

# 基于特征的遥感影像数据融合方法\*

李 军 林宗坚

(武汉测绘科技大学信息工程学院, 武汉 430070)

**摘 要** 基于小波的多分辨率分析理论提出了一种新的遥感影像数据融合方法。它利用区域方差最大和一致性准则对不同尺度下的子带数据进行融合,采用加权运算对相应基带数据进行复合。文中给出了黑白航空影像与 TM 影像、SAR 影像的融合结果。通过与基于像素平均的融合方法比较,证明了本方法具有良好的鲁棒性和自适应能力。

**关键词** 影像融合,小波,多分辨率分析,一致性检测

## 1 引 言

现代遥感技术正在进入一个能快速、及时提供多种对地观测遥感数据的新阶段。新型传感器不断涌现,已从单一传感器发展到多传感器;从不同遥感平台获得不同空间分辨率和不同时间分辨率的遥感影像,形成多级分辨率影像序列的金字塔,提供从粗到精的对地观测数据源;从多光谱到细分光谱段,形成了现代遥感技术的特点。面对如此巨大的信息量,如何充分利用这些大量的多型式的遥感影像,目前尚是一大难题。它直接影响到大量遥感数据的使用效益。目前多光谱卫星遥感影像信息的使用量在60%以下,而侧视雷达影像的信息使用量不足10%。在多源影像分类与识别中,使用的特征影像太多,势必增加计算工作量,同时受到非感兴趣的信息所干扰;另一方面不可能将所有数据同时用于某项分析。因此,如何将不同类型遥感数据进行融合就成为一个需要迫切解决的问题。

近几年来国际遥感界在多传感器影像数据融合方面研究已有不少报道,其中 Harris<sup>[1]</sup>、Ehlers<sup>[2]</sup>等用 SPOT 全色影像与多光谱影像、侧视雷达影像与多光谱影像进行了研究与实验,通过融合处理来提

高多光谱影像的清晰度,提出了依据像元、并通过映射变换的较简单融合方法;Toet<sup>[3]</sup>等发展了基于 Laplacian 堆的多级影像融合方法。此后,Burt<sup>[4]</sup>等提出了基于邻域的选择准则,并计算某一像素为中心的窗口内的方差来确定此像素的活性测度(activity measure),其融合方法对于传感器之间影像数据差异较大的区域融合影像会产生方块效应。

小波分析是一种崭新的时域/频域信号分析工具,它可以将信号分解成为一系列具有不同的分辨率、频率特性和方向特性的子带信号,能使我们很容易地找到变换小波系数和原始影像内容在空间和频率域两方面的对应关系,同时,变换小波系数的幅值随着分解层数的变化,提供原始影像灰度的局部变化特性,为不同传感器影像融合提供了有利条件。

## 2 多分辨率影像小波分解与重建

在多分辨率分析中,Mallat 引入了尺度函数  $\phi(x)$  与小波函数  $\Psi(x)$ ,由尺度函数  $\phi(x)$  生成的伸缩平移系  $\phi_{j,n}(x) = 2^{-\frac{j}{2}} \cdot \phi(2^j \cdot x - n)$  对于固定的  $j$  值是相互正交的。设  $V_j = \text{span}\{\phi_{j,n}, n \in \mathbb{Z}\}$ ,即  $V_j$  是由  $\phi_{j,n}$  生成的函数子空间,具有如下性质:

(1) 单调性:子空间  $V_j$  中的近似信号包含了低

\* 国防科工委资助项目(Y 95-2);国家教委博士点基金资助项目。  
收稿日期:1996年10月;收到修改稿日期:1997年1月。

一级子空间  $V_{j-1}$  中同样原始信号的所有近似信号。  
 (2)逼近性:随着分辨率的增高,细节信号越丰富,收敛于原始信号;反之,信号逐渐丢失,直到完全消失。  
 (3)伸缩性:相邻子空间中的信号可通过乘以比例因子 2 得到转换。  
 (4)平移性:当函数  $f(x)$  平移时  $2^j$  时,近似函数  $A_{2^{-j}n}, f(x)$  也平移同样的距离  $2^j$ 。同样,对每一  $j$  值,  $\{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$  也构成  $V_j$  的正交补空间  $W_j$  的正交小波基,即

$$W_j = \text{span} \{ \Psi_{j,n}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \cdot \Psi(2^{-j} \cdot x - n), n \in Z \}$$

