

基于纹理的雷达与多光谱遥感数据小波融合研究

高文涛 汪小钦 凌飞龙 史晓明

(福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,福州大学省空间信息工程研究中心,福州 350002)

摘要 众所周知,多光谱与雷达影像融合具有重要的意义,但雷达影像小尺度的纹理特征在先前的融合方法中却没有被考虑。为了更好地对多光谱与雷达影像进行融合,基于双正交小波变换,提出了一种小尺度纹理影像参与融合的三影像小波融合方法。该方法借鉴多通道滤波及基于亮度调节的平滑滤波(SFIM)融合的原理,首先提取多时相雷达影像的小尺度纹理数据;然后再将该纹理数据、单时相 JERS-1 SAR 数据及 TM 多光谱数据进行小波融合。分析表明,该方法的融合结果较雷达与多光谱影像小波融合的结果不仅具有更丰富的光谱特征,而且由于继承了雷达影像丰富的小尺度纹理特征,因而具有更高的清晰度。实验证明,该方法可获得较好的融合结果,是一种切实有效的融合法。

关键词 基于亮度调节的平滑滤波 小波变换 纹理影像 遥感数据融合 TM 影像 JERS-1 合成孔径雷达影像
中图分类号:TP751.1 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)07-1341-06

Fusion Algorithm Research Based on Texture for SAR and Multi-spectral Images with Wavelet Transform

GAO Wen-tao, WANG Xiao-qin, LING Fei-long, SHI Xiao-ming

(Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing (Fuzhou University), Ministry of Education, Spatial Information Research Center, Fuzhou University, Fuzhou 350002)

Abstract The fusion between multispectral and SAR (synthetic aperture radar) images has great significances. However, the small scale texture information of SAR images has not aroused scholars' attention in previous fusions. For better fusion result, a new data fusion technique has thus been developed based on biorthogonal wavelet transform with three types of images. They are: TM multi-spectral image, single temporal JERS-1 SAR image and the small scale texture image extracted from multi-temporal JERS-1 SAR images based on the principles of multi-channel filtering and SFIM (smoothing filter-based intensity modulation) fusion. Compared with the fusion method without texture image, the new one not only preserves spectral information well, but also inherits from SAR images rich small scale textural information that makes the result have higher definition. The wavelet fusion algorithm with texture image is of high flexibility and practicability.

Keywords smoothing filter-based intensity modulation(SFIM), wavelet transform, texture image, remote sensing data fusion, TM image, JERS-1 SAR image

1 引言

空间技术的快速发展以及新型传感器的不断出现,使得人们能够获取大量的不同空间分辨率、不同时间分辨率、不同光谱分辨率的可见光、红外、雷达等数据,从而构成了用于全球变化研究、环境监测、资源

调查、灾害防治等方面的多层次的遥感影像集。多源遥感影像融合是富集多种传感器遥感信息的最有效途径之一,被认为是现代多源遥感影像处理和分析中非常重要的一步^[1]。由于它能充分利用来自不同传感器的各类遥感信息,因而能克服遥感影像信息提取与解译中单一信息源的不足。

由于多光谱数据包含了丰富的地物光谱信息,

但其成像受观测时刻、天气及大气状况等外部条件的影响较大,而合成孔径雷达(SAR)则由于具有全天时、全天候对地观测的能力,且 SAR 影像轮廓比较清晰,具有丰富的地物纹理和结构信息,因此,采用融合技术将二者的特性结合起来,对于充分发挥两种数据的潜力,以及提高遥感解译和信息提取的精度、效率具有重要的意义。虽然已有众多学者采用不同的方法对多光谱和雷达数据的融合进行了研究^[2-7],但由于这些方法都没有充分利用雷达影像的小尺度纹理特征,且都是基于 2 种信息类型的影像融合,因此无法充分利用多时相或多极化的雷达数据;另一方面,由于 SAR 影像具有明显的斑点噪声,通常是在滤除斑点噪声后,再进行 SAR 与多光谱影像的融合;由于滤波在除掉噪声的同时,具有一定的平滑作用,即会损失大部分小尺度的纹理特征,使图像变模糊,因此,如何充分利用多时相或多极化雷达数据的纹理特征,对 SAR 和多光谱数据融合的结果有重要的影响。

