

基于比值变换的全色与多光谱图像高保真融合方法

徐其志 高峰

(北京航空航天大学计算机学院数字媒体北京市重点实验室 北京 100191)

摘要 随着遥感技术的快速发展,越来越多的成像卫星可采集同时相的全色和多光谱图像。通常,多光谱图像的分辨率低于全色图像,但实际应用中人们更迫切地需要提升多光谱图像的分辨率。当前,研究人员已提出了大量的图像融合方法来解决这个问题,但依然存在光谱失真、细节模糊等问题。此外,真实遥感图像的尺寸较大,现有融合方法难以满足实际应用的高时效要求。为此,提出了基于比值变换的全色与多光谱图像高保真融合方法。根据全色与多光谱图像分辨率之比,该方法对全色图像先下采样,再上采样,生成全色降质图像;同时,对多光谱图像进行上采样,得到多光谱降质图像;然后,计算全色与其降质图像的比值,将多光谱降质图像乘以该比值生成融合图像。实验表明,本方法的保真效果好,性能优于对比方法。

关键词 图像融合,全色锐化,图像增强,比值变换

中图法分类号 TP391.4 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.10.004

High Fidelity Panchromatic and Multispectral Image Fusion Based on Ratio Transform

XU Qi-zhi GAO Feng

(Beijing Key Laboratory of Digital Media, School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract With the rapid development of remote sensing technology, more and more satellites can simultaneously acquire both panchromatic (PAN) and multispectral (MS) imagery. In general, spatial resolution of the MS imagery is relatively lower than that of PAN imagery. However, MS imagery with high spatial resolution is more desirable in application. Although various image fusion algorithms have been developed to pansharpen MS imagery, there are still some problems regarding spectral and spatial distortion. In addition, due to large size of remote sensing imagery product, running times of existing fusion methods are hard to match user's expectation. To solve these problems, a high fidelity fusion method based on ratio transform was proposed to fuse PAN and MS imagery. In this method, a degraded image is generated by down-sampling and up-sampling of PAN image, while a MS image is up-sampled by bilinear interpolation. Then, fused image is obtained by multiplying the up-sampled to a ratio between the PAN image and its degraded version. Experimental results show that the proposed method has better spatial and spectral fidelity performance than compared methods.

Keywords Image fusion, Pansharpening, Image enhancement, Ratio transform

1 引言

目前,大部分光学卫星均采集同时相的全色与多光谱图像,如 SPOT、Landsat 7、IKONOS、QuickBird、WorldView-2、ZiYuan-3。通常,对于同时相的全色与多光谱图像,前者的分辨率优于后者,其原因在于^[1,2]:全色感应器(detector)接收入射光的光谱范围远比多光谱感应器宽,若要接收相同能量的人射光,多光谱感应器的物理尺寸需要大于全色感应器;此外,受卫星链路传输带宽的限制,直接提高多光谱图像的采集分辨率,将大大增加星上数据的下传压力。然而实际应用中,人们需要更高分辨率的多光谱图像,例如在遥感图像判读中需要高视觉质量的融合图像。因此,自从 20 世纪 80 年代开

始,图像融合技术逐步受到研究人员的关注,至今依然是数据融合领域的研究热点^[3]。

目前,研究人员已提出了大量的图像融合方法,其可分为分量替换(component substitution)、频率域变换以及比值变换等融合方法。分量替换法首先利用矩阵变换计算保留分量和被替换分量,然后通过对多光谱图像各波段的加权来构造替换分量,最后利用矩阵逆变换得到融合图像。该方法的缺点在于:不考虑图像的局部差异,对于每一个光谱波段而言,一旦其权值确定,该波段的所有图像区域均利用这一权值进行累加^[4]。因此,在某些局部区域,融合图像存在着明显的光谱失真现象。频率域变换融合方法是研究最为广泛的融合方法,但因频率变换存在细节模糊的先天不足而难以实用。研

到稿日期:2013-05-16 返修日期:2013-08-15 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2010CB327900),国家杰出青年科学基金项目(61125206)资助。

徐其志(1983—),男,博士,主要研究方向为遥感图像配准、融合与理解,E-mail: xqzfeiyang@gmail.com;高峰(1985—),男,博士生,主要研究方向为遥感图像配准、融合与理解、遥感图像目标识别。

