

文章编号:1001-9014(2006)02-0123-04

# PHI 高光谱数据和高空间分辨率遥感图像融合技术研究

董广军, 张永生, 范永弘

(解放军信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

**摘要:**提出了一种新的高光谱图像融合技术——基于最佳指数准则的高光谱小波包图像融合方法,即首先利用最佳指数选择高光谱的最佳合成波段,得到低分辨率的彩色合成影像,然后采用一种基于区域多特征的小波包融合算法进行融合处理.文中利用上海地区 PHI 高光谱数据和高分辨率全色航空像片来验证算法的有效性,实验结果表明该方法可有效的实现高光谱数据和高空间分辨率遥感图像的融合处理.

**关键词:**图像融合;高光谱图像;小波包;最佳指数准则

中图分类号:TP751.1 文献标识码:A

## IMAGE FUSION FOR HYPERSPECTRAL DATA OF PHI AND HIGH-RESOLUTION AERIAL IMAGE

DONG Guang-Jun, ZHANG Yong-Sheng, FAN Yong-Hong

(Information Engineering University Institute of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** A model for hyperspectral data fusion based on OIF method of optimal band selection and wavelet package transformation algorithm was put forward. The first step of the method is to obtain color fusion imagery by OIF band selection, and then the fusion technique is employed on the basis of wavelet transformation algorithm for image fusion. Hyperspectral data from PHI and high-resolution aerial image data were used for the study. Experiment shows that the method is effective.

**Key words:** image fusion; hyperspectral data; wavelet package; OIF model

### 引言

高光谱技术的发展与应用对高光谱遥感数据的处理方法提出了更高的要求,其中高光谱融合技术是热门并具有相当难度的研究领域.对于光学遥感器系统而言,图像的空间分辨率和光谱分辨率是一对矛盾,在给定信噪比的条件下,高光谱分辨率(窄光谱波段)往往意味着以降低空间分辨率为代价.为解决这一矛盾,在诸如 LOUIS, ASTER, MODIS 等高光谱卫星传感器中均加载高空间分辨率传感器,将成像光谱图像与高空间分辨率影像进行融合处理,可以大大改善成像光谱图像空间解析特性,同时保持其光谱物理特性和波段形态<sup>[1]</sup>.

目前有关多光谱遥感图像与高空间分辨率全色图像融合的文章或方法很多,但高光谱图像融合研究受目前数据源较少的限制而相对较少<sup>[2]</sup>.根据高光谱数据特点,结合光谱融合思路,张兵等人提出了

基于图像光谱复原的空间域遥感数据融合模型(SF-SR),将高光谱数据与高空间分辨率全色数据进行直方图均衡化拉伸,并分波段进行融合<sup>[1]</sup>. Zhang 等在自适应子空间分解的基础上,提出基于局部信息熵的多分辨率小波融合方法进行特征图像的提取<sup>[3]</sup>; Wilson 等人提出的基于对比敏感度的特征选择准则的高光谱图像融合算法,克服了数据量大给数据处理造成的困难<sup>[4]</sup>.但是,通常的多分辨率融合算法在进行融合时一般仅依据一个特征,而单一的特征作为准则有一定的局限性<sup>[5]</sup>.此外小波变换融合也只是对低频部分不断进行递归的分解、融合和重构处理,而对高频部分(即细节图像部分)则不予以考虑.

高光谱数据像谱合一与海量数据特点导致利用常规方法进行高光谱图像融合处理遇到一定困难,本文主要以目视判读和图像显示为出发点,针对高光谱数据特点和实际应用需求,提出了一种新的高

收稿日期:2005-05-20,修回日期:2005-09-28

基金项目:国家 863 计划(2002AA716121,2001AA131090)资助项目

作者简介:董广军(1979-),男,江苏东台人,解放军信息工程大学博士生,研究方向为遥感图像信息工程、高光谱分析应用等.

