

基于波段选择估计 PSF 的高光谱 图像运动模糊盲校正方法

南一冰, 高 昆*, 倪国强

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 结合双三次插值处理和基于方向滤波的图像维去模糊算法, 提出了基于波段选择估计图像点扩散函数的高光谱图像盲校正方法, 以降低光谱冗余信息对复原精度的影响. 校正实验结果表明, 提出的方法能够对不同卫星振动模式引入的运动模糊进行有效校正, 能够同时提高高光谱图像空间维质量、减小光谱维失真.

关键词: 卫星姿态; 高光谱成像; 盲校正; 波段选择

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

Hyperspectral image blind correction method based on band selection and PSF estimation

NAN Yi-Bing, GAO Kun*, NI Guo-Qiang

(Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System (School of Photoelectricity),
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Considering the motion complexity of real satellite platform and the difficulty to obtain blur kernel, a hyperspectral image blind correction method based on band selection and PSF estimation was proposed to reduce the influence of spectral redundant information on correction precision. The method combined bicubic interpolation with image deblur algorithm via directional filters. Correction experimental results show that the proposed method can compensate and correct the image motion errors introduced by various unknown satellite motion. Image sharpness is improved, and spectral distortion is also suppressed.

Key words: satellite attitudes, hyperspectral imaging, blind correction, band selection

PACS: 07.57.Ty, 84.40.Xb, 87.57.C-, 42.30.Va

引言

星载高光谱成像仪具有能够同时获取大范围地物目标图像和波谱信息的“图谱合一”的能力, 在全球定量化遥感领域有广泛应用. 高光谱成像仪在可见光到短波红外波段的光谱分辨率高达纳米 (nm) 量级, 其中短波红外反射光谱中, 许多地物特别是岩石矿物存在着可分辨的吸收和反射特征峰, 是遥感应用的重要波段. 然而卫星在轨运动成像中, 以星体

振动为主要表现形式的卫星平台运动误差, 将最终造成高光谱影像空间维图像运动模糊和光谱维失真等质量退化, 严重影响了高光谱成像精度, 这对采用推扫机制的高光谱成像仪的影响尤为严重.

如何校正高光谱成像误差, 提高仪器精度, 是星载高光谱仪目前备受关注且亟需解决的问题之一^[1-12], 采用新的光学设计手段成本太高^[13-14], 不改变原成像条件而采用数据分析的手段来校正误差, 则显得更加行之有效. 文献[1-2]针对天文探测领域

收稿日期: 2016-01-12, 修回日期: 2016-09-30

Received date: 2016-01-12, revised date: 2016-09-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB72400504), 航空科学基金重点项目(20100112002)

Foundation items: The National Basic Research Program of China(2009CB72400504), Aeronautical Science Foundation of China Project(20100112002)

作者简介(Biography): 南一冰(1987-), 男, 河北邢台人, 博士, 主要研究领域为遥感图像处理. E-mail: ceecnannan@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: gaokun@bit.edu.cn

的模糊高光谱数据进行了校正研究;文献[3]提出了一种联合的图像复原和融合算法,该算法利用低空间分辨率的高光谱图像和高空间分辨率的多光谱图像融合来提高高光谱图像的空间分辨率;文献[4]利用低分辨率高光谱图像的光谱信息来增强全色图像的质量;文献[6]提出了一种针对推扫机制的校正算法,对已知卫星振动引起的光谱图像空间维、光谱维退化进行了校正;文献[7-8]实现了典型高斯模糊高光谱图像的校正;文献[9]对高光谱图像中信噪比较低的波段进行了降噪研究;文献[10-11]对干涉型成像光谱仪受卫星振动影响进行了校正研究;另外,文献[10]、[12]分别提出了卫星平台旋转、平移和向前像移造成的高光谱图像校正算法.从目前高光谱图像复原和校正技术研究现状来看,往往依赖额外的辅助图像或先验知识,或者只针对某一特定退化原因进行校正;而现实中卫星平台的运动模式复杂多变,导致高光谱图像退化形式也多种多样.因此,在缺乏先验知识的情况下,开展未知退化模式的高光谱图像盲复原和校正研究就变得尤为重要.

