

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0140 - 06

计入波段间相关性的高通调制图像融合方法

窦 闻¹, 陈云浩^{2*}

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;

2. 北京师范大学 资源学院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 利用通用分量替换 (general component substitution, GCOS) 的扩展模型对几种具有代表性的融合方法进行分析, 探讨了这些方法在细节注入方式上的联系. 在此基础上, 提出了一种考虑全色与多光谱图像之间相关性的空间可变的细节注入方法; 结合不同的细节提取方式, 构建了三种新的高通滤波调制融合方案. 利用所提出的方法对 Ikonos 和 Quickbird 数据融合结果进行定量分析, 并传统的高通滤波调制方法 (high-pass modulation, HPM) 进行了对比. 可见光波段的融合结果表明, 调制方法和细节提取方式的改进均有效地提高了融合性能, 且由调制参数的改进而引起的融合性能的提高十分显著; 近红外波段的融合试验则表明近红外与全色波段的融合在滤波器设计方面需要做进一步的研究.

关键词: 遥感; 图像融合; 波段间结构模型; 空间细节调制参数; 高通滤波调制

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

MAGE FUSION METHOD OF HIGH-PASS MODULATION INCLUDING INTERBAND CORRELATIONS

DOU Wen¹, CHEN Yun-Hao^{2*}

(1. Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Several classic image fusion methods were analyzed by using the extended model of general component substitution (GCOS) framework. The relations between the injection modes of these fusion methods were investigated. On this basis, a novel spatial variable detail injection method, which took the correlations of panchromatic and multispectral bands into consideration, was established. By combining with different spatial detail extraction methods, three novel high-pass modulation (HPM) image fusion schemes were proposed. The fusion results of Ikonos and Quickbird data were analyzed quantitatively by using the proposed methods, and the result was compared with those by the traditional HPM. Fusion results of visible bands show that the fusion performance is improved by the proposed modification of modulation coefficients and detail extraction methods compared to HPM, and the contribution of the improved modulation coefficients is more significant. However, the fusion results of near infrared (NIR) bands indicate that the study of the filter design should be paid more attentions for the fusion in NIR and panchromatic bands.

Key words: remote sensing; image fusion; interband structure model; modulation coefficient of spatial detail; high-pass modulation (HPM)

引言

遥感图像融合的一个主要目标是突破传感器空间分辨率与光谱分辨率之间的物理约束, 提高多光谱数据的空间分辨率. 自二十世纪八十年代开始, 一系列数据融合方法相继被提出^[1,2]. 早期的融合方

法最重要的思路是将全色数据 (panchromatic, Pan) 视为观测表面较高分辨率的空间信息, 通过替换多光谱数据 (multispectral, MS) 中包含的较低分辨率的空间信息产生融合图像. 这一类方法简单快速, 称为分量替换法 (component substitution, CS)^[3]. HS 融合方法^[4]、主成分分析法 (principal component analy-

收稿日期: 2009 - 02 - 12, 修回日期: 2009 - 10 - 13

Received date: 2009 - 02 - 12, revised date: 2009 - 10 - 13

基金项目: 国家自然科学基金 (40671122); 北京市自然科学基金 (4072016) 以及霍英东教育基金会 (111017)

作者简介: 窦 闻 (1980-), 男, 安徽和县人, 博士, 主要研究方向为遥感图像处理与分析.

* 通讯作者: cyh@ires.cn

sis, PCA)^[5]和由柯达公司持有专利的 Gram-Schmidt (GS)光谱增强法^[6]均属此类。

尽管分量替换法对于一般应用而言可以获得比较满意的融合结果,但随着定量遥感的发展,通过注入均值为 0 的高通空间细节进行融合的方法受到越来越多的关注。此类方法很大程度上避免了由于局部辐射特性不吻合造成的光谱扭曲。高通滤波融合法 (high-pass filtering, HPF) 将 Pan 数据的高频成分直接注入经双三次采样的低分辨率 MS 数据构建融合结果^[5],被公认为此类方法的起源。在此基础上发展的高通滤波调制融合法 (high-pass modulation, HPM) 暗示了此类方法将在两个方向上进行深入研究:空间细节提取方式和空间细节注入模型。

