

文章编号:1001-9014(2004)03-0164-05

基于滤波器组的遥感图像融合方法及其性能分析研究

王宏, 敬忠良, 李建勋

(上海交通大学航空航天信息与控制研究所, 上海 200030)

摘要:提出了一种基于滤波器组的图像融合方法,用以融合高空间分辨率全色图像和低空间分辨率的多光谱图像。在高空间分辨率全色图像经过多通道滤波器组分解的基础上,用多光谱图像直接替换全色图像低频子图像的方式进行融合处理;最后对替代后的子图像进行滤波器组重构得到融合后的图像。实验结果表明,通过调整滤波器组的通道个数,该方法能够使融合图像中空间信息和多光谱信息获得更好地折衷。

关键词:图像融合;滤波器组;滤波器;遥感

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

IMAGE FUSION ALGORITHM BASED ON FILTERS BANKS AND PERFORMANCE STUDY FOR REMOTING SENSING APPLICATION

WANG Hong, JING Zhong-Liang, LI Jian-Xun

(Institute of Aerospace Information and Control, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract:An image fusion method was proposed based on the filter banks for merging a high-resolution panchromatic image with a low-resolution multispectral image. The panchromatic image was first decomposed into sub-images by using analysis filters and then the low-frequency sub-image of the panchromatic image was directly substituted by the multispectral image to merge a high-resolution panchromatic image with a low-resolution multispectral image. Finally, the fused image was reconstructed by using the synthesis filters. Experimental results indicate that the proposed approach can obtain the better trade-off between the spectral information of low-resolution multispectral sensor and the spatial properties of high-resolution panchromatic sensor by adjusting the channel number.

Key words:image fusion; filter banks; filter; remote sensing

引言

由于不同遥感成像传感器的使用,数据具有不同的空间分辨率和光谱分辨率。对于多光谱传感器来说,能够获得光谱分辨率高而空间分辨率低的多光谱图像;对于全色波段的传感器,可得到空间分辨率高的遥感图像。利用图像融合技术能将它们各自的优势结合起来,得到空间分辨率高的多光谱图像,弥补了单一图像上信息的不足,不仅扩大了应用范围,而且大大提高了遥感影像分析的精度。

至今为止,人们已发展了多种方法用以融合不同分辨率的遥感图像,其中包括:IHS变换^[1]、主成分分析^[2]、高通滤波法^[3]等经典方法。随着小波理论的发

展,基于离散小波变换^[4]以及小波框架^[5]等融合方法已广泛应用于遥感领域。近年来,随着研究的深入,人们已将多速率滤波器组^[6]的方法引入到图像融合领域。在此,本文提出了一种基于滤波器组的图像融合新方法用以融合不同分辨率的遥感图像并进行了相应的性能分析。实验结果表明本文采用的基于滤波器组融合方法具有良好的融合结果。

1 余弦调制滤波器组

图1为一个典型的 M 带最大抽取滤波器组。在本文中仅讨论一维情况,对于二维图像可采用可分离方式直接将一维滤波器组推广到二维情况。本文采用的滤波器组为余弦调制滤波器组(CMFB)。

收稿日期:2003-03-31,修回日期:2004-02-20

Received date: 2003-03-31, revised date: 2004-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(60375008)、国家863计划项目(2001AA135091)、上海市科技发展基金重大项目(02DZ15001)

作者简介:王宏,(1972-),男,河北邢台人,上海交大自动化学博士,从事图像融合,多分辨率分析。

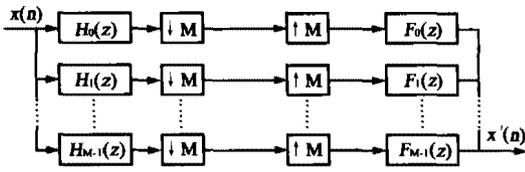


图 1 M 通道最大抽取滤波器组
Fig. 1 M channel maximally decimated filter band

在 M 带余弦调制滤波器组中,原型滤波器 $H(z)$ 是一个长度为 N , 带宽为 $\pi/(2M)$ 的线性相位低通 FIR 滤波器. 所有分析滤波器和综合滤波器都是通过调制原型滤波器得到的^[7]:

$$U_k(z) = c_k H(zW_{2M}^{k+0.5}) \quad (1)$$

$$V_k(z) = c_k^* H(zW_{2M}^{-(k+0.5)}) \quad (2)$$

那么,可得到相应的分析滤波器和综合滤波器

$$\begin{cases} H_k(z) = a_k U_k(z) + a_k^* V_k(z) \\ F_k(z) = a_k^* U_k(z) + a_k V_k(z) \end{cases} \quad 0 \leq k \leq M-1, \quad (3)$$