究人员提出了许多方法试图克服细节失真问题,例如Alparone 等人^[5]利用非抽取小波变换大大改善了融合图像的细节失真问题,并在2006年国际遥感图像融合竞赛中胜出。尽管如此,该方法的实际应用效果依然差强人意。比值变换融合方法首先根据某种假设计算多光谱上采样图像的变换比值,然后将多光谱上采样图像与该比值相乘得到融合图像。下面具体介绍比值变换融合方法的基本原理并分析其存在的问题。

同时相的全色与多光谱图像之间存在很强的相关性,这种强相关性是比值变换基本假设成立的现实依据。比值变换融合方法认为全色图像与其降质图像的比值等于融合图像与多光谱上采样图像的比值^[6],即:

$$\frac{P_{i,j}}{\bar{P}_{i,j}} = \frac{\hat{M}_{i,j}^h}{\bar{M}_{i,j}^h} \quad (1)$$

其中, P 与 $\bar{P}$ 分别为全色及其降质图像, $\hat{M}$ 与 $\bar{M}$ 分别为融合图像及多光谱上采样图像, i,j 为像素点所在的行号与列号, k 为多光谱图像的波段序号。

比值变换法的关键在于合理地构造全色降质图像。现有方法主要通过多光谱上采样图像的加权^[7,8]或全色图像的低通滤波^[9]来构造全色降质图像。这些构造方法存在光谱失真或细节模糊的缺点,其原因如下:加权构造法从全局考虑各光谱波段对合成全色降质图像的贡献,未考虑图像的局部差异,在某些局部区域内,全色图像与其降质图像的灰度存在较大的差异,导致融合图像出现严重的光谱失真^[10];低通滤波构造法通过全色图像的低通滤波直接构造全色降质图像,通常很难确定准确的滤波参数(包括滤波的窗口大小及平滑程度两个方面)来生成合理的降质图像。在文献[9]中,作者利用尺寸为 3×3 的均值滤波器计算全色降质图像,与加权构造法相比,该方法得到的融合图像细节较模糊。为了弥补现有比值变换融合方法的不足,本文提出了一种新的方法来构造全色降质图像,在此基础上,提出了基于比值变换的全色与多光谱图像高保真融合方法。

2 高保真融合方法

对于全色图像 P 和多光谱图像 M ,Wald融合准则^[11]要求:理想的融合图像应与传感器直接采集到的高分辨率多光谱图像(记为 $\hat{M}$)相同。根据Wald融合准则,本文将多光谱上采样图像 $\bar{M}$ 视为融合图像 $\hat{M}$ 的降质图像。在此基础上,比值变换融合的基本假设可表述为多光谱与其降质图像的比值等于全色与其降质图像的比值。该假设的物理意义在于:通过全色与其降质图像相除,全色图像本身所含有的灰度信息被抵消,得到的比值仅蕴含了地物的空间细节信息,而多光谱降质图像正好蕴含了地物的谱信息,通过二者相乘可将地物的空间细节信息与谱信息有效地结合起来,进而推断出融合图像,见下式:

$$\hat{M}_{i,j}^h = \bar{M}_{i,j}^h \times \frac{P_{i,j}}{\bar{P}_{i,j}} \quad (2)$$

但是,全色降质图像的构造必须满足两个条件,才能使比值变换融合的物理含义成立。第一条件:在每一个像素点处,

全色降质图像与全色图像局部均值之差必须近似为零。如果该条件不成立,则全色与其降质图像的比值中除了蕴含地物的空间细节信息,还蕴含了全色图像的灰度信息,导致融合图像出现光谱失真。通常,加权构造法^[7,8]生成的全色降质图像容易违背该条件,导致融合图像的局部区域出现光谱失真。第二条件:全色降质图像相对全色图像的细节损失程度必须与多光谱上采样图像 $\bar{M}$ 相对的融合图像 $\hat{M}$ 的细节损失程度完全一致。通常,低通滤波构造法^[9]生成的全色降质图像不满足这个条件。

为了构造满足上述两个条件的全色降质图像,本文从图像采样的角度,建立高分辨率图像与其降质图像的联系。根据图像采样(image sampling)原理,首先利用大小为 $N \times N$ 的窗口对像元尺寸为 h 米的高分辨率遥感图像 I^h 进行均值采样,得到像元尺寸为 $N \times h$ 米的低分辨率遥感图像 I^l ,见式(3);然后利用双线性插值对低分辨率遥感图像 I^l 进行 N 倍上采样,得到高分辨率遥感图像 I^h 的降质图像 I^d ,见图1。这个“先上采样,再下采样”的两步采样模型较准确地刻画了高分辨率图像与其低分辨率上采样图像(即降质图像)的关系。因此,由该模型生成的全色降质图像满足比值变换融合所需的条件。

$$I_{i,j}^l = \frac{1}{N \times N} \sum_{x=0, y=0}^{N-1, N-1} I_{iN+x, jN+y}^h \quad (3)$$

