

基于传感器光谱特性与分类的遥感图像融合

倪 翠, 关泽群, 林 怡

(同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092)

摘要: 为了提高多光谱图像和全色图像的融合质量, 提出了一种基于广义亮度色度饱和度(IHS)变换与分类思想相结合的遥感图像融合算法. 在充分考虑各波段传感器的相对光谱响应的基础上, 在强度分量的构造和空间细节信息的注入方面进行了改进. 改进后的方法首先对图像进行分类, 然后采用高斯概率密度函数对分类构造后的影像进行加权融合, 有效地改善了光谱畸变问题, 且能同时对所有的光谱波段进行融合. 以资源卫星 IKONOS 影像进行实验, 结果表明该方法不仅能使融合图像具有较好的空间分辨率, 还能很好地保持原有多光谱图像的光谱响应特性, 具有潜在的应用前景.

关键词: 图像融合; 分类加权; 高斯概率密度函数; 光谱响应特性

中图分类号: TP 751.1; TP 79

文献标识码: A

Fusion of Remote Sensing Images Based on Sensor Spectral Response and Classification

NI Cui, GUAN Zequn, LIN Yi

(Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to improve the fusion quality of the multi-spectral images and panchromatic images, a new fusion algorithm based on the generalized IHS transformation and supervised classification is proposed. Taking into account the spectral response of the multispectral and panchromatic sensors, the generalized HIS fusion can be improved in two parts: the construction of intensity component and injection method of detail information. In the proposed method, the images are classified into different parts, and then the Gaussian probability density function is used to do the weighted fusions to the images after the classification. These works reduce significantly the spectral distortion and all the multispectral bands can be fused at the same time. IKONOS

images is taken as an example to evaluate the performance and efficiency of the proposed method. The result shows that the proposed algorithm can provide high spatial resolution images, as well as the spectral features based on original multi-spectral images. This algorithm proves to be prospective in the application for image fusion.

Key words: image fusion; classified weight; Gaussian probability density function; spectral response feature

大多数的资源卫星可同时提供高分辨率的全色影像(PAN)和低分辨率的多光谱影像, 如 Landsat 7, SPOT, IKONOS, Quickbird 等. 越来越多的遥感应用需要综合利用多光谱与全色影像各自的优势, 以获得分辨率高、光谱信息多的遥感数据, 为环境研究和土地利用分析等领域提供重要的参考资料^[1-2], 融合技术正是解决此问题的有效途径.

常用的遥感图像融合方法主要有通用的分量替换融合方法与基于多分辨率分析的融合方法^[3-14]等. 通用的分量替换融合方法中最常用的融合方法之一是亮度色度饱和度(IHS)变换融合方法, 其计算代价较小, 但是融合图像的光谱质量不高. 针对 IHS 融合方法存在的光谱失真问题, 不少学者相继提出了一些改进的方法. T. M. Tu 等人以线性 IHS 变换为基础提出了一种广义 IHS 变换(GIHS)融合方法^[7-8], 多光谱图像的亮度 I 由红波段(R 波段)、绿波段(G 波段)、蓝波段(B 波段)以及近红外波段(N 波段)的 4 个波段的平均值构成, 该融合方法的主要特点是无需进行 IHS 逆变换, 融合过程就是多光谱图像、全色图像和 I 分量之间的加减运算, 减少了融合的计算代价, 但融合图像的光谱失真依然较大.

收稿日期: 2010-10-11

基金项目: 上海市科委项目(08DZ1205708)

第一作者: 倪 翠(1982—), 女, 博士生, 主要研究方向为摄影测量与遥感. E-mail: 09tjnc@tongji.edu.cn

通讯作者: 关泽群(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为遥感图像处理、计算机视觉、地理信息系统.
E-mail: zequnguan@tongji.edu.cn

为此,Choi M^[10]在 GIHS 融合方法的基础上,采用平衡参数的快速融合方法,通过调节平衡参数来控制融合图像的光谱质量和空间细节质量.该方法的主要不足在于没有给出如何选择最优的平衡参数. González-Audicana M 等^[11]基于传感器的光谱响应函数,结合 GIHS 研究了一种快速遥感图像融合方法,但是该方法在构建遥感器的光谱响应函数时,参数的选择需要根据经验估计.

本文以 GIHS 融合方法为前提,充分考虑全色传感器的光谱范围以及光谱响应,引入高斯概率密度函数,在构造 I 分量和空间细节分量调制两方面进行了改进.

