

遥感图像双正交小波的数据融合模式研究

付 炜 邢广忠 侯蓝田 王文君

(燕山大学信息学院通信与电子工程系, 秦皇岛 066004)

摘 要 鉴于小波变换分析方法在图像处理与图像融合中具有广阔的应用前景, 为了获得更好的图像融合效果, 首先介绍了图像数据小波分解与重构的基本方法, 然后从理论上阐述了具有广义线性相位的双正交小波基的优点, 最后通过小波变换与 HIS 变换的有机结合实现了图像融合。融合后的影像不仅仍然保持了地物的光谱信息, 而且保留了高空间分辨率全色波段影像细节清晰的特点。实验结果表明, 基于双正交小波变换的多分辨率遥感图像数据融合技术是提高卫星遥感影像解像力的一个重要手段。

关键词 双正交小波 多分辨率分析 数据融合 遥感图像

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)03-0378-04

Research on Data Fusion Model of Biorthogonal Wavelet for Remote Sensing Image

FU Wei, XING Guang-zhong, HOU Lan-tian, WANG Wen-jun

(Department of Communication & Electronic Engineering of Information Institute, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract In consideration of the case that wavelet transform analysis means has been applied extensively in image processing and image fusion, in order to obtain better fusion effect of image, This paper first presents basic approach of wavelet decomposition and reconstruction of image, then theoretically expounds the merits of biorthogonal wavelet based with general linear phase, last realizes image fusion by combining wavelet transform with HIS transform. Furthermore, the author applies the method mentioned above to data fusion of multi-spectral Remote Sensing (RS) image. By organically connecting wavelet transform with HIS transform, the fusion image can not only comprise spectral information of ground objects, but also reserve panchromatic band's clear details of high-spatial resolving power of RS image. The experimental result shows that data fusion approach of multi-resolving power of RS image based on biorthogonal wavelet transform is an important means to improve image interpreting power of satellite RS image.

Keywords biorthogonal wavelet transform, multi-resolving power analysis, data fusion, remote sensing image

1 引言

遥感(remote sensing, RS)图像数据融合是一种利用同一地区不同空间分辨率的遥感图像,通过一定的数据处理技术来提取各遥感图像中的有用信息,最后将其融合到统一的空间坐标系(图像或特征空间)中,以便通过信息互补性来提高遥感图像中地物识别、目标解译精度的方法和技术。数据融合始于20

世纪70年代,国内外不少学者提出了图像数据融合的多种方法,其中,一些学者利用小波变换方法对图像数据进行融合,收到较好效果。在应用小波变换进行遥感图像数据融合中,笔者发现,采用正交小波进行遥感图像数据融合,往往很难达到很好的融合效果,由于通过双正交小波来放松正交性的约束可以获得更好的图像特性,因此本文在实验中采用双正交小波进行遥感图像数据融合,同时,本文还阐述了基于双正交小波变换的多分辨率遥感图像数据融合的原

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69662001)

收稿日期:2004-05-31;改回日期:2004-12-13

第一作者简介:付炜(1949~),男,燕山大学信息学院通信与电子工程系教授,博士生导师,新疆大学电子科学与信息工程学院兼职教授。1992年获北京大学资源环境遥感与地理信息系统应用研究所理学博士学位。主要从事遥感、资源环境信息系统与计算机信息处理的科研与教学工作。在国内外学术刊物上公开发表科研论文100余篇,出版科研专著一部。E-mail: xyweifu@sina.com

理与方法,并构建了相应的模式及算法。

2 小波分析

小波变换作为在傅里叶变换基础上新发展起来的一种数学方法,由于它在时间域和频率域上同时具有良好的局部化特性,因此对高频成分采用逐步精细的时间域采样步长,可以“聚焦”到任意细节。它不仅具有能把信号分解成空域和时域两个独立部分的功能,同时还不会失去原信号所包含的信息,并且具有可以通过找到正交小波基来实现无冗余的信号分解等优点。小波变换中的多分辨率分析^[1,2]不仅能将原始信号分解成几个具有不同分辨率的分量,而且利用这些分量不失真地重建信号。设闭子空间集 $\{V_j, j \in \mathbf{Z}\}$, $V_j \subset L^2(\mathbf{R})$ 是 $L^2(\mathbf{R})$ 的多分辨率分析集,则存在函数 $\varphi(t) \in V_0$,使得集合 $\varphi_j = \{\varphi_{j,k}(t), k \in \mathbf{Z}\}$ 构成 V_j 的标准正交基。这里

$$\varphi_{j,k} = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) \quad (1)$$

称为尺度函数,并满足以下尺度方程

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n) \varphi(2t - n) \quad (2)$$

