

基于小波包的遥感图像融合新算法

李 慧, 林克正

(哈尔滨理工大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:提出了一种基于正交小波包的局域方差遥感图像融合新算法. 该算法利用正交小波包变换, 把图像分解成不同尺度的低频和高频部分, 采用小波包局域窗口和子区域窗口统计, 把小波包系数分类成边缘和非边缘系数. 在融合处理中, 把低频图像的小波包系数平均值作为融合后的低频系数, 高频细节系数根据不同区域特征选择方法以及对应图像小波包系数的多窗口区域方差, 来确定融合后高频小波包系数. 实验结果表明, 这种方法能够在保留图像微小细节方面获得满意的结果, 有效且优于其他图像融合算法.

关键词:遥感图像融合; 小波包变换; 多分辨率分析; 局域方差

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)05-0068-04

New Remote Sensing Image Fusion Based on Wavelet Packet Algorithm

LI Hui, LIN Ke-zheng

(School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper we presented a new wavelet packet transform method based on local deviation. Wavelet packet transform decomposed an image into low frequency hand and high frequency hand in different level; local window and local sub-window statistic in the wavelet domain were used to further classify the wavelet coefficients into the edge and non-edge coefficients. In the fusion processing, the fused approximate coefficients were obtained by average method, the fused detailed coefficients were obtained by several different area-based feature selection method and the multi-window local deviation of the corresponding image wavelet packet coefficients. Experimental results show that the proposed algorithm can retain subtle image detail and achieve an excellent effect and the new image fusion algorithm provides a performance better than that of other methods.

Key words: remote sensing image fusion; wavelet packet transform; multi-resolution analysis; local deviation

0 引 言

遥感图像融合就是将不同空间与光谱分辨率图像按特定的算法进行处理, 使所产生的新图像同时具有原来图像的多光谱特性以及高空间分辨率, 以

提高遥感图像的判读与分析精确度. 常用的遥感图像融合方法有 HS 变换法、PCA 变换法、Brovey 乘积法等^[1]. 这些方法虽然能较好地增加多光谱图像的空间分辨率, 但当高分辨率图像与多光谱图像波段之间的光谱响应范围不一致时^[2], 融合后的影像色彩畸变严重. 小波包的遥感图像融合算法很好地解

收稿日期: 2008-09-03

作者简介: 李 慧 (1981—), 女, 硕士研究生, E-mail: girl-lihui@163.com;

林克正 (1962—), 男, 教授, 硕士生导师.

决了这个问题,其能同时对图像的低频和低频部分进行进一步分解,充分利用了图像所用频段的信息.在图像融合领域已经有研究证明,基于不同的融合规则对融合效果有重要影响^[3].文中利用小波包对遥感图像进行融合,采用窗口局域统计方差实现高频图像的有效边缘检测,这样可保留图像的真实边缘细节部分,可有效地将来自不同图像的特征与细节有机融合起来,使之形成立体数据,并获得与人的视觉特性接近的融合效果,同时与其他融合算法的图像融合质量进行比较.

1 小波包变换分析

小波包分析是由 Coifman 等人^[4]在小波分析的基础上提出的,由于正交多分辨率分析的尺度是按二进制变化而来的,所以在高频频段的频率分辨率较差,而在低频频段,其时间分辨率较差,即对图像函数频带的划分具有等带宽比结构,这种“高频低分辨”现象正是正交小波基的一大缺陷^[5].正交小波包分析能够为图像函数提供一种更加精细的分析方法,将频带进行多层次划分,对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解,从而提高了高频段的频率分辨率,克服了正交小波变换的不足.

正交小波包递推分解关系为

$$\begin{aligned} f_{j+1}^{(0)}(t) &= f_j^{(2l)}(t) + f_j^{(2l+1)}(t) \\ f_j^{(2l)}(t) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k}^{(2l)} \mu_{j,k,2l}(t) \\ f_j^{(2l+1)}(t) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k}^{(2l)} \mu_{j,k,2l+1}(t) \\ d_{j,k}^{(2l)}(t) &= \sum_{m \in \mathbb{Z}} h_{m-2n} d_{j+1,m}^l(t) \\ d_{j,k}^{(2l+1)}(t) &= \sum_{m \in \mathbb{Z}} g_{m-2n} d_{j+1,m}^l(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\mu_{j,k,2l+1}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \mu_l(2^j t - k)$ 表示尺度为 2^{-j} 时,时间中心为 $2^{-j}k$,震荡次数(过零点次数)为 l 的小波图像函数; $f_j^{(2l)}(t)$ 为图像函数在小波包空间 $\text{Close span}\{\mu_{j,k,2l}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 的正交投影, $f_j^{(2l+1)}(t)$ 为图像函数在 $\text{Close span}\{\mu_{j,k,2l+1}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 上的正交投影,数列 $\{d_{j,k}^{(2l)}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 为 $f_j^{(2l)}(t)$ 在小波包基 $\{\mu_{j,k,2l}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 下的展开系数;数列 $\{d_{j,k}^{(2l+1)}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 为 $f_j^{(2l+1)}(t)$ 在小波包基 $\{\mu_{j,k,2l+1}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 下的展开系数.

