

## 小波局部高频替代融合方法

哈斯巴干 马建文 李启青 刘志丽 韩秀珍

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘要** IHS变换是图象融合的经典算法之一,采取IHS变换与小波变换结合的融合算法是近年发展起来的遥感数据融合方法,发挥了IHS和小波两种变换算法的优点,效果比用单一一种方法更显著.提出了小波局部高频替代的融合方法.ETM遥感数据5、4、3波段由IHS孟塞尔彩色空间正变换后的I亮度分量,经与全色波段中高能替代的小波变换,形成一个新的集中了I亮度分量和全色波段高频能量的新分量,再通过IHS进行反变换.经过实验,表明此方法可显著提高融合后图象的分辨率,同时又保持了原来多光谱图象的光谱信息.将此方法处理结果用在四川岷江“退耕还林”遥感调查项目中,可以提高土地利用计算精度.

**关键词** 数据融合 小波变换 IHS变换 局部替代

**中图分类号**: TP391.4 **文章标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)10-1012-05

## Wavelet High Frequency Substitution Fusion Method

Hasibagan, MA Jian-wen, LI Qi-qing, LIU Zhi-li, HAN Xiu-zhen

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** IHS transform was one of typical method for remote sensing data fusion. In recent years, newly developed method that combines advantages of IHS and wavelet algorithms makes image fusion. The result is better than single method implemented. In this paper a high frequency wavelet substitution method is introduced to improve spatial resolutions of the imagery. ETM remote sensing data 543 bands is transformed in IHS munsell color space and then I intensity was produced. Using high energy in PAN image substitutes I high energy by using wavelet. A new image is produced which combines both information PAN and I. Finally the new image as I' to finish IHS inverse transformation. The test result is proved that the resolution was greatly improved comparing original 543 composite in spatial resolution while keeps multi-spectral resolution. In cooperating with the demand of on going Minjiang river return farmland into grassland project, Si Chuan, China, A 15m resolution PAN band and 30m resolution 3 bands of ETM data were selected for the method testing. Improved imagery raised the quality for monitoring land cover and land use change monitoring.

**Keywords** Data fusion, Wavelet transform, IHS transform, Part Substitution

### 0 引言

利用ETM5、4、3彩色合成图象1:10万影像图概算四川岷江流域土地利用面积,采用30m分辨率的ETM多光谱波段数据与15m分辨率的PAN波段数据融合技术提高影像图的几何分辨率和成图比

例尺.

IHS变换和小波变换相结合已经被广泛用于处理ETM、SPOT、IRS、IKONOS等多光谱数据和高分辨率全色数据的融合.

IHS变换法是融合多源遥感数据最常用的方法,此方法先将空间分辨率低的3波段多光谱数据变换到IHS空间,得到明度I、色度H、饱和度S三

分量;然后将高空间分辨率影像进行对比度拉伸,使之与 I 分量有相同的均值和方差;最后用拉伸后的高空间分辨率影像数据代替 I 分量,再把它与原来的色度 H、饱和度 S 经 IHS 逆变换得到融合后的影像,融合后的影像要同原多光谱影像的光谱特征相似。小波变换在 IHS 变换基础上,首先以低分辨率图象为参考来对高分辨率图象进行直方图匹配,然后对高分辨率图象和低分辨率图象进行小波变换,以形成各自的低频图象和高频细节信息,取低分辨率图象的低频图象和高分辨率图象的高频部分进行小波逆变换,从而获得融合图象。但是采取什么样的高频替代方法直接影响融合后图象的效果<sup>[1~3]</sup>。

利用 IHS 变换与小波变换结合的方法,采取局部化替代方法可提取地表丰富的纹理信息。

对高分辨率数据的各级各方向的高频成分与强度(I)分量的相应各级各方向的高频成分进行局部方差最大的比较,组成新的高频,然后与强度(I)分量的低频合成后组成新的反变换强度(I'),然后进行 IHS 逆变换,得到高分辨率的融合图象。