它对应于一低通滤波器 H ,其中 $H(w)$ 是 $h(n)$ 的傅里叶变换,即 $H(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n) e^{-inw}$ 。令 W_j 为 V_j 在 V_{j-1} 中的正交补空间,即 $V_{j-1} = V_j \oplus W_j, j \in \mathbf{Z}$,对于给定的 $j \in \mathbf{Z}$,设 $\{\psi_{j,k}(t)\}_{j \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{Z}}$ 构成 W_j 的标准正交基,则整个函数集 $\{\psi_{j,k}(t)\}_{j \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{Z}}$ 构成 $L^2(\mathbf{R})$ 的标准正交基。这里 $\{\psi_{j,k}(t)\}_{j \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{Z}}$ 正是由同一母函数伸缩平移得到的正交小波基^[3],称为小波函数,它满足另一个尺度方程,即满足

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n) \varphi(2t - n) \quad (3)$$

它对应于一高通滤波器 G ,其中 $G(w)$ 是 $g(n)$ 的傅里叶变换,即 $G(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n) e^{-inw}$ 。

3 双正交小波

定义1 函数 $\psi \in L^2$ 是一个非正交或非半正交小波,且是一个R小波,如果存在一个对偶 $\tilde{\psi}$,且具有

$$\langle \psi_{j,k} \tilde{\psi}_{l,m} \rangle = \delta_{j,l} \cdot \delta_{k,m}, j, k, m, l \in \mathbf{Z} \quad (4)$$

则称 ψ 为双正交小波^[4]。对于任意信号 $f \in L^2(\mathbf{R})$,在 V_N 上对任何正整数 M ,图像 f 的分解唯一性为

$$f_N(x) = k_{N-1}(x) + \dots + k_{N-M}(x) + f_{N-M}(x) \quad (5)$$

其中, $k_j(x) \in W_j, j = N - M, \dots, N - 1, f_{N-M}(x) \in V_{N-M}$ 。

在遥感图像的融合过程中,需要用到小波重建。一般图像重建的质量好坏取决于式(5)中各 $k_j(x)$ 分量是否存在失真,或失真的程度,而后者又取决于小波基的滤波器组的品质;总而言之,如果滤波器组具有线性相位,或至少具有广义线性相位,则可避免或能尽量避免图像的失真。

定义2 若 $f \in L^2(\mathbf{R})$,则称 f 具有“线性相位”,如果 f 的傅里叶变换为

$$\hat{f}(w) = \pm |\hat{f}(w)| e^{-iaw} \quad (6)$$

其中, a 是实值常数。如果

$$\hat{f}(w) = F(x) e^{-i(aw+b)} \quad (7)$$

其中, $F(x)$ 是实值函数, a, b 是实常数,则称 f 具有“广义线性相位”。上两式中的 a 称为 \hat{f} 的相位,而对于小波 $\psi \in L^2$ 的相位特征,则取决于尺度函数 φ 的相位特征与两尺度序列 $\{q_k\}$ (或符号 \hat{q})的相位特征,一般 ψ 仅具广义线性相位。由于Harr小波是紧支撑正交小波中其尺度函数唯一具有广义线性相位的,因此,为了得到良好的相位特征,需要在正交性上放宽约束,本文使用了具有线性相位或广义线性相位的双正交小波基。从滤波器组设计来看,双正交滤波器由于取消了正交条件,因而其设计的自由度必然加大,但设计上的考虑也更多,特别是保证收敛所需要的条件就更复杂些。本实验采用的双正交小波基滤波器组为:

$$h[DD] = \{-0.00332761, 0.00569794, 0.0196637, -0.0482603, -0.0485391, 0.292562, 0.564406, 0.292562, -0.0485391, -0.0482602, 0.0196637, 0.00569794, -0.0033276\}。$$

$$g[DD] = \{0.00332761, 0.00569794, -0.0196637, -0.0482603, 0.0485391, 0.292562, -0.564406, 0.292562, 0.0485391, -0.1482502, -0.0196637, -0.00569794, 0.0033276\}。$$

4 遥感影像的融合

遥感影像融合的目的是将不同空间分辨率的卫星遥感图像合成一幅新的图像,并使各种信息达到互补,以改善原图像的质量。融合采用的方法是先对30m分辨率多光谱卫星图像进行HIS^[5]变换,并对2.5m分辨率全色卫星图像和30m分辨率多光谱