其中,上标“*”为复共轭; $W_{2M} = e^{-j\pi/M}$; $c_{kw} = W_{2M}^{(k+0.5)N/2}$; $a_k = e^{j\theta_k}$, $\theta_k = (-1)^k \pi/4$. 分析滤波器 $H_k(z)$ 和综合滤波器 $F_k(z)$ 相应的脉冲响应分别为:

$$\begin{cases} h_k(n) = 2h(n)\cos\left((2k+1)\frac{\pi}{2M}\left(n - \frac{N-1}{2}\right) + (-1)^k \frac{\pi}{4}\right) \\ f_k(n) = 2h(n)\cos\left((2k+1)\frac{\pi}{2M}\left(n - \frac{N-1}{2}\right) - (-1)^k \frac{\pi}{4}\right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 \leq N \leq M-1 \end{cases}$$

因此余弦调制滤波器组的设计可简化为原型滤波器的设计. 所以整个滤波器组的输出可表示为:

$$\hat{X}(z) = X(z)T_0(z) + \sum_{l=1}^{M-1} X(zW_M^l)T_l(z), \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} T_0(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} H_k(z)F_k(z) = \frac{z^{-(N-1)}}{M} \sum_{k=0}^{M-1} H_k(z)\tilde{H}_k(z) \\ T_l(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} H_k(zW_M^l)F_k(z) \quad 1 \leq l \leq M-1 \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可知 $T_0(z)$ 具有线性相位,整个滤波器组没有相位失真,只有幅度和混叠失真. 通过设计原型滤波器以尽可能消除幅度和混叠失真.

2 基于滤波器组的图像融合

对本文基于滤波器组的图像融合算法具体的实现步骤如下:

(1) 对同一地貌的低空间分辨率多光谱图像与高空间分辨率全色图像进行配准;通过对低空间分辨率图像进行插值重采样,以实现 2 者具有相同的尺寸大小.

(2) 将多光谱图像的 RGB 通道进行 IHS 转换并对高分辨率全色图像和多光谱图像的 IHS 变换中的 I 分量进行直方图匹配,使它们的灰度均值和方差相一致.

(3) 高分辨率全色图像通过分析滤波器组被分解成不同频带上的子图像,在此我们针对融合的需要未进行降采样处理,所得子图像为:

$$X_{ij}(z_1, z_2) = H_i(z_1)H_j(z_2)PS(z_1, z_2) \quad 0 \leq i, j \leq M \quad (7)$$

其中, $PS(z_1, z_2)$ 为输入原图像; $x_{ij}(z_1, z_2)$ 为高频频带的子图像.

(4) 为了尽可能多的保留多光谱图像中的光谱信息,用多光谱图像的 IHS 变换中的 I 分量直接替换高分辨率全色图像的低频部分.

融合后低频子图像为: {I 分量}; 融合后高(带)频子图像为: { $X_{ij}, 0 \leq i, j \leq M$ 且 $i+j > 0$ };

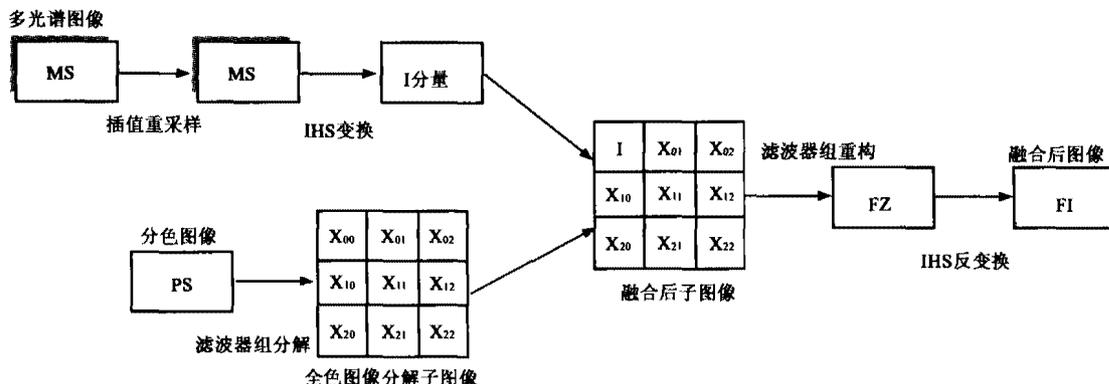


图 2 滤波器组图像融合示意图
Fig. 2 Diagram of image fusion scheme using filter banks

(5)对替代后的图像进行滤波器组重构并进行 IHS 逆变换得到融合后的图像。

$$FZ(z_1, z_2) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M F_i(z_1) F_j(z_2) X_{ij}(z_1, z_2) \quad (8)$$