此方法可将高空间分辨率图象中的空间信息与多光谱图象的光谱信息及多光谱图象所包含的纹理信息有效地融合起来。通过试验,证明这种方法非常有效。

## 1 小波变换与 IHS 变换结合进行局部替代的方法

### 1.1 小波多分辨率分析

小波理论是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一种新的信号处理工具。由于它具有良好的时频局部化特征、尺度变化特征和方向性特征,使得其在图象处理、模式识别、计算机视觉、分形分析等研究领域取得了广泛的应用。对信号进行小波分解的有效途径就是利用多分辨率分析(MRA)的 Mallat 算法。多分辨率分析是 Mallat 于 1989 年提出<sup>[4]</sup>,是为了解决分析图象信息的困难,在不同分辨率下的信息差别(即细节),可以通过将函数在一小波正交基上分解而获得,从而解决了以前图象用定义在渐增分辨率序列  $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$  上的细节来描述时难以解决的细节间的相关性问题,同时也去除了信息的冗余。

平方可积函数空间  $L^2(\mathbb{R})$  中的一列闭子空间  $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$  若满足一定的条件,则称  $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$  为  $L^2(\mathbb{R})$  的一个多分辨率分析(MRA)。利用多分辨率分析可以

得到空间  $L^2(\mathbb{R})$  的正交分解。

设  $W_j$  是  $V_j$  在  $V_{j+1}$  上的正交补空间,则有  $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$ 。

对于  $f \in (L^2(\mathbb{R}))$ , 已知  $f(x)$  在  $2^{j+1}$  和  $2^j$  分辨率下的逼近分别等于其在  $V_{j+1}$  和  $V_j$  中的正交投影,则  $f(x)$  在  $2^j$  分辨率下的高频细节部分为空间  $W_j$  中的正交投影。

设在  $2^k (k \in \mathbb{Z})$  分辨率下,  $f(x)$  在  $V_k$  和  $W_k$  中的投影分别为  $f_k \in V_k$  和  $g_k \in W_k$ ,  $f_k, g_k$  为  $f_k(x), g_k(x)$  的简写,以下类似。则  $f_k = f_{k-1} + g_{k-1}$ , 若设  $f \in V_0$  即  $f = f_0$ , 则有

$$\begin{aligned} f &= f_{-1} + g_{-1} = f_{-2} + g_{-2} + g_{-1} \\ &= f_{-N} + g_{-N} + \dots + g_{-2} + g_{-1} \\ &= f_{-N} + \sum_{i=1}^N g_{-i} \end{aligned} \quad (1)$$

由于  $\{\psi_{k,n}; k, n \in \mathbb{Z}\}$  是  $V_k$  的规范正交基,  $\{\varphi_{k,n}; k, n \in \mathbb{Z}\}$  是  $W_k$  的规范正交基,因而  $f_k, g_k$  可表示为

$$f_k = \sum_n c_n^k \psi(2^k x - n), \{c_n^k\} \in L^2(\mathbb{R}) \quad (2)$$

$$g_k = \sum_n d_n^k \varphi(2^k x - n), \{d_n^k\} \in L^2(\mathbb{R}) \quad (3)$$

其中,  $\psi$  称为尺度函数,  $\varphi$  称为小波函数。

分解算法:由  $\{c_n^k\}$  求  $\{c_n^{k-1}\}$  和  $\{d_n^{k-1}\}$

$$\begin{cases} c_n^{k-1} = \sum_i a_{i-2n} c_i^k \\ d_n^{k-1} = \sum_i b_{i-2n} c_i^k \end{cases} \quad (4)$$

重构算法:由  $\{c_n^{k-1}\}$  和  $\{d_n^{k-1}\}$  求  $\{c_n^k\}$

$$c_n^k = \sum_i [p_{n-2i} c_i^{k-1} + q_{n-2i} d_i^{k-1}] \quad (5)$$

上述分解算法与重构算法又称为 Mallat 算法。其中  $\{a_n\}, \{b_n\}$  称为分解序列,  $\{p_n\}, \{q_n\}$  称为重构序列<sup>[4~6]</sup>。