设原图像函数为 $f_j^{(0)}(t)$,经过 p 级分解,有

$$f_j^{(0)}(t) = f_{j-p}^{(0)}(t) + f_{j-p}^{(1)}(t) + f_{j-p}^{(2)}(t) + \cdots + f_{j-p}^{(2p-1)}(t) \quad (2)$$

在同一尺度下,各个正交投影 $\{f_{j-p}^{(l)}(t); l=0, 1, \cdots, 2^{p-1}\}$ 具有相同的带宽.即对于同一层次的正交小波包分解具有相同的频率分辨率.图像函数的正交小波包离散递推重建算法为

$$d_{j+1}^l(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} (h_{m-2k}) d_{j,k}^{(2l)}(t) + (g_{m-2k}) d_{j,k}^{(2l+1)}(t) \quad (3)$$

合成的结果 $\{d_{j+1}^l(t); m \in \mathbb{Z}\}$ 实际上是 $f(t)$ 小波包空间 $\text{Close span}\{\mu_{j+1,k}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 上的正交投影 $f_{j+1}^l(t)$ 按小波包基 $\{\mu_{j,k,l}(t); k \in \mathbb{Z}\}$ 展开的系数.

基于小波包变换的图像融合基本思想是在对源图像进行配准的基础上,首先将源图像进行小波包分解,然后依据不同的融合规则分别对分解后的低频与高频系数进行融合处理,最后经过相应的小波包逆变换重构获得融合后的图像.

2 基于局域方差的融合算法

文中提出了基于窗口局域方差的融合算法,以减小源图像的预处理要求,提取图像的边缘点以更好地体现图像的细节,以图像的边缘为参考,围绕边缘建立融合策略,实现细节与整体性视觉的有机融合.这里采用基于小波包变换局域方差的融合规则,将小波包分解后的高频子图像分成一系列小区域,通过滑动邻域操作分别计算各个小块的方差.方差是一个反差(对比度)的测度,它反映图像细节的信息量,因此可作为融合的依据.

在小波包变换中,不同尺度、不同分辨率的高频子带图像一般分解为水平方向 LH、垂直方向 HL 及对角方向 HH 3 个子带图像.而各子带图像的小波包系数分别代表水平方向、垂直方向及对角方向的边缘细节特征.如果 LH 子带图像包含水平方向的边缘特性,那么水平区域子窗口的小波包系数的方差应当大于整个区域窗口的小波包系数的方差;同样,如果 HL 子带图像包含垂直方向的边缘特性,那么垂直区域子窗口的小波包系数的方差应当大于整个区域窗口的小波包系数的方差;对于对角线方向的 HH 子带图像,如果两个对角线区域子窗口内小波包系数方差都大于对应整个区域内小波包系数的方差,表示具有对角方向的边缘特性.设子带小波包系数中心点 (i, j) 的标准方差为

$$\delta(i, j) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k, l \in \mathbb{Z}} (D(k, l) - E[S(i, j)])^2 \quad (4)$$

其中: $S(i, j)$ 为以 $D(i, j)$ 为中心的方形小波包系数区域, $E[S(i, j)]$ 表示区域内小波包系数的均值, N 为这区域内小波包系数的个数.