卫星图像的亮度分量进行小波分解和重建,然后重建后图像的亮度分量作为新的亮度分量取代原来的亮度分量,最后经过 HIS 反变换来实现图像融合,对该方法阐述如下。

4.1 HIS 变换

图像处理中最常应用的有 RGB(红、绿、蓝三色)和 HIS 两种彩色坐标系统,其中 RGB 是从物理学角度出发描述颜色,它适于计算机定量处理颜色时使用;而 HIS 是从人眼的主观感觉出发来描述颜色,适于定性地处理色彩。在 HIS 系统中,色调(hue) H 表示颜色的类别,亮度(intensity) I 表示人眼感受到的颜色的亮度程度,饱和度(saturation) S 表示颜色的纯度。 H 、 I 、 S 相关性低, I 主要反映遥感图像中地物反射的全部能量和图像所包含的能量空间分布;而 H 是组成色彩的主波长,其由红绿蓝的比重所决定; S 则主要反映地物的光谱信息。考虑到 HIS 变换融合虽可以提高合成图像的地物纹理特征,但光谱失真较大,而小波变换融合正好能有效地增强多光谱图像的空间细节表现能力,还能保持融合前后图像的光谱特征。针对遥感图像的融合,本文将小波变换和 HIS 变换进行有机地结合,以便使数据融合具有互补性。

4.2 融合步骤

HIS 正变换是从 RGB 空间到 HIS 空间的变换,反变换是从 HIS 空间反变换到 RGB 空间。本文采用的圆柱体变换法是 HIS 变换方法的一种。其融合步骤如下:

(1) 将插值后已进行空间配准的 30m 分辨率多光谱遥感图像进行 HIS 正变换,首先得到 H 、 I 、 S 3 个分量;

(2) 确定小波分解的级数。小波变换中的分解合成实际上是对频带的划分,即分解级数越多,产生的子带越多,频带划分得越细,由于上一级频带分解的信号输出可作为下一级频带分解的输入,且级数增加意味着级间的滤波器越多,从而造成信号移位也越大;另一方面,由于小波分解和合成都要进行边界延拓,且级数越多,引起边界失真越大,为此要根据不同的图像处理目的选取最佳的级数。实验表明,小波变换分解到 4 级时的效果最好;

(3) 分别对 2.5m 分辨率全色卫星图像和 30m 分辨率多光谱卫星图像亮度分量进行小波分解 4 层,分别得到 1 个低频分量,12 个高频分量。对于低频部分可采取取平均算子去噪;对于高频分量 HH_i 、 HL_i 、

LH_i , $i=4$,由于小波系数尺度越大,信噪比越大,而同一层 HH_i 子带的信噪比小于 HL_i 、 LH_i 子带的信噪比,所以应采取不同的阈值分别对不同的高频子带去噪, HH_i 子带可采用 4 邻域均值作为阈值进行去噪,而 HL_i 、 LH_i 则采用 8 邻域均值作为阈值进行去噪。这样,去噪时,将子带小波系数中,小于均值的系数取为零,并看作噪声,大于均值的保留;

(4) 边界处理。使用文献[6]的方法进行边界处理;

(5) 将各层去噪后的高频分量和低频均分量进行小波融合,融合后的亮度值记为 \tilde{I} ;

(6) 将 H 、 I 、 S 进行 HIS 反变换到 RGB 空间,以实现图像融合(融合步骤流程见图 1)。

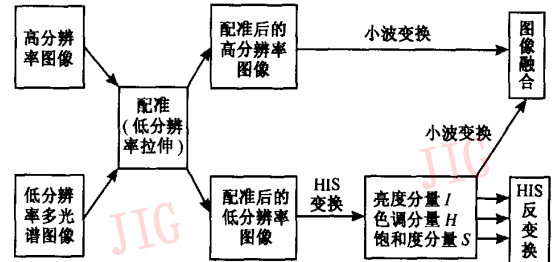


图 1 高分辨率全色卫星图像和低分辨率多光谱卫星图像数据融合算法框图

Fig. 1 Data fusion algorithm frame-map of high resolution panchromatic satellite image and low resolution multi-spectral satellite image

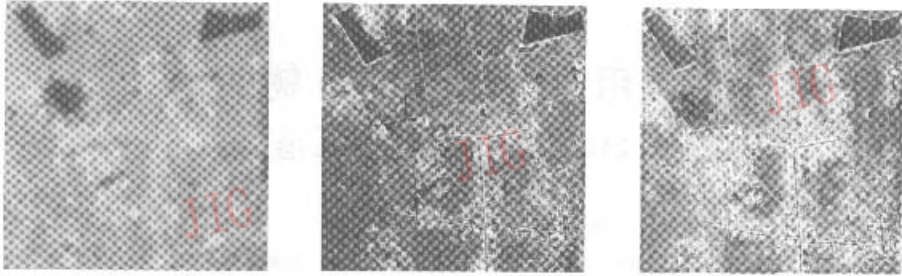
5 融合结果评估与讨论

按照 4.2 节所述融合步骤,本文用 30m 分辨率多光谱图像(图 2(a))和 2.5m 分辨率全色卫星图像(图 2(b))匹配后进行融合。采用双正交小波融合后的图像见图 2(c)。