### 1.2 基于小波变换进行局部替代的融合算法

小波分析的最大特点在于具有极敏感的变焦特征,它能形成可调时频窗,在低频段采用高的频率分辨率和低的时间分辨率,而在高频段则采用低的频率分辨率和高的时间分辨率。从而在不同的分辨率下,反映出不同的图象结构特征,使其在增强图象纹理信息方面具有特殊的能力。

据影像频谱分析,同一地区不同种的遥感影像,其信号的低频部分相差小,高频成分相差大。小波变换后,在变换域内有分频特征。基于离散二进小波变换的 Mallat 算法可将两幅待融合的图象分解成多

级小波系数图象,然后在每一级小波系数图象上进行融合,通过小波逆变换由每一级的融合图象生成最终的融合结果<sup>[7~10]</sup>.

小波局部高频替代融合过程如图1所示(虚框部分为小波局部高频替代融合).

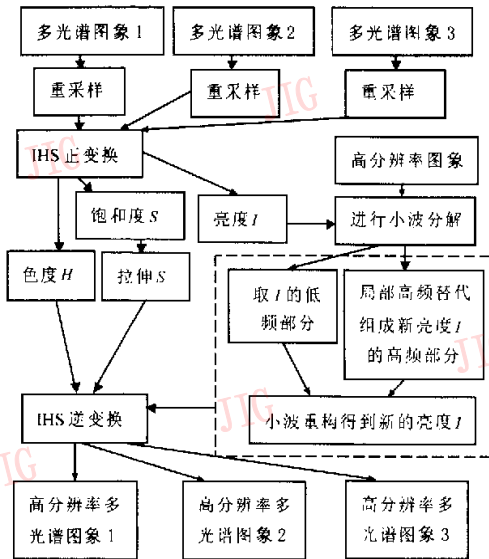


图1 融合流程图

首先对多光谱数据进行 IHS 变换,而后对其  $I$  分量 and 高分辨率图象进行小波变换,取得其各自的低频图象和不同尺度下的高频细节部分,对  $I$  和高分辨率图象的同级的水平、垂直和  $45^\circ$  3 个方向的高频成分按局部方差最大的准则进行融合.组成新的 3 个方向的高频成分.这样不会丢失高分辨率图象的高频信息和多光谱数据所包含的纹理信息.其方法如下:设  $F$  为融合图象的高频部分, $A$ 、 $B$  分别为  $I$  和高分辨率图象的高频成分,各高频成分中点  $(i, j)$  及其相邻的 8 个点如下所示:

$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$
$(i, j-1)$	$(i, j)$	$(i, j+1)$
$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$

首先比较  $A$ 、 $B$  图中对应的点  $(i, j)$  的均方差(均方差的计算只取以  $(i, j)$  为中心的 9 个点),均方差大的点临时选入  $F$  中,若  $F$  中以  $(i, j)$  为中心的 9 个点中从  $A$  中选的点占优,则  $F$  中以  $(i, j)$  为中心的 9 个点全部取为  $A$  中相应的点,否则全部取为  $B$  中相应的点.然后以  $I$  分量的低频部分和局部替换后的高频部分( $F$ )进行小波逆变换,最后通过 IHS

逆变换获得融合图象.此方法可以将高空分辨率图象中的空间信息与多光谱分辨率图象的光谱信息及多光谱图象所包含的纹理信息有效地融合起来.

## 2 试验和数据分析

采用了 2000 年 11 月 23 日在岷江地区获取的 ETM5、4、3 3 个多光谱波段组合和 ETM8 波段(全色波段)进行了融合试验.

由于对图象进行多级小波分解和重建时,边界失真的原因之一为正交镜像滤波器的非线性相位特性.滤波器线性相位对于图象的多分辨率分析具有重要意义,只有当分析滤波器满足线性相位条件,才能解决不同分辨率表达之间的相位补偿,在不同的分辨率之间跟踪函数的特性.为了减小边界失真,本文选取的滤波器为具有线性相位的对称紧支集近似滤波器<sup>[5,6]</sup>,其中滤波器长度为 13.考虑到遥感图象的分辨率不高,故选用的分解水平为 3 级.