空间细节提取方式的研究得益于多尺度分析 (multiresolution analysis, MRA) 的发展,特别是利用离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT)^[7]和拉普拉斯金字塔 (Laplacian pyramid, LP)^[8],近年来又进一步发展出脊波 (ridgelet)^[9]、曲波 (curvelet)^[10]等方向信息检测的新工具。

空间细节注入方式则是图像融合的另一重要问题。ARSI 模型^[11]可以认为是首次明确引入注入方式的融合模型。在 ARSI 模型中,注入方式是由波段间结构模型 (interband structure model, BSM) 确定的,因此可以从不同的角度和融合目的出发,对 BSM 进行建模。此后出现的基于简化成像过程模型的 GIF 模型 (General Image Fusion)^[12]和基于数学推导的 GCOS 模型 (General Component Substitution)^[13]也都将图像融合过程分解为细节提取和细节注入两个子问题进行探讨,并对现有融合方法进行分析与分类。

本文侧重于高通空间细节的注入方式研究,第 1 部分介绍 GCOS 的扩展模型及其对几种代表性融合方法注入方式的分析,并建立起这些注入方式之间的联系,第 2 部分构建一种考虑 Pan 与 MS 相关性的空间细节注入方法,并在结合不同的细节提取方式构建三种新的高通滤波调制融合方法,第 3 部分对提出的方法进行真实数据的试验,定量分析其融合性能,并与传统的 HPM 方法进行对比。

1 空间细节注入方式

1.1 GCOS 模型

GCOS 模型是基于正交变换的分量替换法的一般数学模型^[13],用以分析分量替换融合法,并指导此类方法的设计与开发。GCOS 的数学模型如下

$$V_{MS_b}^h(i, j) = V_{MS_b}^l(i, j) + \alpha_b(i, j), \quad (1)$$

其中, $V_{MS_b}^h(i, j)$ 为 b 波段 (i, j) 位置的融合结果, $V_{MS_b}^l(i, j)$ 为相应波段位置上升采样的待融合低分辨率 MS 数据, α_b 为 b 波段的空间细节调制参数, (i, j) 为从高分辨率 Pan 数据中提取的空间细节,即 $\alpha_b(i, j) = V_{PAN}^h(i, j) - V_{PAN}^l(i, j)$, V_{PAN}^l 为 MS 数据线性组合得到的低分辨率亮度分量。为行文方便,下文在不引起误会的情况下,省略 i, j, b 的标注。

GCOS 模型指出,分量替换法得到的图像融合结果,实际上是两部分信息叠加而成的:第一部分 V_{MS}^l 是以某种方式表达的原始的低分辨率多光谱数据;第二部分 α_b 代表的是在较高的空间分辨率下 MS 数据应包含的空间细节信息向量,其中 α_b 由 Pan 和 MS 在同等尺度下的空间细节分量之间的关系决定,表示由 Pan 的细节估计同等分辨率下 MS 应包含细节的方法,因此称之为空间细节调制参数。从 GCOS 模型可以看出,具体的分量替换融合法是由空间细节调制参数 α_b 和空间细节信息 V_{PAN}^h 的不同构建方法来刻画的,有利于通过问题分解进行深入研究。为了解决直方图匹配问题,窦闻对 GCOS 模型进行了扩展,提出在 GCOS 模型中规定 V_{PAN}^h 为未经直方图匹配的高分辨率全色数据^[14]。这样,一个具体的分量替换融合方法就由 α_b 和 V_{PAN}^h 唯一确定。

对于典型的分量替换法而言, α_b 由逆变换矩阵的第一列构成,因此 GCOS 模型对分量替换法的分析十分方便。由于一种融合方法可以表示为形如式 (2) 的函数,因此不属于分量替换法的融合方法可以很容易以式 (3) 的方式进行转换,结合扩展模型中对 α_b 和 V_{PAN}^h 的定义,即可获得与 GCOS 模型相匹配的唯一形式。

$$V_{MS}^h = F(V_{PAN}^h, V_{MS}^l), \quad (2)$$

$$V_{MS}^h = V_{MS}^l + (F(V_{PAN}^h, V_{MS}^l) - V_{MS}^l). \quad (3)$$

Otazu 等人根据细节注入的方式将小波融合法分为三类:直接注入、通过 IHS 变换注入和通过 PCA 变换注入^[15]。从 GCOS 的扩展模型容易看出这一分类是不完全的。

