

文章编号: 1007-4619 (2004)04-0356-06

一种光谱保持型的图像融合方法

吴连喜¹ 王茂新²

(1 东华理工学院 测量系, 江西 抚州 344000; 2 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 常用的遥感图像融合的方法,如 HIS 变换法、Brovey 变换法和主成分变换法等,在实施图像融合时,存在不同程度的光谱扭曲的现象。针对 IRS 与 TM 数据光谱响应范围不同,探讨了一种新的光谱保持型的 EEIM 融合算法。EEIM 融合方法是首先对参与融合的全色波段进行滤波,然后进行比值变换,融合后的图像在信息量、光谱保持性能等方面均较优。

关键词: 光谱保持; EEIM 融合法; 遥感图像融合

中图分类号: TP79/TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

随着遥感技术的发展,特别是 20 世纪 90 年代中后期多颗雷达卫星 JERS-1, ERS-1, Radarsat 和高几何分辨率卫星如 IRS-1C/1D, SPOT-5, IKONOS, Orbview, Eyeglass, Quickbird 相继发射升空,可见光、近红外、短波红外、热红外、微波等不同类型的卫星传感器获取同一地区的遥感图像数据日益增多^[1-4],因此,研究有效地融合多种类型的遥感数据,便具有非常重要意义。中国在 20 世纪 80 年代也开展了信息融合技术的研究,目前仍为“十五”重点研究项目^[5]。

常用的融合方法有 HIS 变换法^[6,7], Brovey 变换法^[8]和主成分变换法^[9-11]。这些方法均要求高分辨率的全色波段与多光谱波段的光谱响应范围要一致或相近^[12,13],从而限制了许多不同类型的遥感数据的融合。针对不同平台、不同光谱响应范围的多源遥感数据,研究具有光谱保持性能的融合方法在中国处于起步阶段。本文以 IRS 与 TM 数据为例,探讨一种光谱保持型融合方法。

2 信息保持型融合方法的提出

Brovey 融合方法的表达式如下:

$$I_{B_j} = \frac{I_{low_j} \circ I_{high}}{\sum_j I_{low_j}} \quad (1)$$

式中 I_{B_j} 表示融合后图像的第 j 波段当前像元的灰度值, I_{low_j} 为多光谱图像的第 j 波段对应像元的灰度值, I_{high} 为高空间分辨率的全色波段对应像元的灰度值, $j=1, 2, \dots, n$, n 为用于融合的多光谱波段数,因为彩色合成时只使用 R, G, B 3 个波段,故在此 $n=3$ 。

对高分辨率图像进行 LOG 滤波,并替换式(1)中的分母,则得式(2),这便是本文提出的边缘增强调制(Edge Enhancement Intensity Modulation, 简称 EEIM)融合方法。

$$I_{EEIM_j} = \frac{I_{low_j} \circ I_{high}}{I_{LOG}} \quad (2)$$

式中 I_{EEIM_j} 表示 EEIM 融合后图像第 j 波段当前像元的灰度值, I_{low_j} 为多光谱图像的第 j 波段对应像元的灰度值, I_{high} 为高空间分辨率的全色波段对应像元的灰度值, I_{LOG} 表示用 LOG 滤波核对待高分辨率图像进行卷积处理后的图像对应像元的灰度值。

数字图像的 DN (Digital Number) 值记录的是地物的波谱信息,包括地物反射或辐射。根据 Elachi 的研究^[14],有:

$$DN(\lambda) = \rho(\lambda) E(\lambda) \quad (3)$$

式中 $\rho(\lambda)$ 表示 λ 波段的反射比, $E(\lambda)$ 表示 λ 波段

收稿日期: 2003-03-04; 修订日期: 2003-05-16

基金项目: 国家留学基金(2003836044), 江西省科技项目“南方红壤荒漠化遥感调查”课题。

作者简介: 吴连喜(1966—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 中国农业大学毕业, 现主要从事图像融合的研究, 已出版专著 2 本, 发表论文 40 余篇。Email: pkwlx@sina.com.

