

基于小波变换的自适应图像融合算法^①

张永梅^{②*} 田 越* 李 波*

(* 北京航空航天大学计算机学院数字媒体室 北京 100191)

(** 北方工业大学信息工程学院 北京 100144)

摘 要 针对现有图像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,建立了图像内容自适应的融合准则和一致性选取准则,提出了一种基于小波变换的自适应图像融合算法,实现了多光谱图像与全色图像的融合,并对融合图像进行了主、客观评价。着重从图像融合如何提高目标的区分度和识别率的角度给出主观评价,通过光谱扭曲度、清晰度客观分析多光谱与全色图像的融合效果。实验结果表明,该算法充分利用了全色图像的空间细节特征、图像边缘和方向性特征信息,保留了多光谱图像的光谱信息特征,提高了融合图像的主观效果,有利于信息的提取和目标解译。在光谱和空间细节综合保持方面,该算法优于 IHS 融合方法和传统的二进小波融合方法。

关键词 小波系数, 自适应融合, 光谱扭曲度, 清晰度

0 引 言

多传感器像素级图像融合算法大体上有加法融合、IHS 变换(将多光谱图像的 RGB(红绿蓝)彩色空间变换到 IHS 空间,其中 I 代表亮度, H 代表色调, S 代表饱和度)、小波分析等融合方法^[1]。加法融合算法简单、速度快,缺点是图像的空间细节和光谱特征都有失真^[2]。IHS 融合算法完整地保留了全色图像的信息^[3],具有高频信息丰富的特点,但容易产生光谱失真现象^[4]。近年来像素级图像融合研究的主流是基于小波分析的图像融合算法^[5],主要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,在两个或多个源图像中选择最显著的特征,并将这些特征保留在融合图像中,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^[6]。

本文结合小波分析理论和小波域的局部统计特征分析,提出了基于小波变换的自适应融合算法,改善了融合图像的结构信息和光谱信息。该融合方法通过对小波系数的统计,建立融合准则,实现了内容自适应的融合。此外,还通过区域加权和一致性检验规则来保证融合图像高频细节分量的一致性。

1 图像内容自适应的融合准则

小波变换具有变焦性、信息保持性,图像经小波变换,可得到具有时频局部性的小波系数。低频子带的小波系数主要表征源图像信号的强度,高频子带的小波系数主要表征源图像信号的纹理、结构信息,但它们对原始图像特征的表征不够集中。本文依据这些特性,构造了统计量,通过分析统计量与图像内容的内在联系,根据各个图像的具体情况,建立了图像内容自适应融合准则,使融合图像既保持全色图像的纹理信息,又保持多光谱图像的光谱信息。

1.1 图像的融合准则

在对图像进行小波变换之后,就应该确定图像的融合准则,并根据融合准则计算不同图像中小波系数的融合权值。所谓融合准则就是确定融合权值的方式。

在利用小波变换后的各级特征进行融合上,文献[7]总结的融合准则主要有逻辑方法(或、与、系数取大原则)、小波系数平均或加权法、局部相关匹配准则、能量准则和基于边缘提取准则等。其中前两种方法都是直接对独立像素进行运算,易将点噪声累加到融合后的数据中。局部相关匹配准则能较好

① 863 计划(2007AA0879)资助项目。

② 女,1967 年生,博士,教授;研究方向:图像处理,人工智能;联系人, E-mail: mali@263.net
(收稿日期:2008-11-20)

地考虑到区域特征,但用于灰度分布差别较大、相关性低的不同波段图像时会增添伪信息,如纹理、边缘等。能量准则是计算对应子带信号的局部能量,并以此为依据选择对应的子带信号。能量准则能较好地体现图像的整体性,但易丢失细节信息。基于边缘提取准则能较好地体现源图像的细节,但无法维持图像的整体性,影响视觉效果。综合以上分析,在融合过程中,融合规则及融合算子的选择对于融合的质量起决定性作用,这也是图像融合研究的难点之一。