本文以星载推扫色散型高光谱成像仪为对象,提出了一种基于波段选择估计图像点扩散函数(PSF)的高光谱图像盲校正算法.利用选择的波段进行PSF估计,进而逐波段校正整个高光谱图像序列.针对不同振动模式引入的图像退化和光谱误差以及原始图像未知的模糊高光谱图像,分别进行了仿真退化和校正实验研究,实现了运动退化高光谱图像的空间分辨率复原和光谱校正.

1 高光谱图像波段选择方法

1.1 波段选择技术

理论上,运动误差导致的色散型光谱仪的空间维退化与光谱维退化影响是独立的,因此某一波段图像的校正与全色遥感影像复原的原理是一致的^[6].然而高光谱图像的波段多、数据冗余量大,给退化数据的校正工作带来了不便.理论上,每个波段的PSF是相同的,直接对每一波段图像进行盲校正,不仅增加了估计PSF的误差,忽略了高光谱图像的谱间相关性,计算量也过大.因此有必要在海量的数据中选择出最能代表整个光谱立方体空间和波段信息特点的图像,估计出推扫成像过程中的PSF,从而有的放矢对数据进行校正.

波段选择技术源自高光谱数据降维和压缩等研究领域,是指从原始的数百个波段中选出最能表示

整体特征的数十个或数个波段,并以此来表示整个数据集^[15].一般认为选出的波段包含的信息量越大、与其它波段的相关性越小、研究区域内地物光谱特征差异越大,就越能表示整个数据源.根据该原则,发展出了一些波段选择算法,典型的有最佳指数因子法(optimum index factor, OIF)^[16]和自适应波段选择(adaptive band selection, ABS)法^[17-18]等.以ABS法为例,其数学模型如下:

$$I_i = \frac{\sigma_i}{[R_{\text{spectral}}(i, i-1) + R_{\text{spectral}}(i, i+1)]/2}, \quad (1)$$

其中, I_i 表示第 i 个波段的指数大小, σ_i 表示第 i 个波段的标准差, $R_{\text{spectral}}(i, j)$ 表示第 i 个波段和第 j 个波段之间的相关系数^[16], 其定义为:

$$R_{\text{spectral}}(i, j) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x, y) - u_i][f_j(x, y) - u_j]}{\sqrt{(\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x, y) - u_i]^2)(\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_j(x, y) - u_j]^2)}}, \quad (2)$$

其中 M 、 N 表示图像大小, u_i 、 u_j 表示图像平均灰度.该方法充分考虑了每个波段图像的信息富集程度与相邻波段的相似性. I_i 越大, 相应波段图像的信息量就越大, 越具有代表性.

1.2 高光谱图像校正中的波段选择

高光谱图像校正中的波段选择只需要选出一个最具代表性的波段.以澳大利亚 Hymap 高光谱数据为例,利用 ABS 法计算各波段的选择指数,如图 1 所示. Hymap 数据的波段范围为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 覆盖了可见光、近红外和短波红外, 波段数为 128.

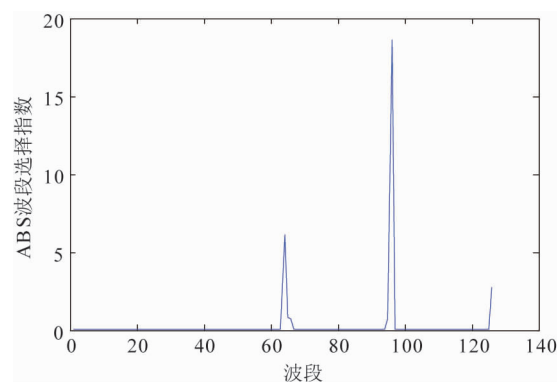


图1 不同波段的选择指数
Fig. 1 Selection index of different bands

图 1 中, 标准差和选择指数较高的为第 65、97 和 127 波段, 但实际上这三个波段的灰度值相对很低, 例如图 2 所示的第 65 波段图像. 较大的标准差和较小相关系数共同拉高了这些波段的选择指数.

