

小波变换在遥感图象融合中的应用研究

霍宏涛

游先祥

(中国人民公安大学科技系, 北京 102623) (北京林业大学资源环境学院, 北京 100083)

摘要 针对基于小波变换的图象融合中存在的光谱扭曲问题, 提出了一种直接相加的小波变换低频信息处理方法, 即将未分解的 TM 放大图象与小波分解后的 SPOT 图象的高频部分重构得到的图象通过直接相加来生成融合图象, 这种方法得到的融合图象, 其光谱扭曲值和信息量两个指标均优于常规的小波融合方法, 由小波变换与 IHS 变换的光谱质量比较表明, 小波变换比 IHS 变换更适合于波谱响应范围不同、相关性弱的图象间的融合; 另外, 空间质量比较还表明, 小波变换在融合中、小尺度的纹理特征方面具有优势。

关键词 计算机图象处理(520·6040) 图象融合 小波变换 IHS 变换

中图分类号: TP751.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)05-0551-06

The Application of Wavelet Transform in the Fusion of Remotely Sensed Images

HUO Hong-tao

(Department of Science & Technology, Chinese People's Public Security University, Beijing 102623)

YOU Xian-xiang

(College of Resources & Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract In order to reduce the spectral distortion existed in the fusion images generated by wavelet transform method, this paper developed a new fusion method called direct addition to process the low frequency information. The method directly added the original resized TM image that was not decomposed and the reconstruction images generated only with the high frequency parts of the decomposed SPOT image. The analysis of the spectral distortion and image entropy showed that the direct addition method was better than the general wavelet transform methods. Because the direct addition method does not need to decompose the multi-spectral images, its fusion speed was faster than the general wavelet transform methods. The spectral quality comparison of wavelet transform and IHS transform showed that wavelet transform is more suitable than IHS transform for the fusion of images with different spectral response ranges and for the fusion of images with little correlation. The spatial quality comparison showed that wavelet transform was excelled at the fusion of images contained medium scale or small scale texture characteristics.

Keywords Computer image processing, Image fusion, Wavelet transform, IHS transform

0 引言

现代遥感技术可以提供同一地区的不同光谱、不同时间和不同空间分辨率的遥感图象, 这就为资源调查、环境监测等创造了前所未有的有利条件。但这样也就致使数据量急剧增加, 由于大量数据难以

利用, 因此多源遥感图象融合逐渐成为国际国内遥感界研究的重点, 尤其是像元级融合。最初, Zobrist 等报道了有关把 Seasat 与 MSS 复合图象应用于地质解译的消息^[1]; 随后, Chavez 等对 TM 和 SPOT 图象的融合又做了大量研究工作^[2]。随着雷达卫星遥感技术的深入应用, Solberg 等对 Radarsat 和多光谱图象的融合也做了大量研究性工作^[1]。IHS 变

基金项目: 国家 863 计划项目(2001AA245031)

收稿日期: 2002-07-18; 改回日期: 2003-01-28

换是像元级融合的代表,可用于提高分辨率、特征增强和特征差异大的数据间的融合。此外,主成分分析和高通滤波也经常用于图象融合。大家知道,对像元级融合的研究始终围绕一个目的,就是提高融合图象的光谱质量,即在提高融合图象空间分辨率的同时,应尽可能保持原始图象的光谱特性。

小波变换为改善融合图象的光谱质量提供了一个新的途径,并且有关小波变换应用于图象融合的研究已有不少报道。由于小波变换可将图象的空间特征和光谱特征分离,而且还可以通过多分辨率分解,将图象的不同尺度的空间特征进行分离,从而可为图象融合提供有利条件。

1 离散小波变换与多分辨率分析

同傅立叶变换一样,小波变换也存在连续小波、小波级数展开和离散小波变换 3 种形式。其中,连续小波和小波级数虽早已由 Grossman 和 Morlet 引入^[3],但在图象融合中,一般采用离散小波变换。离散小波变换的发展与滤波器族理论、多分辨率分析和子带编码 3 个技术密切相关^[3],因为离散小波变换的最终实现是通过与小波变换相应的高低通滤波器来完成的,即通过对图象的高低通滤波可以将图象的高频(空间特征)和低频(光谱特征)成分分离;而子带编码理论则不仅可将图象分解成窄带分量,更重要的是,能够以一种无冗余、无重建误差的方式来表示它们;多分辨率分析技术则为小波变换在图象处理中的应用起到了关键作用。