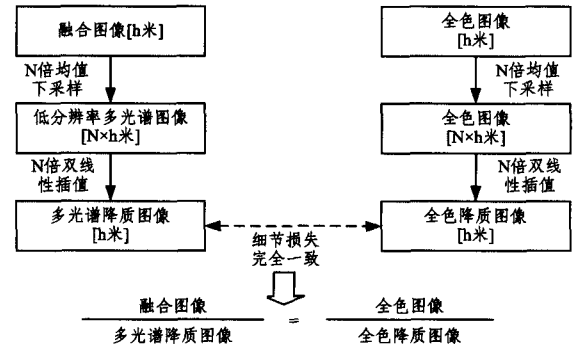


图1 高保真比值变换融合的基本思路

综合上述分析,对于配准的全色图像(h 米)与多光谱图像($N \times h$ 米),本文采用如下步骤对其进行比值变换融合:1)利用式(1)对全色图像进行 N 倍均值下采样,得到全色下采样图像;2)利用双线性插值法对全色下采样图像进行 N 倍上采样,得到全色降质图像 $\bar{P}$;3)利用双线性插值法对多光谱图像进行 N 倍上采样,得到多光谱降质图像 $\bar{M}$;4)将全色与其降质图像相除,得到融合变换所需的比值;5)将多光谱上采样图像与 R 相乘,得到融合图像,见式(2)。

3 实验数据与评价指标

3.1 实验数据

为了测试融合方法对不同卫星遥感图像的适应性,本文同时利用IKONOS和QuickBird卫星的全色和多光谱图像进行融合实验,其数据如表1所列。本文选取城区的遥感图像作为实验数据,因其含有丰富的纹理细节,地物种类多且光谱差异大,非常适合测试遥感图像的融合效果^[12]。此外,在图像融合之前,全色与多光谱实验数据已经进行了地理匹配

(geo-registration)预处理。

表1 融合实验数据简介

卫星	IKONOS	QuickBird
分辨率(米)	MS:4.0 PAN:1.0	MS:2.44 PAN:0.61
图像大小(像素)	MS:3000×3000 PAN:11000×11000	MS:3000×3000 PAN:12000×12000
辐射分辨率(比特)	11	11
波段及光谱范围	B:445~516nm G:506~596nm R:632~698nm NIR:757~853nm PAN:450~900nm	B:450~520nm G:520~600nm R:630~690nm NIR:760~900nm PAN:450~900nm
拍摄的区域	天津	北京

3.2 评价指标

目前,研究人员已提出了许多评价指标,其中,大部分评价是通过与参考图像对比完成的。通常,现有评价方法将多光谱图像作为参考图像来对降分辨率的全色与多光谱图像进行融合。这类评价方法仅能反映降分辨率图像的融合效果,不能真实反映分辨率图像的融合效果,评价结果与用户主观感受往往相左^[10]。为此,本文选用无参考评价指标,在真实分辨率下,直接评价融合图像的保真效果,评价指标具体如下^[13]:

$$\begin{cases} D_s = (\sum_{i=1}^K |Q(F^i, P) - Q(M^i, P^i)| / K)^{1/2} \\ D_\lambda = (\sum_{i=1}^K \sum_{j \neq i}^K |Q(F^i, F^j) - Q(M^i, M^j)| / (K^2 - K))^{1/2} \\ QNR = (1 - D_\lambda)(1 - D_s) \end{cases} \quad (4)$$

其中, D_λ 和 D_s 分别为光谱和细节保真度评价指标, QNR 是光谱与细节保真综合评价指标, Q 指两图像之间的差异度(见文献^[13]), 上标 i, j 为光谱波段序号, K 为光谱波段总数, P^i 为全色下采样图像。

4 实验结果与分析

为验证融合方法的有效性,将本方法与经典的比值变换方法——Brovey融合方法进行了对比。同时,本方法还与另外两种应用效果较好的最新融合方法进行了对比:多元回归分量替换融合方法^[14]首先利用多元回归方法计算各光谱波段的权值,再通过各光谱波段的加权构造替换分量,有效地解决了传统分量替换融合方法光谱失真的问题,目前该方法已在ENVI软件中应用;非线性IHS变换融合方法^[15]主要利用非线性方法来解决传统IHS变换融合的光谱失真问题,融合图像的空间细节清晰且光谱保真效果较好。

