文章编号:1671-8860(2012)11-1316-05　　**文献标志码**:A

利用直方图匹配和低通滤波改进的 SVR 融合算法

高永刚[1,2]　徐涵秋[1,2]

(1　福州大学环境与资源学院,福州市大学城学园路 2 号,350108)
(2　福州大学遥感信息工程研究所,福州市大学城学园路 2 号,350108)

摘　要:针对 SVR 融合算法光谱失真的现象,提出了一种基于低通滤波和直方图匹配的改进 SVR 算法,即 SVRFM 算法。以 IKONOS 影像为实验数据,从光谱保真度和高频信息融入度两个方面将 SVRFM 与小波变换、SVR、Pansharp、Ehlers 和 Gram-Schmidt 等算法的融合结果进行了定性和定量对比。结果表明,SVRFM 算法的融合影像光谱信息失真小,高频信息融入度高。

关键词:影像融合;SVRFM;光谱保真度

中图法分类号:P237.3

遥感影像融合就是将低分辨率多光谱影像和高分辨率全色影像采用一定的算法将各影像的优点有机结合起来,以达到提高多光谱影像空间分辨率的技术。好的影像融合算法能减少或抑制被感知对象(或环境)解译中可能存在的多义性、不完全性、不确定性和误差,增强影像判读的解译能力,从而提高地面地物的辨识能力[1]。

如何在融入高频信息的同时减小光谱失真是目前遥感影像融合的一个难点。目前,常用的融合算法有 IHS 变换法[2]、Brovey 变换法[3]、主成分分析法(PCA)[4]、SFIM 算法[5]、小波变换法[6]、SVR(synthetic variable ratio)算法[7]、Pansharp 算法[8]、Ehlers 算法[9]和 Gram-Schmidt 算法[10]等,其中,IHS 算法、Brovey 算法融合后的影像光谱失真较大[11,12];SFIM 算法的光谱保真度较好,但其高频信息融入度较差[13];小波变换[14,15]的光谱保真度和高频信息融入度受所用小波基和小波分解层数的影响较大;Pansharp 算法的光谱保真度好,高频融入度高,但融合影像的光谱保真度受参与模拟的多光谱影像的影响显著;SVR 算法的光谱保真和高频信息融入度均较好[7],且易于实现,但将其应用于高分辨率影像的融合时,光谱失真较明显;Ehlers 算法具有较好的光谱保真度和高频融入度[9];Gram-Schmidt 算法变换后产生的各分量间的信息量没有明显的区别,其融合后影像的光谱保真度较好,融合前后同一地物光谱的波形没有变化,但存在部分不同地物的光谱相互关系发生变化的问题[16]。根据以上分析,本文以 SVR 算法为基础,提出了一种既有较高的光谱保真度,又有较高的高频融入度的高分辨率影像的融合算法——SVRFM(synthetic variable ratio base on low-pass filter and histogram matching)算法。

1　SVRFM 融合算法

SVR 算法为 Zhang 改进 Munechika 的算法得到的[7,17]。该算法首先求出低分辨率多光谱波段和高分辨率全色波段之间关系的回归系数,然后利用回归系数将低分辨率多光谱影像的有关波段模拟为全色影像,最后将原全色影像和模拟的全色影像作比值运算,并与各多光谱波段相乘来完成多波段影像的融合。但由于 SVR 算法在应用于高分辨率影像时,容易造成光谱失真,因此,针对这一问题,本文对 SVR 算法进行了改进,提出了 SVRFM 算法。该算法通过低通滤波和直方图匹配来改进 SVR 融合算法,使其同样也能应用于高分辨率影像的融合。与 SVR 算法不同的

收稿日期:2012-09-15。

项目来源:福建省自然科学基金资助项目(2011J01269);海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室基金资助项目(2010B09);福州大学科技发展基金资助项目(2009-XY-9)。