1.2 空间细节调制参数的结构分析

采用这样的方法对 IHS (圆柱体模型、三角形模型)、Brovey 变换 (Brovey Transform, BT)、GS、PCA、HPF 和 HPM 融合法进行分析^[16],各自的调制参数见表 1,其中 LP 为低通滤波操作, (\cdot) 为标准差, ρ 为相关系数, V_s 为低分辨率 MS 尺度上构建的空间

表 1 几种现有方法的空间细节调制参数

Table 1 Spatial detail modulation coefficients of selected methods

融合方法	调制参数
HS(圆柱体模型)	$\frac{(V'_S)}{(LP(V^h_{PAN}))}$
HS(三角形模型)	$\frac{V'_{MS}}{V'_S} \cdot \frac{(V'_S)}{(LP(V^h_{PAN}))}$
BT	$\frac{V'_{MS}}{V'_S} \cdot \frac{(V'_S)}{(LP(V^h_{PAN}))}$
GS	$(V'_{MS}, V'_S) \cdot \frac{(V'_{MS})}{(V'_S)} \cdot \frac{(V'_S)}{(LP(V^h_{PAN}))}$
PCA	$(V'_{MS}, V'_S) \cdot \frac{(V'_{MS})}{(V'_S)} \cdot \frac{(V'_S)}{(LP(V^h_{PAN}))}$
HPF	$\frac{(V'_{MS})}{(LP(V^h_{PAN}))}$
HFM	$\frac{V'_{MS}}{LP(V^h_{PAN})}$

分量,在 HS和 BT方法中, $V'_S = \frac{1}{3} \sum_{b=1}^3 V'_{MS,b}$; PCA方法中 V'_S 为第一主成分 PC1; GS方法中 V'_S 为 GS变换第一分量 GS0,而 GS0并无明确规定,一般采用 MS各波段的均值或 Pan的退化数据.

从表 1可以清楚地看到,形式各异的融合方法在空间细节注入方式上的差异却比较小,通过改变每一方法采用的假设条件,可以得到不同注入方法之间的转化关系:

1) 对比 GS和 PCA发现,二者形式完全相同,仅 V'_S 的定义不同.由于 GS方法未对 V'_S 作出明确规定,可采用任何合理的构建方法,因此 PCA是 GS方法的一个特例;

2) 假设 $(V'_{MS}, V'_S) = 1$,则 GS方法退化为 HPF;

3) 假设 $(V'_{MS}, V'_S) = 1$,即 MS与空间分量之间为严格的线性关系,则 $\frac{(V'_{MS})}{(LP(V^h_{PAN}))} = \frac{V'_{MS}}{LP(V^h_{PAN})}$,从而 HPF转化为 HFM;

4) 假设 $(V'_{MS}, V'_S) = 1$,并令 $\frac{(V'_{MS})}{(LP(V^h_{PAN}))} = \frac{V'_{MS}}{LP(V^h_{PAN})}$,则 GS退化为 BT方法;

5) BT方法与 HS三角形模型完全等价;

6) 若以 $LP(V^h_{PAN})$ 作为 V'_S ,则 BT方法转化为 HFM方法;

7) 假设 MS与空间分量之间为严格线性关系

且二者之间的增益系数为 1,即 $(V'_{MS}, V'_S) \cdot \frac{(V'_{MS})}{(V'_S)} = 1$,则 GS方法退化为 HS圆柱体模型.

由此可见,空间细节调制参数存在一定的结构特征,其中结构最为完整的是 GS方法,可以看到它由三部分的乘积组成:低分辨率 MS与低分辨率空间分量之间的相关系数 (V'_{MS}, V'_S) , MS与空间分量的标准差之比 $\frac{(V'_{MS})}{(V'_S)}$ 以及空间分量与 Pan的标准差之比 $\frac{V'_{MS}}{LP(V^h_{PAN})}$. 第一部分是对高分辨率空间分量细节信息和高分辨率多光谱数据细节信息之间线性关系大小的估计.后两部分都是在线性关系的假设上对全色数据、构建的空间分量和多光谱数据之间细节信息能量大小关系的估计.