本文借鉴多通道滤波^[8]及基于亮度调节的平滑滤波(SFIM)融合^[9]的原理,将提取的多时相雷达数据的小尺度纹理结构信息作为第 3 类数据,并通过构造 3 类数据参与的小波融合方法来对雷达与多光谱数据进行融合研究。本研究采用的数据为福建莆田地区的 TM 影像(除热红外波段外的其他 6 个多光谱波段的数据,空间分辨率为 30m)及 3 个时相的 JERS-1SAR 雷达影像(L 波段, VV 极化,空间分辨率为 18m)。

2 小波变换与 Mallat 算法

小波变换是介于函数的时间域(或空间域)表示和频率域表示之间的一种表示方法,因此其在时间域(或空间域)和频率域上同时具有良好的局部化性质。其基本思想是将任一平方函数或能量有限信号通过多分辨率分析表示成小波系数的叠加。在实际应用中,二进小波是最常用的离散小波变换。

Mallat 算法在小波分析中占有重要地位,其是基于多尺度分析(multi-resolution analysis, MRA)框架下的一种塔式分解算法^[10]。信号的塔式分解递推公式为

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_k^{(j+1)} &= \sum_{n \in \mathbf{Z}} h_{n-2k} \mathbf{c}_n^{(j)} \\ \mathbf{d}_k^{(j+1)} &= \sum_{n \in \mathbf{Z}} g_{n-2k} \mathbf{d}_n^{(j)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{c}_k^{(j)}$ 称为 $f(x)$ 在 2^j 分辨率下的离散逼近,即低频部分; $\mathbf{d}_k^{(j)}$ 称为 $f(x)$ 在 2^j 分辨率下的离散细节,即高频部分; h 、 g 分别为分解时的低通和高通滤波器系数。

合成是上述的逆过程,可表示为

$$\mathbf{c}_k^{(j-1)} = \sum_{n \in \mathbf{Z}} \tilde{h}_{k-2n} \mathbf{c}_n^{(j)} + \sum_{n \in \mathbf{Z}} \tilde{g}_{k-2n} \mathbf{d}_n^{(j)} \quad (2)$$

\tilde{h} 、 \tilde{g} 分别为重构时的低通和高通滤波器系数。其中正交小波只要确定一个滤波器系数就可以确定另外的滤波器系数,而双正交小波则需要知道 2 个滤波器系数,才能确定出完整的小波系数。

3 多通道 SAR 与光学图像的小波融合

本研究的融合算法(简称三影像融合)如图 1 所示,其中 JERS-1 SAR 为空间域滤波的结果。

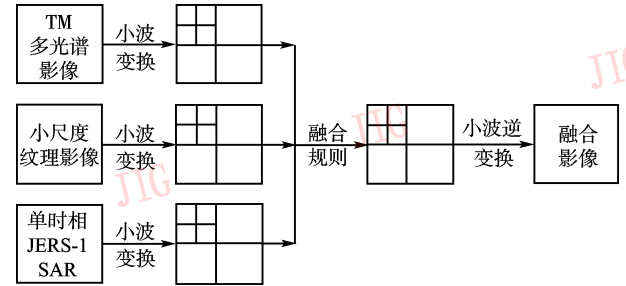


图 1 三影像小波融合算法

Fig. 1 The wavelet fusion algorithm of three images

该实验基于双正交小波变换(biorthogonal wavelet transform, BWT)进行融合,小波变换采用样条小波函数作为小波基,分解与重构的小波基长度均为 3,小波分解层数为 7 层。具体融合步骤如下:

- (1) 进行配准、滤波等预处理;
- (2) 生成小尺度纹理影像(具体方法在 3.1 节介绍);
- (3) 构造三影像参与的小波融合算法;
- (4) 对每一源图像分别进行双正交小波变换,通过建立图像的双正交小波塔形分解,以获取各自的低频(近似)系数和低频(细节)系数;
- (5) 高频系数与低频系数的处理:融合后的低频系数采用光学影像的低频系数部分;融合后的高频系数则综合了 3 种数据的特征,采用加权 and 进行融合(具体融合规则在 3.2 节介绍);
- (6) 对融合后所得小波金字塔进行双正交小波

逆变换,所得到的重构图像即为融合后的图像。

3.1 基于多通道滤波与 SFIM 融合原理的小尺度纹理影像生成

在纹理提取前,首先对三时相 VV 极化的 SAR 影像进行精确的相对配准、正射校正、重采样(TM 影像与 SAR 影像采样均为 15 m),然后截取大小为 $1\ 024 \times 1\ 024$ pixels 的实验样区。

尽管 SAR 影像具有明显的结构和纹理特征,但由于 SAR 成像固有的特性,在雷达图像上不可避免地存在斑点噪声现象,这将严重地影响后续的处理和应用,因此,如何在有效地去除斑点噪声的同时,较完整地保持影像的清晰度,是雷达图像处理中很重要的环节,由于一般基于空间域的滤波方法是以损失空间分辨率为代价的,而多通道滤波^[8]则充分利用了 N 幅经配准的不同时相或极化的同景 SAR 影像进行线性组合处理,因此可获得 N 幅斑点噪声降低的影像,其原理如式(3)所示:

$$J_k = \sum_{i=1}^N A_{k,i} I_i \quad 1 \leq i, k \leq N \quad (3)$$

在各通道视数(number of looks)相同的情况下,式(3)可表示为

$$J_k = \frac{\sigma_k}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{\sigma_i} \quad (4)$$

式中, J_k 为第 k 个通道滤波后影像, $A_{k,i}$ 为系数矩阵, I_i 为第 i 个通道的强度(Intensity)影像, σ_i 为 I_i 的均值滤波(本研究采用 5×5 窗口)影像, N 为通道数。由式(4)可得

$$\frac{J_k}{\sigma_k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{\sigma_i} \quad (5)$$

在通道数 N 足够多($N \geq 12$)的情况下,如果式(5)中的 J_k 与 σ_k 均为高信噪比影像,则式(5)等号右侧所得影像亦为高信噪比影像。与基于空间域的滤波方法相比,该方法能够在降低斑点噪声的同时,较好地保持图像的纹理特征和空间分辨率。

SFIM 融合^[9]的基本思想是将高分辨率影像与其自身均值滤波结果进行比值运算,首先获得小尺度纹理影像,再将该小尺度纹理影像与多光谱影像进行乘积运算,即可获得具有丰富光谱特征和较高清晰度的融合影像。由该融合原理可知,由于 I_i 与 σ_i 的比值不仅可消去 I_i 的强度反差,而且保留了 I_i 的高频成分(主要为边缘信息),因此具有丰富的小尺度纹理结构特征。

综合多通道滤波及 SFIM 融合的上述原理可知

$$T_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{\sigma_i} \quad (6)$$

式中, T_N 为通过 N 幅 SAR 影像获得的小尺度纹理影像。 N 值越大, T_N 的纹理越丰富,噪声越少。实验结果也证明了 T_3 比 T_1 具有更丰富的小尺度纹理特征及更少的噪声。

由于只获得了 3 个通道的 SAR 影像,故 T_3 仍有较多噪声,可对其进行 3×3 窗口的 Gamma-MAP 滤波,以减少余下的噪声。最终获得的小尺度纹理影像如图 2 所示。