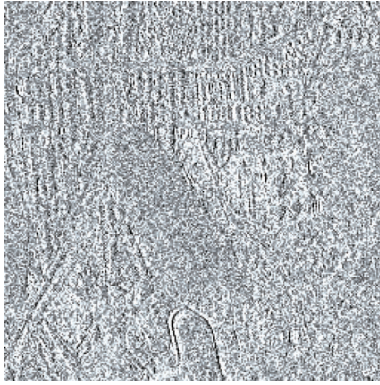


图2 第 65 波段图像
Fig. 2 Image of band 65

但这些波段所含信息量较小,对其它波段来说并不具有代表性;另外,由于图像边缘信息是 PSF 估计的关键,这些波段也不适合用来估计 PSF.

由此可见,标准差并不能真实反映图像的信息量,传统算法选择出的谱间相关性较小的波段也不一定适用于 PSF 的估计. 因此,这里将波段选择依据的原则更改为:(1)所选波段的信息量要大;(2)所选波段与其它波段相关性尽量大. 依据该原则,结合不同波段选择方法的优点,构造适用于高光谱图像校正的波段选择方法,其数学模型如下:

$$I_i = E_i \sum_{j=1, j \neq i}^n R_{\text{spectral}}(i, j) / (n - 1) \quad (3)$$

式中, E_i 为第 i 个波段的信息熵, $[\sum_{j=1, j \neq i}^n R_{\text{spectral}}(i, j)] / (n - 1)$ 表示第 i 个波段和其它所有波段相关系数的平均值. 其中信息熵定义为:

$$E = - \sum_j p(i) \log_2 p(i) \quad (4)$$

其中, $p(i)$ 表示图像内出现的像素灰度值为 i 的概率. 在应用中,常用熵来衡量图像信息的丰富程度.

该模型充分考虑了各波段图像本身的信息量和谱间相关性,所选出的最优波段既具有较大的信息量,又能充分代表其它波段的信息. 仍以 Hymap 为例说明该波段选择方法模型,根据更改后的数学模型,计算不同波段的选择指数,结果见图 3. 图 4 为选择出的指数最大的第 107 波段图像,灰度平均梯度为 48.85. 而 ABS 法指数最大的 97 波段的灰度平均梯度仅为 5.63, 本文方法选择结果的边缘和纹理特征明显更加丰富,更适于 PSF 的估计.

2 基于波段选择估计 PSF 的高光谱图像盲校正算法

高光谱成像仪在轨运动成像过程中,为了满足

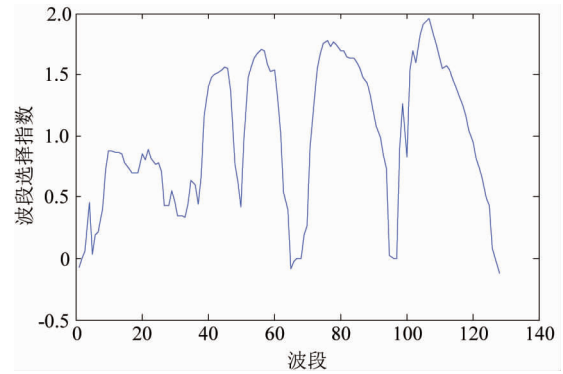


图3 不同波段的选择指数
Fig. 3 Selection index of different bands



图4 波段选择结果
Fig. 4 Band selection result

空间分辨率的要求,每行的曝光时间通常很短,这大大减少了入射到狭缝的光通量,降低了获取的图像的信噪比. 现有的单幅图像去模糊算法往往对噪声很敏感,尤其是在光通量不足时更会严重影响 PSF 估计的准确性;或者即使估计精确,后续反卷积过程中产生的噪声放大和振铃效应也会严重降低复原效果.