的辐照度(在可见光及近、短红外波段, $\rho(\lambda)$, $E(\lambda)$ 分别为反射比和辐照度, 在热红外波段无 $\rho(\lambda)$ 项, $E(\lambda)$ 则应改为 $L(\lambda)$, 即辐亮度。为叙述方便, 下文统称为辐照度)。

用 $DN(\lambda)_{low}$ 表示低分辨率多光谱数据 λ 波段图像的 DN 值, $DN(\gamma)_{high}$ 表示高分辨率数据 γ 波段图像的 DN 值, 如果多光谱数据与高分辨率全色波段数据的太阳辐照度相同, 则有:

$$DN(\lambda)_{low} = \rho(\lambda)_{low} E(\lambda)_{low} \quad (4)$$

$$DN(\gamma)_{high} = \rho(\gamma)_{high} E(\gamma)_{high} \quad (5)$$

式中 $DN(\lambda)_{low}$ 表示低分辨率多光谱数据 λ 波段的 DN 值, $DN(\gamma)_{high}$ 表示高分辨率数据 γ 波段图像的 DN 值, $\rho(\lambda)_{low}$ 表示低分辨率多光谱 λ 波段的反射比, $\rho(\gamma)_{high}$ 表示高分辨率全色波段(即 γ 波段)的反射比, $E(\lambda)_{low}$ 表示低分辨率多光谱数据 λ 波段的辐照度, $E(\gamma)_{high}$ 表示高分辨率全色波段的辐照度。

本文提出的算法如式(2), 由式(2)可得:

$$\begin{aligned} DN(\lambda)_{EEIM} &= \frac{DN(\lambda)_{low} DN(\gamma)_{high}}{DN(\gamma)_s} \\ &= \frac{\rho(\lambda)_{low} E(\lambda)_{low} \rho(\gamma)_{high} E(\gamma)_{high}}{\rho(\gamma)_{low} E(\gamma)_{low}} \quad (6) \end{aligned}$$

式中 $DN(\lambda)_{EEIM}$ 表示融合后对应于多光谱 λ 波段的 DN 值, $DN(\gamma)_s$ 表示经 LOG 滤波处理后 γ 波段的 DN 值, $\rho(\gamma)_{low}$ 表示 γ 波段中低频部分的反射比, $E(\gamma)_{low}$ 表示 γ 波段中低频部分的辐照度。

对于同一太阳辐射而言, 辐照度主要受地形地貌影响, 虽然多光谱图像与全色波段图像的几何分辨率不同, 但 DN 值范围相同, 则有: $E(\lambda) \approx E(\gamma)^{13}$ 。由于 LOG 滤波对 PAN 图像的光谱影响不大, 故有: $\rho(\gamma)_{low} = \rho(\gamma)_{high}$ 。那么, 式(6)可变换为:

$$DN(\lambda)_{EEIM} \approx \rho(\lambda)_{low} E(\gamma)_{high} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 融合后图像的信息主要包括多光谱波段的光谱信息与全色波段的高分辨率的空间信息。所以, $EEIM$ 融合法能较好地保持多光谱图像的光谱信息。

3 EEIM 融合算法

$EEIM$ 融合算法包括两个主要内容, 一是边缘增强, 二是 $EEIM$ 融合。

3.1 边缘增强

边缘信息对图像的识别起着重要作用, 拉普拉

斯(Laplacian)可进行边缘的检测与增强^[16], 拉普拉斯算子是二阶导数, 设一幅图像的灰度函数为 $f(x, y)$, 则拉普拉斯函数的表达式为:

$$\Delta^2 f(x/y) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x, y) \quad (8)$$

式中 $f(x, y)$ 为图像的灰度函数。

但如果存在噪声, 在边缘增强的同时噪声也会随之增强, 所以, 在拉普拉斯函数进行边缘的检测与增强之前, 需要先进行低通滤波, 以抑制噪声。由于高斯函数具有旋转对称性的特点^[17], 所以, 本文采用高斯(Gaussian)低通滤波。高斯函数的表达式为:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2 + y^2)\right] \quad (9)$$