1 传感器的光谱特性

多数资源卫星同时搭载全色和多光谱传感器.理论上,各个多光谱波段应较好地分离且恰好与全色波段覆盖相同的光谱范围,然而实际并非如此,传感器记录的辐射能量是入瞳处的辐射能量与传感器的光谱响应共同作用的结果.表 1 给出了多种全色传感器的光谱范围.通过定义权值来估计全色波段的辐射值.以 IKONOS 影像为例,定义式如下:

$$P = \omega_B B + \omega_G G + \omega_R R + \omega_N N + \epsilon \quad (1)$$
式中: P, B, G, R, N 分别对应全色、蓝、绿、红、近红外波段的辐射值; $\omega_B, \omega_G, \omega_R, \omega_N$ 分别为相应波段的加权系数;由于实际上全色波段比多光谱波段覆盖了更大的范围,考虑将这部分加上,在公式中用 ϵ 表示.

进一步推广,全色波段与其光谱范围覆盖下的多光谱波段近似满足以下线性关系:

$$P = \sum_i \omega_i M_i + \epsilon \quad (2)$$

式中: i 为波段数; ω_i 为相应波段的加权系数; M_i 为全色波段光谱范围覆盖下的多光谱波段.

表 1 全色传感器的光谱范围

Tab.1 Spectral range of panchromatic sensor		
卫星名称	光谱范围/ μm	对应的多光谱波段
Landsat 7 (ETM+)	0.52~0.90	2(G),3(R),4(N)
IKONOS	0.45~0.90	1(B),2(G),3(R),4(N)
Quickbird	0.45~0.90	1(B),2(G),3(R),4(N)
SPOT 5	0.48~0.71	1(G),2(R)
IRS P 6	0.50~0.85	1(G),2(R),3(N)
EO1 (ALI)	0.48~0.69	2(B),3(G),4(R)
ALOS	0.52~0.77	2(G),3(R)

2 IHS 变换和 GIHS 变换融合算法

2.1 IHS 变换

IHS 融合方法是一种比较成熟的经典方法,其基本思想是:将低分辨率多光谱影像从红(R)、绿(G)、蓝(B)空间转换到 IHS 空间.由于 IHS 彩色系统中,亮度 I 、色度 H 和饱和度 S 这 3 种分量之间的相关性很低,且 I 分量反映了图像的几何特征,因此用高分辨率的 I 分量替换原来的 I 分量后,再通过逆变换得到融合影像.具体流程如下^[12]:

(1) 空间转换

$$\begin{bmatrix} I \\ H \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & 2\sqrt{2}/6 \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R, G, B 分别表示原始低分辨率多光谱图像 R 波段, G 波段, B 波段.

(2) 用 P 图像作为高分辨率的 I 分量替代原来的 I 图像.

(3) 逆变换

$$\begin{bmatrix} F(R) \\ F(G) \\ F(B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ H \\ S \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $[F(R), F(G), F(B)]^T$ 表示融合后的图像.

2.2 广义 IHS 变换(GIHS)

Tu 等^[7-8]等对 IHS 变换的实质进行了探讨,提出了一种快速 IHS 变换融合方法,考虑从 RGB 空间到 IHS 空间的彩色转换为线性变换,依据 IHS 变换融合思想,利用新的强度分量 I_{new} ($I_{\text{new}} = P, P$ 表示为全色图像的灰度值)替换 I 分量,再通过逆变换得到融合影像 F ,即有

$$\begin{bmatrix} F(R) \\ F(G) \\ F(B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I + (I_{\text{new}} - I) \\ H \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I + \delta \\ H \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\delta = I_{\text{new}} - I, I = (R + G + B)/3$.

式(2)表明融合图像 $[F(R), F(G), F(B)]^T$ 可以通过对原始影像 $[R, G, B]^T$ 进行简单的加法运算获得.针对 IKONOS 影像,考虑到其全色波段的光谱范围覆盖了 N, R, G, B 4 个波段(见表 1),Tu 等引入近

红外波段(N)来构造 I 分量,同时将快速 IHS 融合方法从 3 个波段扩展到了 4 个波段,得到了一种广义的 IHS 变换.

$$\begin{bmatrix} F(N) & F(R) & F(G) & F(B) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} N + \delta & R + \delta & G + \delta & B + \delta \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

式中: $\delta = I_{\text{new}} - I$, $I = \frac{1}{4}(N + R + G + B)$.