Received date: 2005-05-20, revised date: 2005-09-28

光谱图像融合技术——基于最佳指数准则的高光谱图像融合模型,其重点是对高光谱图像数据与高空间全波段数据进行融合处理,在大大改善融合后高光谱图像空间解析特性的条件下,可以保持满足应用需求的高光谱图像的光谱物理特性和波形形态,为深入的研究提供更好的条件。

## 1 基于最佳指数准则的高光谱图像小波包融合方法

通常的小波变换融合只是对低频部分不断进行递归的分解、融合和重构处理,而对高频部分(即细节图像部分)则不予以考虑。小波包的提出有力地克服了小波算法对高分辨率影像高频细节信息处理存在明显不足的这一缺陷,能够对不同分辨率上的各个高频成份进行进一步的划分,从而获取更高质量的图像。此外在实际应用中我们往往关注的是尽可能提高融合后图像空间分辨率,以及使融合后图像的色调上保持不变。为此,本文提出一种基于最佳指数准则的高光谱图像融合方法,即首先利用最佳指数选择高光谱的最佳合成波段,得到低分辨率的彩色合成影像,然后采用一种基于区域多特征的自适应小波包融合算法将其与高空间分辨率图像进行融合获取高分辨率的彩色合成影像,以克服单一特征作为融合准则的局限性,使融合信息更丰富。

### 1.1 最佳指数波段选择模型

图像数据的标准差越大,所包含的信息量也越大,而波段间的相关系数越小,表明各波段图像数据的独立性越高,信息的冗余度越小。故可采用美国查维茨提出的最佳指数(OIF)模型:

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i}{\sum_{i=1}^3 |R_{ij}|},$$

式中  $S_i$  为第  $i$  个波段图像的标准差,  $R_{ij}$  为  $i, j$  两波段图像的相关系数。其中分子为每 3 个波段图像的均方差之和,分母为这 3 个波段图像每两者之间的相关系数之和。其意义十分明显,即相关性越小,离散度(或信息量)越大越好。将每 3 个波段的 OIF 值计算出来加以排序,取其大者,即为最佳波段组合。若仅对某些特定的区域感兴趣,则可以定义兴趣区域,并按照上述法只针对这些区域求解相应的最佳组合波段。

### 1.2 小波包算法<sup>[6]</sup>

小波包是由许多小波函数组成的集合。设有函数族  $\{w_n(x), n \in N\}$ , 它们满足如下关系

$$w_{2n}(x) = \sum_k h_k w_n(2x - k), \quad (1)$$

$$w_{2n+1}(x) = \sum_k g_k w_n(2x - k). \quad (2)$$

当  $n=0$  时,  $w_0(x) = \varphi(x)$ ,  $w_1(x) = \psi(x)$ , 其中  $\varphi(x)$  为尺度函数,  $\Psi(x)$  为小波函数,  $\{h_k\}$  和  $\{g_k\}$  是与尺度函数和小波函数相对应的低通和高通 QMF 滤波器系数, 则称函数族  $\{w_n(x), n \in N\}$  是由  $w_0(x) = \varphi(x)$  所确定的小波包。根据式(1)和式(2)可得由  $w_{2n}(x)$ 、 $w_{2n+1}(x)$  重构  $w_n(x)$  的公式如下

$$w_n(2x - l) = \sum_k \{p_{l-2k} w_{2n}(x - k) + q_{l-2k} w_{2n+1}(x - k)\}, \quad (3)$$

其中  $(\{p_k\}, \{q_k\})$  是和  $(\{h_k\}, \{g_k\})$  对应的 QMF 滤波器。从而可以得到基于小波包的分解与重构算法如下:

设  $A_n^{2^j}(f(x))$  是函数  $f(x)$  在分辨率为  $2^j$  的小波包  $w_n$  的近似表示, 即

$$A_n^{2^j}(f(x)) = \sum_k S_{n,k}^j \cdot w_n(2^j x - k), \quad (4)$$

其中  $S_{n,k}^j = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) w_n(2^j x - k) dx$ 。