1.1 多分辨率分析

图象中显示的物体是出现在不同大小尺度上的,这与地图非常相似,因为地图通常也是以不同尺度来获得的。一幅地图的尺度是用地面物体实际大小与它在地图上大小的比值来表示的。在较大尺度地图上,例如在特别宏观的地球仪上,大陆和海洋等主要特征是可见的,而像城市街道这样的细节信息就在地图的分辨率之外了。在较小尺度地图上,细节虽变得可见,但较大的特征却不见了^[3]。小波变换正是沿着多分辨率这条线发展过来的,而变尺度则是通过由基本小波膨胀和压缩而构成的一组基函数来实现的。由于小波变换可将图象分解为一系列具有不同分辨率、频率和方向特性的子带信号,因此使研究者可很容易地找到小波系数和原始图象内容在空间和频率域两方面的对应关系。

1.2 离散小波变换的设计与快速实现

Castleman 给出了离散小波变换的设计过程^[3],其关键是低通滤波器的设计。表 1 给出了研究中应用的低通滤波器。

表 1 低通滤波器序列

位置	值
$h_0(0)$	$(1 - \sqrt{3})/4 \sqrt{2}$
$h_0(1)$	$(3 - \sqrt{3})/4 \sqrt{2}$
$h_0(2)$	$(3 + \sqrt{3})/4 \sqrt{2}$
$h_0(3)$	$(1 + \sqrt{3})/4 \sqrt{2}$

离散小波变换的实现一般采用 Mallat 算法。Mallat 算法以迭代的方式来使用双带子带编码,并且自底向上地建立小波变换。下面以一维信号为例来给出 Mallat 算法的计算过程(见图 1):

(1)首先对离散采样信号 $f(k)$ 进行双带子带编码,即分别用低通滤波器 $h_0(k)$ 和高通滤波器 $h_1(k)$ 对 $f(k)$ 滤波,再对每个输出进行间隔抽样,以产生两个半长度的子带信号 $A_2^{(1)}$ 和 $W_2^{(1)}$ 。 $A_2^{(1)}$ 和 $W_2^{(1)}$ 分别为图象的低频和低频半长度子带信号;上角代表分解次数。

(2)对低频半长度子带信号 $A_2^{(1)}$ 再一次实施双带子带编码得到 $A_4^{(2)}$ 和 $W_4^{(2)}$ 。连续进行这一过程,在每一步都保留高频半长度子带信号,并进一步编码低频半长度子带信号,直到得到一个仅有一个点的低频半长度子带信号为止。而小波变换系数就是这个低频半长度子带再加上用子带编码的高频半长度子带信号的全部。

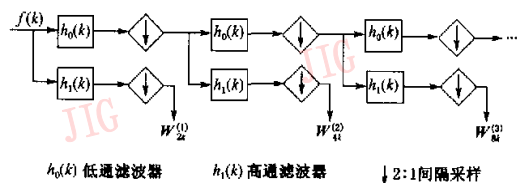


图 1 离散小波变换算法

一维信号的 Mallat 算法可以很容易地推广到二维图象,因为二维尺度函数和小波函数都可分离,所以图象的二维小波变换可以分解为在行和列方向上的一维小波变换,如图 2(a)所示,即先沿行方向作低通和高通滤波,将图象分解成概貌和细节两部分,并进行 2:1 采样;然后再对行运算结果沿列方向用高通和低通滤波器进行运算,并进行 2:1 采样。这样得到的 4 路输出中,图象 $A_{2^{j+1}}^{(0)}(m, n)$ 为原图象的概貌,上角代表分解后低频部分, $D_{2^{j+1}}^{(1)}(m, n)$ 、 $D_{2^{j+1}}^{(2)}(m, n)$ 、

$D_{2^{j+1}}^{(s)}(m, n)$ 分别为垂直方向、水平方向和对角线方向的高频子带信号,分别用上角 1, 2, 3 区分。小波重构是小波分解的逆过程,如图 2(b)所示。