由于实验图像的尺寸较大,为了方便对比图像的细节信息,图2和图3仅展示了IKONOS和QuickBird遥感图像局部区域的融合效果。其中,图2(a)和图2(g)的大小分别为600×600和240×240像素,图3(a)和图3(g)的大小分别为500×500和80×80像素。对于IKONOS和QuickBird实验图像,Brovey变换融合法构造的全色降质图像均不满足高保真比值变换融合的第一个条件,在植被区域出现了较严重的光谱失真,见图2(c)和图3(c)。与之相比,本方法所构造的全色降质图像较好地满足了高保真比值变换融合的第一个条件,融合图像的光谱保真效果较好。

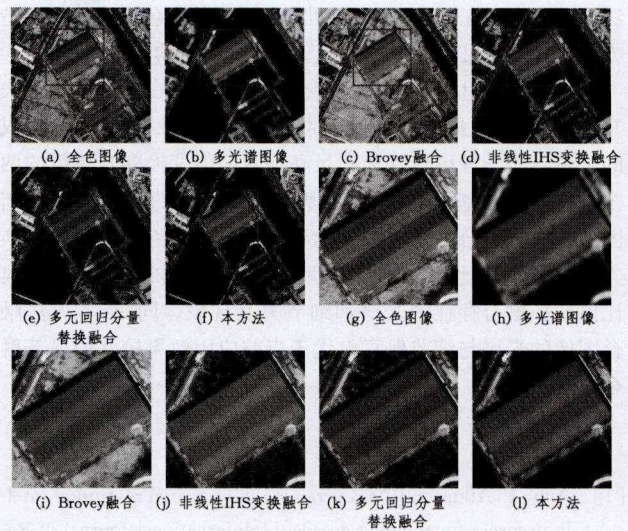


图2 IKONOS实验图像及融合结果

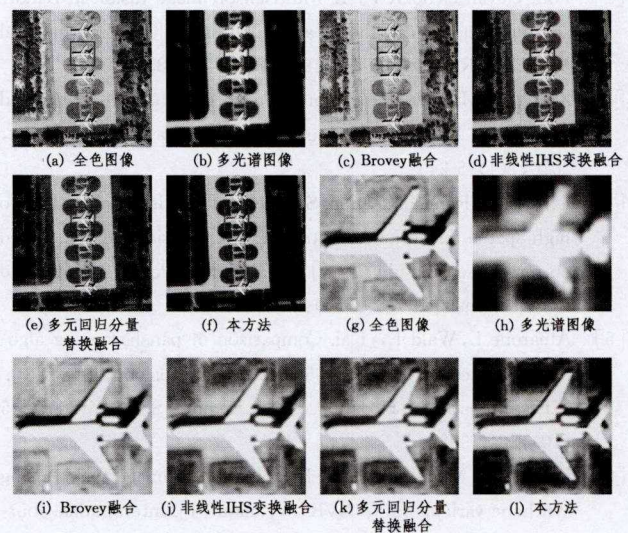


图3 QuickBird实验图像及融合结果

与当前应用效果较好的最新融合方法相比,本方法在光谱保真与细节保真方面均有优势:对于IKONOS实验图像,非线性IHS变换和多元回归分量替换融合方法的植被区域均存在一定程度的光谱失真,见图2(d)和(e)。此外,对比图2(j)、(k)和(l),可以发现本方法融合图像的空间细节也略微比二者清晰。对于QuickBird实验图像,在植被区域,非线性IHS变换融合方法依然存在一定程度的光谱失真,见图3(d)。此外,对比图3(j)、(k)和(l),可以发现本方法融合图像的飞机边缘更清晰。

表2 融合图像的客观评价结果

评价指标	D_λ	D_s	QNR
最优取值	0	0	1
Brovey变换	0.151	0.206	0.674
IHS变换	0.093	0.120	0.798
分量替换	0.077	0.085	0.845
本方法	0.053	0.061	0.889

表2中列出了融合图像的客观评价指标。对比表中各指标的评价结果,可知本融合方法的光谱保真和细节保真效果均优于对比方法。通常,融合图像的光谱与细节综合评价指标QNR的取值大于0.8时,融合图像的质量较好。对于本方