采用 ETM5、4、3 波段组合和 ETM8 波段(全色波段)进行融合的主要步骤如下:

(1) 把低分辨率多光谱图象 ETM5、4、3 采样到和全色波段数据 ETM8 一样大,为保持线性地物的边缘,采用了双三次多项式内插方法.

(2) 把 ETM5、4、3 从 RGB 空间变换到 IHS 空间,得到  $I$ 、 $H$ 、 $S$  三分量数据.

(3) 对  $I$  和 ETM8 进行直方图匹配,将 ETM8 进行对比度拉伸,使之与  $I$  分量有相同的均值与方差.目的是使频率域中  $I$  和 ETM8 的幅度值保持一致.

(4) 对  $I$  和 ETM8 分别进行小波分解(三级).

(5) 确定融合图象的低频部分.用分解后的  $I$  的低频成分替代 ETM8 的低频成分.低频代表了概貌信息,以保持融合后的色调.

(6) 确定融合图象的高频部分.

(7) 用此新的一组多尺度分析数据进行小波重建,用以实现 ETM8 和 ETM5、4、3  $I$  分量的融合,得到融合后的  $I'$  分量.

(8) 利用 IHS 反变换从  $I'$ 、 $H$ 、 $S$  获得融合后的 RGB 图象.在完成色彩逆变换时,对亮度( $I'$ )及饱和度( $S$ )进行最小最大拉伸,使其数值充满  $0 \sim 1$  之间.这样可使不同地物的色彩差别得到增强,同时又保持了原来的假彩色合成图象的基本格局,便于提高解译的质量.

图版 I 图 1(a)为 ETM5、4、3 波段原始数据经

重采样后合成并经直方图均衡的图象、图版 I 图 1 (b) 为融合结果的彩色合成并经直方图均衡的图象 (图版 I 图 1(a)、(b) 为岷江地区的一部份, 获取时间为 2000-11-23)。

图版 I 图 1(c) 为图版 I 图 1(a) 中所选区域放大 6 倍后的图象、图版 I 图 1(d) 为图版 I 图 1(b) 中所选区域放大 6 倍后的图象、图版 I 图 1(e) 为图版 I 图 1(c) 右下角散射状部分再放大 2 倍后的图象、图版 I 图 1(f) 为图版 I 图 1(d) 的右下角散射状部分再放大 2 倍后的图象。

比较融合前后的各图可知, 放大 6 倍后的图中, 融合后的图版 I 图 1(d) 中, 植被河流及城镇清晰可见, 河流的边缘和水域变化清晰, 大大提高了目视解译的精度, 城镇建筑物、河流、道路的边缘纹理清晰度比起图版 I 图 1(c) 的相应目标大有提高。放大 12 倍后的图象中, 融合后的图版 I 图 1(f) 中的散射状部分的纹理依然清晰, 植被河流、道路的边缘纹理及山脊的走向清晰可见, 而融合前图版 I 图 1(e) 中的

散射状部分已模糊不清。

再比较一下原始重采样图和融合后图象在进行直方图拉伸前的数理统计参数和直方图。

基于数理统计方法的比较包括融合前后图象各波段的均值、方差和熵值, 统计结果见表 1。

表 1 融合前后的数理统计参数比较

融合方法	重采样后的原始图象			IHS 变换与小波结合后		
	原始波段 5	原始波段 4	原始波段 3	波段 5	波段 4	波段 3
均值	62.780	59.421	59.776	74.883	76.328	86.274
方差	33.663	30.407	43.486	54.338	46.061	54.527
中值	59	55	49	64	72	82
熵值	6.8152	6.2171	6.2531	6.9801	7.0214	7.5050

从表 1 中可以看出, 融合后的单色影像的熵值都大于原始图象, 说明融合后信息量要大于原始图象, 达到了信息融合的目的。从统计数据看融合后图象的方差普遍大于原图象相应波段的方差, 表明融合后图象的动态范围增大, 均值和中值普遍大于原波段也表明动态范围变大。