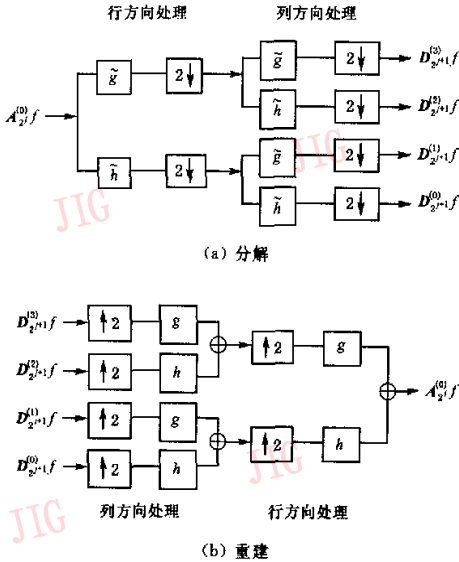


图 2 Mallat 算法的小波分解与重建过程

图 2 中, \tilde{g} 为高通分解滤波器, \tilde{h} 为低通分解滤波器, $2\downarrow$ 为 1:2 间隔采样, g 为高通重构滤波器, h 为低通重构滤波器, $\uparrow 2$ 为 1:2 增频采样。

2 基于小波变换的遥感图象融合过程

2.1 遥感图象小波融合的一般过程

小波变换可以将图象的空间特征和光谱特征进行分离,而且由于小波变换的多分辨率特性,不同尺度的空间特征也可以进行分离,因此小波变换可以用于多分辨率遥感图象的融合。现以 TM 图象和 SPOT-PAN 图象(以下简称 SPOT 图象)为例来说明融合的过程,由于 SPOT 图象的分辨率较高,因此其空间纹理特征优于 TM 图象,而 TM 图象却具有丰富的光谱信息,通过小波变换,可以将 TM 图象的光谱信息与 SPOT 图象的空间信息有机结合,以形成空间分辨率和光谱分辨率俱佳的融合图象。具体融合过程如下:

(1) 将 TM 图象通过插值放大来得到 10m 分辨率图象,并以 SPOT 图象为参考图象进行几何配准;

(2) 通过分别对 TM 和 SPOT 图象进行小波分解来获取各自的低频图象和高频图象;

(3) 用小波分解后的 TM 低频图象替代 SPOT 图象的低频图象;

(4) 通过对 TM 低频图象和 SPOT 高频图象进行小波重构来得到融合图象。

在实际应用中,为了防止融合过程中由于替换而引起的光谱扭曲,通常在小波分解前需通过对 SPOT 与 TM 的各波段图象进行直方图匹配来加大 SPOT 与 TM 各波段图象的相关性,以减小融合图象的光谱偏差。

2.2 小波融合过程的改进

在前述图象融合过程中,仅仅用到了 TM 图象经小波分解后得到的低频图象信息(以下简称 TM 图象基带数据)和 SPOT 图象经小波分解后得到的高频图象信息(以下简称 SPOT 图象子带数据),而 TM 图象的高频信息和 SPOT 图象的低频信息则被丢弃。由于 TM 图象的光谱分辨率优于 SPOT 图象,在理想情况下,可以认为 TM 图象基带数据优于 SPOT 图象的低频信息,因此舍去 SPOT 图象的低频信息是可行的。但在实际情况中却远非如此,由于遥感图象的成像过程是一个随机过程,其像元的灰度值会受到传感器性能、大气及地形等诸多因素的影响,因此,虽然从整体上看,TM 图象基带数据优于 SPOT 图象的低频信息,但在图象的一个局部区域,由于成像过程中上述因素的影响,使得 SPOT 图象的低频光谱信息有可能优于 TM 图象基带数据。因此在融合过程中,不对 SPOT 图象的低频信息进行简单的舍弃,而应加以充分利用。