3 基于分类加权的 GIHS 变换融合新算法

GIHS 变换融合方法操作简单,计算量小,因而得到了广泛的应用.然而,其调整策略仅针对 IKONOS 影像,推广性较差.本文在充分考虑传感器光谱响应特性的基础上,从两个方面对 GIHS 变换融合方法进行了改进.

3.1 基于分类思想的 I 分量重构

由于全色波段与其光谱范围覆盖下的多光谱波段近似满足线性关系,因此,无论参与融合的波段为哪几个波段,均利用全色波段光谱范围覆盖下的多光谱波段来构造 I 分量,且根据各波段的光谱响应采用不同的加权系数,即有

$$I = \sum_i \omega_i M_i \quad (7)$$

加权系数 ω_i 的确定至关重要. Dou^[15] 等通过全色与多光谱传感器的光谱响应函数进行线性回归,得到适用于一组 IKONOS 影像的系数. Boggione^[16] 等依据全色与多光谱传感器的光谱响应曲线覆盖的面积,得到一组系数.然而,实际应用中获得的遥感影像往往受到卫星工作状态、大气效应、成像误差等因素的影响,直接依据光谱响应函数得到的加权系数并不适用于所有影像,特别是受大气影响严重的影像.因此,本文在考虑传感器光谱响应的基础上,通过多元线性回归来获取加权系数.

首先根据遥感影像上不同地物特征,对影像进行分类处理(共分成 j 类),然后计算分类后的图像的加权系数,得到一系列 I_j 值,为下一步通过高斯概率调整空间细节分量提供了保证.不同于以往的对整幅影响直接求解 I 分量,增加分类这一过程,使得求得的 I 更加具有针对性,融合过程更加准确.

算法流程如下:

(1) 对全色影像进行低通滤波和下采样,将其退化到与多光谱影像相同的分辨率.

(2) 对多光谱影像进行分类,采用最大似然法

分为 j 类.例如河流、建筑用地等.

(3) 假设满足公式(2),对不同类地物的全色和多光谱影像进行多元线性回归,共得到 j 组构造 I 分量的加权系数 ω_i .文中对 IKONOS 影像进行实验,得到的系数为 $[\omega_B, \omega_G, \omega_R, \omega_N]$.公式(2)中的常数项,在提取空间细节分量 δ 时对其进行均值调整.

3.2 基于高斯概率对空间细节分量 δ 的调整

传统的 IHS 方法将空间细节分量同等地注入参与融合的各个多光谱波段.本文方法将对其进行改进.根据上节计算得的一系列 I 分量,利用高斯概率^[17]对空间细节分量进行调制后,再注入各个波段中,即公式(6)改写为

$$F(M_k) = M_k + a_k f_{\text{gauss}}(\delta) \quad (8)$$

式中: M_k 为参与融合的多光谱波段; $\delta = I_{\text{new}} - I$, $I_{\text{new}} = P, I$ 分量依照公式(7)构造; $f_{\text{gauss}}(\delta)$ 为高斯概率密度函数;为了保持光谱响应特性,考虑注入的空间细节与原始多光谱波段成比例,则 $a_k = M_k / I$.

为了使不同类的地物得到更好的融合效果,文中引入一种自适应调整的方法,即高斯概率分布.若随机变量 x 服从一个数学期望为 μ 、标准方差为 σ^2 的高斯分布,其概率密度函数为

$$f_{\text{gauss}} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

认为 δ 服从正态分布,也就是说 $x = \delta$.通过分类的结果,可以从原有的一对全色和多光谱影像中获取到 j 组影像,从而计算出 j 个 I 分量(I_1, I_2, \dots, I_j),即 j 个 δ 值,进而求其均值与方差.公式(8)可以通过概率大小使得某一地物能更好地在融合过程中调整自身的空间细节和光谱信息,使各类地物合并之后得到的融合影像既具有较高的空间分辨率,又可以保留较全的光谱信息.

4 融合实验与分析

为了验证所提算法的有效性,对高分辨率的 IKONOS 图像的融合进行分析比较.由表 1 可以得出,IKONOS 卫星 PAN 图像的光谱范围是 $0.45 \sim 0.90 \mu\text{m}$,刚好覆盖多光谱图像 1, 2, 3, 4 波段.分别利用 HIS 变换、Tu 的广义 HIS 变换、Choi 的平衡参数法 GIHS(其中参数取 5)、Hong 的基于 atrous 小波的 GIHS 融合方法(其中高频结合一致性检测选取绝对值最大)和基于分类加权的 GIHS 变换方法对其进行融合处理.图 1 为原始的多光谱图像与全色图像.