针对这些问题, Zhong 提出了一种基于定向滤波新方法^[20]. 其主要思想是对输入图像应用方向低通线性滤波,这不仅能大幅降低噪声水平,同时不会影响垂直滤波器方向上,包括基本模糊信息在内的频率信息. 基于该思想,在一系列不同方向上对图像进行滤波,在每个方向上估计出模糊核投影的一部分,最后通过反 Radon 变换重建模糊核. 得到精确的模糊核后,在最终的反卷积过程中结合去噪滤波技术,从而压制噪声获得高质量的复原图像.

2.1 图像插值

目前现役的星载高光谱成像仪都位于近地轨道,地元空间分辨率(GSD)为 10 m 量级,曝光时间在毫秒量级,轨道高度一般在 400 ~ 800 km;卫星平

台的姿态稳定度一般为 $(10^{-3} \sim 10^{-6})^\circ/\text{s}$ 水平^[21],由此推算卫星振动造成的曝光时间内的像移一般不会超过前后左右一个像元^[6,25].这使得 PSF 支持域非常小.直接将常规图像盲复原算法应用于高光谱图像的校正是不现实的^[6].因此,在估计 PSF 之前,先对选中的单波段图像做插值处理,提升其分辨率和 PSF 的支持域.考虑到图像细微结构对 PSF 估计的积极作用,在退化高光谱图像的校正中,这里采用了双三次插值法.

2.2 基于波段选择的高光谱图像盲校正方法流程

综合考虑高光谱图像的波段选择及图像插值算法,结合 Zhong 提出的算法,提出基于波段选择估计图像 PSF 的高光谱图像盲校正方法,其流程如图 5 所示.

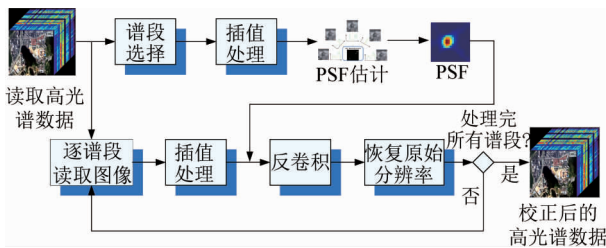


图 5 基于波段选择估计 PSF 的高光谱图像盲校正方法流程图

Fig. 5 Flowchart of hyperspectral image blind correction method based on band selection and PSF estimating

步骤 1: 读取退化高光谱数据,利用式(3)进行波段选择,选出最佳波段图像;

步骤 2: 采用双三次插值法,对选出的最佳波段图像做插值处理,提升其分辨率;

步骤 3: 利用基于方向滤波的模糊核估计算法,得到高分辨率最佳波段图像的 PSF;

步骤 4: 按波段顺序读取高光光谱图像序列,对当前读取的图像做插值处理;

步骤 5: 利用步骤 3 估计出的 PSF 和 Zhong 提出的反卷积方法,校正当前波段图像,然后恢复图像原始分辨率;

步骤 6: 重复步骤 4 和步骤 5,直到完成所有波段的校正.

模糊核的估计是盲校正实施的前提.根据 Zhong 的算法,首先基于建立的运动成像误差模型,观察下式中的方向低通滤波器:

$$I(p) * f_\theta = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^{\infty} w(l) I(p + lu_\theta) dl, \quad (5)$$

其中, I 表示一幅图像, p 为像元位置, l 表示某个像

元到 p 的空间距离, c 为归一化因子,定义 $c = \int_{-\infty}^{\infty} w(t) dt$, u_θ 是方向 θ 上的单位向量.滤波器的轮廓由 $w(t)$ 决定,采用高斯函数的形式: $w(t) = \exp(-t^2/2\sigma_f^2)$,其中 σ_f 控制滤波器的强度.