设小波包系数区域中心点 $D(i, j)$ 的主窗口区域和子窗口区域方差分别为 $\delta_b(i, j)$ 和 $\delta_{sd}(i, j)$, 则利用主窗口区域和子窗口区域方差 $\delta_b(i, j)$ 和 $\delta_{sd}(i, j)$ 的大小, 就可将小波包系数分类为重要边缘点和非重要边缘点, 为了保持融合后的各个频带数据具有一致性, 应采用概率方法对其进行一致性检测与调整. 调整原理是在频带数据融合时对每个像素进行如下处理: 如果某个像素的 8 邻域中有多数像素是重要边缘点, 说明该区域是有效边缘区. 如果某个像素的 8 邻域中多数像素为非重要的边缘区, 说明该区域是有效平滑区. 中心点 $D(i, j)$ 的方差可取为

$$\delta(i, j) = \begin{cases} \delta_{sd}(i, j) & \delta_{sd}(i, j) \geq \delta_b(i, j) \\ \delta_b(i, j) & \delta_{sd}(i, j) < \delta_b(i, j) \end{cases} \quad (5)$$

基于局域方差的小波包融合全色图像和多光谱图像的流程图如图 1 所示.

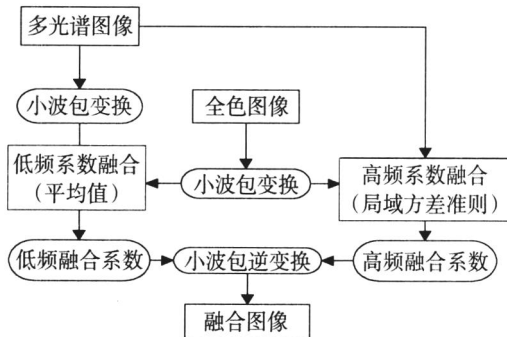


图 1 基于小波包局域方差图像融合算法的流程图

融合算法的具体步骤如下:

1) 对待融合的源图像多光谱图像 A 和全色图像 B 分别进行正交小波包变换分解生成低频图像和一系列不同尺度的高频图像.

2) 与多光谱图像 A 、全色图像 B 对应的低频小波包系数进行平均, 作为融合后图像的低频小波包系数.

3) 利用式 (4) 和式 (5) 分别计算待融合高频子图像对应局部小方差.

4) 然后利用局部方差原理进行对应的高频子图像的融合, 设融合后图像高频为 $f(i, j)$, 则有效边缘区为

$$f(i, j) = \begin{cases} D_A(i, j) & \delta_A(i, j) \geq \delta_b(i, j) \\ D_B(i, j) & \delta_A(i, j) < \delta_b(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

有效平滑区为

$$f(i, j) = \left(\frac{\delta_A}{\delta_A + \delta_b} D_A(i, j) + \frac{\delta_b}{\delta_A + \delta_b} D_B(i, j) \right)^2 \quad (7)$$

5) 最后将融合变换获得的小波包系数进行小波包的逆变换, 即可得到融合后的图像.

3 实验结果与分析

本文使用的是经过几何校正、图像配准等预处理步骤的 SPOT 全色图像和 Landsat-TM 多光谱图像进行试验. 图 2(a)、(d) 分别给出了原始 TM 图像、原始 SPOT 图像、小波包常规局域方差融合图像、本文方法的融合图像. 目前图像融合质量的评价并没有一个全面客观的标准, 通常根据应用目的的不同可以从主观目视和客观统计数据两个方面来评价.

从主观目视判决可以清楚看到, 图 2(d) 融合效果优于图 2(c). 本文方法的融合图像纹理清楚, 边缘轮廓也清晰可见, 在有效保留了多光谱图像信息基础上, 显著地提高了图像的空间细节信息量, 从而达到了融合的目的.

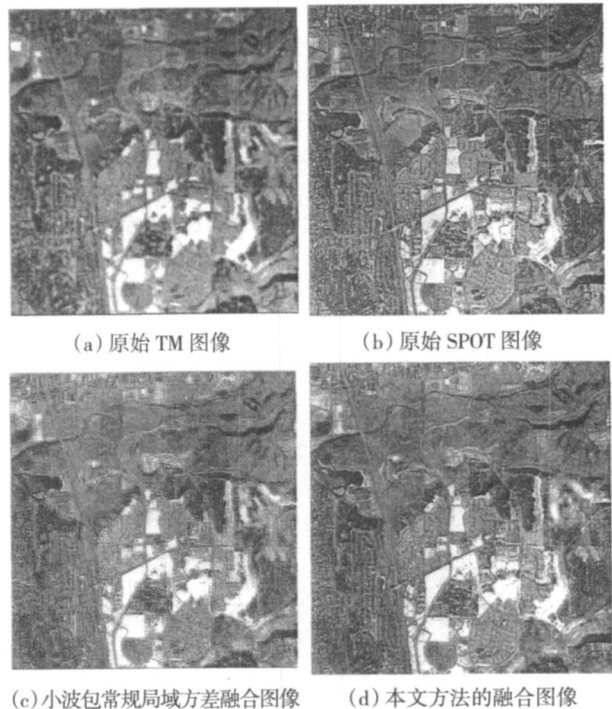


图 2 原始图像和融合结果

在客观评价方面, 使用了信息熵和交叉熵、标准差等^[6-7]指标来说明本文算法与其他算法的融合结果的比较情况. 信息熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标, 融合图像的熵越大, 说明融合图像的