2 引入 PAN与 MS相关性的高通滤波调制方法

由于利用 Pan对 MS进行空间增强的图像融合属于病态问题,因此明确的融合结果的获取依赖于一定的附加约束条件,即合理的假设.从空间细节调制参数的转化关系可以看出,其基本结构代表着融合方法采用的基本假设.结构越简单,如基于圆柱体模型的 HS方法,其采用的假设越强,融合性能,特别是光谱性能也就越差;结构越完整,如 GS方法,则采用的假设越弱,融合性能也就越好.

在第 2节列举的现有方法中,HFM方法比较特殊,表现在两个方面:1、HFM方法无须进行直方图匹配,因此避免了因图像拉伸而造成的光谱失真;2、虽然从前文看到 HFM与基于分量替换方式的融合方法之间可以相互转换,但 HFM方法实际上是由简化的成像过程建立的.从简化的成像过程推导 HFM方法依赖于两个基本假设^[12]:1)不同传感器获取图像时相应区域的地表与太阳直射光的夹角相同或相近;2)低分辨率图像一个像元对应的地表范围内的反射率相同.其中假设 2是一个较强的假设,它要求低分辨率图像的像元纯度比较高,对应区域内的光谱变化比较小.这一点显然是很难符合实际的,特别是空间细节丰富的区域.前文指出,假设 Pan与 MS之间为严格线性关系,则 GS方法就退化为 HFM方法.这一过程回避了假设 2,但这样的回避并未提高融合性能,说明严格线性关系的假设需要作一定的修正.一种直观的方法是从 HFM方法的调制参数结构入手,通过增加缺失的结构项来减弱假设条件的

影响,故构建如下调制参数

$$= (V_{MS}^l, LP(V_{PAN}^h)) \cdot \frac{V_{MS}^l}{LP(V_{PAN}^h)} \quad (4)$$

同时,传统的 HPM 方法采用尺寸为空间分辨率之比的均值滤波器进行低通滤波,会造成较强的振铃效应.考虑成像系统点扩散函数(point spread function, PSF)特性,采用高斯滤波器更为合理.针对不同空间分辨率比例的影像融合,滤波器大小应取空间分辨率之比的 2 倍^[5].对于 Ikonos 数据而言, Pan 与 MS 的分辨率比例为 4,因此可采用 9×9 高斯滤波器进行模拟.这样根据调制参数和滤波器的不同组合,可构建四种不同的高通滤波融合方案(见表 2).这四种融合方案性能的对比,可以分别考察调制参数和细节提取方式对融合结果的影响.式(4)的方法采用的假设条件弱于传统方法,因此其光谱保持能力应有所提高;但由于相关系数不大于 1,因此调制参数要小于传统方法,意味着融合图像的锐化程度可能小于传统方法.

3 试验与结果

本研究分别采用 Ikonos 和 Quickbird 数据进行试验. Ikonos 试验数据为北京市区影像的子集,全色图像的空间分辨率为 1m,多光谱图像的空间分辨率为 4m,包含蓝(B)、绿(G)、红(R)和近红外(NIR)四个波段,全色图像的大小为 2048×2048 . Quickbird 试验数据为北京市区影像的子集,全色图像的空间分辨率为 0.7m,多光谱图像的空间分辨率为 2.8m,包含蓝、绿、红和近红外四个波段,全色图像的大小为 1024×1024 .

为了获得对试验结果更为准确的评价,本试验将全色数据退化到与多光谱数据相同的空间分辨率,并将多光谱数据也按照同样的方式进行退化,这

表 2 高通滤波调制融合方案

Table 2 Image fusion schemes based on high-pass modulation

方法	调制参数	低通滤波器
HPM-CC	$(V_{MS}^l, LP(V_{PAN}^h)) \cdot \frac{V_{MS}^l}{LP(V_{PAN}^h)}$	5×5 均值滤波器
HPM-CC-PSF	$(V_{MS}^l, LP(V_{PAN}^h)) \cdot \frac{V_{MS}^l}{LP(V_{PAN}^h)}$	9×9 均值滤波器
HPM	$\frac{V_{MS}^l}{LP(V_{PAN}^h)}$	5×5 均值滤波器
HPM-PSF	$\frac{V_{MS}^l}{LP(V_{PAN}^h)}$	9×9 均值滤波器