由于图像滤波会对估计的模糊核产生影响,定义模糊图像为 b ,模糊核为 k ,从滤波后的图像 $b_\theta = b * f_\theta$ 估计出的模糊核为:

$$k_\theta = k \otimes f_\theta, \quad (6)$$

其中, f_θ 对像元取平均,可降低噪声水平.由于 f_θ 只沿 θ 方向操作,它对垂直方向上的模糊信息几乎没有影响.利用这一特点,估计原始模糊核 k 沿 θ 方向的投影.使用 Radon 变换构造投影:即 k 在投影方向上的线性积分.一条投影线 $\rho = x \sin(\theta) + y \cos(\theta)$ 对应的 Radon 变换的特征值为:

$$R_\theta(\rho) = \iint k(x, y) \delta[\rho - x \sin(\theta) - y \cos(\theta)] dx dy, \quad (7)$$

式中, $k(x, y)$ 表示模糊核 k 上坐标点 (x, y) 的值, θ 和 ρ 分别为投影线的角度和偏移量.因此, k_θ 沿 θ 方向的投影为:

$$R_\theta(k_\theta) = R_\theta(k * f_\theta) = R_\theta(k) * R_\theta(f_\theta) = R_\theta(k), \quad (8)$$

其中, R_θ 为方向 θ 的 Radon 变换操作符, $\theta' = \theta + \pi/2$.它是一个线性操作符,由式(5)中 f_θ 的定义可以证明 $R_\theta(f_\theta)$ 是一维脉冲函数.式(8)说明 f_θ 对模糊核 Radon 变换的垂直方向没有影响,这是基于定向滤波模糊核估计方法的基础.

基于以上分析,采用方向滤波器 f_θ 来估计不同方向的模糊核 k_θ ,然后将其投影到和滤波器相同的方向来获取相应的 Radon 变换.重复这一过程获取一系列的投影.最终,利用反 Radon 变换计算出二维的模糊核.为了更可靠地估计模糊核,采用多尺度盲反卷积技术.生成一个输入模糊图像 b 的图像金字塔 $\{b_0, b_1, \dots, b_n\}$, b_0 为原始分辨率,从 b_n 到 b_0 自底向上估计模糊核.通过降维,大部分噪声被去除.利用现有的 Cho 和 Lee 的方法^[22],从 b_n 到 b_1 估计模糊核 k_i 和潜能 l_i .仅仅对原始分辨率的 b_0 采用方向滤波器来估计模糊核.

反卷积:获得了精确的模糊核 k_0 后,利用它来从包含噪声的输入图像 b_0 中估计出一幅清晰的潜能 l_0 .由于在该步骤中, k_0 是固定不变的,因此在整个算法中,降噪和模糊核估计不会互相影响.

在本算法中,通过最小化下面的能量方程来估

计最终的输出图像 l_0 :

$$\|l_0 * k_0 - b_0\|^2 + w_3 \|l_0 - \text{NLM}(l_0)\|^2, \quad (9)$$

其中, $\text{NLM}(\cdot)$ 表示非局部均值去噪, w_3 是平衡参数. 该能量方程的最小化可以确保得到的结果是无噪声的, 结果 k_0 和 l_0 也最匹配. 由于 $\text{NLM}(l_0)$ 是高度非线性的, 很难直接进行最小化运算. 但在实际应用中发现, 通过以下两步的迭代运算, 可以达到令人满意的结果:

$$l_0' = \text{NLM}(l_0), \quad (10)$$

$$l_0 = \arg \min_{l_0} \{ \|l_0 * k_0 - b_0\|^2 + w_3 \|l_0 - l_0'\|^2 \}, \quad (11)$$

其中, l_0' 的初始值为 0 (一幅全黑图像). 解式 (11) 同样可以得到包含有用高频信息的噪声图像 l_0 . 在交替最小化过程中, l_0 中的噪声逐渐被去除, 同时高频图像细节被保留下来.