$0 \leq i, j \leq M$

其中, $X_{00}(z_1, z_2) = I$; 由于我们在分解和重构时未进行降采样处理, 所以必须在重构后乘以一系数 $1/M^2$ 。

图 2 为滤波器组融合示意图(以 3 通道滤波器组为例)。

3 实验与性能分析

在实验中, 我们所用的遥感图像为伦敦地区的 SPOT 10m 全色图像和 Landsat TM 30m 多光谱图像, 摄于 1994 年。在输入原图像进行配准的基础上, 我们采用三次卷积内插法对 Landsat TM 30m 多光谱图像进行插值重采样, 使其与全色图像尺寸大小相同。图像的大小为 $512 * 512$ 。

首先我们对采用不同通道数的滤波器组融合方法所得融合结果进行了比较评价, 并分析通道数对融合结果的影响。在本文中, 为进行融合评价对比, 我们采用的滤波器组及其滤波器长度分别为 $M=3, N=36; M=4, N=48; M=5, N=64; M=6, N=72$; 为了获得具有高阻带衰减的滤波器组, 我们采用 Nguyen 在文献[7]中的方法设计原型滤波器。

当进行定量地融合结果评价时, 必须提供客观的评价准则。在此, 采用以下 3 种评价准则。

(1) 图像的平均梯度:

$$g = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \sqrt{\left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial y}\right)^2} / 2 \quad (9)$$

其中 $f(x, y)$ 为图像函数, M, N 为图像的行、列数。平均梯度反映图像的清晰度; 平均梯度越大, 清

晰度越高。它能够体现图像空间分辨率的高低。

(2) 图像的偏差指数:

$$DI = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |F(i, j) - L(i, j)| \quad (10)$$

其中, F 为融合后图像; L 为多光谱图像。偏差指数反映与多光谱图像的偏离程度; 偏差指数越小, 则偏离程度越小, 图像融合效果越好。

(3) 图像的相关系数:

$$\text{corr}(A/B) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f(i, j) - \bar{f})(g(i, j) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f(i, j) - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g(i, j) - \bar{g})^2}} \quad (11)$$

其中 \bar{f} 和 \bar{g} 分别为图像 f 和 g 的均值。融合图像与多光谱图像间的相关系数越大, 表明融合图像保留更多的光谱信息。

图 3(a) 和 (b) 为 SPOT 10m 全色图像和 Landsat TM 30m 多光谱图像。图 3(c) ~ (f) 分别为采用 3 ~ 6 通道滤波器组融合方法所得融合图像。表 1 给出了相应的融合评价结果。从融合后图像能直观地注意到, 随着通道数的增加, 融合图像的空间信息得到明显的提高, 通道数越大, 提高的越明显; 同时与原多光谱图像相比, 光谱信息存在损失, 但不明显。从表 1 所得的评价结果与我们直观的定性评价是一致的, 即反映空间分辨率的平均梯度随通道数的增加而增加, 同时反映光谱保留程度的相关系数, 随通道数的增加而减少。在基于滤波器组的融合方法中, 采用更多的分解通道会使更多的全色图像高频信息被融合到多光谱图像, 这使得融合后图像获得更多的空间信息。当更多的全色图像高频信息被融合到多光谱图像时, 势必会增加多光谱信息的损失程度。也就是说, 融合图像的空间分辨率的提高是以光谱信

表 1 融合后图像的评价结果
Table 1 Evaluation results of fused images

	相关系数			相对偏差			平均梯度		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Filter03	0.8797	0.8719	0.8911	0.3179	0.2823	0.3890	27.4301	27.4962	27.0590
Filter04	0.8457	0.8362	0.8599	0.3609	0.3201	0.4423	28.6584	28.7422	28.2317
DWT(2层)	0.8344	0.8243	0.8498	0.3735	0.3314	0.4588	28.7640	28.8587	28.3364
TM							11.0370	10.9445	11.1354
Filter05	0.8192	0.8082	0.8361	0.3933	0.3488	0.4833	28.8276	28.9228	28.3953
Filter06	0.7963	0.7839	0.8158	0.4206	0.3722	0.5146	28.8411	28.9342	28.4132
DWT(3层)	0.7551	0.7406	0.7797	0.4683	0.4124	0.5688	28.8716	28.9354	28.4447
IHS	0.6083	0.5899	0.6595	0.6551	0.5355	0.7702	29.0002	28.9709	28.8957