式中 $f(x, y)$ 为图像的灰度函数, σ^2 为方差。

将高斯函数与拉普拉斯函数结合起来, 即对式(9)求导, 则有:

$$\begin{aligned} \Delta^2 G(x, y, \sigma) &= -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \\ &\quad \times \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2 + y^2)\right] \quad (10) \end{aligned}$$

式(10)实质上是线性运算, 计算时首先需将灰度图像转换到频率域, 再用式(10)进行计算, 之后又要转回到空间域, 计算过程仍较复杂。这一过程可用数字卷积实现, 这样需构造一个卷积核。

$$\text{令 } A = -\frac{1}{\pi\sigma^4}, k = \frac{1}{2}, r^2 = x^2 + y^2$$

式(10)可变为:

$$\Delta^2 G(x, y, \sigma) = A(1 - K \frac{r^2}{\sigma^2})^{-k} \frac{r^2}{\sigma^2} \quad (11)$$

式(11)便是 LOG 卷积核(又称卷积模板, 算子), 即:

$$LOG(x, y, \sigma) = A \left[1 - K \frac{r^2}{\sigma^2}\right] e^{-k \frac{r^2}{\sigma^2}} \quad (12)$$

式中 r 表示从模板中心至某点 (x, y) 的距离, σ 为模板的标准差, k 为常数, k 可使模板上各元素值的代数和接近于0。

3.2 $EEIM$ 变换的算法

式(2)是针对图像进行的“点”操作, 若将它描述为图像的“域”操作, 则可写成:

$$I_{EEIM} = \frac{I_{low} \times I_{high}}{I_{LOG}} \quad (13)$$

式中 I_{EEIM} 表示经融合后得到的图像, I_{low} 表示低分辨率多光谱遥感影像, I_{high} 表示高分辨率全色波段遥感图像, I_{LOG} 表示全色波段经 LOG 滤波后得到的图像。

式(13)即为 EEIM 变换的算法。经 LOG 滤波后的图像保留并强化了高分辨率图像地物边缘信号。所以,融合后的影像不仅保全了高分辨率图像的边缘信息,还保持了低分辨率图像丰富的色彩。

4 融合方法应用

首先构造一个卷积核,由于 TM 图像的分辨率与 IRS PAN 图像的分辨率之比约 5:1,故卷积核的尺寸定为 5×5 ,假设 $\sigma = \sqrt{2}$ (即 $\sigma = 1.414$),则可构造如下模板(图 1)。

$$\begin{bmatrix} 0.0252 & 0.0193 & 0.0127 & 0.0193 & 0.0252 \\ 0.0193 & -0.0153 & -0.0412 & -0.0153 & 0.0193 \\ 0.0127 & -0.0412 & -0.0796 & -0.0412 & 0.0127 \\ 0.0193 & -0.0153 & -0.0412 & -0.0153 & 0.0193 \\ 0.0252 & 0.0193 & 0.0127 & 0.0193 & 0.0252 \end{bmatrix}$$

图 1 LOG 卷积模板($\sigma = \sqrt{2}$)

Fig. 1 LOG convolution template($\sigma = \sqrt{2}$)

由图 1 可以看出,LOG 模板的元素值是以元素值“-0.0796”作中心对称;模板的代数和为 0.0004,接近 0。边缘部分的元素值较高,经 LOG 理后,边缘信息得到增强,非边缘信息有所减弱。

经 LOG 处理后的图像,参与式(13)进行 EEIM 变换。以上算法,可用 Matlab 软件编程实现。

本研究以北京市的大兴区的西部、房山区东部作为研究区域,研究区域的经度是从 $39^{\circ}47'47.25''$ 到 $39^{\circ}43'43.20''$,经度从 $116^{\circ}16'53.10''$ 到 $116^{\circ}23'35.30''$,面积为 $9523.6\text{m} \times 7603.8\text{m}$,以该区域内的遥感数据作为数据源。