对小波分解后基带数据的分析包括两个方面:一是线性加权,由于常规小波变换融合方法在重构过程中,一般仅用 TM 图象基带数据,SPOT 图象的基带数据则被放弃,因此研究中多采用 TM 与 SPOT 图象基带数据的加权和来参与重构,并将融合结果与仅用 TM 图象基带数据重构的常规小波变换融合方法的扭曲值,从信息量和光谱扭曲两个方面进行了比较,实验中选取的两组权值如表 2 所示,从统计结果来看,常规小波融合方法的融合效果优于 TM 和 SPOT 图象基带线性加权的融合效果;二是直接相加,李克鲁等提出了直接替换的方法^[4],其基本思想是先对 SPOT 图象进行一层小波分解,得到 20m 分辨率的基带和子带数据,然后将 TM 图象通过插值得到 20m 分辨率图象,再用 TM 图象与 SPOT 图象的 3 个子带图象进行重构。

在此基础上,研究中提出了直接相加的融合方

法,主要步骤包括:

(1) 将 TM 图象通过插值来得到与 SPOT 图象同一分辨率(10m)的图象;

(2) 通过将 SPOT 图象进行小波分解来得到其基带和子带数据;

(3) 仅将各分辨率水平的子带数据进行小波重构得到与原始图象大小相同的还原图象,注意,由于重构过程中没有加入基带数据,因此所得到的重构图象仅包含 SPOT 图象的高频信息;

(4) 将重构图象与 10m 分辨率的 TM 图象通过直接相加来生成融合图象。

从表 2 可见,直接相加法的融合结果优于线性加权法和常规小波变换融合法的融合结果。在 TM4、5 两个波段,直接相加法融合结果的信息量和光谱扭曲值两个统计指标优于其他方法。图 3 给出了直接相加法与常规小波融合法的融合结果。由此可以看出,直接相加法融合图象的光谱特征更接近于 TM4 原始图

象。在 TM3 波段,其光谱扭曲值大于常规小波变换融合方法的融合图象,且其信息量是所有方法中最小的,经分析认为,这与 TM3(0.63~0.69 μm)与 SPOT(0.51~0.73 μm)图象的波谱范围部分重叠有一定关系。由于两者波谱范围重叠,使得 TM 图象基带数据参与 SPOT 图象每一分辨率层的小波重构过程变得更具有实际意义,其所得到的图象光谱扭曲值也必然小于直接相加法融合图象的光谱扭曲值。波谱范围重叠也是造成在 TM3 波段,线性加权法的信息量优于其他方法,而光谱扭曲值又高于其他方法的原因。由于 SPOT 与 TM3 图象都属于可见光范围,但前者的波谱范围比后者宽,因此两者用基带线性加权法所得到的融合图象的信息量必然大于仅采用 TM3 图象基带数据的融合结果,而且因为光谱扭曲是以 TM3 原始图象为标准计算得到的,所以其光谱扭曲值大于仅采用 TM3 图象基带数据的融合图象。

表 2 线性加权法、常规小波变换融合法及直接相加法对融合图象光谱特征的影响

融合方法	TM 权重	SPOT 权重	SPOT 与 TM3 融合图象		SPOT 与 TM4 融合图象		SPOT 与 TM5 融合图象	
			信息量	光谱扭曲值	信息量	光谱扭曲值	信息量	光谱扭曲值
线性加权法	0.67	0.33	7.7576	18.2897	7.0990	25.0582	7.4232	49.5780
	0.50	0.50	7.7582	21.8470	6.9815	35.1100	7.3970	53.4778
常规小波变换融合方法			7.7431	7.0990	7.5833	12.4651	7.5136	11.3089
直接相加法			7.7266	9.2497	7.5947	6.7249	7.5277	6.4014

注:常规小波变换融合方法是指仅采用 TM 图象基带数据进行重构的方法



(a) TM4 原始图象

(b) 直接相加法融合图象

(c) 常规小波变换法融合图象

图 3 直接相加法与仅采用 TM 图象基带数据的常规小波变换法的 SPOT 与 TM 融合结果比较

3 小波变换与 IHS 变换的比较

研究中,从光谱质量、空间质量和灵活性 3 个方面对小波变换与 IHS 变换的融合效果进行了比较分析,采用的融合方法分别为 IHS 变换中最优的球

体变换^[5]和前述小波变换中直接相加的融合方法(小波基长度为 10,分解层数为 2)。所有的实验分析都用 Matlab 语言开发完成。采用的数据源为 TM 和 SPOT 图象,试验区域位于北京百望山地区。