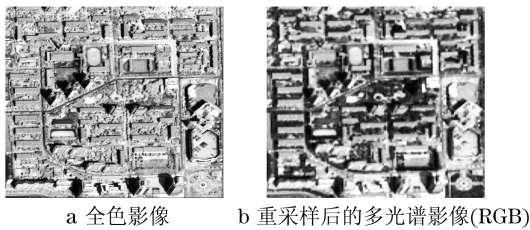


图 1 原始图像
Fig.1 Original image

首先采用本文方法对影像进行分类. 由于影像上地物比较简单,考虑到减小计算量问题,实验中将其分为两类,如表2所示. 由表中可以看出,不同的

地类对应不同的 I 分量,计算出每组数据的均值与方差后,根据公式(9)得到相应地类融合的结果,再由遥感软件(ERDAS)进行合并,从而得到融合的最终结果. 截取 3,2,1 波段合成,如图 2 所示.

表 2 IKONOS 分类结果计算的 I 分量的
加权系数(由公式(8)计算)
Tab.2 IKONOS weighting coefficient of I value
based on classification result

分类结果	构造 I 分量的加权系数
草地	{ -0.021 3,0.117 9,0.237 5,0.643 1 }
建筑区	{ -0.071 0,0.092 2, -0.014 3,0.321 9 }



图 2 IKONOS 融合结果
Fig.2 Fusion results of IKONOS

由图 2 可以看出,实验中所有算法在光谱质量、空间细节质量方面都优于原始多光谱影像,表明本文算法和其他融合算法都提高了融合图像的质量. 从光谱质量看,IHS 变换融合结果存在较明显的光谱畸变,光谱信息损失较大. 本文算法的融合图像,其光谱质量和 GIHS、atrous + GIHS 方法、Choi 方法相比很难区分优劣,但优于 IHS 变换. 从空间细节质量上,IHS 变换融合结果边缘不清晰,有失真现象. GIHS 方法较好地保留了光谱信息,但是在空间分辨率上不如其他方法. 本文算法融合的图像和 atrous + GIHS 方法和 Choi 方法很难区分优劣,但是优于 IHS 和 GIHS 变换结果.

为了更客观地比较融合图像,本文采用以下指标对融合结果进行定量评价.

(1) 空间细节质量方面. 图像清晰度评价函数^[18-19]是对所成像的清晰度进行评价,常见的包括基于梯度的函数,如 TenenGrad 函数、Brenner 函数、平方梯度函数、Vollath 函数、加窗梯度函数. 在图像处理中,梯度函数常被用来提取边缘信息,对于边缘信息多的图像应该有更大的梯度函数值;基于熵的函数,如熵函数等,根据香农信息理论,熵最大时信息量最多. 因此认为清晰度越好的图像的熵值越大. 各种算法的空间质量评价结果见表 3.

表 3 空间质量比较
Tab.3 Comparison of spatial qualities

方法	TenenGrad 函数值	Brenner 函数值	平方梯度函数值	Vollath 函数值	加窗梯度函数值	熵函数值
全色图像	100.000 0	100.000 0	100.000 0	100.000 0	100.000 0	100.000 0
本文方法	98.869 0	96.352 5	97.387 2	80.236 4	97.045 1	99.956 8
atrous + GIHS	96.108 8	90.053 3	92.760 4	82.560 0	93.083 1	99.556 8
Choi-GIHS	76.820 6	90.021 6	76.417 7	68.536 9	69.905 5	99.217 2
GIHS	73.016 9	86.494 6	73.045 7	69.959 2	66.994 8	99.303 5
IHS	69.357 4	86.837 7	68.067 6	69.931 4	62.770 6	99.048 2

(2) 光谱质量方面. 采用均值偏差、相关系数、通用图像质量指数 3 个指标共同评价融合结果. 其中均值偏差反映了融合影像与参考多光谱影像光谱

特征变化的平均程度,理想情况下为 0;相关系数反映了融合影像光谱特征保持程度,光谱信息保持越多,其取值越接近于 1;通用图像质量指数反映了融

合影像的光谱质量,其值越高,表明融合影像与参考多光谱影像的相似程度越高.各种算法的融合图像与原始多光谱图像对应波段间光谱质量评价结果见表 4.