1.2 本文的自适应融合准则

图像经二维小波变换分解一次之后,分别得到图像的低频信息 LL,以及水平、垂直、对角 3 个方向的高频信息 HL、LH、HH。LL 主要表征原图像信号的强度,HL、LH 和 HH 则主要表征原图像信号的纹理、结构信息,其中 HL 表示水平方向的变化,LH 表示垂直方向的变化,HH 表示对角方向的变换。但低频信息和高频信息对原始图像特征的表征不够集中。因此,需要在此基础上设计统计量,进一步描述图像的特性,建立小波系数的融合准则。对于多光谱与全色图像的融合而言,在对小波系数合并时既需要重点考虑融合图像的空间细节信息,同时又要考虑图像的光谱信息。

图像在局部区域上有意义的图像特征大都由一些基本的几何结构(如纹理、边缘、线条等)组成,这些基本特征表现出多尺度性和较强的方向性。本文根据各个图像的具体情况,对小波变换后的低频和高频信息采用不同融合规则,以实现更精确、充分的融合。

基于小波变换的自适应融合算法针对不同的频率域特点选择不同的融合规则。对高频部分,根据系数区的方向性分别采用水平、垂直、对角线三种 Sobel 方向边缘提取算子,选取各方向最大特征值区域的系数作为小波系数合并的权重因子;对低频部分以区域局部能量作为权重因子。最终,通过选取的图像特征或者特征组合自适应地确定高、低频融合系数和加权方式。实验结果表明,该方法在提高融合图像的信息量、增强融合图像的清晰度以及保留图像中的边缘细节等方面具有良好的融合效果。下面给出小波各频段系数的处理过程。

首先给出低频子带小波系数的处理过程。全色图像经过小波变换后,低频部分体现了主要辐射能量。对于多光谱图像而言,IHS 变换后的 I 分量是主要辐射能量。低频部分决定了图像的基本亮度辐射

能量,是影响融合图像光谱保持度的主要因素;对于全色图像来说,其主要来自全色传感器接收到的亮度辐射能量。本文对多光谱和全色图像的低频部分进行能量统计量计算,对于多光谱图像的低频分量 L_M 和全色图像的低频分量 L_P ,选取的统计特征量为局部区域的能量 E_M 和 E_P ,若局部区域窗口为 $N \times N$,则 E_M 和 E_P 的计算公式如下:

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

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

在式(1)和式(2)中, x, y 分别为小波系数平面行、列号, $F(i, j)$ 为能量提取算子, i, j 为能量提取算子模板的行、列号。一般情况下取 $N = 3$, 则 $F(i, j)$ 为 $\{0, 1, 0; 1, 2, 1; 0, 1, 0\}$ 。

为了保证融合图像与多光谱图像、全色图像都具有较好的相似性,获得较好的整体融合效果,本文提出的基于小波变换的自适应图像融合算法依据统计特征量的比例关系来计算融合权值,公式如下:

$$\begin{cases} C_M(x, y) = \frac{E_M(x, y)}{E_M(x, y) + E_P(x, y)} \\ C_P(x, y) = 1 - C_M(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

在式(3)中, E_M 和 E_P 分别为利用模板统计的局部能量值, $C_M(x, y)$ 表示在 (x, y) 点多光谱图像的小波系数融合权值, $C_P(x, y)$ 表示 (x, y) 点全色图像的小波系数融合权值,且 $C_M(x, y) + C_P(x, y) = 1$ 。根据 $C_M(x, y)$ 和 $C_P(x, y)$ 所确定的融合权值,就可以得到融合图像的低频小波系数 $LL_F(x, y)$:

$$LL_F(x, y) = C_M(x, y) \times LL_M(x, y) + C_P(x, y) \times LL_P(x, y) \quad (4)$$

在式(4)中, LL_M 和 LL_P 分别为融合前多光谱图像 I 分量和全色图像的低频小波系数。

下面给出高频子带小波系数的处理过程。图像经过小波变换后,得到的各级系数体现了图像在各尺度下的边缘特征,即多尺度边缘特征。对于图像融合而言,高频部分反映了图像的细节变化,高频分量需要增强图像的空间纹理、边缘等特征信息,同时还要保持图像的光谱信息不变,并且防止发生振铃效应。