则由式(1)和式(2)可得分解公式如下

$$S_{2n,l}^{j-1} = \sum_m h_{m-2l} S_{n,m}^j, \quad (5)$$

$$S_{2n+1,l}^{j-1} = \sum_m g_{m-2l} S_{n,m}^j.$$

由式(3)可得重构公式如下

$$S_{n,k}^j = \sum_k p_{k-2l} S_{2n,l}^{j-1} + \sum_k q_{k-2l} S_{2n+1,l}^{j-1}. \quad (6)$$

### 1.3 基于最佳指数准则的高光谱小波包融合算法

基于最佳指数准则的高光谱小波包融合处理时,首先利用最佳指数选择高光谱的最佳合成波段,得到低分辨率的彩色合成影像。在此基础上对配准的遥感影像分别进行小波包分解,在每个层次均对上一层次的各个部分(无论高频还是低频)进行全方位的递归解析,然后分别对两景影像分解的子影像应用相应的融合策略进行融合处理,最后进行逆变换重构融合影像。一般小波包分解的层数越多,融合结果中包含的细节就越丰富,但这是以增加计算量为代价的,随着解析层次的增加,计算量增长非常迅猛,并且顶层融合损失的信息越大,因此基于小波包变换的分解层数不宜过多。通常取 3~5 之间。基于最佳指数准则的高光谱小波包融合处理算法可以归纳如下:

1. 基于最佳指数准则选择高光谱的最佳合成波段,得到低分辨率的彩色合成影像。
2. 初始化小波包分解层次数目,分解系数等参数。
3. 设计尺度函数  $\varphi(x)$  对应的低通分解滤波器和小波函数  $\Psi(x)$  对应的高通分解滤波器,以及相

应的低通与高通重构滤波器.

4. 根据小波包分解算法使用分解滤波器逐层抽样分解全色影像与高光谱彩色合成影像,获取高频分解影像和低频分解影像.

5. 对小波包分解后的高光谱彩色合成子影像和全色子影像进行融合. 为了扩展信息复合的适用范围,我们提出了基于区域特征的自适应小波包融合,其过程为:

a. 设小波包分解后的高光谱彩色合成影像为  $A(x,y)$ , 全色图像为  $B(x,y)$ , 将高光谱彩色合成影像进行色彩分离,得到 3 个波段的子图像分别为  $A_j^k(x,y)$  ( $k=1,2,3, j$  为尺度参数), 将全色影像分别对高光谱彩色合成影像 3 个波段进行直方图均衡化;

b. 对  $A_j^k(x,y)$  3 个分量影像以及  $B(x,y)$  影像各开辟  $M \times N$  处理窗口(一般大小为  $3 \times 3$ ), 求出每一个窗口的方差  $D_i$ , 窗口的能量  $E_i$ , 窗口的信息熵  $S_i$ ;

c. 分别计算  $A_j^k(x,y)$  和  $B(x,y)$  影像上像素的权值;

$W_i = a * E_i + b * D_i + c * S_i$ ;  $a, b, c$  为各特征的权值,默认为 1.

d. 按照下列公式获取融合子图像:  
 $F_j^k(x,y) = (A_j^k(x,y) * W_a + W_b * B^k(x,y)) / (W_a + W_b)$

6. 利用上述的小波包重构滤波器逆向逐层插值重构图像,最终获取融合影像.

## 2 高光谱融合实验

### 2.1 实验数据

高光谱融合实验包括最佳波段彩色合成与高光谱与高空间分辨率影像融合 2 个方面. 实验中所用数据为 2003 年 10 月获取的上海市技术物理研究所 124 个波段的 PHI 数据<sup>[7]</sup>, 其工作波长为 400 ~ 850nm, 瞬时视场角为 1.5mrad, 数据量化率为 12bit. 仪器装载于运五飞机上, 航高 2 163m, 纬度范围 31.18° ~ 31.20°, 经度范围为 121.46° ~ 121.51°. 本文选择原始数据中杨浦大桥区域作为研究对象, 图像大小为 647 × 721 个像素. 此外还收集了同一区域高分辨率全色航空影像进行实验, 以获取高分辨率彩色融合影像.

### 2.2 结果与分析

为验证方法的有效性,我们对上述 PHI 数据进行了试验,具体融合处理流程如下(如图 1 所示):

1. 对高光谱融数据进行预处理,包括辐射校

正、大气校正和几何校正等<sup>[8]</sup>.