是，SVRFM 算法不是直接用原始多光谱影像与全色影像进行拟合求出它们之间的回归系数 φ，而是通过计算低通滤波后的全色影像和多光谱影像各波段之间的回归系数，利用低通滤波后的多光谱影像模拟全色影像的低频部分，然后采用比值算法生成融合影像；融合过程中进一步通过直方图匹配来减少光谱损失，其基本公式为：

$$F'(i) = \mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)\frac{\overline{P}}{P_{\mathrm{LS}}} \tag{1}$$

$$P_{\mathrm{LS}} = \sum \varphi(i)\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i) \tag{2}$$

$$F(i) = F'(i)_{\mathrm{hm}} \tag{3}$$

式中，$F'(i)$ 为该算法第 i 波段经初始融合后的 DN 值；$\overline{P}$ 是高分辨率全色波段与各多光谱波段进行直方图匹配后求得的均值影像的 DN 值；$\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)$ 是经低通滤波后多光谱影像第 i 波段的 DN 值；P_{LS} 是由低通滤波后的多光谱波段模拟而成的全色低频影像的 DN 值；$\varphi(i)$ 为 $\overline{P}$ 经低通滤波后生成的影像 $\overline{P}_{\mathrm{low}}$ 与低通滤波后多光谱波段 $\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)$ 之间的回归系数；$F(i)$ 为 $F'(i)$ 与原多光谱影像对应波段直方图匹配后所形成的融合影像的第 i 波段的 DN 值。该算法的具体步骤如下：

1）数据准备。将低分辨率多光谱影像重采样为和高分辨率全色影像相同的分辨率。

2）直方图匹配。将高分辨率全色影像 Pan 分别与重采样后的多光谱影像的各波段 $\mathrm{Mul}(i)$ 进行直方图匹配，获得全色影像与各多光谱波段直方图匹配后的影像，记为 P_i；直方图匹配采用 GML 方法[17]，其公式为：

$$\left| \sum_{k=0}^{I(f)} p_s(s_k) - \sum_{j=0}^{f} p_u(u_j) \right| ,f = 0,1,\cdots,L-1 \tag{4}$$

式中，$p_s(s_k)$、$p_u(u_j)$ 分别表示影像中 DN 值为 s_k、u_j 的概率；L 为灰度级。

3）计算均值影像。将经直方图匹配后的各高分辨率全色影像 P_i 求均值，作为直方图匹配后的全色均值影像 $\overline{P}$（简称为全色均值影像），$\overline{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i$（$n$ 为多光谱影像参与直方图匹配的波段个数）。

4）低通滤波。对全色均值影像 $\overline{P}$ 和多光谱影像 $\mathrm{Mul}(i)$ 分别进行低通滤波，生成各自的低频影像 $\overline{P}_{\mathrm{low}}$ 和 $\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)$。

5）求回归系数。利用最小二乘拟合算法计算 $\overline{P}_{\mathrm{low}}$ 与 $\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)$ 之间的回归系数 $\varphi(i)$。

6）融合。先利用式(2)生成模拟全色低频影像 P_{LS}，然后利用式(1)生成融合影像 $F'(i)$。

7）直方图匹配。利用式(3)将影像 $F'(i)$ 和原多光谱影像 $\mathrm{Mul}(i)$ 各对应波段进行直方图匹配，生成最后的融合影像 $F(i)$。

2　遥感影像融合结果评价

遥感影像融合的最终目的是实现不同分辨率遥感影像在空间分辨率和光谱信息方面的互补，因此对于遥感影像融合效果的评价，应综合考虑高频信息的融入度和光谱信息的保真度。

2.1　光谱保真度

融合影像与原多光谱影像相比，其光谱变化主要是由全色高分辨率影像中的低频信息引入造成的，因此融合影像相对于原多光谱影像会存在不同程度的光谱差异。对此，本文采用相对整体维数综合误差（erreur relative globale adimensionnelle de synthèse，ERGAS）[18]来评价融合影像各波段与多光谱影像各对应波段间的差异程度。ERGAS 作为一种光谱质量评价指标，它顾及了全色影像与多光谱影像的分辨率对光谱质量的影响，其评价结果与参与计算的影像波段数无关。ERGAS 是在均方根误差 RMSE 的基础上，进一步通过将各波段的 RMSE 与均值作比值，来综合考察融合影像和多光谱影像之间的光谱差异，其值越小，表明光谱保真度越好，理想值为 0。其计算公式为：

$$\mathrm{ERGAS} = 100\frac{h}{l}\sqrt{\frac{1}{n_c}\sum_{i=1}^{n_c}\frac{\mathrm{RMSE}^2(i)}{\mu^2(i)}} \tag{5}$$