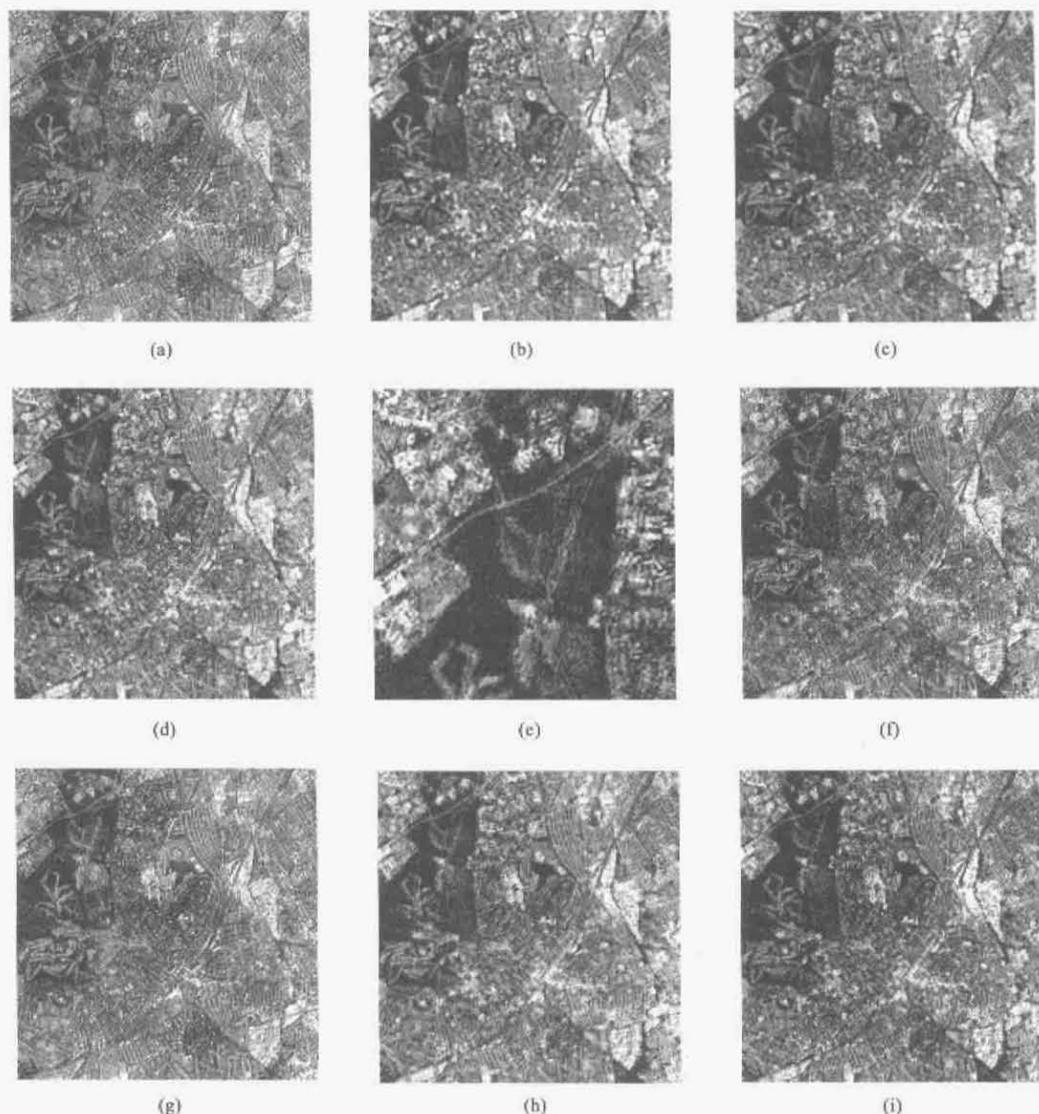


图3 输入原图像及融合后图像:(a)SPOT 10m 高分辨率全色图像(b)Landsat TM 30m 低分辨率多光谱图像(c)~(f)3~6 通道滤波器组融合图像(g)IHS 变换融合图像(h)小波变换融合图像(2 层分解)(i)小波变换融合图像(3 层分解)

Fig.3 The original images and fusion images:(a)the original SPOT 10m image (b)the original Landsat TM 30m image (c)~(f) fused image by 3~6 channel filter bands (g) fused image by IHS transform (h)fused image by discrete wavelet transform(2 level) (i)fused image by discrete wavelet transform(3 level).