于是,我们可以得到函数  $f(x)$  在分辨率  $2^j$  层的最佳逼近  $A_{(n)}^j$  和相应的细节信号  $W_{(n)}^j$ ,其公式如下:

$$A_{(n)}^j = \sum_{k \in Z} h(k-2n) \cdot A_{(k)}^{j-1} \quad (1)$$

$$W_{(n)}^j = \sum_{k \in Z} g(k-2n) \cdot A_{(k)}^{j-1} \quad (2)$$

式中:  $g(n) = (-1)^n h(1-n)$

引入无穷矩阵

$$H = \{h(k-2n)\}, G = \{g(k-2n)\}$$

则式(1)、(2)可简写成:

$$A^j = H \cdot A^{j-1} \quad (3)$$

$$W^j = G \cdot A^{j-1} \quad (4)$$

相应重建公式为:

$$A_n^{j-1} = \sum_{k \in Z} h(n-2k) \cdot A_k^j + \sum_{k \in Z} g(n-2k) \cdot W_k^j \quad (5)$$

设  $H^*$  和  $G^*$  分别为  $H$  和  $G$  的对偶算子,故上式可写为:

$$A^{j-1} = H^* \cdot A^j + G^* \cdot W^j \quad (6)$$

一维小波变换可推广到多维情形。在二维小波分析中,我们定义尺度函数  $\phi(x, y) = \phi(x) \cdot \phi(y)$ , 其中  $\phi(x), \phi(y)$  为一维尺度函数,则二维小波分析具有 3 个基本小波函数:  $\Psi_{(x,y)}^1 = \phi_{(x)} \cdot \Psi_{(y)}, \Psi^2(x, y) = \Psi(x) \cdot \phi(y); \Psi^3(x, y) = \Psi(x) \cdot \Psi(y)$

图 1 即是显示了一影像的多尺度小波分解与重

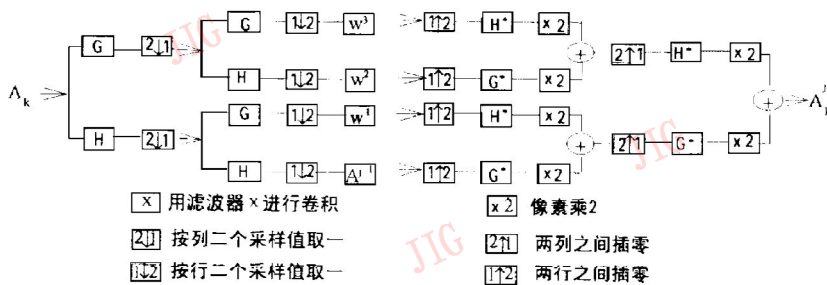


图 1 多分辨率影像小波分解与重建算法  
 Fig. 1 Multiresolution decomposition and reconstruction algorithm of an image.

建过程。

### 3 边界处理

在影像分解与重建过程中,由于信号是有限的,为了满足完全重构性,因而在进行小波变换时,应对信号作边界延拓,边界延拓的方法很多,本文提供对称周期延拓方法。

设信号  $f(n)$  长度为  $N$ , 滤波器  $h(n), g(n)$  长度为  $M$ , 且具有对称结构:

$$\begin{cases} h(M-1-n) = \pm h(n) \\ g(M-1-n) = \pm g(n) \end{cases} \quad (7)$$

对有限长信号  $f(n)$  作对称周期延拓:

$$f(n) = \begin{cases} f(n) & 0 \leq n \leq N-1 \\ f(2N-1-n) & N \leq n \leq 2N-1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\tilde{A}(n) = f'(n \bmod 2N) \quad (9)$$

对称周期延拓的小波变换迭代公式如下:

$$\begin{cases} A^j(n) = \sum_{k=\frac{M}{2}+1}^{2^{-j+1} \cdot N + \frac{M}{2} - 1} h\left(2n + \frac{M}{2} - k\right) \cdot \tilde{A}_{(k)}^{j-1} \\ W^j(n) = \sum_{k=\frac{M}{2}+1}^{2^{-j+1} \cdot N + \frac{M}{2} - 1} g\left(2n + \frac{M}{2} - k\right) \cdot \tilde{A}_{(k)}^{j-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $j=1, 2, \dots, J; n=0, 1, \dots, 2^j \cdot N - 1$ .  $\tilde{A}^j$  是有限信号的对称周期延拓。