本文对于高频的细节分量提取,特征量选为梯度算子,考虑到小波系数的方向性,选择了基于方向

性的梯度算子。利用 Sobel 算子提取多光谱和全色图像的小波系数细节分量三个方向的边缘特征,将小波分解后平面内的 3 个高频子带 LH、HL 和 HH 的小波系数分别采用垂直、水平和对角线三个方向 Sobel 算子提取垂直、水平和对角分量局部区域的边缘特征值。垂直方向特征提取算子采用对垂直边缘敏感的 Sobel 算子 $V(3,3) = \{1,2,1;0,0,0;-1,-2,-1\}$; 同样,水平方向特征提取算子采用对水平边缘敏感的 Sobel 边缘提取算子 $H(3,3) = \{1,0,-1;2,0,-2;1,0,-1\}$; 其他分量选择对角方向边缘敏感的梯度算子 $D(3,3) = \{-1,0,-1;0,4,0;-1,0,-1\}$; 选取各方向特征值较大区域的系数作为该位置的小波系数值。

以上述的方向提取算子计算特征统计量,统一记为 $G_M(x,y)$ 和 $G_P(x,y)$ 表示多光谱图像和全色图像中 (x,y) 位置的统计值,如式

$$\begin{cases} G_M(x,y) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i,j) \\ \quad Q_M(x - \frac{N}{2} + i, y - \frac{N}{2} + j) \\ G_P(x,y) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i,j) \\ \quad Q_P(x - \frac{N}{2} + i, y - \frac{N}{2} + j) \end{cases} \quad (5)$$

所示。其中,根据三个方向的不同, $P(i,j)$ 分别为垂直方向特征提取算子 $V(i,j)$ 、水平方向特征提取算子 $H(i,j)$ 和对角方向特征提取算子 $D(i,j)$, 而 $Q(x,y)$ 分别取多光谱或全色图像小波分解后的水平、垂直和对角分量边缘特征值的较大值。

然后依据特征统计量,以如下方式来计算融合权值:

$$\begin{cases} C_M(x,y) = \frac{G_M(x,y)}{G_M(x,y) + G_P(x,y)}, \\ \quad G_M(x,y) \leq G_P(x,y) \\ C_M(x,y) = 0, \quad \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_P(x,y) = \frac{G_P(x,y)}{G_M(x,y) + G_P(x,y)}, \\ \quad G_M(x,y) \leq G_P(x,y) \\ C_P(x,y) = 1, \quad \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

同样, $C_M(x,y)$ 表示 (x,y) 点的多光谱图像小波系数的融合权值, $C_P(x,y)$ 表示 (x,y) 点全色图像的小波系数的融合权值,且 $C_M(x,y) + C_P(x,y) = 1$ 。根据上面确定的融合权值,就可以获得融合图像的小波系数。

本文提出的自适应融合准则根据各个图像的具体情况为小波变换后的高频部分、低频部分选择不同的融合规则,通过选取的图像特征或者特征组合自适应地确定高、低频融合系数和加权方式。

2 小波系数的一致性选取准则

一致性检验的主要目的是为了防止发生振铃效应^[6]。改变图像关键位置的小波系数,会影响到图像内容的表达连续性和完整性,可能会导致图像内容的失真和引入噪声。

本文采用“少数服从多数”原则对融合图像高频细节分量进行一致性检验。若某个位置 (x,y) 的 8 个邻域中至少有 6 个小波系数来自于全色图像,则该位置的小波系数调整为全色图像的小波系数。

3 基于小波变换的自适应融合算法

本文提出了基于小波变换的自适应融合算法实现多光谱与全色图像的融合,该算法流程图见图 1,具体步骤如下:

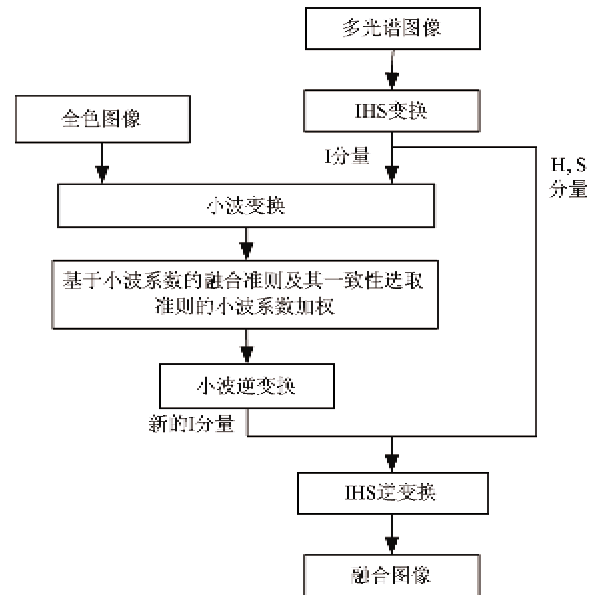


图 1 基于小波变换的自适应融合算法流程图

(1) 对多光谱图像进行 IHS 变换,提取表征地表辐射能量的 I 分量;