息的损失为代价的,光谱信息的损失是不可避免的.我们所要做的就是在提高图像空间信息的同时,尽可能地保留融合图像的光谱信息.在本文所作的实验中,采用3通道滤波器组进行图像融合其光谱信息保留的最好,但其空间信息相对不理想;采用6通道滤波器组进行图像融合时,其空间信息提高的最多,但其光谱信息的保留相对不理想;而采用4或5通道滤波器组进行图像融合所得结果在保留大多数光谱信息的基础上空间信息也得到了大幅度地提高,相比较而言较理想.

下面我们分别与 IHS 变换以及小波变换方法(DWT)方法进行了对比.在本文中,我们选用的小波变换为双正交9-7小波.实验的分解层数为2或3层.图3(g)~(i)分别为采用 IHS 变换和小波变换所得的融合后图像.从表1可看到,各种方法所得融合图像的平均梯度比原始 Landsat TM 30m 图像即低空间分辨率多光谱图像的平均梯度显然要大得多,表明各融合方法所得融合图像的空间信息均得到较大的提高.但通过比较可知,传统的 IHS 变换方法所获得的空间信息最丰富,小波变换方法和本文

方法的空间信息也能够得到较好地保留;然而 IHS 变换方法光谱信息的损失比较大,小波变换方法光谱信息的损失比 IHS 变换方法要小得多,而本文所提方法却能保留更多的光谱信息. 综上定量分析可见,本文提出的融合方法所得的融合图像能较好地保留图像的空间分辨率和光谱信息,能够使融合图像中的空间信息和多光谱信息获得更好地折衷.

4 结论

在本文中,我们提出了一种基于滤波器组的图像融合方法,用以融合不同分辨率的遥感图像. 通过调整滤波器组的通道数,达到融合后图像在保持空间信以融合不同分辨率的遥感图像. 通过调整滤波器组的通道数,达到融合后图像在保持空间信息和多光谱信息之间的折衷. 实验结果表明了该融合方法的有效性.

REFERENCES

[1] Carper J W, Lillesand T M, Kiefer R W. The use of inten-

sity - hue - saturation transformation for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, **56**(4): 459—467.

- [2] Chavez P S, Slides 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.
- [3] Sheffigara V K. A generalized component substitution technique resolution data set [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, **58**(5): 561—567.
- [4] ZHOU J, CIVCO D L, Silander J A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(4): 743—757.
- [5] Li S T, Ianes T K, Wang Y N. Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images [J]. *Information Fusion*, 2002, **3**(1): 17—23.
- [6] Argenti F, Alparone L. Filter banks design for multisensor data fusion [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, **7**(5): 100—103.
- [7] Nguyen T Q. Near - perfect - reconstruction pseudo - QMF banks [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, **42**(1): 65—76.

(上接第 163 页)

Fig. 1 shows the reconstruction results using both CG scheme and WSD scheme with different weighting factors β . The objective functions, E , of the reconstructed images with different weighting factors are shown in row three of the right column. We find that the minimum objective function occurs at $\beta = 8$, which is the optimum weighting factor. The computation time for an iteration of the spatial location weighted steepest descent method is approximately equal to that of the CG method. From Fig. 1, we will find that the WSD method exhibits an extraordinary fast convergence rate. In addition, the WSD method recovers more precise position information of the embedded object than the CG method does.

4 Conclusions

In this paper we have presented two different reconstruction schemes for CW diffusion-based optical tomography. We analyzed that CG scheme is subject to

slow convergence and more sensitive to the perturbation closer to the boundary. We have made a comparison between the CG method and our WSD method using the synthetic data. The WSD method can effectively locate the perturbations in absorptions, and in addition, greatly reduce the computation burden.

REFERENCES

- [1] Hielscher A H, Klose A D, Hanson K M. Gradient-based iterative image-reconstruction scheme for time-resolved optical tomography [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1999, **18**(3): 262—271.
- [2] Roy R, Sevick-Muraca E M. Active constrained truncated Newton method for simple-bound optical tomography [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(9): 1627—1641.
- [3] Arridge S R, Schweiger M. A gradient - based optimisation scheme for optical tomography [J]. *Optics Express*, 1998, **2**(4): 213—226.
- [4] Arridge S R, Schweiger M. Photon - measurement density functions. Part2: Finite-element-method calculations [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(34): 8026 - 8037.