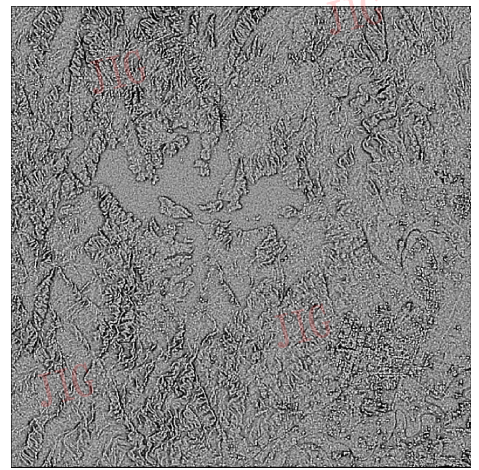


图 2 小尺度纹理影像图

Fig. 2 The small scale texture image

利用该方法提取小尺度纹理影像时,研究样区的下垫面在不同的时相期间应变化较小。对福建而言,由于林地四季常绿,变化很小,而且居民用地、道路及水体的变化也比较小,故上述地物在 SAR 影像上的纹理特征基本没有变化。变化比较大的是耕地,但由于耕地在本研究区分布很有限,因而,本研究提取的纹理影像较客观地反映了实际情况。

3.2 小波金字塔高频融合规则

由于自然景物具有漫反射特性,SAR 图像的任一单位回波强度 I (像素点灰度值) 均受到周围景物的回波影响,所以图像的每一个像素均与相邻像素有很大的相关性;而且图像是由不同灰度等级的区域组成,因此对 SAR 影像与可见光图像的融合宜选取基于区域的融合规则,因为利用区域差绝对值来对不同图像的高频部分进行加权平均,可以获得视觉特性更佳、细节更丰富、突出的融合效果。具体的融合规则如下:

(1) 确定一空域窗口尺寸(本实验采用 3×3 窗口);

(2) 在分辨率层 2^j 下,分别计算 TM 影像、小尺度纹理影像和 SAR 影像的高频部分与当前窗口对应的中心像素点与其相邻的 8 个像素点的灰度值之差的绝对值总和,记为 S_1 、 S_2 和 S_3 ;

(3) 选取 TM 影像与小尺度纹理影像参与高频系数的加权平均,权重分别为 a 与 b ,其值为

$$a = \frac{K_1 \times S_1}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (7)$$

$$b = \frac{K_2 \times S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (8)$$

式中, K_1 、 K_2 为调节系数,当融合结果需保留更多的光谱特征时,则增大 K_1 ;当融合结果需融入更多的小尺度纹理特征时;则增大 K_2 。调节系数 K_1 、 K_2 的取值受 a 、 b 、 $a + b$ 取值范围(均为 $(0, 1)$)限制。

(4) 高频系数融合如下:

$$W = a \times W_1 + b \times W_2 + (1 - a - b) \times W_3 \quad (9)$$

W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 TM 影像、小尺度纹理影像及 SAR 影像小波变换后的高频系数, W 为融合后小波金字塔的高频系数。

4 融合结果分析

为便于比较,本文还进行了 TM 影像与 JERS-1 SAR 影像的融合研究(简称两影像融合)。两影像融合的小波函数、分解层数及融合中的低频系数的融合规则均与三影像融合相同。在对高频部分进行融合中, TM 影像的高频系数的权重与三影像融合中 TM 影像的权重相同。

目前大部分研究,在评价融合结果时,主要以基于视觉效果定性分析比较和基于数理统计的定量指标作为评价标准,而基于视觉效果的定性分析评价是定量分析的前提^[11]。下面将从视觉效果、典型地物光谱分析和定量统计指标等几个方面对融合结果进行评价。

4.1 视觉效果比较

参与融合的 TM 影像、SAR 影像及融合后的影像如图 3~图 5 所示。图 3 是整个试验样区 TM 影像、SAR 影像的融合结果,该区地物类型丰富,主要有山体、植被、水体、道路及居民地等;图 4 和图 5 是该实验区局部区域放大图,图 4 主要反映了自然地貌特征,如山体、植被、水体等,图 5 主要反映了城区的结构特征。