融合前后图象的各波段直方图见图 2。

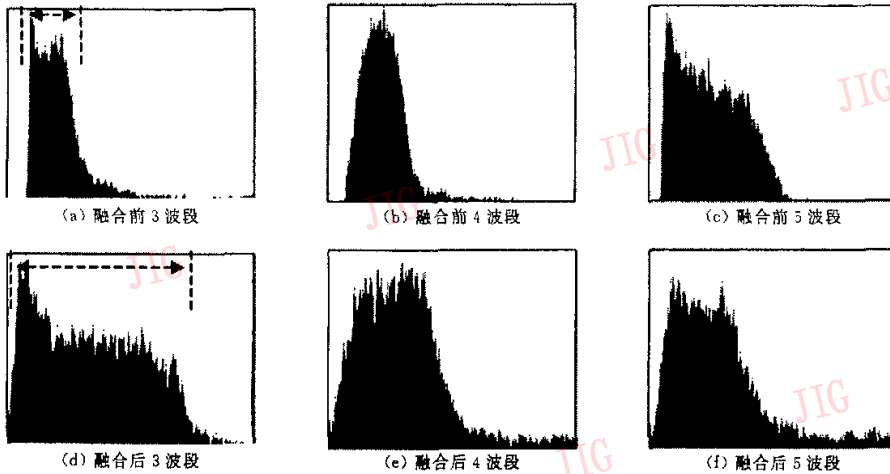


图 2 融合前后的直方图比较

从直方图比较中也容易看出融合后图象各波段的直方图动态范围变大, 表明原图中不太明显的细节信息显示出来了。

### 3 试验结果

实验结果表明, 利用小波变换局部高频替代方法的融合结果, 既包含了 PAN 波段的高分辨率信息, 又包含了 ETM5、4、3 多波段的光谱信息, 从而使融合后图象的空间分辨率大大提高。无论是通过

目视判读, 还是通过统计特性和直方图的比较, 得到的融合图象目视判读效果有了很大的改善; 对植被、河流、城镇的解译能力有了很大改善。融合后图象中的细节更加清晰, 植被河流及城镇的纹理清晰, 河流的边缘和水域变化清晰可见, 城镇中较大的建筑物易于辨别。

### 参考文献

1 Yocky D A. Image merging and data fusion by means of the discrete two dimensional wavelet transform[J]. J Opt Soc Am

- A, 1995, 12(9): 1834~1841.
- 2 刘晓龙. 多源遥感图象信息保持型融合技术的研究[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(7): 636~640.
  - 3 Jorge Nunez, Xavier Otazu, Octavi Fors etc. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1204~1211.
  - 4 Mallat S G. A theory of multiresolution signal decomposition, The wavelet representation [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674~693.
  - 5 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995, 198~242.
  - 6 李建平主编. 小波分析与信号处理——理论、应用及软件实现[M]. 重庆: 重庆出版社, 1997, 46~165.
  - 7 马建文, 赵志明, 布利致斯尔. 遥感数据模型与处理方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 156~161.
  - 8 Garguet-Duport B, Girel J, Chassery J M *et al.* The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogramm. Eng. Remote Sensing, 1996, 62(9): 1057~1066.
  - 9 Zhou J, Civco D L, Silander J A. A Wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19(4): 743~757.
  - 10 Jianwen Ma, Huadong Guo, Changlin Wang *et al.* Extraction of polymetallic mineralization information from multispectral Thematic Mapper data using the Gram-Schmidt Orthogonal Projection (GSOP) method [J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22(17): 3323~3337.



**哈斯巴干** 1967年生, 1991年获北京大学数学系学士学位, 1996年获北京航空航天大学应用数学硕士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所博士研究生. 主要研究方向为数据模型与算法研究.