3.1 光谱质量

表 3 给出了不同融合方法得到的融合图象的统

表 3 采用不同融合方法的 SPOT 与 TM 图象的融合图象的信息量、标准差和光谱扭曲值比较

	信息量			标准差			光谱扭曲值		
	TM4	TM5	TM3	TM4	TM5	TM3	TM4	TM5	TM3
原始图象	6.32	6.44	5.94	51.23	50.92	70.01	-	-	-
IHS 变换融合图象	7.32	7.43	7.74	42.96	48.10	73.27	26.57	18.90	18.01
小波变换融合图象	7.58	7.51	7.74	51.52	51.09	70.13	7.00	6.50	9.89

注:表中后两行数据分别是指 TM4、5、3 波段图象与 SPOT 图象的融合图象的信息量、标准差、光谱扭曲值

计结果.由表 3 可以看出,IHS 变换后, TM4、5 波段与 SPOT 图象融合结果的信息量和标准差明显低于小波变换,仅 TM3 波段 IHS 变换的融合结果与小波变换融合结果相似,这说明 IHS 变换在融合具有相同波谱响应范围的两幅图象(如 TM3 和 SPOT)时,与小波变换所得到的融合结果相似;但在融合波谱响应范围不同(相关性弱)的图象时,其融合结果与小波变换的融合结果相比,则存在明显差异.从光谱扭曲值的统计结果也可以看出这一点,在 TM4、5 波段, IHS 变换融合结果的光谱扭曲值远远高于小波变换(相差 3~4 倍),而在 TM3 波段,两种融合方法的融合结果的光谱扭曲值差异缩小至 2 倍,其原因可以从融合过程中有所发现:由于 IHS 变换中, SPOT 图象只能通过与 TM4、5、3 这 3 个波段图象变换后的 I 分量进行直方图匹配来增加相关性,才可减少融合图象的光谱扭曲值,而 I 分量通常是 3 个波段亮度值的平

均值或极大值(依变换公式不同),因此在 IHS 变换过程中,只是使 SPOT 图象从整体上与 TM4、5、3 这 3 个波段图象的相关性有所增强.对于小波变换,则可以使 SPOT 图象分别与 TM4、5、3 这 3 个波段图象进行直方图匹配,以增加其与每一个波段的相关性,这就使得融合图象与原始图象的相关性大大增强,从而也就提高了图象的光谱质量.

3.2 空间质量

从 IHS 变换与小波变换融合图象的基于灰度共生矩阵的纹理分析结果来看,对于中小尺度的纹理特征,小波变换的优势比较明显,因为其具有多分辨率分析的特征,故可以逐步细化图象的细节特征,而且小波变换还可以对大尺度的特征进行进一步细化,但其带来的负面效果是一些线性地物由于过分细化而导致中间出现“掉线”现象;对于较大尺度的特征来讲, IHS 变换与小波变换结果的差别不大.不过, IHS 变换生成的纹理图象,其连续性更强,且图象整体比较平滑.从试验区图象来看,由于山区遥感图象(图 4)的纹理尺度较大,因此 IHS 变换融合图象的空间特征质量优于小波变换,如山脊线比较清楚;在平原区(图 5),尤其城近郊区的遥感图象,由于图象上中、小尺度的纹理特征较强,因此小波变换的优势比较明显,如成片的住宅小区和整齐的农田、果园,在小波变换的融合图象上,其纹理特征非常明显.