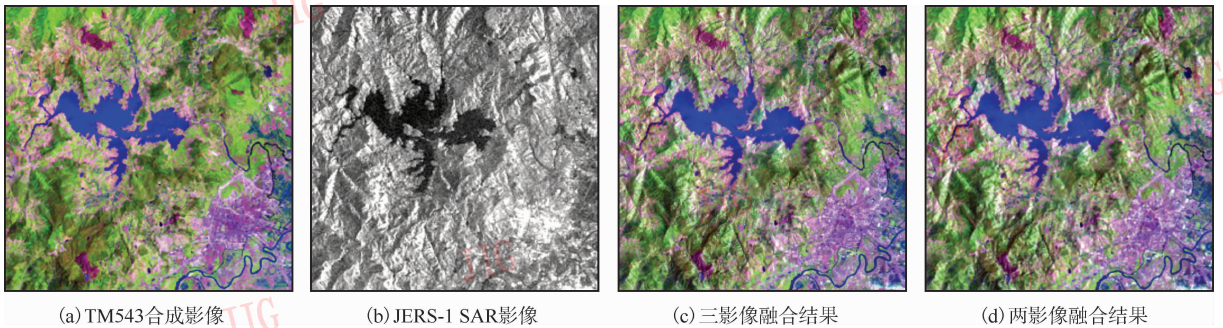


图 3 实验区原始影像与融合结果影像

Fig. 3 Original images and the fusion images

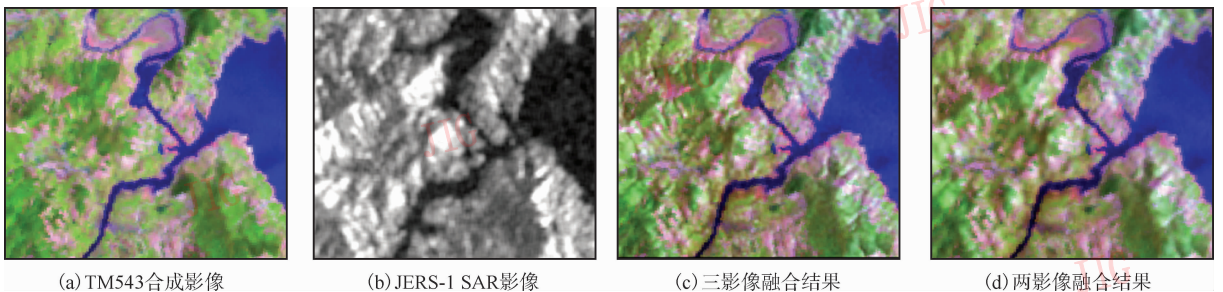


图 4 实验区局部地区原始影像与融合结果地貌特征影像

Fig. 4 The detail features of original images and the fusion images

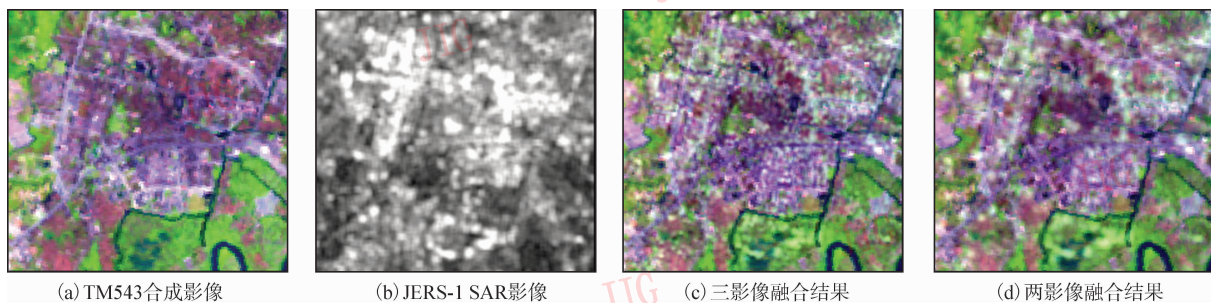


图 5 某城区原始影像与融合结果结构影像

Fig. 5 The urban structure in original images and the fusion images

由目视可知,三影像融合与两影像融合结果均保留了丰富的光谱信息,虽然都具有明显的山体结构特征,但小尺度纹理影像参与的三影像融合的结果较两影像融合的纹理结构更清晰,这是因为该结果在抑制纹理影像斑点噪声的同时,还融入了丰富的小尺度纹理结构信息的缘故。