3 校正实验及其结果评价

为了验证基于波段选择估计 PSF 的高光谱图像盲校正算法, 采用 HJ-1A 卫星搭载的可见光/近红外超光谱成像仪 (HIS) 获取的真实高光谱图像进行分析. 该图像在 2011 年 5 月 11 日拍摄于中国新疆哈密地区的数据, 包含城区、农田和戈壁等, 地物目标较丰富. 其数据格式为, 波段范围为 $0.45 \sim 0.95 \mu\text{m}$, 地面分辨率为 100 m, 每行的曝光时间为 14.6 ms, 采样频率等效于 68 Hz. 去掉条带噪声较明显的前 16 个波段, 从原始数据中选取 99 个波段进行研究.

卫星振动在空域上表现为卫星本体 6 个自由度方向上的振动, 一般归纳为沿 3 个轴的平动和绕 3 个轴的转动, 而对像质影响较大的主要是角转动 (成像距离大). 为了验证本文方法的有效性, 根据国际上卫星在轨测量运动规律^[23-24], 分别进行俯仰和侧滚方向复合正弦振动模式下的的大振幅低频 (振幅 1 像元, 频率 5 Hz)、小振幅高频 (振幅 0.5 像元, 频率 34 Hz) 和随机振动模式 (振幅 1 像元以内) 的高光谱图像退化仿真 (采用文献 [25] 中的退化仿真方法) 和校正实验, 以及原始清晰图像和退化函数都未知情况下的双盲校正实验, 并对实验结果进行评价. 校正后, 分别使用均方误差 (MSE)、峰值信噪比 (PSNR) 和图像结构相似度 (SSIM)^[26] 对空间维实验结果进行评价, 使用光谱信息散度 (SID)、光谱均方误差 (SMSE) 和光谱梯度角 (SGA)^[27] 对光谱维实验结果进行评价.

3.1 仿真退化及其校正实验

3.1.1 光谱图像空间维校正结果

图 6 为 PSF 估计结果, 图 7 为各振动模式下校正前后各波段图像的 MSE、PSNR 和 SSIM 评价参数相减后的数值变化情况. 可以看出, 经过本文算法的校正, 各波段图像的质量有了一定程度的改善.

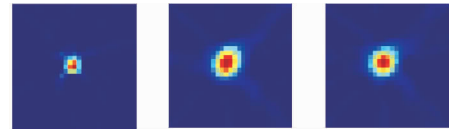


图 6 从左到右依次为估计的大振幅低频、小振幅高频和随机振动模式下的 PSF

Fig. 6 Estimated PSF for vibration with large amplitude at low frequency, small amplitude at high frequency, and random mode (from left to right)

表 1 给出了校正前后各波段图像质量评价结果的平均值, 对于大振幅低频、小振幅高频和随机振动模式下的退化高光谱图像, 经过校正, MSE 值从 0.001 3、0.000 4 和 0.000 4 分别减小为 0.000 9、0.000 2 和 0.000 2; PSNR 分别提高了 1.6、3 和 2.2 dB; SSIM 数值也分别从 0.76、0.88 和 0.88 升高到 0.83、0.94 和 0.94. 结果表明, 校正后, 不仅整个高光谱数据立方体的数据质量得到了提高, 校正后的图像细节也更加接近原始清晰图像.

表 1 空间维质量评价

Table 1 Assessment of spatial quality

振动模式	数据	MSE	PSNR	SSIM
大振幅低频	退化数据	0.001 3	53.844 2	0.765 0
	校正后	0.000 9	55.398 4	0.831 2
小振幅高频	退化数据	0.000 4	58.876 8	0.877 1
	校正后	0.000 2	61.829 5	0.941 9
随机振动	退化数据	0.000 4	58.949 4	0.883 1
	校正后	0.000 2	61.128 3	0.935 0

3.1.2 光谱图像光谱维校正结果

表 2 给出了校正前后空间各点光谱质量评价结果的平均值. 由光谱质量评价参数的定义可知, SMSE、SID 反映的是光谱曲线整体的变化情况, 而 SGA 反映的是光谱曲线局部走向的变化. 从光谱维的评价结果可知, 对于各振动模式, 经本文方法的校正, 无论是光谱曲线整体还是局部特征, 都更加接近原始真实光谱.