表 4 光谱质量比较
Tab.4 Comparison of spectral qualities

方法	相关系数				均值偏差				质量指数			
	N	R	G	B	N	R	G	B	N	R	G	B
IHS		0.656 7	0.702 1	0.784 3		1.027 1	0.930 7	1.024 0		0.760 7	0.687 0	0.639 6
GIHS	0.944 3	0.959 0	0.962 7	0.917 4	0.880 8	0.816 8	0.822 3	0.841 1	0.853 5	0.818 6	0.785 6	0.744 3
Choi	0.955 0	0.958 7	0.969 1	0.952 0	0.807 3	0.891 2	0.865 6	0.916 9	0.854 1	0.871 3	0.855 6	0.833 3
atrous + GIHS	0.955 0	0.963 9	0.971 1	0.956 0	0.612 0	0.530 9	0.501 6	0.509 3	0.858 9	0.871 2	0.858 6	0.853 0
本文方法	0.955 2	0.967 0	0.974 1	0.955 5	0.512 0	0.481 8	0.466 0	0.485 6	0.867 6	0.891 0	0.871 0	0.862 0

从表 3 的评价值可以得出,本文提出的方法在融合结果中,除了空间细节质量的 Vollath 函数比 atrous + GIHS 方法略差,在其他各个评价函数中均优于其他方法,而且清晰度值最接近全色图像.因此整体上看,本文提出的方法对于提高融合图像的空间分辨率比较适当.从表 4 中可以看出,本文提出算法的各个波段相关系数值虽然最大,但仅略高于 atrous + GIHS 算法.结合其余两个指标的值,可以明显得出本文所提的算法在光谱质量的改善方面优于其他算法.综上所述,本文提出的方法所得到的融合结果无论是在空间质量上还是在光谱质量上均优于其他各种方法,融合结果不仅保留了原始多光谱影像的光谱信息,且最大程度地提高了空间分辨率,边缘清晰.

5 结论

本文从遥感的物理基础和影像特征出发,基于分类加权思想与广义 IHS 融合的方法,提出了一种新的光谱保持型遥感影像融合方法.该方法对广义的 IHS 融合方法进行了两点改进,首先考虑了遥感影像中地物的不同,对影像进行监督分类.在分类的基础上考虑全色传感器的光谱范围以及全色与多光谱波段之间的关系,采用多元线性回归重新构造了 I 分量.其次,根据高斯概率函数对注入的空间细节分量进行调制,根据概率大小自适应调整影像上某一地类在融合结果中的位置,使其光谱及空间分辨率达到最优.此外,本方法可以同时对所有的光谱波段进行融合.针对 IKONOS 影像进行实验,结果表明,本文提出的方法不仅空间细节质量提高了,最接近全色图像,同时又较好地保持了原有多光谱影像的光谱信息,综合性比其他方法要好.

参考文献:

[1] Pohl C, Van Genderen J L. Multi-sensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(2): 823.

[2] Chen C M, Hepner G F, Forster R R. Fusion of hyper-spectral and radar data using the IHS transformation to enhance urban surface features [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2003, 58: 19.

[3] 杨恒, 裴继红, 杨万海. 基于边缘信息的多光谱高分辨率图像融合方法[J]. 自动化学报, 2002, 28(3): 441.

YANG Heng, PEI Jihong, YANG Wanhai. A method to fuse multispectral and high resolution images based on edge information[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(3): 441.

[4] Jorge Nenez, Xavier Otazu, Octavi Fors. Multi-resolution based image fusion with additive wavelet de-composition [J]. IEEE Trans on Geo-science and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1204.

[5] 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.

[6] Thomas Claire, Ranchin Thierry, Wald Lucien, et al. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: a critical review of fusion methods based on remote sensing physics[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(2): 1301.

[7] TU Teming, HUANG P S, HUNG Chungling, et al. A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(4): 309.

[8] TU Teming, HUANG P S, HUNG Chungling. A new look at IHS-like image fusion methods [J]. Information Fusion, 2004, 2(3): 309.

[9] 吴艳, 杨万, 李明. 多光谱与高分辨率图像融合算法研究[J]. 光子学报, 2003, 32(2): 174.

WU Yan, YANG Wan, LI Ming. Fusion algorithm of multispectral and high-resolution panchromatic images[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(2): 174.

[10] CHOI Myungjin. A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 1672.

(下转第 1870 页)