4.2 典型地物光谱曲线分析

融合前后影像光谱曲线的相似度能够很好地反映融合结果影像的光谱保持程度,即相似度越高,融

合所引起的光谱扭曲就越小^[12]。图 6 是研究区域 TM 影像及三影像融合结果影像中典型地物的光谱曲线。从图中可以看出,三影像融合结果影像中典型地物的光谱曲线与原始 TM 影像中典型地物的光谱曲线非常接近,即曲线走向及灰度值大小都基本一致。这说明三影像融合结果影像的光谱扭曲较小,也就是三影像融合影像具有较好的光谱保持特性。

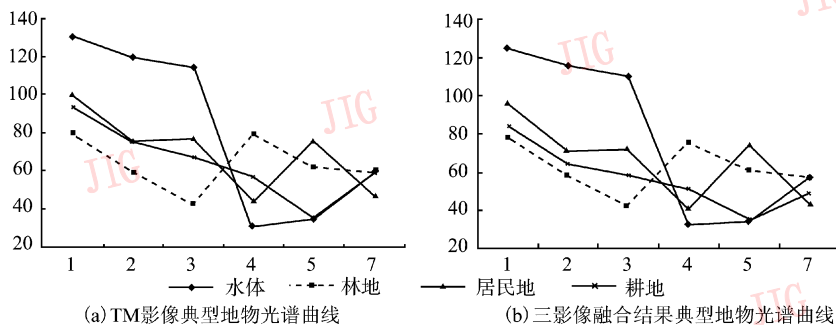


图 6 典型地物光谱曲线

Fig. 6 The spectral profiles of typical land covers

4.3 定量分析比较

为了对融合结果进行定量分析,使用信息熵^[3,11,13]、相关系数^[11,13]和平均梯度^[3,11]等参数对融合结果进行定量评价。其中信息熵反映了影像信息量的大小;相关系数是对整幅影像光谱信息畸变的度量,与光谱曲线相比,它从另一侧面反映了融合后的影像与原始多光谱影像的光谱差异;平均梯度反映图像中的微小细节反差与纹理变化特征,表征了影像的清晰程度。两种融合方法融合结果的信息熵、平均梯度、相关系数如表 1 所示。

从表 1 可知,两种方法的融合结果较原始 TM 影像在信息量与清晰度等方面均得到了较大的提高,且与原始 TM 影像的光谱相关程度也较高。在

参与融合的 TM 影像的权重相同的前提下,三影像融合结果虽然在信息量上较两影像融合结果略少,但平均梯度及相关系数均比两影像融合结果高。这说明三影像融合结果不仅更好地保持了原始 TM 影像的光谱特征,还较大幅度地提高了影像的清晰度,其在保持光谱特征和提高影像清晰度方面均较两影像融合结果好。

综合视觉效果、光谱曲线和定量分析的结果可知,小尺度纹理影像参与的三影像融合方法,由于在增强影像信息量及较好地保持光谱影像特征的同时,更好地利用了 SAR 影像的小尺度纹理信息,从而提高了影像清晰度和抑制了斑点噪声。实践证明,此方法不仅适用于具有相同入射角的多个时相

或极化的 SAR 影像与多光谱影像的融合,也为综合利用影像的光谱信息和结构纹理信息来进行地物特征提取及分类提供了较好的数据。

表 1 融合结果定量评价分析

Tab. 1 Quantitative analysis for the fused images

评价指标	波段	原 TM 影像	三影像融合	两影像融合
信息熵	1	5.315 967	5.773 946	5.817 011
	2	5.567 169	5.905 535	5.941 923
	3	6.111 418	6.281 929	6.303 389
	4	5.600 944	5.889 087	5.934 167
	5	6.578 007	6.583 604	6.604 634
	7	5.091 555	5.564 519	5.636 006
	平均梯度	1	0.162 238	0.269 977
2		0.191 544	0.288 339	0.247 423
3		0.320 826	0.379 600	0.349 853
4		0.219 140	0.304 448	0.266 186
5		0.479 357	0.506 518	0.485 026
7		0.258 507	0.308 385	0.280 340
相关系数		1		0.792 300
	2		0.844 841	0.827 057
	3		0.920 028	0.909 762
	4		0.873 263	0.862 547
	5		0.957 994	0.953 088
	7		0.733 587	0.7140 28