样原始的多光谱数据就可以作为对退化数据进行融合的结果的评价标准^[17].考虑传感器调制传递函数(Modulation Transfer Functions, MTF)对成像过程的影响,首先对原始的全色和多光谱数据分别进行 9×9 高斯低通滤波,然后根据 Ikonos 全色与多光谱数据的空间分辨率比例,对滤波后的数据进行向下 4 倍重采样,获得空间分辨率分别为 4m 和 16m 的全色和多光谱试验数据,这样可以保证在较低分辨率下进行的融合试验的结论可以应用于较高分辨率水平下的融合^[18].融合结果为空间分辨率为 4m 的 4 波段影像,以原始多光谱图像作为参考图像进行定量分析. Quickbird 数据也作同样处理.定量分析指标包括相关系数(CC)、相对偏差(RD)和 UQI^[19].对于有参考图像的检验而言,相关系数理想值为 1,相对偏差的理想值为 0, UQI 的理想值为 1.

表 3 和表 4 分别为 Ikonos 和 Quickbird 数据融合结果与参考图像之间的相关系数、相对偏差和 UQI 的计算结果,黑体表明最接近理想值.从调制参数来看,采用考虑 Pan 与 MS 之间相关性的细节注入方式的两种方法(HPM-CC, HPM-CC-PSF)的融合性能均好于采用传统调制参数的两种方法(HPM, HPM-PSF),特别是第一波段的性能提高最为显著.对于 Ikonos 和 Quickbird 数据而言,由于第一波段与全色波段的光谱响应范围重叠最少,因此是最难获得较好融合效果的波段,其融合性能的提高也是最有价值的.从细节提取方式来看,在同样的调制参数条件下,使用高斯滤波器以反映调制传递过程影响的方法要好于相应的采用均值滤波器的方法,同样,在第一波段的提高幅度最大.由此可见,本文提出的改进方案是有效的.

表 3 融合结果与参考图像之间的定量分析(Ikonos)

Table 3 Quantitative validation of fused image compared with reference image(Ikonos)

		B0	B1	B2	B3
CC	HPM-CC	0.9012	0.9494	0.9655	0.9455
	HPM-CC-PSF	0.9133	0.9548	0.9668	0.9431
	HPM	0.8541	0.9340	0.9610	0.9435
	HPM-PSF	0.8720	0.9424	0.9638	0.9443
RD (%)	HPM-CC	2.1237	2.1537	2.6537	2.6294
	HPM-CC-PSF	1.8829	1.9388	2.5178	2.6341
	HPM	2.7439	2.5000	2.8140	2.6610
	HPM-PSF	2.4453	2.2323	2.6263	2.5820
UQI	HPM-CC	0.8962	0.9493	0.9641	0.9360
	HPM-CC-PSF	0.9099	0.9548	0.9654	0.9332
	HPM	0.8365	0.9326	0.9605	0.9407
	HPM-PSF	0.8584	0.9416	0.9631	0.9409

表 4 融合结果与参考图像之间的定量分析 (Quickbird)
Table 4 Quantitative validation of fused image compared with reference image (Quickbird)

		B0	B1	B2	B3
CC	HM-CC	0.8251	0.9045	0.9467	0.9606
	HM-CC-PSF	0.8487	0.9197	0.9541	0.9630
	HM	0.8069	0.8949	0.9434	0.9589
	HM-PSF	0.8320	0.9117	0.9518	0.9623
RD (%)	HM-CC	7.8410	6.7926	6.6609	7.5252
	HM-CC-PSF	7.0068	5.9756	6.0805	7.3398
	HM	8.7395	7.3981	6.9128	7.5935
	HM-PSF	7.8134	6.4935	6.2520	7.3237
UQI	HM-CC	0.7710	0.8923	0.9466	0.9590
	HM-CC-PSF	0.8068	0.9124	0.9540	0.9602
	HM	0.7374	0.8774	0.9430	0.9580
	HM-PSF	0.7768	0.9004	0.9518	0.9604