2. 对高空间分辨率图像进行几何校正等预处理,并利用最佳指数模型选择高光谱的最佳合成波段,得到低分辨率的彩色合成影像.

3. 对高光谱与高空间图像进行空间配准,高光谱与高空间图像点对点的匹配是图像融合重要步骤,其目的是在一定程度上消除不同传感器的图像在分辨率、时相、角度等方面的差别,并确定二者的每一像元的空间位置对应关系.

实验中图像配准时首先在 2 幅影像上选择一定量的均匀分布的同名点,主要选择特征突出的点如道路交叉点、花园中心、房屋角点等,然后利用采集的同名点选择二次多项式法进行影像配准,采用双线性插值方法对图像进行重采样,输出配准的图像,以实现影像间配准.

4. 按照上述的基于最佳指数准则的高光谱图像小波包融合算法对配准后的低分辨率彩色影像和高分辨率航空全色影像进行融合处理.

在实际应用中为减少计算的盲目性与工作量,我们按照波长范围以及原始影像的中心波长对合成影像中的红、绿、蓝 3 个波段的选择加以条件限制,其中红色波段选择原始 124 波段中 43 ~ 66 波段,绿色波段选择范围为 22 ~ 42,蓝色波段对应范围为 1 ~ 21. 最佳波段选择结果为红色波段为 55,绿色波段为 33,蓝色波段为 10,最佳指数为 56.881. 图 2(a)为波段处理得到的影像,可以看出波段合成后的影像较好地保持了原始信息的光谱特征,为图像目视解译提供了有利的条件. 图 2(b) 和 2(c)为杨浦大桥区域高光谱数据与高空间分辨率全色影像合成的影像,可以看出无论是空间分辨率还是图像的清晰程度均比高光谱影像有较大的提高,桥上汽车目标形态非常明显,花坛中央的标志更加突出,同时色彩信息反映较好.

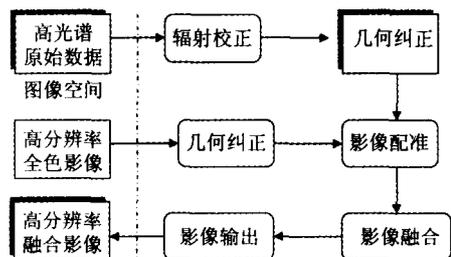


图 1 基于最佳指数特征选择准则的高光谱小波包融合处理流程

Fig.1 The process of hyperspectral fusion based on OIF method and wavelet package transformation fusion algorithm

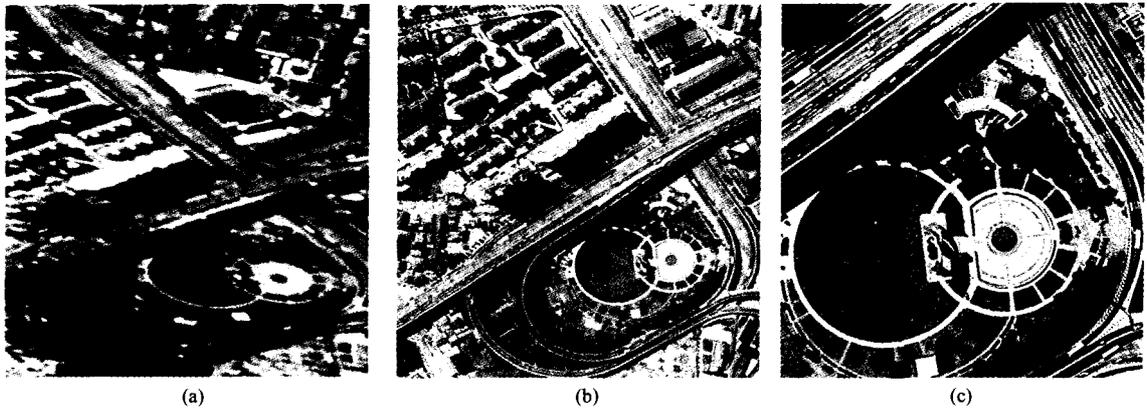


图2 PHI 高光谱数据基于最佳指数准则的小波包融合处理效果图 (a) 高光谱最佳波段合成图 (b) 融合结果图 (c) 融合局部图

Fig.2 PHI hyperspectral fusion image based on OIF method and wavelet package transformation fusion algorithm (a) hyperspectral composite image based on OIF (b) fusion image (c) the part of fusion