Landsat-5 TM 图像包括 band 1, band 2, band 3, band 4, band 5, band 7 等 6 个波段,获取的时间为 1999-08-10。

IRS-1C 的全色波段(PAN)影像,获取时间为 2000-05-23。

将 Landsat-5 TM band 5, band 4, band 3 进行 RGB 合成,得 RGB 合成图像(简称 TM 图像,图 2),以 IRS-1C PAN(图 3)为基准,对 TM 图像进行几何配准。

用上述 EEIM 算法对 TM 图像与 IRS-1C PAN 图像实施融合(简称 EEIM 图像,图 4),同时用 Brovey 法进行融合(简称 Brovey 图像,图 5),融合后的图像的几何分辨率和融合前 PAN 图像的分辨率大小一致,即 $5.8\text{m} \times 5.8\text{m}$ 。



图 2 TM RGB 合成图像(band 5, 4, 3)

Fig. 2 TM image(band 5, 4, 3 RGB)

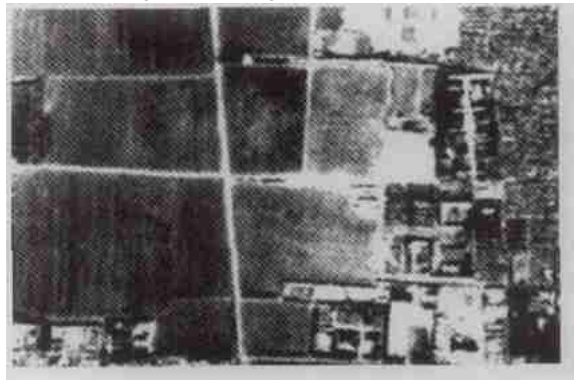


图 3 IRS-1C PAN 图像

Fig. 3 IRS-1C panchromatic image



图 4 EEIM 融合图像

Fig. 4 The fused image by EEIM method



图 5 Brovey 融合图像

Fig. 5 The fused image by Brovey transform

5 融合效果评价

5.1 熵

用式(14)计算图像的熵:

$$E = - \sum_{i=0}^{255} P_i \lg P_i \quad (\text{bit}) \quad (14)$$

式中 E 表示信息熵, P_i 表示灰度为 i 的频率。计算结果如表 1。

表 1 融合前后图像的熵(bit)

Table 1 The entropy of the raw image and the fused image

图像	融合前 TM			EEIM 融合图像			Brovey 融合图像		
波段	R	G	B	R	G	B	R	G	B
熵	1.67	1.69	1.57	2.29	2.34	2.23	1.89	2.11	2.05
RGB									
波段熵之和	4.93			6.86			5.75		

由表 1 可见, 融合后各单波段的信息熵大于融合前 TM 图像对应波段的信息熵。R, G, B 3 个波段的熵之和也是 EEIM 融合图像高于 Brovey 融合图像。

5.2 灰度变化程度分析

评价融合效果的另一个方面是, 融合图像能否较好地保留融合前多光谱图像的波谱特性, 即光谱保持性能。由于波谱是各单波段的有序组合, 故光谱保持性能可通过融合前后图像的对应波段的同名像素灰度值的变化程度来表示, 一般地融合前后图像的对应波段的同名像素灰度值的变化程度越小, 说明光谱保持性能越好^[18]。