一般而言,融合结果与参考图像之间的相关系数和相对偏差的结果是一致的,但在 Ikonos数据试验中对近红外波段(B3)的定量分析结果却出现了显著的不一致:在第四波段,HM-CC获得了最高的相关系数,而HM-PSF取得最小的相对偏差。这种不一致也表现在单独分析调制参数和细节提取方式对融合性能的影响上,例如相关系数,HM-CC-PSF低于HM-CC,而HM-PSF则高于HM。在Quickbird数据试验中,虽然HM-PSF在NR波段的相对偏差和UQI最接近理想值,但HM-CC-PSF与之差距很小,排除这一异常,则其它结果均与理论上的预期完全一致。

4 结论

利用GCOS的扩展模型对几种代表性融合方法的注入方式进行分析,提出从调制参数结构入手对HM融合法进行改进,构建了一种基于Pan与MS相关性的空间细节注入方法,结合不同的细节提取方式构建了三种新的高通滤波调制融合方法。

对可见光波段的融合结果表明,调制参数的改进和细节提取方式的改进均有效地提高了融合性能。这两方面的对比证实了本文基于GCOS扩展模型对融合性能进行的分析是有效的,其根源在于将融合问题分解为调制参数和细节提取两个子问题进行研究。值得注意的是,本文中的方法由调制参数的改进引起的融合性能的提高幅度要高于细节提取方式的改进。这并不意味着调制参数的研究比细节提取方式的研究更为重要,但调制参数的研究相对而言推广性要强一些,而细节提取方式与传感器特性、图像内容、空间分辨率等因素

的关联更加密切。

对Ikonos近红外波段的融合结果的分析不能得出一致的结论,甚至基于任何一个因素或指标的对比都会出现相反的表现。这一结果表明,GCOS扩展模型对融合问题的分解并不是对问题空间的完全划分,子问题之间存在耦合,对HM方法而言表现为低通滤波器的选择同时改变了调制参数和细节提取方式。在图像融合任务中,低通滤波器是连接不同尺度图像的桥梁。本文直接采用前人的研究成果,使用 9×9 高斯低通滤波器。近红外波段与可见光波段相比,MTF具有较大的差别,表现为实际空间分辨率的差别,因此滤波器设计也应当不同。如何根据传感器特性或图像特性进行滤波器设计,避免本文在近红外波段处理时出现的不一致,从而获得综合性能较高的融合方法,是下一步研究的重点。

REFERENCES

- [1] Chavez P S. Digital merging of landsat TM and digitized NHAP data for 1:24 000-scale image mapping[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1986, **52** (10): 1637—1646.
- [2] Price J C. Combining panchromatic and multispectral imagery dual resolution satellite instruments[J]. *Remote Sens Environ*, 1987, **21** (2): 119—128.
- [3] Shettigara V. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, **58** (5): 561—567.
- [4] Capser W J, Lillesand TM, Kiefer R W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, **56** (4): 459—467.
- [5] Chavez P S, Sides S C, Anderson J A. Comparison of three different methods to merge multispectral and multispectral data: landsat TM and SPOT panchromatic[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, **57** (3): 295—303.
- [6] Laben C A, Brower B V. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening [P]. U. S. Patent 6 011 875, Jan 4, 2000.
- [7] Garguet-Dupont B, Girel J, Chassery J M, et al. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, **62** (9): 1057—1066.
- [8] Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, et al. Generalised Laplacian pyramid-based fusion of MS + P image data with spectral distortion minimisation [J]. *ISPRS Internat Archives Photogramm. Remote Sensing*, 2002, **34** (3A-W3): 3—6.
- [9] Do M N, Vetterli M. The finite ridgelet transform for image representation [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2003, **12** (1): 16—28.

(下转 155页)

限的,很大程度上降低了算法的复杂度和运行时间.

3 结论

本文提出了一种基于背景残差数据的非线性微小目标检测算法,对高光谱数据进行处理取得了较好的结果.该方法有效地将背景光谱信息和目标光谱信息分离,很好地抑制了背景干扰,充分挖掘了高光谱图像波段间的非线性信息,具有较好的检测性能和较低的虚警概率.由于只需对背景端元进行提取,使得端元提取算法的复杂度大大降低,采用分块端元快速提取算法进一步减少了端元提取中的运算量.通过与其它目标检测算法的比较,可以看出本文算法不仅目标检测性能较好,而且结构简单,计算量相对较少,对硬件系统的要求较低,便于实现.