注:SAR 影像的信息熵为 7.176 967,平均梯度为 0.554 609;

小尺度纹理影像的信息熵为 6.663 056,平均梯度为 1.229 800

5 结 论

本文基于多时相的雷达纹理信息,提出了一种小尺度纹理图像参与的三影像小波融合方法。该方法不仅较好地保持了多光谱影像的光谱特征,而且弥补了多光谱影像与单通道 SAR 影像融合所带来的小尺度结构纹理特征的不足,可比两影像融合的结果包含有更丰富的纹理结构特征。另外还可根据融合的目的,通过引入合适的调节系数来融合各影像的有用信息,以抑制不利因素(如噪声等),因而具有很强的灵活性与实用性。

参考文献 (References)

1 Bloch I. Information combination operators for data fusion: a comparative review with classification [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1996, 26(1):52~67.

2 Li Jun, Lin Zong-jian. Data fusion for remote sensing imagery based on feature[J]. Journal of Image and Graphics, 1997,2(3): 103~107. [李军,林宗坚. 基于特征的遥感影像数据融合方法[J]. 中国图象图形学报, 1997,2(3):103~107.]

3 Ni Xiu-ping, Xiao Guo-chao, Wan Zhi-long. Data fusion for remote sensing image using wavelet transform [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 1998, 15(3):185~187. [倪秀平,肖国超,王志龙. 小波变换在遥感图像数据融合中的应用[J]. 测绘学院学报, 1998, 15(3):185~187.]

4 Song Jian-she, Zheng Yong-an, Liu Ying-chun. Image fusion algorithm of SAR and optical images based on wavelet transform[J]. Application Research of Computer, 2004,21(10):110~112. [宋建设,郑永安,刘迎春. 基于小波变换的 SAR 与可见光图像融合算法[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(10):110~112.]

5 Le Hegarat-Masclé, Quesney A, Vidal-Madjar D, et al. Land cover discrimination from multitemporal ERS images and multispectral Landsat images: a study case in an agricultural area in France[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(3):435~456.

6 Moghaddam M, Dungan J L, Acker S. Forest variable estimation from fusion of SAR and multispectral optical data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(10): 2176~2187.

7 Wu Zhen-yu, Wang Peng, Ma Meng. Study of multisensor image fusion technology[J]. China Journal of Space Science, 2006, 26(1): 48~53. [巫震宇,王鹏,马猛. 多传感器遥感图像数据融合研究[J]. 空间科学学报, 2006, 26(1):48~53.]

8 Quegan Shaun, Yu Jiong Jiong. Filtering of multichannel SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11):2373~2377.

9 Liu J G. Evaluation of landsat-7 ETM + panchromatic band for image fusion with multispectral bands [J]. Natural Resources Research, 2000, 9(4): 269~276.

10 Mallat S C. A theory for multiresolution signal decomposition wavelet representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7):674~693.

11 Wang Xiao-qin. Coastal Eco-environment Change Analysis — Based on Spatial Information Technique and a Case Study in the Yellow River Delta [D]. Beijing: Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS. 2002:35~36. [汪小钦. 黄河三角洲生态环境演化的时空分析[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2002:35~36.]

12 Wang Xiao-qin, Wu Qun-yong, Wang Qin-min, et al. Fusion algorithm research based on biorthogonal wavelet transform for resource satellite data and multispectral image Data [J]. High Technology Letter, 2004, (8):106~110. [汪小钦,郭群勇,王钦敏等. 基于双正交小波变换的资源二号卫星与多光谱影像融合方法研究[J]. 高技术通讯, 2004, (8):106~110.]

13 Lau Wai Leung, Bruce King, Vijay Vohora. Comparison of image data fusion techniques using entropy and INI[A]. In: Proceedings of CRISP, The 22nd Asian Conference on Remote Sensing [C], Singapore, 2001, 5~9.