由于一幅单色图像实质上是一个二维矩阵^[19], 因此, 将融合前后的每一波段图像分别看作是一个二维矩阵, 将融合后图像的灰度矩阵记为 A_{Fi} (i 为波段号, 下同), 将融合前图像的灰度矩阵记为 A_{Ri} , 把波段号 i 相同的两个对应的矩阵 A_{Fi} 与 A_{Ri} 相减, 得到一个差值矩阵 D_i , 矩阵 D_i 中的每个元素即为 A_{Fi} 与 A_{Ri} 两矩阵中对应元素的差, 所以, 矩阵 D_i 可以反应灰度变化的情况。又由于矩阵 D_i 中的元素值有正数、负数和零这 3 种情形, 故本文引入线性代数的 F-范数概念, 将矩阵 D_i 中的每个元素求平方和, 然后再开方, 即:

$$\|A\| = \sqrt{\sum_{j,k} D_{ijk}^2} \quad (15)$$

式中 i 为波段是, j, k 表示矩阵 D_i 的行号、列号, $j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n, m, n$ 分别为图像的行列数。

由于 D_i 为一矩阵, 将式(15)进一步计算, 得:

$$C = \frac{1}{m \times n} \circ \sqrt{\sum_{j,k} D_{ijk}^2} \quad (16)$$

式中 m, n 分别为图像的行列数。

本文将式(16)的“ C ”称为差值矩阵 F-范数(difference matrix frobenius nom, 简称, DMFN), 它反映了融合前后某一对应的波段的灰度变化程度, 由式(16)可知, 当差值矩阵 F-范数大于 0 时, 说明有灰度变化现象, 当差值矩阵 F-范数等于 0 时, 说明没有灰度变化现象。所以, C 又可称为“灰度变化程度”(Gray Variance Degree, ‘GVD’)。以上计算过程, 可用 Matlab 语言编程实现, 计算结果如表 2。

表 2 融合前后灰度变化程度

Table 2 Gray variance degree between the fused image and TM image

方法	波段	DMFN	3 个波段之和
EEIM 融合法	R	0.021	0.065
	G	0.028	
	B	0.016	
Brovey 融合法	R	0.032	0.123
	G	0.049	
	B	0.042	

由表 2 可见, 上述融合方法的 DMFN 均不等于 0, 说明这两种融合方法均有灰度变化现象, 但 Brovey 融合法灰度变化程度比 EEIM 融合法严重。由于色彩是 R, G, B 3 个波段合成的结果, 灰度变化的结果表现为色彩变化, 即 Brovey 融合图像的色彩变化程度比 EEIM 融合图像严重。对融合前后图像进行目视比较也可以证实这一点。所以, EEIM 融合法的光谱保持性能优于 Brovey 法。

6 结 论

本文探讨了 EEIM 融合的算法, 对 EEIM 融合后的图像进行分析, 结果表明 EEIM 融合后的图像既有丰富的边缘信息, 又较好地保留了多光谱数据的波谱信息, EEIM 融合后图像的信息量和光谱保持性能均优于 Brovey 融合图像。IRS-1C PAN 的光谱响应范围为 0.50—0.75 μm , TM band 3 为 0.63—0.69 μm , band 4 为 0.76—0.90 μm , band 5 为 1.55—

1. $75\mu\text{m}$, 二者相差较大, 所以说, EEIM 融合法是对不同平台、不同光谱响应范围的两组遥感数据源进行融合的较好的方法之一。

参 考 文 献(References)