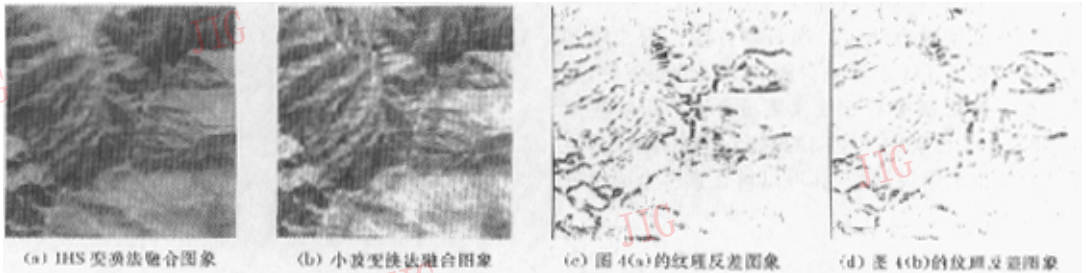


图 4 用 IHS 变换法与小波变换法融合的北京百望山山区 TM 与 SPOT 图象的融合图象及其纹理反差图象

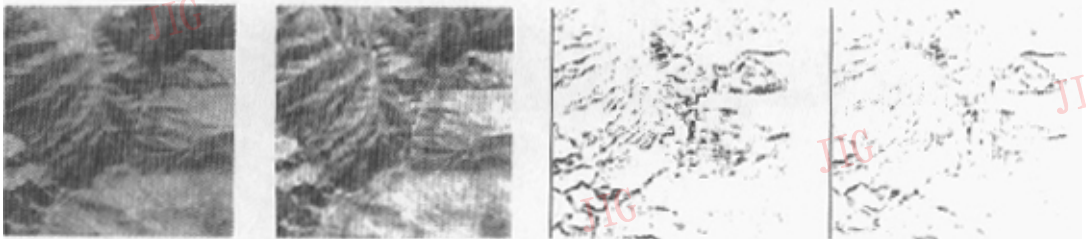


图 5 用 IHS 变换法与小波变换法融合后的北京百望山平原区 TM 与 SPOT 图象的融合图象及其纹理反差图象

图 5 用 IHS 变换法与小波变换法融合后的北京百望山平原区 TM 与 SPOT 图象的融合图象及其纹理反差图象

3.3 灵活性

从灵活性来看,小波变换融合法具有非常大的灵活性,它可以对任意多个波段图象进行融合,而IHS变换融合法则只能,且必须用3个波段进行融合;小波变换融合法可以通过小波基长度和分解层数来调整融合图象的光谱和空间质量,使其达到最佳平衡状态,而IHS变换在这一方面则显得无能为力,不过不同的变换公式对融合图象的光谱质量和空间质量影响不同,可以通过应用不同的变换公式来调整融合图象的光谱和空间信息的比例。

4 结论

试验表明,直接相加的小波变换低频信息处理方法,由于可以充分利用参与融合的多光谱图象的光谱信息,从而可以达到改善融合图象的光谱质量的目的。通过融合图象的光谱质量分析可见,直接相加法应用于多源遥感图象融合是可行的,而且其融合图象的质量优于常规的小波变换融合算法。直接相加法由于不需要对参与融合的多光谱图象进行小波分解,因此运行速度快,在融合海量遥感数据方面具有重要的应用价值。直接相加法的不足之处在于,在融合波谱响应范围重叠的图象(如TM3与SPOT)时,其效果与常规小波变换融合方法相比,还略有差距,需要加以改进。

小波变换融合法可以通过直方图匹配来增加SPOT图象与TM不同波段图象之间的相关性,这就使得小波变换比IHS变换更适合于波谱响应范围不同、相关性弱的图象间的融合。另外,小波变换还具有非常大的灵活性,其可以对任意多个波段进行融合。

参考文献

- 1 Pohl C, Gendern J L V. Multisource image fusion in remote sensing: Concepts, methods and application^[J]. International Journal Remote Sensing, 1998, 19(5): 823~854.
- 2 Chavez, Sides, Anderson. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM& Spot-Pan^[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991, 57(3): 295~303.
- 3 Castleman K R 著. 数字图象处理^[M]. 朱志刚, 林学闯, 石定机等译. 北京: 电子工业出版社, 1998: 266~290.
- 4 李克鲁, 王霞, 郭敏茹. 小波变换的信息融合方法及结果评价^[J]. 国土资源遥感, 1999, (4): 46~52.
- 5 霍宏涛, 林小竹, 何薇. 数字图象处理^[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 187~193.



霍宏涛 1972年生, 2001年获北京林业大学遥感与地理信息系统专业博士学位。主要研究方向为数字图象处理与模式识别、遥感与地理信息系统应用。



游先祥 1936年生, 教授, 博士生导师, 现在北京林业大学资源与环境学院任教。主要研究方向为遥感、地理信息系统在资源环境中的应用。