此外信息熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要的指标,平均梯度反映了图像中微小细节反差能力与纹理变化特征,同时也反映了图像的清晰度,相关系数可反映融合结果和原多光谱图像的相似程度.因此我们选择信息熵、平均梯度、相关系数等指标对融合结果进行定量分析,结果见表1所列.

从表中可以看出,基于最佳指数准则的高光谱图像小波包融合处理后图像熵值增加,即融合信息量较为丰富.相关系数较大,可以看出其在保持图像的光谱信息上效果比较好.平均梯度明显增大,定量的融合实验评价结果表明,融合后影像不仅很好地保留了原多光谱图像的光谱特征,而且在增加融合结果信息量,增强信息透明度和锐化度等方面均收到很好的效果.

### 3 结语

高光谱分辨率遥感图像与高空间分辨率遥感图像的融合是随着成像遥感技术的最新发展而兴起的图像融合技术,在城市规划、环境监测、土地利用、军事侦察等方面有广阔的应用前景,但是大部分研究和尝试仍属于试探性质,如何将这些理论与方法变成普遍化准则,在遥感领域中取得成功应用,还有很

长的路要走.本文在研究相应算法的基础上,提出基于最佳指数特征选择准则的高光谱图像小波包融合算法,实验结果表明该方法能够有效得到高光谱融合图像.

### REFERENCES

- [1] ZHANG Bing. Hyperspectral data mining supported by temporal and spatial information [D]. Institute of Remote Sensing Applications of Chinese academy of Sciences Doctor Paper (张兵.时空信息辅助下的高光谱数据挖掘.中国科学院遥感应用研究所博士论文), 2002.
- [2] Jong-Hyun Park, Ryutaro Tateishi a, Ketut Wikantika. Multisensor data fusion using multiresolution analysis [C]. Holand: ISPRS, 2000:987—1002.
- [3] Zhang Jun-Ping, Zhang Ye. Hyperspectral image multi-resolution fusion based on local information entropy [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2002, 11(2):163—166.
- [4] Wilson Terry A, Regers Steven K, Matthew Kabrisky. Perceptual-based image fusion for hypetspectral data [J]. *IEEE Trans, On G. R. S.*, 1998, 35(4):1007—1017.
- [5] ZHANG Jun-Ping, ZHANG Ye. Hyperspectral image classification based on multiple features during multiresolution fusion [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张钧萍,张晔.基于多特征多分辨率融合的高光谱图像分类. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(4):345—348.
- [6] ZHU Shu-Long, GENG Ze-Xun. *Wavelet Transforms for Remote Sensing Image Processing* [M]. Beijing: China PLA Publishing House (朱述龙,耿则勋. *小波理论在图像处理中的应用*.北京:解放军出版社), 2000, 24—25.
- [7] XUE Yong-Qi, WANG Jian-Yu. *Operative Modulor Imaging Spectrometer. Development of Information Acquisition and Processing Technology* [M]. Beijing: China Timbering Industrial Publishing House (薛永祺,王建宇. *实用型模块机载成像光谱仪,信息获取与处理技术*.北京:中国建材工业出版社), 1998, 43—46.
- [8] Bethel J S, Lee C, Landgrebe D A. Geometric registration and classification of hyperspectral airborne pushbroom data [C]. Holand: ISPRS, 2000:567—571.

表1 融合图像定量分析结果表

Table 1 The quantitative analysis result of hyperspectral fusion image

融合方法	信息熵	标准差	平均梯度	相关系数
原始全色影像	7.650	57.598	9.529	-
原始高光谱影像	10.756	29.307	1.777	-
融合影像	13.095	57.78	9.566	0.838