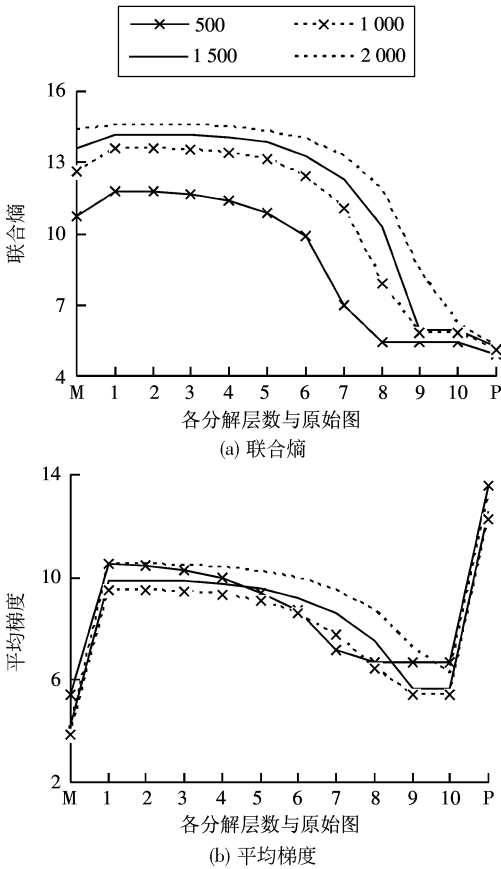


图 5 融合影像质量小波分解层数响应与区域面积关系曲线

Fig. 5 Response curve of relationship between image quality and wavelet decomposition level to area size

1) 联合熵

从图 5(a)可以看出, M 对应的纵坐标轴的 4 个联合熵按面积从小到大递增,表明影像携带的信息量随区域面积递增。1 层小波融合后,图像联合熵曲线都显著上升,表明不论面积大小,小波融合明显地增加图像信息量。随着小波分解层数递增,融合图像熵值仍然保持信息量大小排序,各面积下的熵值均随着小波分解层数增加呈小幅单调减小,到层数为 6 时熵值开始呈大幅度减小,到层数为 9 或 10 时,融合图像的熵值趋于稳定,其值与原始全色波段图像相近。

为进一步探讨区域面积对融合图像熵值的影响,将同面积相邻分解层数融合图像对应的熵值的差进行比率计算。如第 1 层融合图像与原始多波段

图像熵值的差除以原始多波段图像的熵值;同样地,第 2 层融合图像熵值减去第 1 层融合图像熵值的差,除以第 1 层融合图像的熵值;依次类推进行百分比率计算,结果汇总于表 3。

从表 3 可以看出,随区域面积递增,相对原始多波段图像,融合图像信息量都增加,但是增加幅度递减。如 1 层融合后,区域面积 500 ~ 2 000 对应的 4 个熵值增幅依次分别为 10.1%, 7.7%, 4.5%, 1.7%。随后,小波分解层数增大,图像熵值递减,区域面积越小,熵值减少的绝对值越大,因此随层数增大而下降的趋势越快,图像熵值大幅度下降的阈值层数就越小,具体如表 3 中黑体数字所示。

表 3 小波相邻分解层数的融合图像的质量指标变率
Tab. 3 Change rates of indices for image quality between two neighborhood images

分解层数	联合熵				平均梯度			
	500	1 000	1 500	2 000	500	1 000	1 500	2 000
1	10.1	7.7	4.5	1.7	94.3	146.7	135.7	155.8
2	-0.4	-0.1	0.0	-0.1	-0.7	-0.3	0.0	-0.1
3	-1.1	-0.4	-0.2	-0.2	-1.3	-0.6	-0.4	-0.3
4	-2.1	-0.9	-0.6	-0.4	-2.9	-1.2	-0.9	-0.6
5	-4.4	-2.2	-1.6	-1.1	-6.1	-2.7	-1.9	-1.5
6	-9.3	-5.2	-3.9	-2.2	-6.8	-5.1	-3.8	-2.7
7	-29.5	-11.2	-7.5	-5.2	-18.3	-9.9	-6.6	-4.9
8	-22.0	-28.4	-16.1	-10.8	-6.6	-17.2	-12.3	-7.9
9	0.0	-26.4	-42.4	-28.8	0.0	-15.4	-25.1	-17.2
10	0.0	0.0	0.0	-26.2	0.0	0.0	0.0	-13.3