(2) 分别对多光谱图像的 I 分量和全色图像进行小波变换;

(3) 对变换后的高、低频子带的小波系数采用小波系数的融合准则及一致性选取准则进行加权融

合;

(4)对加权融合后的系数进行小波逆变换,得到新的 I 分量,再将该分量与原多光谱图像的 H 与 S 分量进行 IHS 逆变换,得到融合图像。

4 融合效果评价与实验结果

本文着重从图像融合如何提高目标的区分度和目标识别率的角度给出主观评价。客观上,采用图像光谱扭曲度指标来评价融合图像的光谱保持程度,利用描述图像细节信息的清晰度指标来评价融合图像的空间结构细节。

4.1 多光谱与全色图像融合效果主观评价

本文利用基于小波变换的自适应融合算法完成了多光谱与全色图像的融合,融合后的图像较好地

保持了多光谱图像的光谱特征和全色图像的空间结构细节特征,增加了目标的区分度,可以有效提高目标识别率。

图 2 中最显著的目标是一条蜿蜒在山区 V 字形的道路,观察图 2,可以发现在(c)中更容易识别许多目标。对比图 2 中矩形框区域,即目标区分度提高最显著的区域,可以发现:(a)是多光谱图像,分辨率低,矩形框区域中道路两旁的目标相当模糊,难以识别;(b)是全色图像,分辨率高,可以辨认出道路两旁目标的一些空间细节信息,但是,仅依靠这些信息还不足以识别目标;(c)是利用本文提出的基于小波变换的自适应融合算法实现的多光谱与全色的融合图像,可以看到,经过图像融合,目标的光谱信息与空间结构细节信息得以有机结合,提高了目标的区分度,容易识别出目标为道路两旁的树木。

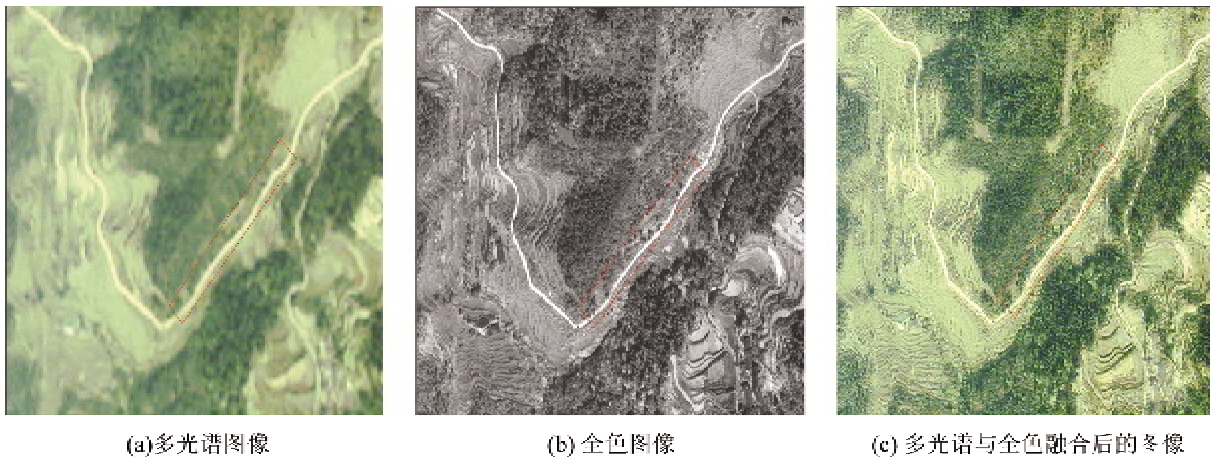


图 2 本文方法实现的多光谱与全色的融合图像

4.2 多光谱与全色图像融合效果客观评价

光谱保持度是指图像融合后光谱的保持程度,是一种定性评价,没有合适的定量计算公式。光谱保持度是与光谱扭曲度相对的概念,光谱扭曲度越大,则光谱保持度越小,反之亦然。光谱扭曲度直接反映了融合图像相对于多光谱图像的光谱失真程度,可以通过计算 RGB 坐标系上 R、G、B 三个分量的平均值 I (亮度)的变化情况来度量,具体定义为

$$D = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \left| \frac{I_{i,j} - I'_{i,j}}{I_{i,j}} \right| \quad (8)$$

