

高分辨率遥感图像小波融合算法研究

张亦慧, 赵志强

(深圳职业技术学院 计算机工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要: 针对现有融合方法存在的光谱信息和空间细节信息不能较好兼顾的问题, 提出了一种遥感图像小波融合算法。根据高分辨率遥感图像自身的空间尺度, 采用多进小波分析技术较好地解决了不同尺度遥感图像空间细节的表达问题, 同时利用基于方向能量统计量的自适应融合准则较好地解决了融合中的光谱信息保留问题。实验结果表明, 该融合方法在保持全色图像的高空间分辨率的同时, 提高了融合图像的光谱保持度。

关键词: 高空间分辨率; 图像融合; 多进小波变换; 方向能量统计量; 光谱保持度

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)07-0040-03

Research of high-resolution image fusion algorithm based on wavelet transform

Zhang Yihui, Zhao Zhiqiang

(College of Computer Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Aiming at a worse tradeoff between spectrum information and spatial details of present fusion methods, a new algorithm is proposed to process the remote sensing data fusion. The algorithm adopts a multi-band wavelet transform to analyze the image, at the same time, it uses directional energy statistics to evaluate the spatial texture and edge. It can solve the balance between the texture enhancement and spectrum preservation. Experimental results show that this algorithm can improve the spatial resolution, and enhance the spectrum preservation.

Key words: high spatial resolution; image fusion; multilevel wavelet transform; directional energy statistics; spectra maintain rate

随着传感器技术的不断进步, 遥感卫星的空间分辨率不断提高, 数据源和图像数据量的增多是当前遥感技术发展的趋势^[1]。数据融合技术是提高数据利用率的有效方法之一, 目前经典的遥感图像融合算法主要有 IHS 变换融合算法、PCA 变换融合算法和小波变换融合算法等。IHS 融合算法从人类的色彩感觉角度将表征空间分布的物理量 I 与表征光谱特征的物理量 H 和 S 分离出来, 用全色图像替换 I 分量后, 经 IHS 反变换得到融合图像。但 IHS 融合算法将产生光谱失真现象。PCA 变换作为一种统计学上的多维正交线性变换, 通过研究 R 、 G 、 B 3 组数据的相互数学关系, 经统计变换, 给出最大特征值对应的特征向量, 然后用全色波段来替换该特征向量。

小波变换兴起于 20 世纪 80 年代中期, 引起了信号处理和图像处理领域的广泛兴趣。MALLAT 首先将小波技术引入到图像处理领域, DAVID 首先利用小波技术实

现了多光谱和全色的遥感图像融合^[2], 利用小波进行图像融合迅速成为研究热点。基于小波分析的图像融合算法主要是利用人眼对局部对比度的变化比较敏感这一现象, 根据一定的融合规则, 在多幅原图像中选择出最显著的特征, 并将这些特征保留在最终的融合图像中, 其缺点是融合图像存在一定程度的振铃效应和空间细节丢失现象。

本文提出了一种自适应的多进小波变换图像融合算法, 根据全色图像和多光谱图像的空间分辨率关系分别设计了相应的多进小波分解方法, 这种方法保留了图像本身固有的尺度; 根据融合数据源的不同特点, 设计了两个不同的小波系数特征统计量, 减少了传统二进小波带来的空间细节信息丢失和振铃模糊效应。

1 多进小波变换

小波分析在图像处理中具有非常重要的地位, 它克

服了傅里叶变换单一分辨率的缺陷,具有多分辨率分析的特点,同时在时域和频域都有表征信号局部信息的能力。因此,基于小波分析的图像融合算法是近年来研究的热点。但是目前基于小波分析的图像融合研究主要集中在融合规则方面^[3],这也是近年来像素级图像融合研究的主流。

多进小波分析是近年来发展起来的小波理论的一个重要分支。它在对称性、光滑性和紧致性等方面都优于二进制小波;它将频带分解更细,为在不同的频带而采用不同的融合提供了有利条件,为融合算法提高了灵活性。多进小波的基本构造理论是多分辨分析。设 $M \geq 2$, 则平方可积空间 $L^2(R)$ 上的一个多分辨分析是满足以下条件的闭子空间列:

- (1) $V_j V_{j+1}, j \in Z$;
- (2) $IV_j = \{0\}, \overline{UV_j} = L^2(R)$;
- (3) $f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(Mx) \in V_{j+1}, \forall j \in Z$;
- (4) 存在 $g \in V_0$, 使得 $\{g(x-k) | k \in Z\}$ 构成 V_0 的 Riesz 基。

从上面可以看出,多进小波的多分辨分析与二进小波主要区别在于,其中定义 $M \geq 2$,而在二进小波中 $M=2$ 。因此,多进小波中不同层次的尺度空间 V_j 不再是以 2 的幂次尺度变化,也就是说二进小波只是其尺度为 2 的一种特例。多进小波具有一个尺度函数和 $M-1$ 个小波函数,这样在利用双尺度方程构造小波时,可以构造具有对称性和紧支正交性的小波基。而在二进小波中,除 Harr 小波外,紧支正交小波都不具有对称性,而 Harr 小波不连续,光滑性差,缺乏实用性^[4]。

2 利用方向能量计算融合图像的小波系数

目前针对全色和多光谱的图像融合技术流程大致相同,但是不同的参数(如小波基、小波分解层数、小波区域大小和不同的小波系数的合并方法等)都将会对融合图像效果产生一定的影响^[5]。

图像在局部区域上有意义的图像特征往往由一些基本的几何结构来表达,如纹理、边缘和线条等,这些基本特征表现出多尺度性和较强的方向性^[6]。本文利用的小波系数特征统计量是根据全色和多光谱图像的低频和低频系数提取的。

$$E(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} F(i, j) L(x - \frac{N}{2} + i, y - \frac{N}{2} + j)^2 \quad (1)$$

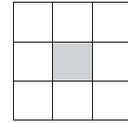
其中, $F(i, j)$ 是用来统计小波系数局部能量的算子, L 为小波系数 8 邻域的窗口。

在图 1(a)中,标记为 1 的区域是小波系数低频区域;标记为 2 的区域是小波系数水平方向的高频区域;标记为 3 的区域是垂直方向的高频区域;标记为 4 的区域是用来提取斜向能量特征的区域。图 1(b)为 3×3 的卷积模板。

在图像的低频和低频部分分别采用两个特征统计量,这两个特征统计量用来判断图像在局部空间的亮度

1	2	2	2
3	4	4	4
3	4	4	4
3	4	4	4

(a)小波系数特征划分



(b)3x3 卷积模板

图 1 小波系数特征区域及提取

和细节变化,通过这两个参数来决定小波系数的最终合并方法。

2.1 低频小波系数的处理

图像经过小波变换后,低频部分体现了主要辐射能量。对于全色图像来说,它主要来自全色传感器接收到的亮度辐射能量;而多光谱图像则反映的是 I 分量的主要辐射能量。低频部分决定了图像的基本亮度辐射能量,影响到图像的光谱保持度。本文选用 3×3 作为区域窗口,对全色和多光谱的低频部分进行能量统计量计算,计算出能量值后,将该值作为系数合并的权重。

$$E_{ML}(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} F(i, j) L_M(x - \frac{N}{2} + i, y - \frac{N}{2} + j)^2 \quad (2)$$

$$E_{PL}(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} F(i, j) L_P(x - \frac{N}{2} + i, y - \frac{N}{2} + j)^2$$

其中, $F(i, j)$ 表示图像的小波系数卷积核, L_M 和 L_P 分别为多光谱波段和全色波段低频分量的窗口系数矩阵。

$$\begin{cases} c_M = \frac{E_M}{E_M + E_P} \\ c_P = 1 - c_M \end{cases} \quad (3)$$