式中，h 为高分辨率全色影像的分辨率；l 为多光谱影像的分辨率；n_c 为融合影像的总波段数；$\mu(i)$ 为融合影像的各波段 DN 值的均值；$\mathrm{RMSE}(i)$ 为融合影像与多光谱影像对应各波段的均方根误差；i 表示波段。

2.2　高频信息融入度

融合影像高分辨率空间细节信息的融入度可以通过求融合影像和高分辨率全色影像的相关系数来判断。由于影像的空间细节信息主要保留在影像的高频部分，因此为了去除影像低频部分对计算相关系数的干扰，首先要对融合影像和高分辨率全色影像作 Laplacian 高通滤波，然后计算滤波后两影像之间的相关系数[19]。相关系数越大，表示融合影像的高频信息融入度越高，其理想值为 1。相关系数(CC)的定义为：

$$\mathrm{CC}_i =$$

$$\frac{\sum_{r=1}^{M}\sum_{c=1}^{N}[F'_i(r,c)-\bar{F}'_i][P'(r,c)-\bar{P}']}{\sqrt{\sum_{r=1}^{M}\sum_{c=1}^{N}[F'_i(r,c)-\bar{F}'_i]^2\times\sum_{r=1}^{M}\sum_{c=1}^{N}[P'(r,c)-\bar{P}']^2}} \tag{6}$$

式中，F'和P'分别为经 Laplacian 滤波后的融合影像和全色影像；$\bar{F}'$ 和$\bar{P}'$为滤波后影像的均值。

3 结果与讨论

本文以 2003 年福州市的 IKONOS 全色波段和 4 个多光谱波段(11 bit)的数据作为实验数据，并选取了两个实验区进行融合实验，其中一个主要由建筑物组成，另一个由植被、水体、建筑物和道路等组成，植被中乔、灌、草各种类型都有。融合实验除 SVRFM 算法外，还选用了 SVR 以及目前常用的小波变换、集成于 PCI 软件中的 Pansharp 融合模块、ERDAS 软件中的 Ehlers 模块和 ENVI 软件中的 Gram-Schmidt 模块来进行，并从目视判读、定量指标两个方面对融合后的影像进行评价。目前小波变换的方法很多，本文选用小波基为 dbl3 的小波进行融合实验；利用 Pansharp 融合模块时，以 IKONOS 的 4 个多光谱波段作为参考影像。

通过目视判读可以看出，所有融合算法(封三彩图 3、彩图 4)的空间分辨率均比原多光谱影像有较大程度的提高，有效地增强了影像的空间细节信息量。融合影像中道路、建筑物的纹理清楚，边缘轮廓清晰可见。但在光谱保真度方面，SVR 算法、Ehlers 算法和小波算法融合影像的色调偏暗，光谱有一定损失，而 SVRFM、Pansharp 和 Gram-Schmidt 算法的色调与原多光谱影像基本一致，其光谱保真度较好。

为了更好地对融合结果进行评价，根据式(5)、式(6) 求出各种算法融合影像的 ERGAS 和 CC 的均值，从光谱保真度和高频信息融入度两个方面进行定量分析(见表 1)。

表 1 融合影像定量分析表

Tab. 1 Quantitative Evaluation of Our Used Fusion Image

算法	实验 1 区		实验 2 区	
	ERGAS	CC	ERGAS	CC
原始多光谱影像	/	0.091	/	0.056
小波	4.045	0.999	4.176	0.999
SVR	4.175	0.930	4.096	0.892
Ehlers	4.028	0.933	4.011	0.871
Gram-Schmidt	3.798	0.942	3.628	0.886
Pansharp	3.660	0.950	3.591	0.905
SVRFM	3.642	0.972	3.358	0.940