其中, $n \times m$ 为图像的大小, $I_{i,j}$ 、 $I'_{i,j}$ 分别为融合图像和原多光谱图像上 (i,j) 点的亮度值。

清晰度反映了融合图像的空间结构细节保持程度,采用平均梯度来衡量,图像的平均梯度计算公式为

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2)/2} \quad (9)$$

其中, ΔI_x 与 ΔI_y 分别为 x 和 y 方向上的差分, n 为图像的总像素数目。

多光谱与全色图像融合质量评价的准则是:对于同一组融合实验数据,若某种融合方法获得的融合图像的清晰度相对较大、光谱扭曲程度相对较小,则说明该融合方法的性能相对较好。

本文对提出的融合算法进行了相关实验,选取不同地形的多幅图像进行了融合测试,主要选取了来自 IKONOS、SPOT-5、QuickBird 的城市、村落和山区的多光谱和全色图像,较全面地测试了融合功能。图 3 给出了本系统实现的多种融合方法效果图,其中(a)为全色图像,(b)为多光谱图像,(c)为 IHS 变换融合,(d)为传统二进小波融合方法,(e)为本文所

采用的方法。

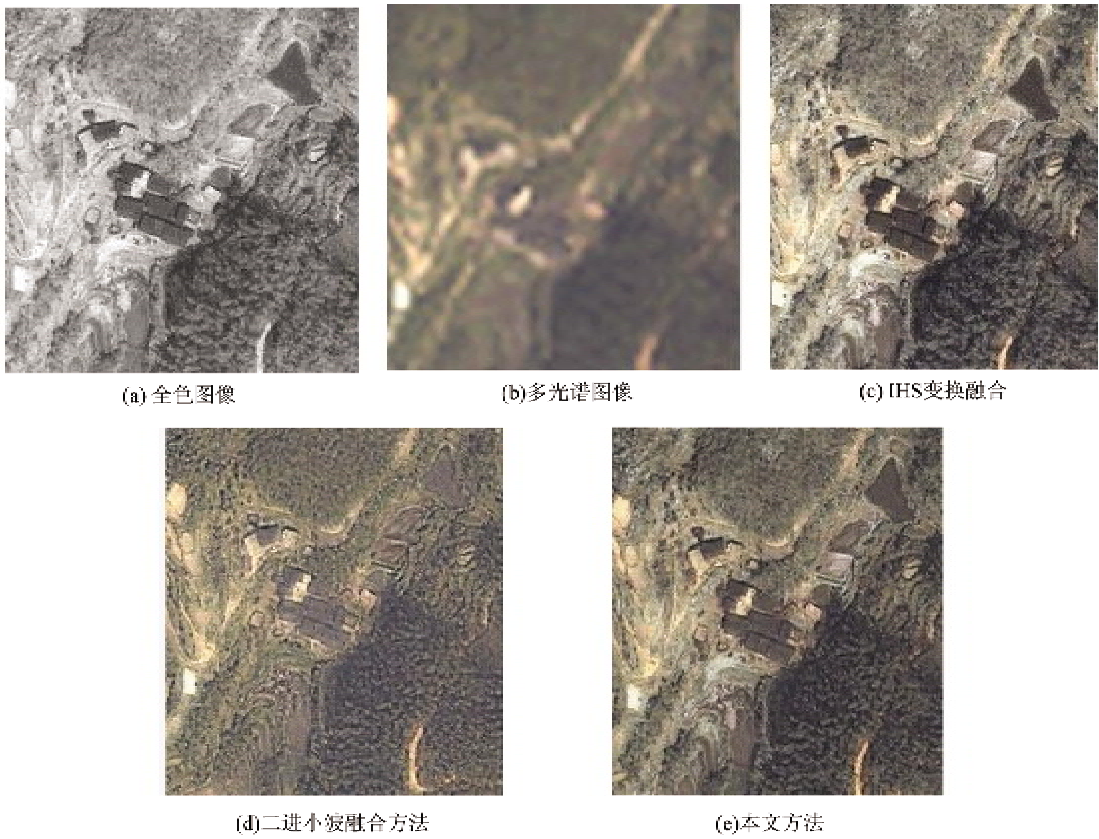


图3 本文所实现的多种融合效果图对比

实验中采用了5组图像作为实验数据,实验结果表明,与IHS、二进小波融合方法相比,本文提出的基于小波变换自适应融合算法保留了多光谱图像的光谱信息特征,充分利用了高空间分辨率全色图像的空间结构细节特征信息,提高了融合图像的主观效果,并采用光谱扭曲度和清晰度客观评价融合效果,评价结果见表1。

从表1可以看到,相对于传统的IHS融合方法和二进小波融合方法,基于小波变换的自适应融合算法的光谱扭曲度较其它两种方法低,其清晰度指标比其它两种算法高。综合所有指标而言,本文提出的基于小波变换的自适应融合算法达到了整体上的最优。

表1 多光谱与全色图像融合客观评价表

测试图像			本文算法的测试结果		IHS融合结果		二进小波融合结果	
名称	类型	分辨率	光谱扭曲度	清晰度	光谱扭曲度	清晰度	光谱扭曲度	清晰度
Mul1.tif	多光谱	10m	20.375	9.536	25.769	7.928	21.975	7.927
Pan1.tif	全色	10m						
Mul2.tif	多光谱	4m	15.0911	8.847	28.799	7.085	20.5227	7.085
Pan2.tif	全色	1m						
Mul3.tif	多光谱	1m	31.869	5.112	46.346	4.204	37.799	4.270
Pan3.tif	全色	1m						
Mul4.tif	多光谱	10m	18.307	9.475	24.498	7.616	20.307	7.092
Pan4.tif	全色	2.5m						
Mul5.tif	多光谱	4m	21.554	9.535	40.486	7.918	25.420	7.889
Pan5.tif	全色	1m						

5 结 论

针对当前高分辨率遥感图像融合在提高空间分辨率时存在的光谱扭曲现象,本文提出了基于小波变换的自适应融合方法,并利用清晰度和光谱扭曲度这两个客观评价指标分析不同方法的融合效果。实验结果表明,本文提出的融合方法在提高图像分辨率的同时,减少了融合图像的光谱扭曲度,有利于图像分割、目标识别等后续处理。该方法有效地解决了 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的问题。

参考文献

- [1] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform. *Graphical Models Image Process*, 1995, 57(3): 235-245
- [2] Wang Z J, Ziou D, Armenakis C. A comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(6): 1391-1402
- [3] 常化文,陈春香.一种 IHS 变换图像融合法的改进算法. *微计算机信息*, 2007, 23(3): 280-282