其中, E_M 和 E_P 分别为利用模板统计的局部能量值。小波反变换的值为:

$$c_f = c_P \times c_{pl} + c_M \times c_{ml} \quad (4)$$

其中, c_{pl} 和 c_{ml} 分别为融合前全色图像和 I 分量低频小波系数, c_f 为融合规则下合并后的小波系数值。

2.2 高频小波系数的处理

对于小波平面内的高频 LH、HL 和 HH 部分,采用垂直、水平、 45° 和 135° 对角方向的正交边缘算子分别统计 3 个方向的能量,如图 2 所示。选其中方向能量特征较大者作为该部分合并后的小波系数值。其中,对角方向存在 45° 和 135° 方向两个模板,计算每一像素点的融合系数时,采用方向能量最大模板作为对角方向的能量统计模板。

3 3 3	3 3 -5	3 -5 -5	3 3 3
3 0 3	3 0 -5	3 0 -5	3 0 -5
-5 -5 -5	3 3 -5	3 3 3	3 -5 -5

(a)水平方向 (b)垂直方向 (c) 45° 对角线方向 (d) 135° 对角线方向

图 2 3 种不同方向的 Sobel 算子

2.3 算法具体步骤

本文的融合思路是:首先对多光谱图像进行 IHS 变换,将表征地表辐射能量和空间分布的物理量 I 分量与

表征光谱信息的 H 和 S 分量分离开来;接下来进行 I 分量与全色图像的融合;然后进行 IHS 反变换;最后得到融合图像。

基于上述分析,本文提出的基于内容自适应多进小波融合算法步骤如下:

(1) 将多光谱图像插值到全色图像尺寸大小,重采样方式采用双线性内插法,然后对其进行 IHS 变换。

(2) 对全色图像和多光谱图像进行 IHS 变换后的 I 分量进行小波分解。

(3) 分别对 I 分量和全色图像的高、中、低频小波系数进行特征量统计并进行比较。

(4) 一致性检验。通过步骤(3)确定融合图像的小波系数后,对不同频带的融合权值作进一步的调整和加权,以保证不同小波频带具有连续的灰度变化和一致性的空间细节。

(5) 将融合后的图像作为 I 分量,与多光谱 IHS 分量的 H 和 S 分量进行 IHS 反变换,从而得到融合图像。

该算法的步骤如图 3 所示。

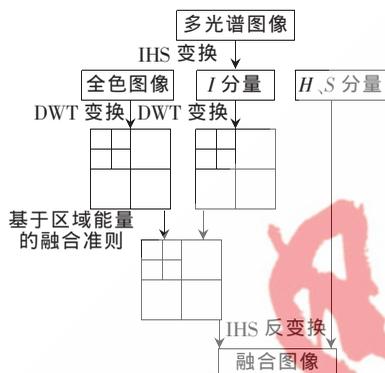


图 3 图像融合示意图

3 实验结果及性能分析

本文的实验数据为 Ikonos 和 Quickbird 高分辨率遥感图像。全色波段和多光谱波段的分辨率之比为 1:4。因此,选用支撑长度为 8 的 4 进对称正交小波,小波基选用 Daubechies8,对称性保证了相位不失真。在全色波段中,图像纹理是一种常用的空间信息,纹理特征依赖于提取纹理时所采用尺度的大小。图像尺寸为 1170×920 。图 4(a)为全色影像,图 4(b)为多光谱影像,图 4(c)为 IHS 变换融合,图 4(d)为传统二进小波融合方法,图 4(e)为本文所采用的方法。从实验融合效果的主观质量来看,IHS 融合方法图像的清晰度最高,但是光谱失真最大;DWT 融合方法光谱保持度最好,却存在一定的振铃模糊;本文提出的方法图像的清晰度较高,光谱保持度较高。