本文采用以下指标来对图像融合效果进行评估:

(1) 清晰度 清晰度是用来评价图像模糊程度的重要指标,它反映了图像中微小细节变化与纹理变化的反差特征。在图像平面上,某一区域的灰度级变化率越大,其相应的梯度也越大,同时图像影像的清晰度也就越大。图像影像清晰度的计算公式如下:

$$g = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \left\{ \frac{1}{2} \left[(f(x,y) - f(x,y+1))^2 + (f(x,y) - f(x+1,y))^2 \right] \right\}^{1/2}$$



(a) 30m 分辨率多光谱遥感原始影像 (b) 2.5m 高分辨率多光谱遥感原始图像 (c) 基于小波融合的多光谱遥感图像

图2 融合图像与30m分辨率,2.5m高分辨率原始图像比较

Fig.2 Original multi-spectral RS image of 30m resolution and Original high-spectral RS image of 2.5m resolution and Multi-spectral RS image based on Wavelet fusion

(2) 信息熵 信息量增加是图像融合最基本的要求,这可以通过融合前后图像信息熵的变化反映出来,图像信息熵 H 的含义为图像的平均信息量,其表达式为

$$H = - \sum_{i=0}^N P(i) \log(P(i))$$

其中, $P(i)$ 为某一像元值 i 在图像中出现的概率, N 是像元值范围(一般为 $0 \sim 255$)。

(3) 空间频率 空间频率反映了一幅图像的空间域的总体活跃程度,图像的行频率 F_{hor} 和列频率 F_{ver} 分别定义如下:

行频率为

$$F_{hor} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [F(i,j) - F(i,j-1)]^2}$$

列频率为

$$F_{ver} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} [F(i,j) - F(i-1,j)]^2}$$

则图像的空间频率为 $F_{spa} = \sqrt{F_{hor}^2 + F_{ver}^2}$ 。

采用以上指标计算的结果见表1。

表1 融合图像效果评价表

Tab. 1 The evaluation table of fusion image effect

遥感图像	评价因子				
	清晰度	小波能量	信息熵	空间频率	均值
原多光谱图像(图2(a))	64.9454	56.3751	7.30839562	10.013.2	11.9851
融合后图像(图2(c))	81.9305	180.656	7.26427998	12.507.2	11.5203

采用本文方法最后得到的融合图像与原多光谱图像相比有了很大的改观,如原多光谱图像街区只呈现模糊的条块状分布,融合后图像清晰了很多,不

仅能分辨出主要的道路和街区,并且保留了原多光谱图像的光谱特征;从评价标准来看,清晰度和空间频率都较原图像有了大幅度的提高。从提高清晰度效果的角度采用小波能量、清晰度、空间频率等评价指标来看,融合后图像上述指标均有很大提高;从信息熵角度来看,由于融合前后信息熵指标很接近,所以采用小波分解融合的方法均不会产生明显的丢失信息现象。

参考文献 (References)

- 1 Mallat S. A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation [J]. IEEE Transactions on Pattern, Analysis Machine Intelligence, 2001,7(10): 674 ~ 693.
- 2 Martin V. Wavelet and filter banks: Theory and design [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 40(12): 2207 ~ 2232.
- 3 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelet [J]. Communication Pure and Applied Mathematics, 2002, XLT (8): 909 ~ 996.
- 4 Chen Wu-fan. Wavelet analysis and its application in image processing [M]. Beijing: Science Press, 2002:40 ~ 48. [陈武凡. 小波分析及其在图像处理中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002:40 ~ 48.]
- 5 Xu Jian-hua, Wang Hong-hua. Remote sensing image fusion based on HIS transform and wavelet transform [J]. Journal of Zhengzhou Surveying College, 2002,20(4):24 ~ 30. [徐建华,王洪华. 基于 HIS 变换和小波变换的遥感图像融合 [J]. 郑州测绘学院学报, 2002,20(4): 24 ~ 30.]
- 6 Geng Xe-xun. Research on compression technology of keeping surveying precision for remote sensing image based on wavelet transform [J]. Journal of Surveying, 2002,15(6):30 ~ 36. [耿则勋. 基于小波变换的遥感图像保持测量精度的压缩技术研究 [J]. 测绘学报,2002,15(6):30 ~ 36.]