

文章编号:1001-9014(2005)01-0034-05

一种基于小波变换的可调节遥感影像融合方法

邓磊, 陈云浩, 李京
(北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要:光谱保持和高分辨率保留是影像融合的两个重要问题,不同的应用可能对融合的结果有不同的要求.提出了一种基于小波变换的可调节遥感影像融合方法.该方法首先分别将高分辨率影像和多光谱影像进行小波分解,然后根据影像的特点,在小波域内进行影像融合,最后通过小波逆变换得到融合结果.通过引入可调节参数,该方法可以在细节保留和光谱保持两方面达到不同程度的平衡,在某些参数组合下,融合图像的目视效果和统计指标可以达到甚至超过传统的小波融合法、IHS变换和主成分变换融合法的效果.

关键词:图像融合;小波变换;可调节性;合成孔径雷达图像;TM图像
中图分类号:TP751 **文献标识码:**A

CONTROLLABLE REMOTE SENSING IMAGE FUSION METHOD BASED ON WAVELET TRANSFORM

DENG Lei, CHEN Yun-Hao, LI Jing
(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Spectral characteristics preservation and high spatial resolution retention are two key issues in image fusion. Different applications may require different balances between the two issues. A new controllable remote sensing image fusion method based on wavelet transform was proposed. At first, the two images were decomposed into sub-images with wavelet transform. Secondly, these sub-images were fused in wavelet space based on their characteristics. Lastly, a fused image was achieved by inverse wavelet transform. By introducing the parameters, the balance between spectral characteristics preservation and high spatial resolution retention can be achieved at different levels. With some combination of the parameters, the visual effects and the statistical parameters indicate that the fused result is slightly better than, or comparable to, those of the commonly used image fusion methods.

Key words: image fusion; wavelet transform; controllability; SAR image; TM image

引言

现代遥感技术正在向高光谱分辨率、高空间分辨率和高时间分辨率方向发展.遥感数据融合的目的是将单一传感器的多波段信息或不同类别传感器所提供的信息加以综合,改善遥感信息提取的及时性和可靠性,提高数据的使用效率^[1].如何充分利用同一地区各种遥感影像的信息是当前研究热点之一.目前图像融合的方法主要有IHS变换融合法^[2]、PC(主成分)变换融合法^[3,4]、小波变换融合法等.

以上各种融合方法都可以在一定程度上实现多光谱与高分辨率影像的融合,但是他们都有一个共

同的缺点,即:对特定的方法来说,只能得到特定的融合效果,无法根据影像的特点和实际应用的需要,在高分辨率保留和光谱保持之间进行动态的调整.本文提出了基于小波变换的可调节遥感影像融合方法.该方法提供可调节参数,将影像在小波域内进行融合,从而使得融合影像可以在光谱保持能力和高分辨率保留能力之间达到不同程度的平衡.

1 基于小波变换的可调节遥感影像融合方法

首先,将高分辨率影像A与多光谱影像B分别作塔式小波变换,得到低频近似分量 $S_A(2^j; x, y)$,

收稿日期:2004-06-20,修回日期:2004-10-20

Received date: 2004-06-20, revised date: 2004-10-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(2002AA130020,2002AA134090);高等学校博士点专项科研基金(20030027014).

作者简介:邓磊(1976-),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事遥感图像处理研究.

$S_B(2^j; x, y)$ 和 高频细节分量 $W_{kA}(2^j; x, y)$, $W_{kB}(2^j; x, y)$, 其中 $k=1, 2, 3$ 表示 3 个方向; $j=1, 2, \dots, J$ 表示不同的分辨率. 我们称 $S_A(2^j; x, y)$, $S_B(2^j; x, y)$, $W_{kA}(2^j; x, y)$ 与 $W_{kB}(2^j; x, y)$ 为子图像.