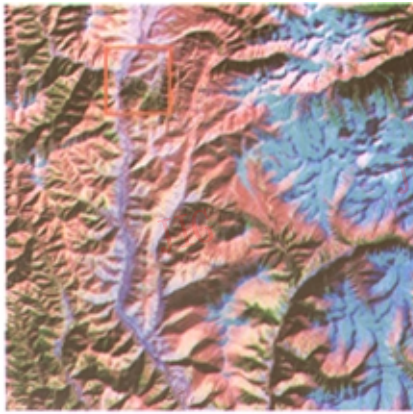
**马建文** 博士, 研究员, 博士生导师, “中科院97年百人计划”, IEEE成员. 1990~1991年留学加拿大, 从事遥感数据模型与图象处理研究, 研究方向为遥感数据模型与处理方法. 发表论文60余篇, 出版专著2部.



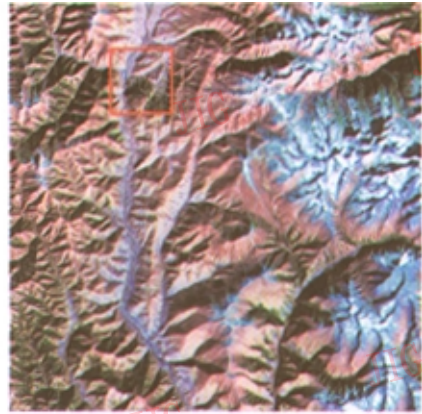
**李启青** 1977年生, 1998年获石油大学(北京)地球科学系学士学位, 2001年获石油大学(北京)地球科学系储层沉积学硕士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所博士研究生. 主要研究方向为图象处理、遗传算法研究.

**刘志刚** 1973年生, 博士研究生, 1997年6月毕业于新疆大学地理系, 2001年6月获中科院新疆生态与地理研究所环境科学专业硕士学位. 现主要从事遥感应用、图象处理等方面的研究.

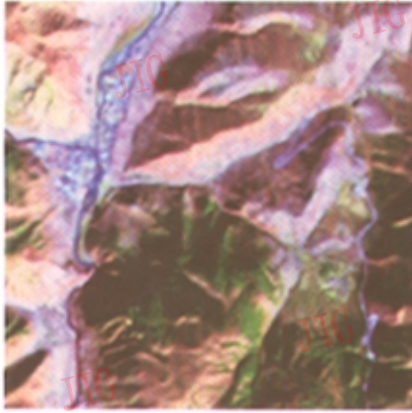
**韩秀珍** 1974年生, 现为中国科学院遥感应用研究所博士研究生. 现主要从事遥感图象处理和GIS等方面的研究.



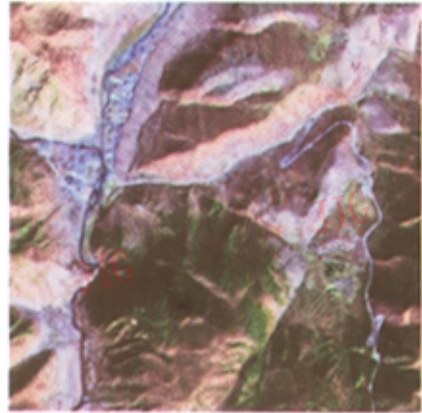
(a) 融合前 543 波段图 (经直方图均衡)



(b) 融合后 543 波段的合成图 (经直方图均衡)



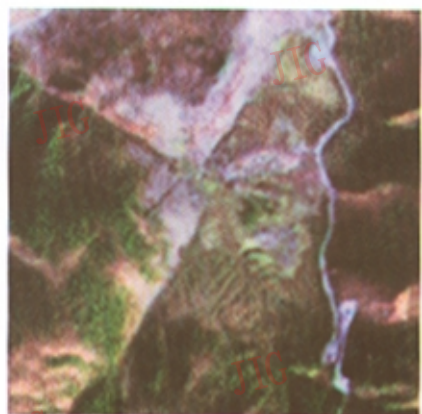
(c) (a) 所选区域放大 6 倍的原图



(d) (b) 所选区域放大 6 倍的融合图



(e) (c) 右下角区域放大 2 倍的原图



(f) (d) 右下角区域放大 2 倍的融合图

图 1 融合试验结果