实验中采用了 4 组图像作为实验数据,采用相关系数和交叉熵作为融合效果评价的客观评价指标。提高比例为本文方法较 IHS 和 DWT 两种方法参数提高的百分比。

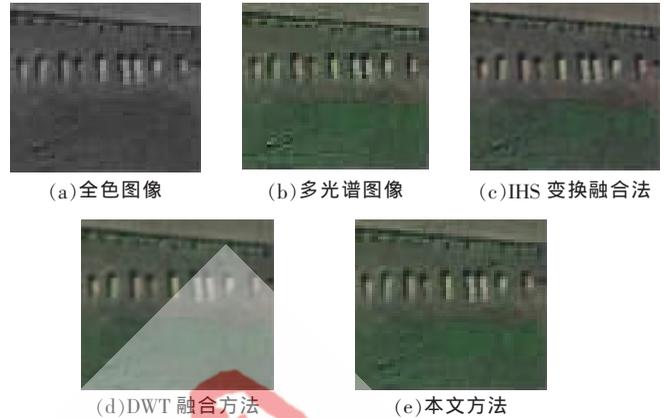


图 4 融合实验结果

相关系数 C_{cc} (Correlation Coefficient) 是用来表征两个现象之间相关关系密切程度的统计分析指标,其值越大,表明两组数据的相关程度越高。在遥感图像融合中,相关系数用来描述两幅图像相似程度,两幅图像相似度越高,相关系数越接近于 1。相关系数的计算公式为:

$$\gamma = \frac{Cov(x,y)}{\sqrt{D(x) \times D(y)}} \quad (5)$$

其中, x, y 表示给定的两组数据。

3 种算法融合图像相关系数的对比如表 1 所示。

表 1 融合图像相关系数及提高比例(全色+多光谱)

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4
相关系数	IHS	1.7133	1.8067	1.7422	1.7984
	DWT	1.6453	1.8193	1.6639	1.8126
	本文方法	1.7542	1.8687	1.7679	1.8616
提高比例/%	IHS	6.62	2.71	6.25	2.65
	DWT	2.38	3.34	1.48	3.51

通过表 1 可以看出,本方法的相关系数都高于 IHS 和 DWT 融合方法,说明本方法在充分利用全色图像和多光谱图像各自的信息上均优于上述两种方法。

交叉熵是 Kullback 提出的度量同一事件空间中的两个概率分布之间差异的信息论方法。在融合评价中,交叉熵越小,说明融合图像与原图像的差别越小。交叉熵的计算公式为:

$$D(P, Q) = \sum_{i=1}^N P_i \ln \frac{P_i}{Q_i} \quad (6)$$

3 种算法融合图像交叉熵的对比如表 2 所示。

表 2 融合图像交叉熵及提高比例(全色+多光谱)

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4
交叉熵	IHS	0.7819	0.1409	0.8727	1.1494
	DWT	0.6303	0.1510	0.7364	0.9427
	本文方法	0.6455	0.1388	0.7482	0.9292
提高比例/%	IHS	1.47	14.26	19.16	2.65
	DWT	8.05	-1.61	1.43	3.51

通过表 2 可以看出,虽然本文采用的方法在光谱的

利用上没有 DWT 算法好,但从总体评价来看,该融合方法改善了融合图像的空间细节信息和光谱信息,从而提高了图像的目标识别率和光谱保持度。

基于方向能量统计量的自适应多进小波融合算法充分利用了高空间分辨率遥感图像的空间细节特征、图像边缘和方向性特征信息,同时保留了多光谱图像的光谱信息特征,有效地解决了 IHS 变换中融合图像光谱信息丢失较多以及传统二进小波产生振铃模糊效应等问题。

参考文献

- [1] RANCHIN T, WALD L. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation[J]. Remote Sensing, 2000,66(1):49-61.
- [2] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform [J]. Graphical Models Image Process, 1995,57(3):235-245.
- [3] Wang Zhijun, ZIOU D, ARMENAKIS C, et al. A comparative

analysis of image fusion methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005,43(6):1391-1402.

- [4] WANG L, SOUSAB W P, Gong Peng, et al. Comparison of Ikonos and Quickbird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama [J]. Remote Sensing of Environment, 2004(9):432-440.
 - [5] DAUBECHIES I. 小波十讲[M]. 李建平, 杨万年, 译. 北京:国防工业出版社, 2004.
 - [6] 王智均, 李德仁, 李清泉. 利用小波变换对影像进行融合的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000,25(2):137-142.
- (收稿日期:2012-01-06)

作者简介:

张亦慧,女,1961年生,副教授,主要研究方向:图像处理与电子系统设计。

赵志强,男,1981年生,讲师,主要研究方向:图像处理技术。