我们构造一个量 $R_k(2^j; x, y)$, 用以反映在每一个分解水平上两幅影像对应的子图像的细节信息的相对大小:

$$R_k(2^j; x, y) = \frac{D_{kA}(2^j; x, y)}{D_{kB}(2^j; x, y)}, \quad (1)$$

其中, $D_{kA}(2^j; x, y)$ 与 $D_{kB}(2^j; x, y)$ 分别是 $W_{kA}(2^j; x, y)$ 与 $W_{kB}(2^j; x, y)$ 中以 (x, y) 为中心像元的 $n \times n$, $n=3, 5, \dots, K$ 窗口内的方差.

接下来, 我们利用公式(2)将 $R_k(2^j; x, y)$ 进行归一化处理, 得到 $R_k(2^j; x, y)$ 在 0~1 之间的值.

$$R_{k_normal}(2^j; x, y) = \frac{R_k(2^j; x, y) - R_{kmin}(2^j)}{R_{kmax}(2^j) - R_{kmin}(2^j)}, \quad (2)$$

其中, $R_{k_normal}(2^j; x, y)$ 是归一化的 $R_k(2^j; x, y)$, $R_{kmin}(2^j)$ 是 $R_k(2^j; x, y)$ 的最小值, $R_{kmax}(2^j)$ 是 $R_k(2^j; x, y)$ 的最大值. 为了综合考虑两幅图像的细节信息, 使用公式(3)进行融合, 得到融合的细节图像.

$$F_k(2^j; x, y) = q \times W_{kA}(2^j; x, y) + (1 - q) \times W_{kB}(2^j; x, y), \quad (3)$$

其中, $F_k(2^j; x, y)$ 是融合后的子图像的滑动窗口中心点 (x, y) 的值, q 值按照公式(4)来取值:

$$q = \begin{cases} 0 & R_{k_normal} \leq a \\ \frac{R_{k_normal} - a}{b - a} & a < R_{k_normal} < b \\ 1 & R_{k_normal} \geq b \end{cases}, \quad (4)$$

式中, a 和 b 是可调节参数, 满足: $0 \leq a \leq b \leq 1$. 对于影像的低频近似分量也采用同样的方法来处理. 最后, 进行小波逆变换, 得到融合影像.

通过对上述公式的分析可知: 融合的效果取决于 R_{k_normal} , 如果 R_{k_normal} 接近于 0, 则融合影像的光谱保持能力较强, 而细节信息的保留则相对减弱; 如果 R_{k_normal} 接近于 1, 则融合影像的细节保留能力增强, 而光谱保持能力下降. 在公式(4)中引入 2 个参数 a 和 b , 通过调节 a 和 b , 可以在细节保留和光谱保持两方面进行调整: 如果 R_{k_normal} 小于或等于 a , 那么 R_{k_normal} 就等于 0, 融合影像中心点的值将取决于多光谱影像; 如果 R_{k_normal} 大于或等于 b , 则 R_{k_normal} 等于 1, 中心点的值将完全由高分辨率影像所决定; 否则,

就使用高分辨率影像和多光谱影像的加权值作为融合结果.

2 试验结果与评价

为了验证新方法, 我们采用徐州附近经过配准的 SAR 与 TM 影像进行试验. 其中, SAR 图像的分辨率为 8.4 米 \times 8.4 米, TM 图像的分辨率为 30 米 \times 30 米. 两幅图像均使用三次内插方法重采样至 12.5 米 \times 12.5 米, 采样后图像大小均为 250 像素 \times 250 像素. 图 1(a) 是 SAR 图像, 图 1(b) 是 TM 第 3 波段的图像. 图 1(c) 和图 1(d) 分别是由 IHS 融合法和 PC 融合法得到的图像, 小波直接融合法以及基于特征的小波融合法得到的结果分别如图 1(e) 和图 1(f) 所示, 使用不同参数的新方法融合图像如图 1(g)~图 1(l) 所示. 其中, 小波变换均采用 db4 小波基, 分解层数为 2 层.

图像融合结果的评价分为主观评价和客观评价. 主观评价通过目视效果进行分析; 客观评价利用图像的统计参数进行判定.