由表 1 可知，在光谱保真度方面，SVRFM 的 ERGAS 值在两个研究区中都是最小，说明该算法具有较好的光谱保真度。Pansharp 算法要求使用与全色影像波谱范围相同的多光谱影像作为参考影像来进行回归系数的计算，因此也能较好地减少光谱失真，而且具有较小的值。在高频信息融入度方面，SVRFM 算法的相关系数 CC 在两个实验区中都超过了 0.9，在所有算法中位居第二，说明 SVRFM 也具有较好的高频信息融入度。在 6 种算法中，小波算法的高频融入度最高，Ehlers 算法和 Gram-Schmidt 算法的高频融入度较差。在实验区 2 中，Ehlers 算法融合影像的块状效应明显。总的看来，6 种融合算法得到的融合影像的高频信息均有明显提高，但在光谱信息保真度上表现不尽相同。SVRFM 算法在光谱保真度和高频信息融入度两方面均具有突出的表现，是一种兼顾光谱保真度和高频信息融入度的算法。

原 SVR 算法直接利用多光谱影像来模拟全色影像，使得在进行比值运算时全色影像 Pan_H 的部分高频信息被抵消，造成融合影像的高频融入度降低；而全色影像的部分低频信息在比值运算中又未被完全抵消，造成融合影像的光谱失真明显。而本文的 SVRFM 算法通过将全色均值影像 $\bar{P}$ 进行低通滤波，去除高频信息，然后再将其与低通滤波后的多光谱影像 $\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)$ 进行拟合，求回归系数。这样通过式(2)生成的模拟全色低频影像 P_{LS} 就不含有高频信息，在下一步的融合中不会抵消全色均值影像中的高频信息。由于用低通滤波后的多光谱影像 $\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)$ 和同样经低通滤波后的全色均值影像 $\bar{P}_{\mathrm{low}}$ 进行拟合，其生成的模拟全色低频影像 P_{LS} 与全色均值影像 $\bar{P}$ 的低频信息基本一致。因此，两者在进行比值运算时，可以更有效地去除全色均值影像 $\bar{P}$ 中的低频信息。而采用低通滤波后的多光谱影像 $\mathrm{Mul}_{\mathrm{low}}(i)$ 作为式(1)的乘积因子，又减小了原多光谱影像高频信息对全色均值影像 $\bar{P}$ 的高频信息干扰；利用式(3)进一步将所生成的融合影像 $F'(i)$ 与原始多光谱影像进行直方图匹配，使得最后的融合影像 $F(i)$ 具有很高的光谱保真度。

SVRFM 融合影像的高频融入度和光谱保真度还受低通滤波窗口大小的影响，窗口尺寸越大，光谱失真越大；窗口尺寸越小，光谱保真度越好。通常情况下，高频融入度在窗口尺寸为 11 像素×11 像素时达到最大值；当窗口尺寸小于该尺寸时，随窗口尺寸的增大，其高频融入度逐渐增加；

大于该尺寸时,随窗口尺寸的增大,高频融入度逐渐降低。实验表明,采用 3×3 的低通均值滤波窗口,可以使融合影像兼有较好的光谱保真度和高频信息融入度。

4 结　语

本文提出的 SVRFM 算法较好地解决了 SVR 算法在高分辨影像融合时的光谱失真问题,同时提高了高频信息融入度。影像融合通过信息的互补,提高了多光谱影像的空间细节信息量,对影像起到了增强的作用。融合影像的高频信息融入度与光谱保真度是一对矛盾,新算法通过对 SVR 算法进行改进,使得融合结果具有较好的光谱保真度和高频信息融入度,比较好地达到了两者的平衡。

参　考　文　献

[1] Jensen J R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2005

[2] 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 (3): 343-365

[3] 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

[4] Chavez P S, Sides S C, Anderson J A. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57(3): 295-303

[5] Liu J G. Smoothing Filter-based Intensity Modulation: A Spectral Preserve Image Fusion Technique for Improving Spatial Details [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(18): 3 461-3 472

[6] Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11:674-693

[7] Zhang Y. A New Merging Method and Its Spectral and Spatial Effects[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20 (10): 2 003-2 014

[8] Zhang Y. A New Automatic Approach for Effectively Fusing Landsat 7 as well as IKONOS Images [C]. IEEE/IGARSS'02 Toronto, Canada, 2002

[9] Ehlers M. Multisensor Image Fusion Techniques in Remoe Sensing[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1991, 46(1): 19-30