按以上方法对边界作对称延拓,它就能够将原始影像数据完全重构。

### 4 基于特征的影像融合原理

#### 4.1 遥感影像经小波分解后的数据特性

经过二维小波变换,将影像的低频分量进行逐级分离,它们可分解为低频分量 LL 和 高频分量 LH、HL 和 HH, 各部分都包含着原影像的空间结构信息。对一幅  $512 \times 512 \times 8\text{bit}$  遥感影像作三层小波分解(图 2)得到每一子带系数的均值和方差表 1。从表中可以看出,用正交小波基对遥感影像进行多分辨率分解, LH、HL、HH 各子带数据的均值都近似为零,而方差随着尺度  $2^j$  的增大而增大。实验表明,各子带之间存在

着一定的联系,在基带(图 2 中的 LL3 带)中的数据

表 1 遥感影像小波分解后分量的统计特性

Table 1 the Statistical properties of each component of Remote Sensing Images decomposed on WT

尺 度	均 值			方 差		
	水平	垂直	对角	水平	垂直	对角
2 <sup>1</sup>	0.004460	-0.00709	-0.001117	3.270931	3.802148	0.131232
2 <sup>2</sup>	0.009782	-0.019362	0.000183	27.670816	33.781849	3.326922
2 <sup>3</sup>	0.131722	0.120237	-0.038684	153.531464	182.188965	57.057823

有较大幅度变化的区域,在其它子带中相应区域的数据也会有较大幅度的变化;反之,在基带中的数据幅度变化较小的区域,在其它子带中其幅度变化也较小。

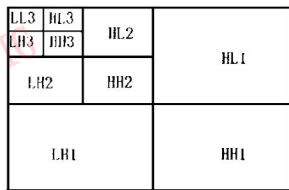


图 2 三层小波分解示意图

Fig. 2 The flowchart of wavelet representation on three resolution levels.

我们知道,遥感影像灰度值所表达的空间变化表面具有随机变化特征,但从空间频谱的角度分析,它们都可以分解为具有不同空间频率的波所组成的谱。对同一地区的不同遥感器影像来说,其差别不在低频部分,而在高频部分。换言之,其空间频谱的低频部分是相同或相近的,而有显著差别的只是在高频部分,即在每一子带部分的差别较大。由于小波变换在变换域内所具有分频特性,这为多遥感器影像融合提供了理论依据。

4.2 融合算法

图 3 给出了基于特征的遥感影像数据融合的流程。该法首先对经过严格配准后的两幅影像分别进行小波变换,得到一系列子带数据。由前一节分析可知,除了基带数据为正值外,其它子带数据均在零值

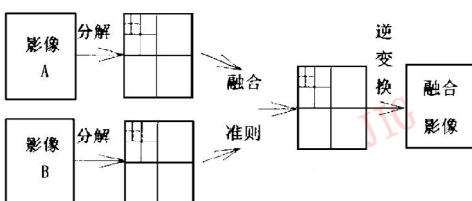


图 3 基于特征的影像融合框图

Fig. 3 The flowchart of image fusion based on feature.

左右摆动,其中幅度值较大的位置对应于灰度突变处,即对应于那些边缘、线和区域边界等显著特征。因此,按下列融合准则选取每一位置上融合后的小波系数,再经过小波变换逆变换重建融合影像。其特征选择准则为:

- (1) 确定一空域窗口尺寸(例如 3×3 或 5×5)。
- (2) 在分辨率层 2<sup>j</sup> 下,分别对两幅影像的子带数据进行统计与运算,求其均值和方差。
- (3) 按下列算法确定该分辨率层下融合后的子带数据:

$$W^k(2^j; x, y) = \begin{cases} W_A^k(2^j; x, y), \\ W_B^k(2^j; x, y) \end{cases} \quad (11)$$

$$D_A^k(2^j; x, y) > D_B^k(2^j; x, y)$$

式中:

$W^k(2^j; x, y)$  为分辨率下各子带融合值;  $W_A^k(2^j; x, y)$ ,  $W_B^k(2^j; x, y)$  分别为原影像 A、B 中相应子带数据。  $D_A^k(2^j; x, y)$ ,  $D_B^k(2^j; x, y)$  分别以  $(x, y)$  为中心像元的 3×3 或 5×5 窗口方差。  $k = 1, 2, 3$ 。