2.1 基于目视判读的比较和分析

在视觉效果上, 各种融合方法的结果在空间细节信息上均有所改善, 并在一定程度上能够保持光谱信息. 随着融合参数的改变, 新方法的融合结果有很大的不同. a 和 b 的值越小, 融合图像的细节和纹理信息越清晰, 而色调与 TM 图像偏离的越大; a 和 b 的值越大, 融合图像的纹理信息越少, 而色调越接近于 TM 图像. 这与理论分析的结果一致. PC 融合法在引入 SAR 图像细节信息的同时, 也引入了 SAR 图像的斑点噪声, 覆盖了某些有用信息. 传统的小波方法在产生了轻微的斑块效应, 而新方法在引入纹理信息的同时, 抑制了噪声的产生, 影像看起来比较平滑、自然. 因此, 新方法优于传统的小波融合法、PC 融合法和 IHS 融合法.

2.2 基于数理统计的分析与评价

对于遥感图像融合效果的评价, 应综合考虑空间细节信息的增强与光谱信息的保持. 所以, 一般应综合利用两类统计参数来进行分析与评价: 一类反映空间细节信息, 如方差、信息熵和清晰度; 另一类反映光谱信息, 如扭曲程度、偏差指数与相关系数.

① 均值与标准方差: 统计均值 μ 、标准差 定义为:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2, \quad (6)$$