- [1] Van Genderen. Multi-sensor Image Fusion in Remote Sensing: Concept, Methods and Application [J] . *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(5): 823—854.
- [2] Solberg S, Jain A K, Taxt T. Multisource Classification of Remotely Sensed Data: Fusion of Landsat TM and SAR Images [J] . *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(4): 768—777.
- [3] Solberg S, Jain A K, Taxt T. A Markov Random Field Model For Classification of Multisource Satellite Imagery [J] . *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1996, **34**(1): 100—113.
- [4] Costantini M, Farina A, Zirilli F. The Fusion of Different Resolution SAR Images [A] . Proceedings of the IEEE [C] , 1997, **85**(1): 139—146.
- [5] LI D R. Towards Photogrammetry and Remote Sensing: Status and Future Development [J] . *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, **25**(1): 1—6. [李德仁. 摄影测量与遥感的现状及发展趋势 [J] . 武汉测绘科技大学学报 2000, **25**(1): 1—6.]
- [6] Pellemans A, Jardans R, Allewijn R. Merging Multi-spectral and Panchromatic SPOT Image with Respect to the Radiometric Properties of the Sensor [J] . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1993, **12**(1): 81—87.
- [7] Jim V. Multi-spectral Imagery Band Sharpening Study [J] . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1996, **62**(9): 1075—1083.
- [8] Gillespie A R, Kahle, A B, Walker, R E. Color Enhancement of Highly Correlated Images: II. Channel Ratio and ‘Chromaticity’ Transformation Techniques [J] . *Remote Sensing of Environment*, 1987, **22**: 343—365.
- [9] Chavez P S, Stuart J, Sides C. Comparison of Three Different Methods to Merge Multi-spectral and Multi-resolution Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic [J] . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1991, **57**(3): 295—303
- [10] Yesou H, Besnus Y, Rolet Y. Extraction of Spectral Information from Landsat TM Data and Merger with SPOT Panchromatic Imagery: A Contribution to the Study of Geological Structures [J] . *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, **48**(5): 23—36.
- [11] Ehlers M. Multi-sensor Image Fusion Techniques in Remote Sensing [J] . *ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing*, 1991, **46**: 19—30.
- [12] Liu J G. Smoothing Filter-based Intensity Modulating: A Spectral Preserve Image Fusion for Improving Spatial Details [J] . *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **18**: 3461—3472.
- [13] Sheffigara V K. A Generalized Component Substitution Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set [J] . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1992, **58**(5): 561—567.
- [14] Elachi C. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing [M] . New York: Wiley, 1987.
- [15] Liu J G, Moore J M, Haigh J D. Simulated Reflectance Technique for ATM Image Enhancement [J] . *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**: 243—254.
- [16] Liu J G, Zhang B, Zheng L F et al. Urban Remote Sensing Application Study Using Hyperspectral Data [J] . *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(3): 224—227. [刘建贵, 张兵, 郑兰芬等. 成像光谱数据在城市遥感中的应用研究 [J] . 遥感学报, 2000, **4**(3): 224—227.]
- [17] Marr D, Hildreth E. Theory of edge detection [J] . *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, 1982, **207**: 187—217.
- [18] Wu L X. Theory and Practice of Evaluation on Fusion for Multi-source Remote Sensing Data; Ph. D. Dissertation [D] . *China Agricultural University*, 2002. [吴连喜. 多源遥感数据融合评价的理论与实践: 博士学位论文 [D] . 中国农业大学, 2002.]
- [19] Kenneth R C. Digital image processing [M] . Prentice-Hall International, Inc. 1998, 487—512.

A New Method of RS Image Fusion Preserving Spectrum

WU Lian-xi, WANG Mao-xin

(1. East China Institute of Technology, Jiangxi Fuzhou 344000, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The fusion methods such as HIS transform, Brovey transform and principal components transform could merge two optical image data of different resolutions——a high spatial resolution panchromatic image and a low spatial resolution but multi-spectral image. But these fusion methods require the spectral response range of the high spatial resolution panchromatic image are equal or approximate to that of the multi-spectral image. This paper brought forward a new kind of fusion method called Edge Enhancement Intensity Modulation (EEIM) that could merge two optical image data of different spectral characteristics based on solar radiation and land surface reflection model. By using a ratio between a high resolution image and its *LOG* filtered image, spatial details can be modulated to a co-registered lower resolution multi-spectral image without altering its spectral properties.

This paper put also forward ‘Difference Matrix Frobenius Norm’ (*DMFN*) to evaluate difference of color between the EEIM image and multi-spectral spectral image, The result of ‘*DMFN*’ showed that value of ‘*DMFN*’ of the EEIM higher than method is less than the Brovey method, and the value of entropy of the EEIM image is higher than the Brovey image. The fused production of EEIM is more excellent at information amount and spectrum preserving.

Key words: spectral preservation; EEIM fusion method; remote sensing image fusion