- (4) 确定分辨率下基带数据的融合值:

$$A(2^j; x, y) = k_1 \cdot A_A(2^j; x, y) + k_2 \cdot A_B(2^j; x, y) \quad (12)$$

式中:

$A_A(2^j; x, y)$ ,  $A_B(2^j; x, y)$  分别为最低分辨率层 2<sup>j</sup> 下影像 A、B 的基带数据。

$A(2^j; x, y)$  分别为最低分辨率层 2<sup>j</sup> 下融合后的基带数据。

$k_1, k_2$  为权系数。  $J$  为分解层数。

在最低分辨率层中,对两幅影像经小波分解得到的基带数据按式(12)进行融合,再把它们对应的各分辨率层 2<sup>j</sup> 的子带数据按式(11)进行融合。由于基带数据与子带数据的融合是分别处理的,因此,融合后的影像数据能较好保留了两幅原影像各自的特性,即不仅融合了原影像的丰富光谱信息,而且可以提高融合数据的空间分辨率。

### (5) 一致性检测:

为了保持融合后的子带数据具有一致性,应采用概率方法对其进行一致性检测与调整,调整原理为采用“多数”原则,即在子带数据融合时对每个像素进行如下处理:若某像素的8邻域中至少有6个像素来自影像A或B,则该像素融合后的子带数据也调整为由影像A(或B)确定;否则,由影像B或A确定。

## 5 实验结果

本文所涉及理论和算法的软件均在PC486机上由C语言调试实现。实验数据为广东肇庆地区1:10000比例尺黑白航片资料和TM5波段及SAR影像。其尺寸均为 $555 \times 600 \times 8\text{bit}$ 灰级,这些影像数据都已分别进行了几何纠正,同时利用相关系数法将它们之间作了几何配准。小波变换采用Daubechies的 $D_3$ 小波滤波器<sup>[5]</sup>。将黑白航空影像与TM5波段影像、SAR影像按式(11)、(12)( $k_1$ 取0.45, $k_2$ 取0.55)分别进行特征融合,然后将融合后的数据经小波变换的逆变换得到融合影像。

图4e是黑白航空影像(图4a)与TM5波段影像(图4b)经本文方法得到的结果,图4d显示了它们融合后的小波表示,图4f为基于像素平均的融合影像。由实验结果可以发现,在原TM5影像上,由于分辨率较低,像小的田块、道路及居民地的轮廓较为模糊,基于像素平均的融合方法虽然提高了原低分辨率影像的空间分辨率,实际上得到的融合影像降低了原高分辨率影像细节特征的反差,而利用本

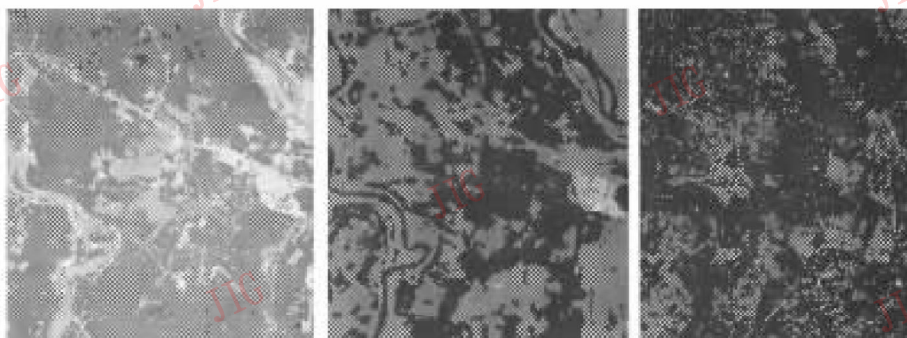
文方法却有效地克服了上述问题。在融合后的影像上,道路、河流极为清晰,居民地能清楚显示,农田能清楚显示出田块。总之,它既保留了原航空影像的分辨率,同时融合TM5影像中丰富的光谱信息。图4g还给出了黑白航空影像与SAR影像(图4c)经本方法融合得到的结果。

## 6 结论

本文提出了一种新的影像融合方法基于特征的影像融合法,它把对原影像的融合处理分解为在不同尺度下分别对基带数据和对子带数据( $x, y, xy$ 方向)的融合处理,从而使融合影像既具有高分辨率影像的性能,又保留了原TM影像丰富的色彩。本方法不仅适合于两幅影像之间的融合,而且适合于多元多维遥感影像的数据融合。