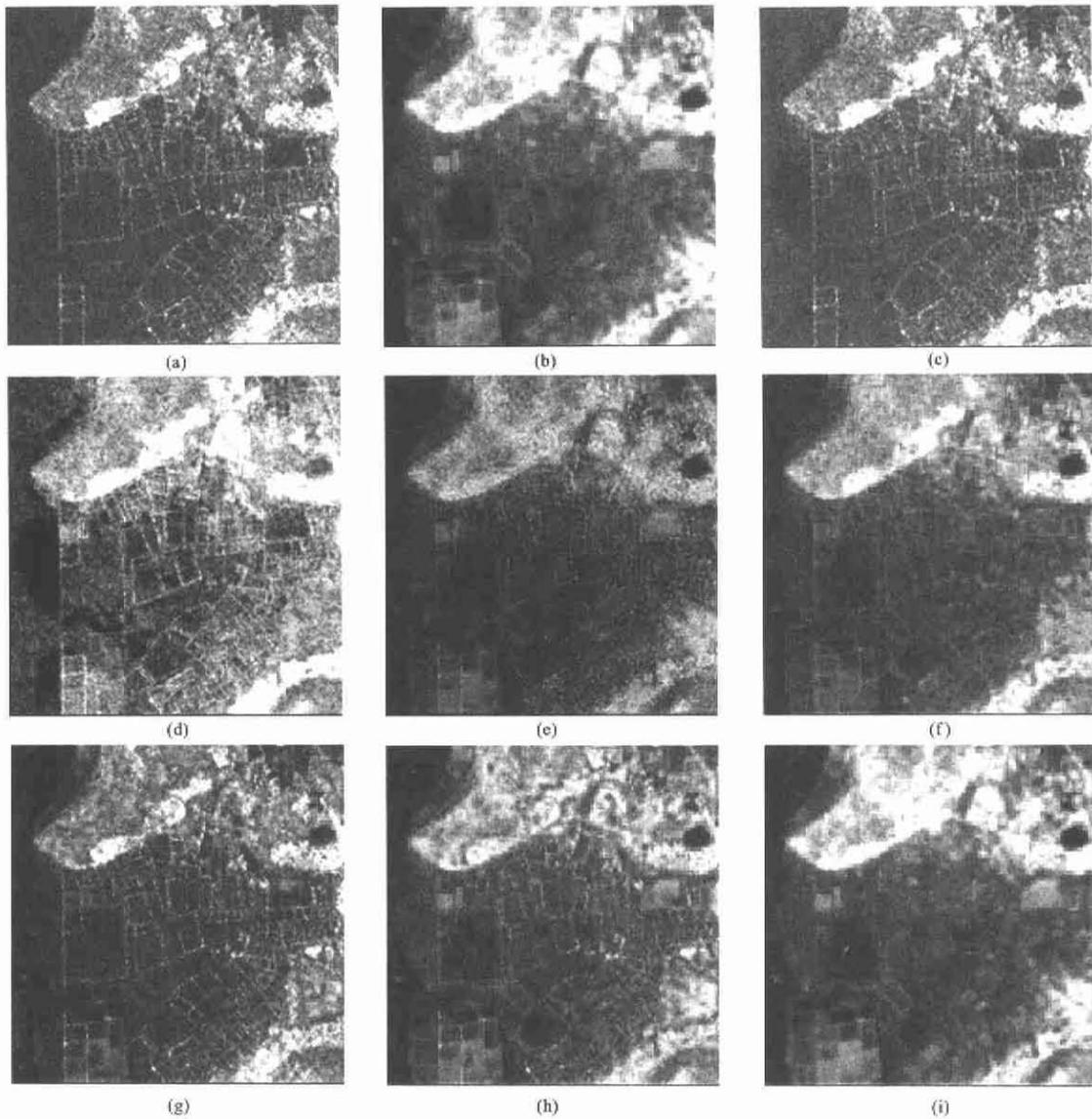


图1 SAR影像、TM影像以及不同融合方法的融合结果

Fig.1 SAR image, TM images, and the result images by different fusing methods

(a) SAR 图像;(b) TM3 图像;(c) IHS 变换法融合图像(第三波段);(d) PC 变换融合图像(第三波段);(e) 小波变换法融合图像;(f) 基于特征的小波变换法融合图像;(g) 新方法 $a=0.001$ $b=0.1$;(h) 新方法 $a=0.07$ $b=0.2$;(i) 新方法 $a=0.7$ $b=0.9$

(a) SAR image;(b) TM3 bands;(c) fused image by IHS (band3);(d) fused image by PC (band3);(e) fused image by Wavelet (db4, level 2);(f) fused image by Feature-based Wavelet;(g) new method $a=0.001$ $b=0.1$;(h) new method $a=0.07$ $b=0.2$;(i) new method $a=0.7$ $b=0.9$

式中 n 为样本总数; x_i 为第 i 个样本值. 均值反映平均亮度, 方差反映灰度相对于均值的离散情况.

② 信息熵: 对于灰度范围 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 的图像直方图, p_i 为灰度值等于 i 的像素数与图像总像素数之比, L 为灰度级总数, 其信息熵定义为:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \ln p_i \quad (7)$$

熵的大小反应了图像携带的信息量的多少. 融合图像的熵值越大, 说明融合图像携带的信息量越大.

③ 清晰度: 图像清晰度采用梯度法来衡量:

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum \sqrt{(\Delta I_x)^2 + (\Delta I_y)^2} / 2 \quad (8)$$

其中, I_x 与 I_y 分别为 x 与 y 方向上的差分, n 为图像的大小. \bar{g} 越大, 则图像的清晰度越高.

④ 光谱扭曲程度: 图像光谱扭曲程度直接反映了多光谱图像的光谱失真程度, 其定义为:

$$D = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j |V'_{i,j} - V_{i,j}| \quad (9)$$

其中, n 为图像的大小, $V'_{i,j}$ 和 $V_{i,j}$ 分别为融合后

和原始图像上 (i, j) 点的灰度值。

⑤ 偏差指数:偏差指数由融合前的亮度值 I 和融合后的亮度值 I' 经下式计算:

$$D_{index} = \frac{1}{n} \sum_{i,j} \frac{|I(i,j) - I'(i,j)|}{I(i,j)}, \quad (10)$$

n 为图像的大小,偏差指数用来表示融合图像和低分辨率多光谱图像的偏离程度。

⑥ 图像的相关系数:图像的相关系数反映了两幅图像的相关程度,通过比较融合增强前后的图像相关系数可以看出多光谱图像的光谱信息的改变程度。

$$C(f, g) = \frac{\sum_{i,j} [f_{i,j} - e_f \times (g_{i,j} - e_g)]}{\sqrt{\sum_{i,j} [(f_{i,j} - e_f)^2] \times \sum_{i,j} [(g_{i,j} - e_g)^2]}}, \quad (11)$$