法, QNR 的取值达到 0.89, 说明本文提出的全色降质图像构造方法较好地满足了高保真比值变换融合所需的两个条件。

结束语 针对现有比值变换融合方法存在光谱和细节失真的问题, 本文提出了一种新的全色降质图像构造方法, 生成的全色降质图像可较好地满足高保真比值变换融合所需的两个条件。在此基础上, 提出了基于比值变换的全色与多光谱图像高保真融合方法。在实验中, 本方法与经典的比值变换方法进行了对比, 实验结果表明本方法可以较好地避免经典比值变换融合存在的光谱和细节失真现象。同时, 本方法融合图像的光谱与细节保真也优于当前应用效果较好的最新融合方法。

参 考 文 献

- [1] Aplin P, Atkinson P M, Curran P J. Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(18): 3873-3881
- [2] Pohl C, van Genderen J L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods, and applications[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823-854
- [3] Zhang J. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2010, 1(1): 5-24
- [4] Thomas C, Ranchin T, et al. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics[J]. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1301-1312
- [5] Alparone L, Wald L, et al. Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest[J]. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10): 3012-3021
- [6] Rahman M M, Csaplovics E. Examination of image fusion using synthetic variable ratio (SVR) technique[J]. *International Jour-*

nal of Remote Sensing, 2007, 28(15): 3413-3424

- [7] Gillespie A R, Kahle A B, Walker R E. Color enhancement of highly correlated images—II Channel ratio and ‘chromacity’ transformation techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(3): 343-365
- [8] Zhang Y. A new merging method and its spectral and spatial effects[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(10): 2003-2014
- [9] 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): 3461-3472
- [10] Zhang Y. Understanding image fusion[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(6): 657-661
- [11] Wald L, Ranchin T, Mangolini M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1997, 63(6): 691-699
- [12] Massip P, Blanc P, Wald L. A method to better account for modulation transfer functions in ARSIS-Based pansharpening methods[J]. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(3): 800-808
- [13] Alparone L, Aiazzi B, et al. Multispectral and panchromatic data fusion assessment without reference[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2008, 74(2): 193-200
- [14] Aiazzi B, Baronti S, Selva M. Improving component substitution pansharpening through multivariate regression of MS + Pan data[J]. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10): 3230-3239
- [15] Chien C L, Tsai W H. Image fusion with no gamut problem by improved nonlinear IHS transforms for remote sensing[J]. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 651-663

(上接第 11 页)

有效的结果。我们的原型在同一个移动设备上支持基于 Linux 内核的不同操作系统(Android 与 Firefox OS)的同时执行。由于开源移动操作系统开发的发展, Linux 与 ARM 成为我们实现与研究的基础。但是本文描写的技术与方法亦可以在其他 OS 与硬件平台(甚至 x86)实现。

下一步我们要对 ARM-MuxOS 进行几个方面的改进: 一是随着多核移动设备的发展, 如何将一个处理器核动态分配给后台的系统从而执行简单的任务。这一问题是为了面对并行执行时共分硬件设备所带来的挑战。二是面对支持非 Linux 的 OS 时, 如何处理在两个系统之间不同硬件设备的状态。

参 考 文 献

- [1] Labs B. CodeZero hypervisor[CP/OL]. <http://dev.b-labs.com/>
- [2] Andrus J, Dall C, Hof A V, et al. Cells: A virtual mobile smartphone architecture[C]//*Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Operating Systems Principles*. 2011: 173-187
- [3] Barr K, Bungale P, Deasy S, et al. The VMware Mobile Virtualization Platform: is that a hypervisor in your pocket? [J]. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2010, 44(4): 124-135

- [4] Dall C, Nieh J. KVM for ARM[C]//*Proceedings of the Linux Symposium*. 2010: 47-56
- [5] Xu Y, Bruns F, Gonzalez E, et al. Performance evaluation of Para-virtualization on modern mobile phone platform[J]. *International Conference on Computer, Electrical, and Systems Sciences, and Engineering*, 2010(48): 272-279
- [6] Heiser G. Virtualizing embedded systems-why bother? [C]//*48th Design Automation Conference*. 2011: 901-905
- [7] Heiser G, Leslie B. The OKL4 microvisor: convergence point of microkernels and hypervisors[C]//*Proceedings of the 1st ACM Asia-Pacific Workshop on Systems*. 2010: 19-24
- [8] Sun J, Zhou D, Longerbeam S. Supporting multiple OSes with OS switching[C]//*Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*. 2007: 357-362
- [9] Keller E, Szefer J, Rexford J, et al. NoHype: Virtualized cloud infrastructure without the virtualization[C]//*37th Annual International Symposium on Computer Architecture*. 2010: 350-361
- [10] Nomura Y, Senzaki R, Nakahara D, et al. Mint: Booting multiple Linux kernels on a multicore processor[C]//*Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWC-CA)*. 2011: 555-560