### 参考文献

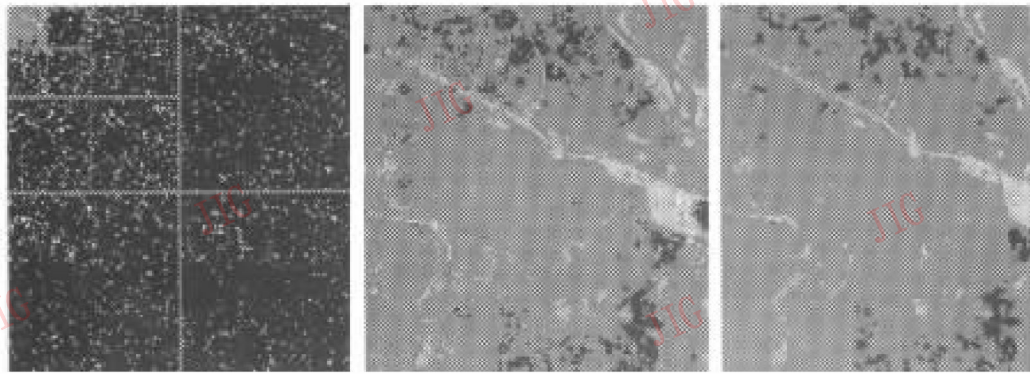
- 1 Harris J R. IHS Transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. PE&RS. 1990,36(12):1631~1641.
- 2 Ehlers M. Multi-sensor image fusion techniques in remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1991, 46:191~30.
- 3 Toet A. Hierarchical image fusion. Machine Vision Application, 1990. (3):1~11.
- 4 Burt P J, Loiczynski R J. Enhanced image capture through fusion. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision. Berlin, Germany. 1993, (May): 173~182.
- 5 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. Commun Pure Appl Math 1988, (41):909~960.



(a)黑白航空影像  
(a)B/W airphoto image.

(b)TM5 波段影像  
(b)TM5 imagery.

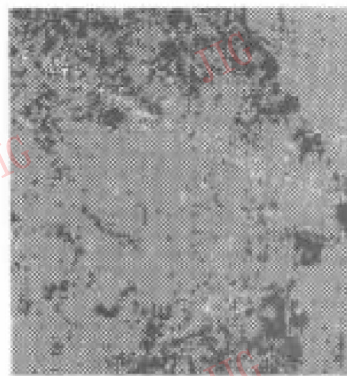
(c)SAR 影像  
(c)SAR imagery.



(d)融合后影像小分解表示  
(d)Wavelet representation for the fused image.

(e)利用本方法融合结果  
(e)The fusion result using proposed method.

(f)基于像素平均的融合结果  
(f)The fused image obtained by pixel-averaging.



(g)黑白航空影像与 SAR 影像融合结果

(g)The fusion result of B/W airphoto and SAR imagery, B/W airphoto and SAR imagery.

图 4 黑白航空影像与 TM5、SAR 影像融合的实验结果

Fig. 4 The fusion results for B/W airphoto and TM imagery B/W airphoto and SAR imagery.



李军 讲师。1986年毕业于武汉测绘科技大学摄影测量与遥感系并获学士学位,1994年获硕士学位,同年考入该校遥感与信息工程学院博士研究生(在职)。主要研究领域:图像处理、模式识别、计算机视觉、小波分析和遥感等。

## Data Fusion for Remote Sensing Imagery based on Feature

Li Jun Lin Zongjian

(School of Geomatics, Wuhan Technical University of Surveying & Mapping, Wuhan 430070)

**Abstract** This paper presents a new image fusion scheme based on multiresolution analysis of Wavelet theory for Remote Sensing imagery. An area-based maximum variance selection rule and a consistency detection are used for feature selection of subbands at different scale, and gray computation with weighting factor is accomplished for base-bands at the coarsest resolution. Experimental results including the fusion of black-white aerial imagery and Landsat(TM)imagery, Landsat and SAR images are presented in the paper. Compared with the pixel averaging method, the proposed scheme is more reliable and capable of adaptability.

**Keywords** Image fusion, Wavelet, Multiresolution analysis, Consistency detection