其中 $f_{i,j}$ 和 $g_{i,j}$ 分别为两幅图像上 (i, j) 点的灰度值, e_f 与 e_g 分别为两幅图像的均值。

分别统计出各图像的均值、方差、信息熵、清晰度、扭曲程度、偏差指数与相关系数,如表1所示。可以看出:

(1) 与原始 TM 影像相比,①新方法的清晰度均高于原始 TM 影像,表明新方法可以显著改善融合影像的空间分辨率;② a 和 b 的值越小,清晰度越高;随着 a 和 b 值的增大,新方法得到的融合影像与原始 TM 影像的均值不断接近,相关系数增加,同时,清晰度依然高于原始 TM 影像。这说明新方法在增强空间细节表现力的同时,具有一定的光谱保持能力。

(2) 与 IHS 融合算法相比,①新方法的标准差和信息熵均超过 IHS 算法;② a 和 b 的各个参数组合所得融合结果的扭曲程度与偏差指数均小于 IHS

算法,而相关系数均高于 IHS 算法,这表明新方法的光谱保持能力优于 IHS 融合法。

(3) 与 PC 融合算法相比,①新方法的标准差和信息熵与 PC 算法相当,清晰度有所下降,但通过目视比较分析可以发现, PC 融合法统计参数值较高的原因可能是由于融合时引入了噪声的缘故;②除了 $a = 0.001, b = 0.1$ 之外,融合影像的相关系数均高于 PC 融合法,扭曲程度和偏差指数均小于 PC 融合法,表明新算法在光谱信息的保持上优于 PC 融合法。

(4) 与小波变换融合法和基于特征的小波变换融合法相比,①新方法的标准差和信息熵均超过或接近这两种小波变换法。 a 和 b 值较小时,清晰度高于这两种小波融合法,而相关系数低于这两种融合法;② a 和 b 值较大时,清晰度略低于这两种小波融合法,而相关系数接近或超过这两种小波融合法。这说明,通过参数的调节,新方法可以得到单独使用某种小波融合法所不能达到的效果。

(5) 参数 a 和 b 的改变,对融合结果有很大的影响。当 a 和 b 接近于0时,融合结果的清晰度很高,影像的特征接近于 SAR 影像,而光谱保持能力相对有所下降; a 和 b 增大,融合影像的光谱保持能力增强,图像特征越来越接近于 TM 影像,而细节和纹理的保留能力则不断下降。这说明,通过调节参数,可以在细节保留和光谱保持之间达到不同程度的平衡,而且,某些参数组合的结果要优于传统的融合方法。

3 结语

光谱保持和高分辨率保留是影像融合的两个重要问题,不同的应用对融合的结果有不同的要求。我

表1 不同方法所得融合结果的统计特性

Table 1 The statistical properties of the fused images by different methods

| 影像/融合方法 | 均值 | 标准差 | 信息熵 | 清晰度 | 扭曲程度 | 偏差指数 | 相关系数 |
|-----------------------|---------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| SAR | 115.472 | 41.982 | 6.721 | 20.548 | | | |
| TM | 119.491 | 54.814 | 7.451 | 11.883 | | | |
| IHS | 124.641 | 42.956 | 4.591 | 18.415 | 30.285 | 0.388 | 0.710 |
| PC | 129.210 | 59.173 | 6.801 | 26.456 | 31.819 | 0.336 | 0.780 |
| 小波 | 88.772 | 43.770 | 7.232 | 16.262 | 31.674 | 0.271 | 0.942 |
| 基于特征的小波 新方法 | 110.285 | 47.040 | 7.326 | 13.355 | 15.240 | 0.139 | 0.940 |
| ($a=0.001$ $b=0.1$) | 100.494 | 45.374 | 7.251 | 19.666 | 28.757 | 0.248 | 0.770 |
| ($a=0.001$ $b=0.3$) | 109.072 | 47.528 | 7.413 | 14.756 | 16.130 | 0.134 | 0.929 |
| ($a=0.001$ $b=0.7$) | 116.525 | 51.385 | 7.499 | 12.674 | 7.016 | 0.060 | 0.979 |
| ($a=0.01$ $b=0.2$) | 106.259 | 45.846 | 7.359 | 16.282 | 20.454 | 0.171 | 0.883 |
| ($a=0.07$ $b=0.2$) | 107.962 | 46.981 | 7.395 | 15.636 | 17.800 | 0.143 | 0.911 |
| ($a=0.7$ $b=0.9$) | 118.873 | 54.942 | 7.474 | 11.951 | 1.492 | 0.013 | 0.994 |