REFERENCES

- [1] Thai B, Healey G. Invariant subpixel target identification in hyperspectral imagery[C]//*Anon. Algorithms for Multispectral and Hyperspectral Imagery V*. Orlando, FL, USA: SPIE-Int Soc Opt Eng, 1999. 14—24.
- [2] Harsanyi J C, Chang C I. Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection[J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing* 1994, **32**(4): 779—785.
- [3] Shaw G, Mankolakis D. Signal processing for hyperspectral image exploitation[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, **19**(1): 12—16.
- [4] HE Lin, PAN Quan, DI Wei. Multicategory targets detection of hyperspectral imagery based on adaptive structured background and shape-feature subspace[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贺霖,潘泉,邸韡.自适应结构化背景和形状特征子空间高光谱图像多类目标检测.红外与毫米波学报), 2007, **26**(5): 353—358.
- [5] ZHANG Bing, CHEN Zheng-Chao, ZHENG Lan-Fen, et al. Object detection based on feature extraction from hyperspectral imagery and convex cone projection transform[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张兵,陈正超,郑兰芬,等.基于高光谱图像特征提取与凸面几何体投影变换的目标探测.红外与毫米波学报), 2004, **23**(6): 441—445.
- [6] LI Zhi-Yong, KUANG Gang-Yao, YU Wen-Xian, et al. Algorithm on small target detection base on principal component of hyperspectral imagery[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李智勇,匡纲要,郁文贤,等.基于高光谱图像主成分分量的小目标检测算法研究.红外与毫米波学报), 2004, **23**(4): 286—290.
- [7] GU Yan-Feng, LU Ying, JIA You-Hua, et al. Anomaly detection algorithm of hyperspectral images based on spectral analyses[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谷延锋,刘颖,贾友华,等.基于光谱解译的高光谱图像奇异检测算法.红外与毫米波学报), 2006, **25**(6): 473—477.
- [8] Schweizer S M, Moura J M F. Efficient detection in hyperspectral imagery[J]. *IEEE Trans On Image Processing* 2001, **10**(4): 584—597.
- [9] Reed IS, Yu X. Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution[J]. *IEEE Trans Acoust, Speech Signal Process* 1990, **38**(10): 1760—1770.
- [10] Kwon H, Nasrabadi N M. Kernel RX-Algorithm: A nonlinear anomaly detector for hyperspectral imagery[J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing* 2005, **43**(2): 388—397.
- [11] Keshave N, Mustard J F. Spectral unmixing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine* 2002, **19**(1): 44—57.
- [10] Nencini F, Garzelli A, Baronti S, et al. Remote sensing image fusion using the curvelet transform[J]. *Information Fusion*, 2007, **8**(2): 143—156.
- [11] Ranchin T, Wald L. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, **66**(1): 49—61.
- [12] Wang Z, Ziou D, Amenakis C, et al. A comparative analysis of image fusion methods[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2005, **43**(6): 1391—1402.
- [13] Dou W, Chen Y H, Li X B, et al. A general framework for component substitution image fusion: An implementation using the fast image fusion method[J]. *Computers and Geosciences*, 2007, **33**(2): 219—228.
- [14] DOU Wen. Research on the Universal Theoretical Framework for Multi-source Remotely Sensed Data Fusion[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2006 (窦闻.多源遥感数据像素级融合统一理论框架研究[D].北京:北京师范大学, 2006).
- [15] Otazu X, Gonzalez-Audicana M, Fors O, et al. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods: Application to wavelet-based methods[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2005, **43**(10): 2376—2385.
- [16] DOU Wen, CHEN Yun-Hao, HE Hui-Ming. Theoretical Framework of Optical Remotely Sensed Image Fusion[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (窦闻,陈云浩,何辉明.光学遥感影像像素级融合的理论框架.测绘学报), 2009, **38**(2): 131—137.
- [17] Wald L, Ranchin T, Mangolini M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, **63**(6): 691—699.
- [18] Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, et al. MTF-tailored multiscale fusion of high-resolution MS and pan imagery[J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2006, **72**(5): 591—596.
- [19] Wang Z, Bovik A. A universal image quality index[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, **9**(3): 81—84.

(上接 144页)