注: 500、1 000、1 500 和 2 000 分别为 4 个区域面积值

2) 平均梯度

从表 3 可以看出, 1 层小波融合后, 研究区域面积越大, 平均梯度值增加越多。如按面积从小到大, 4 个平均梯度增加值分别为 94.3%, 146.7%, 135.7%, 155.8%。自层数 2 开始, 平均梯度随小波分解层数递减。除第 2 层外, 其余层数下, 平均梯度减少幅度与面积大小排序相反, 如按面积从小到大的顺序, 平均梯度下降的绝对值顺序相反, 如第 3 层数上, 顺序为 1.3%, 0.61%, 0.36%, 0.32%。这种变化特点与熵值类似。

但是, 图 5(b) 显示, 不同面积下的指标曲线有交叉, 表明指标值对层数变化的幅度因面积大小不等。主要是 500 对应的曲线, 分 3 段响应分解层数所致。其分段特征为层数小于等于 6, 指标值降幅

较其他面积时大,曲线与面积为 $1\ 000\ \text{m}^2$, $1\ 500\ \text{m}^2$ 曲线交叉;再至层数 7,降幅增大;然后,曲线平直。从融合图像究其原因可知,面积为 $500\ \text{m}^2$ 时,分解层数从 3 开始,融合图像已光谱失真。可能主要因为小波分解中存在的最大分解层数所致,因为每一层数的小波分解都把上层小波系数(近似细节)分解为 4 幅 $1/4$ 大小的图像,研究区域面积大小客观上也使得小波分解存在最大层数的问题。

因此,小波变换影像融合是具有小波分解层数响应的,而这种响应还受到研究区域面积的影响。而不同面积大小的影像代表不同区域范围的地表覆盖,对应的影像所携带的信息量与特征不同。进行影像融合时,融合图像质量某一方面的特性对层数响应的程度不同,不同的质量特性也各异。因此,基于小波变换的影像融合图像增强时,需要确定最佳小波分解层数,并且使分解层数不超过其最大分解层数;同时,根据原始影像覆盖区域的大小,考察其对区域面积的适宜性,或者至少对区域面积问题予以关注,否则可能引起融合图像失真。

4 结 论

随着多源遥感影像数据的广泛应用,遥感影像之间的信息融合已成为不同来源遥感影像信息聚合和增强图像信息的有效途径。基于同一区域相近时相,以 SPOT 全色和多波段、TM 多波段为数据源,采用 IHS 和小波变换相结合的方法,进行不同来源影像之间的融合,融合图像质量对小波分解层数的响应以及这种响应对研究区域面积的敏感性分析,得出以下主要结论:

多源影像之间的融合明显地改善了影像的质量,如图像的联合熵和平均梯度都大于原始多光谱图像的这两个指标值。融合图像质量与原始影像的特性直接相关,如 SPOT 卫星多光谱影像的联合熵、平均梯度都较 TM 高;但是信息量增加的绝对值来看,原始影像空间分辨率差异越大,融合图像信息量的增加值也越大,如第 1 层小波变换后,TM, SPOT 分别与 SPOT-Pan 融合的图像信息量增加值分别为 2.437, 0.028, 增幅达 20.95%, 0.19%。此外,从保光谱性来看,高分辨率图像不如低空间分辨率图像。

除保光谱性以外,融合后的彩色图像以及各通道图像都对小波分解的层数响应,层数在 2, 3 或者 4 以内,都能获得比较高质量的融合图像。之后,随

着小波分解层数递增,图像融合质量开始下降,而 7 或 8 是质量大幅度下降的临界数。因此, IHS 和小波变换结合的图像融合只需在较小的分解层数下进行,一般以 2 或 3 为分解层数就可以获得比较满意的融合图像。

小波分解层数与区域面积的敏感性分析显示,图像融合质量的层数响应具有面积敏感性。特别是对较小面积的影像进行处理时,需要特别注意确定小波分解的最佳层数,或者使小波分解层数在最大分解层数以内。

参考文献 (References)