[10] Clayton D G. Gram-Schmidt Orthogonalization[J]. Applied Statistics, 1971, 20(3): 335-338

[11] Choi M. A New Intensity-hue-saturation Fusion Approach to Image Fusion with a Tradeoff Parameter[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1 672-1 682

[12] Tu T M, Cheng W H, Chang C P, et al. Best Tradeoff for High-Resolution Image Fusion to Preserve Spatial Details and Minimize Color Distortion [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2): 302-306

[13] 徐涵秋. 基于 SFIM 算法的融合影像分类研究[J]. 武汉大学学报・信息科学版, 2004, 29(10): 920-923

[14] Qiang Z, Guo B. Multifocus Image Fusion Using the Non-subsampled Contourlet Transform[J]. Signal Processing, 2009, 89 (7) : 1 334-1 346

[15] 邢帅, 谭兵, 徐青, 等. 基于复数小波变换的遥感图像融合新算法[J]. 武汉大学学报・信息科学版, 2007, 32(1) : 75-77

[16] 李存军, 刘良云, 王纪华, 等. 两种高保真遥感影像融合方法比较[J]. 中国图像图形学报, 2004, 11 (9): 1 375-1 378

[17] Munechika C K, Warnick J S, Salvaggio C ,et al. Resolution Enhancement of Multispectral Image Data to Improve Classification Accuracy[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59:67-72

[18] María G, Xavier O, Octavi F, et al. A Low Computational-Cost Method to Fuse IKONOS Images Using the Spectral Response Function of Its Sensors [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1 683-1 691

[19] 徐涵秋. Landsat-7 ETM$^+$ 影像的融合和自动分类研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(2): 186-194

第一作者简介:高永刚,讲师,博士生,现主要从事遥感图像处理和卫星测高研究。

E-mail:yggao@fzu.edu.cn

An Improved SVR Image Fusion Algorithm Base on Low-pass Filter and Histogram Matching

GAO Yonggang[1,2] *XU Hanqiu*[1,2]

(1 College of Environment and Resources, Fuzhou University, 2 Xueyuan Road, Fuzhou 350108, China)

(2 Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, 2 Xueyuan Road, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To avoid the spectral distortion of SVR (synthetic variable ratio) algorithm, we propose an improved algorithm by using a low-pass filter and histogram matching performance, which is hence named SVR based on low-pass filter and histogram matching (SVRFM) algorithm. Two subsets from the IKONOS image of Fuzhou, representing different land cover types were used as test data. The spectral fidelity and the ability of gaining high frequency information were assessed by using visual and statistical analysis. The fused images were compared with those fused using the SVR, wavelet transform, pansharp, ehlers and Gram-Schmidt algorithms, respectively. The results show that the spectral fidelity of the SVRFM algorithm is generally better than the five algorithms compared.

Key words: image fusion; SVRFM; spectral fidelity

About the first author: GAO Yonggang, lecturer, Ph.D candidate, majors in remote sensing image processing and satellite altimetry.

E-mail: yggao@fzu.edu.cn

(上接第1275页)

Spatial Cognition Oriented Optimal Route Planning with Hierarchical Reinforcement Learning

ZHAO Weifeng[1] *LI Qingquan*[1] *LI Bijun*[1]

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Against the contradictions between model-driven route planning and the diversity of human cognitive preferences for spatial cognition oriented optimal routes, we present a kind of interactive route planning approach based on hierarchical reinforcement learning. In this approach, optimal route criterias are translated into immediate rewards of turning decisions at intersections, and optimal route policies with maximal cumulative rewards can be found through a two-stage learning process. The first pre-learning stage automatically identifies some nodes in road network as subgoals and constructs corresponding subtasks containing local optimal route policies for achieving the subgoals. The second real-time learning stage focuses on efficiently updating the Q values of every available state-action pair using predefined policies, and tracing the optimal routes according to Q values. The experimental results show that our proposed approach learns effectively enough and ensures the routes found close to global optimal ones.

Key words: spatial cognition; optimal route planning; hierarchical reinforcement learning; pre-learning; real-time learning

About the first author: ZHAO Weifeng, Ph.D candidate, majors in intelligent transportation system.

E-mail: wfzhao@whu.edu.cn