信息量增加的越多,融合图像所含的信息越丰富,融合质量越好;交叉熵是评价两幅图像差别的重要指标.对融合前的源图像和融合结果图像求交叉熵,即可得到融合图像与源图像的差异.差异越小,则该融合方法从源图像提取的信息量越多.常用平均交叉熵和均方根交叉熵的关键指标来评价两幅图像的差异,它们直接反映了两幅图像对应像素的差异,差异越小,则融合方法从原始图像中提取的信息越多;标准差反映了图像灰度相对于灰度平均值的离散情况,若标准差大,则图像灰度级分布分散,图像的反差大,可以看出更多的信息.标准差小,图像反差小,对比度不大,色调单一均匀,看不出太多的信息;均值为图像中像素的灰度平均值,对人眼反映为平均亮度.如果均值适中,则视觉效果良好.表 1 给出了基于不同融合规则算法的融合图像定量指标比较.

表 1 基于不同融合规则算法的融合图像定量指标比较

融合算法	标准差	熵值	平均交叉熵	均方根交叉熵
平均值法	23.68	12.67	0.298	0.352
区域能量	29.16	12.97	0.399	0.391
局域方差	38.13	13.30	0.338	0.345
本文融合法	38.35	13.46	0.339	0.347

小波包变换对图像的低频和低频部分同时进行分解,能够将变宽的频谱进一步分割变细,提高频谱分辨率,充分利用了所有频段的信息.由表 1 可以看出,小波包系数平均值融合策略考虑了水平方向、垂直方向、对角方向的小波包系数所代表的方向特征,对原始图像的准确配准提出了很高的要求,对于噪声和相干斑噪声的消除要求也高,虽然交叉熵较小,但熵值和标准差也较小,所以视觉效果差.利用小波包变换的区域能量融合策略降低了对图像的预处理,区域能量分布实现图像的融合,考虑了图像的整体特性,但对图像的细节反映不够细致,影响了融合质量.常规局域方差融合策略从三个方向对高频子图进行融合,保留了图像的细节,但是对整体性视觉

效果考虑不多.本文提出的融合策略考虑了不同层次、不同分辨率、不同方向的细节特征,将图像分为边缘区和平滑区,对不同区域采取不同的融合规则,既考虑了不同方向细节特点,使细节更加丰富和真实,同时又考虑了整体性视觉效果,所以融合效果较好.

4 结 语

本文提出了小波包变换采用局域窗口方差融合策略对图像实现融合,并与小波包变换方法的其他融合策略的融合图像进行了分析比较.总体上说小波包变换的多分辨图像分解融合效果是比较好的,但文中提出的融合算法考虑了不同方向的图像细节,使图像细节更真实、更丰富,减小了对源图像的预处理要求,使图像在整体上有较好的视觉效果.

参 考 文 献:

- [1] 刘 哲,都重阳,刘晓翔,等.多光谱图像与全色图像的像素级融合研究[J].数据采集与处理,2003,18(3):20-25.
- [2] POHL C, GENDEREN J Lva. Multi-sensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods, and Applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5): 823-854.
- [3] GARZELL IA. Possibilities and Limitations of the Use of Wavelets in Image Fusion[C]//IGARSS 2002, Toronto, Canada, 2002; Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 66-68.
- [4] COIFMAN R, WICKERHAUSER M. Entropy-based Algorithms for Best Bases Selection[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 713-718.
- [5] 程英蕾,赵荣椿.一种基于小波包变换的 SAR 图像与 TM 图像融合方法[J].西北工业大学学报,2005,23(4):529-533.
- [6] 李树涛,王耀南,张昌凡.多传感器图像融合的客观评价与分析[J].仪器仪表学报,2002,23(6):651-654.
- [7] SHIW Z, ZHU C Q, TIAN Y, et al. Wavelet-based Image Fusion and Quality Assessment[J]. Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 6: 241-251.

(编辑:付长缨)