- [1] Tison C, Tupin F, Maitre H. A fusion scheme for joint retrieval of urban height map and classification from high-resolution interferometric sar images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(11): 2540-2556.
- [2] Yan Shuyuan, Wang Min, Lu Yanxiong, et al. Fusion of multiparametric SAR images based on SW-nonsampled contourlet and PCNN[J]. Signal Processing, 2009, 89(12): 2596-2608.
- [3] Shimonia M, Borghysa D, Heremansa R, et al. Fusion of PolSAR and PolInSAR data for land cover classification[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, 22(11): 169-180.
- [4] Zhao Shuhe. Fusion and Application of Remote Sensing Multi-Source Images[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2008: 22. [赵书河. 多源遥感影像融合技术与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 2008: 22.]
- [5] Li Shutao, Yang Bin. Multifocus image fusion by combining curvelet and wavelet transform[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(1): 1295-1301.
- [6] Hong G, Zhang Y. Comparison and improvement of wavelet-based image fusion[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(3): 673-691.
- [7] Aslantas V, Kurban R. A comparison of criterion functions for fusion of multi-focus noisy images[J]. Optics Communications, 2009, 282(16): 3231-3242.
- [8] Gao Zhi, Yu Xiaohai. Theory and Application of Wavelet Toolbox in Matlab[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2005: 5. [高志, 余啸海. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 5.]
- [9] Bi Yingchun, Wang Xianghai. Effect of wavelet and decomposition levels on performance of EZW algorithm of different type images[J]. Computer Sciences, 2006, 33(6): 232-235, 246. [毕迎春, 王相海. 小波基和图像分解层数对不同类型图像 EZW 算法的性能的影响[J]. 计算机科学, 2006, 33(6): 232-235, 246.]
- [10] Yang Sa. Selection of optimal decomposition level of wavelet for medical image fusion[J]. Computer Engineering and Design,

- 2008, 29(20): 5265-5268. [杨飒. 医学图像融合中最佳小波分解层数的选择[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(20): 5265-5268.]
- [11] Cheng Zhiqiang, Chen Jianfei. Investigation on extracting the urban land-use and its change by multi-band K-L transform in Fuzhou [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Sciences Edition), 2006, 22(3): 100-103. [陈志强, 陈健飞. 基于多波段 K-L 变换法的福州市城市用地及其变化信息提取[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2006, 22(3): 100-103.]
- [12] Wang Hongmei, Li Yanjun, Zhang Ke. An improved remote sensing image fusion method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(7): 50-53, 97. [王红梅, 李言俊, 张科. 一种改进的遥感图像融合方法[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 50-53, 97.]
- [13] Hu Zifu, Zeng Zhiyuan, Zhang Zhenlong, et al. Fusion of multispectral bands and panchromatic band of ETM images based on the combination of wavelet transformations and HIS transformation[J]. Geo-Information Science, 2005, 7(4): 29-32. [胡子付, 曾志远, 张振龙, 等. 小波和 IHS 变换结合实现 ETM 图像波段融合[J]. 地球信息科学, 2005, 7(4): 29-32.]
- [14] Hong G, Zhang Y. 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.
- [15] Xue Jian, Yu Shenglin, Wang Hongping. An image fusion algorithm based on lifting wavelet transform and IHS transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(2): 340-345. [薛坚, 于盛林, 王红萍. 一种基于提升小波变换和 IHS 变换的图像融合方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(2): 340-345.]
- [16] Wang Xuejiao. Comparison on remote sensing images fusion for QuickBird satellite[J]. Science Technology Information, 2008, (35): 446. [王雪姣. QuickBird 遥感影像的融合方法比较研究[J]. 科技信息, 2008, (35): 446.]
- [17] Li Xiaojuan, Liu Xiaomeng, Hu Deyong, et al. Remote Sensing Images Process Tutorial (improved) [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2008: 383-387. [李小娟, 刘晓萌, 胡德勇, 等. ENVI 遥感影像处理教程(升级版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 383-387.]
- [18] John R. Jensen. Introductory Digital Image Processing-A Remote Sensing Perspective (Third Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2007: 164.
- [19] Wei Jun, Li Bicheng. Remote-sensing image fusion based on IHS transform, wavelet transform and high pass filtering[J]. Journal of Information Engineering University, 2003, 4(2): 46-50. [魏俊, 李弼程. 基于 IHS 变换、小波变换与高通滤波的遥感影像融合[J]. 信息工程大学学报, 2003, 4(2): 46-50.]
- [20] Fan Wenting, Fu Ping. A remote sensing image fusion method based on wavelet transform [J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2008, 77(3): 24-27. [范文婷, 傅平. 一种基于小波变换的遥感图像融合方法[J]. 国土资源遥感, 2008, 77(3): 24-27.]
- [21] Han Ling, Wu Hanning. Objective analysis and quality evaluation of multi-source remote sensing image information fusion at pixel level[J]. Remote Sensing Information, 2005, 5: 40-44. [韩玲, 吴汉宁. 像素级多源遥感影像信息融合的客观分析与质量评价[J]. 遥感信息, 2005, 5: 40-44.]
- [22] Zhou Liya. A study on Remote Sensing Image Fusion Technology and Quality Evaluation (Eissertation for Master Degree) [D]. Zhengzhou: PLA Technical Information University, 2006: 41. [周丽雅. 遥感影像融合及质量评价研究(硕士学位论文)[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006: 41.]