- [4] González M, Saleta J, Catalán R. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 23(18): 1291-1299
- [5] Wanga L, Sousab W P, Gong P, et al. Comparison of Ikonos and Quickbird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 9: 432-440
- [6] Pajares G, de la Cruz J M. A wavelet-based image fusion tutorial. *Pattern Recognition*, 2004, 37(9): 1855-1872
- [7] Piella G. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions. *Information Fusion*, 2003, 9: 259-280

An adaptive image fusion algorithm based on wavelet transform

Zhang Yongmei^{* **}, Tian Yue^{*}, Li Bo^{*}

(^{*} Digital Media Laboratory, School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

(^{**} School of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract

Aiming at present fusion methods, worse tradeoff between spectrum information and spatial details, the paper establishes the image content self-adaptation fusion rules and conformability choice criteria, and realizes the fusion system between multi-spectral and panchromatic remote sensing images. The fusion images are evaluated by subjective and objective methods. The paper subjectively appraises the fusion images on how to improve the discrimination between objects and background, and the recognition efficiency. The fusion effect is objectively analyzed by spectrum resolution and definition. The experimental data show that this algorithm makes the best of spatial detail feature, image edge and directional feature information for panchromatic images, retains spectrum information for multi-spectral images, achieves better visual quality, and it is in favor of information extraction and image interpretation. The experiments prove that this algorithm is better than IHS and traditional dyadic wavelet fusion methods in spectrum maintenance and spatial detail reservation.

Key words: wavelet coefficient, adaptive fusion, spectrum torsion resistance, definition