们提出了一种基于小波变换的可调节遥感影像融合方法. 试验结果表明:通过对参数的调节,可使融合影像在细节保留和光谱保持之间达到不同程度的平衡;融合结果在引入纹理信息的同时,抑制了噪声的产生,使影像看起来更平滑、自然;新方法可以得到单独使用某种传统的融合方法所无法实现的效果;在合理的参数组合下,新方法的融合图像在细节保留和光谱保持方面均要超过某些传统的融合方法,从而可以满足不同的应用需求. 小波基的选择以及小波分解层数对融合效果的影响,有待于今后进一步研究.

REFERENCES

[1] JIA Yong-Hong, LI De-Ren, SUN Jia-Bing. Data fusion

techniques for multisources remotely sensed imagery [J]. *Remote Sensing Technology And Application* (贾永红,李德仁,孙家柄. 多源遥感影像数据融合. 遥感技术与应用), 2000, 15(1): 41—42.

[2] Harris J R. IHS Transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data [J]. *PE&RS*, 1990, 36(12): 1631—1641.

[3] Ehlers M. Multisensor image fusion techniques in remote sensing [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1991, 46: 19—30.

[4] CAO Wen, LI Bi-Cheng, PENG Tian-Qiang. A remote sensing image fusion method based on wavelet packet transform [J]. *Remote Sensing Technology And Application* (曹闻,李弼程,彭天强. 一种基于小波包变换的遥感影像融合方法. 遥感技术与应用), 2003, 18(4): 248—253.

[5] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding [J]. *IEEE Trans. On IT*, 1992, 41(3): 613—627.

全国第十届红外加热暨红外医学发展研讨会 征文通知

由中国光学学会红外光电器件专业委员会、中国光学光电子行业协会红外分会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会、中国光学学会锦州分会、云南省光学学会、中国机械工程学会工业炉分会、中国电工技术学会电热专业委员会、国家红外产品质量监督检验中心联合主办,烟台大学光电信息科学技术学院、淄博蓝景纳米材料有限公司承办、《红外技术》编辑部和《工业加热》编辑部协办的全国第十届红外加热暨红外医学发展研讨会,定于2005年9月在烟台市召开.

本届会议主要反映与交流近年来,红外加热技术及红外医学领域的新成果和新进展.

一、应征论文范围

1. 红外加热技术在国民经济中的地位、作用及发展前景的综述、评论文章;
2. 红外加热元件、红外辐射涂料的新成果、新工艺及相关技术研究;
3. 红外与物质相互作用,红外加热理论与机理的研究;
4. 各种红外加热装置的优化设计与制造及应用实例剖析;
5. 红外加热测试技术、物质的红外光谱及相关技术的研究;
6. 红外加热在生物学和医学中的应用等;
7. 红外医学新仪器、新材料、新技术、新成果及国内外发展动向;
8. 红外医学的临床理论研究,临床应用报告及相关的激光、微波、毫米波的研究与应用.

二、应征论文作者请在2005年7月30日之前,将500至800字论文摘要寄到:大连理工大学物理系栾文彦教授收(邮政编码:116023),并请作者注明详细通讯地址、工作单位及职务、职称和邮政编码.

三、经审稿录用的论文摘要集,将由《红外技术》编辑部编辑出版发行.

四、会议筹备组的通信地址:锦州市13号信箱中国光学学会锦州分会(邮政编码:121000),联系人:王永钧,电话:0416-2135100、2650160,传真:0416-2135100,电挂:1603.