图 8 给出了校正前后三种振动模式下, SMSE 参数退化程度最大点的光谱曲线变化情况. 可以看出, 振动造成了光谱曲线的失真, 经过校正, 光谱曲

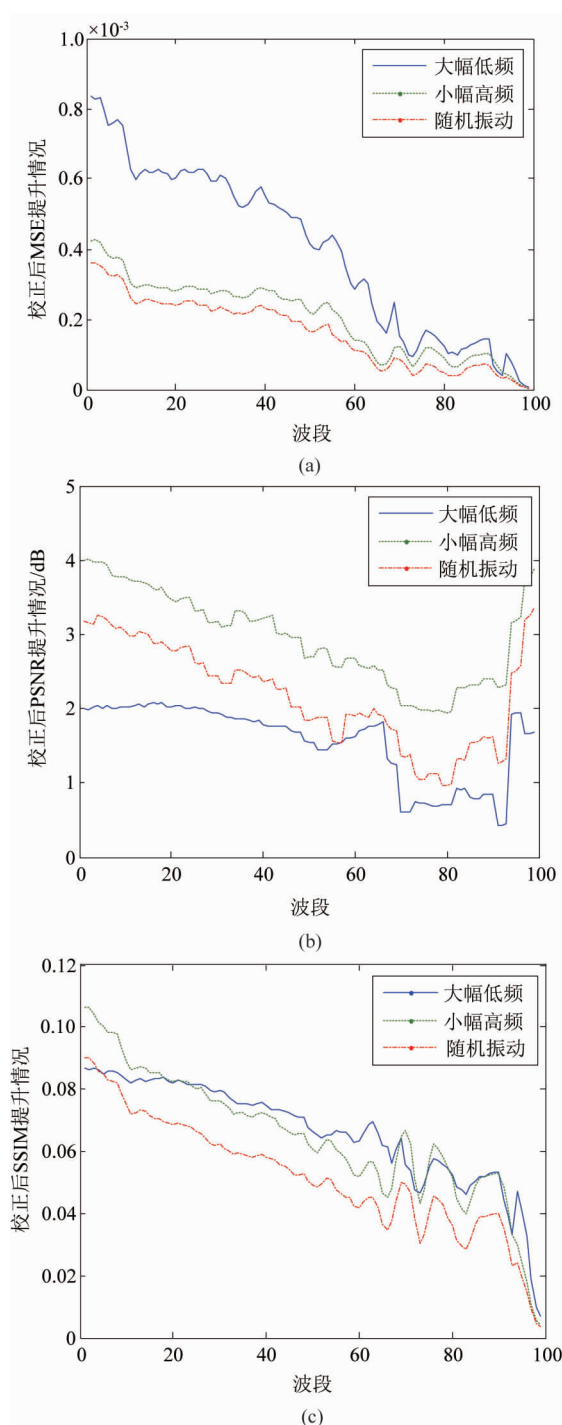


图7 校正后 (a)MSE, (b) PSNR, (c) SSIM 的改善情况
Fig. 7 Improvement of (a) MSE, (b) PSNR, (c) SSIM after correction

表2 光谱维质量评价

Table 2 Assessment of spectral quality

振动模式	数据	SMSE	SID	SGA
大幅低频	退化数据	0.229 6	0.000 026	0.000 64
	校正后	0.000 022	0.000 52	0.195 7
小幅高频	退化数据	0.000 017	0.000 23	0.163 1
	校正后	0.000 012	0.000 11	0.100 1
随机振动	退化数据	0.000 017	0.000 24	0.161 1
	校正后	0.000 012	0.000 14	0.103 4

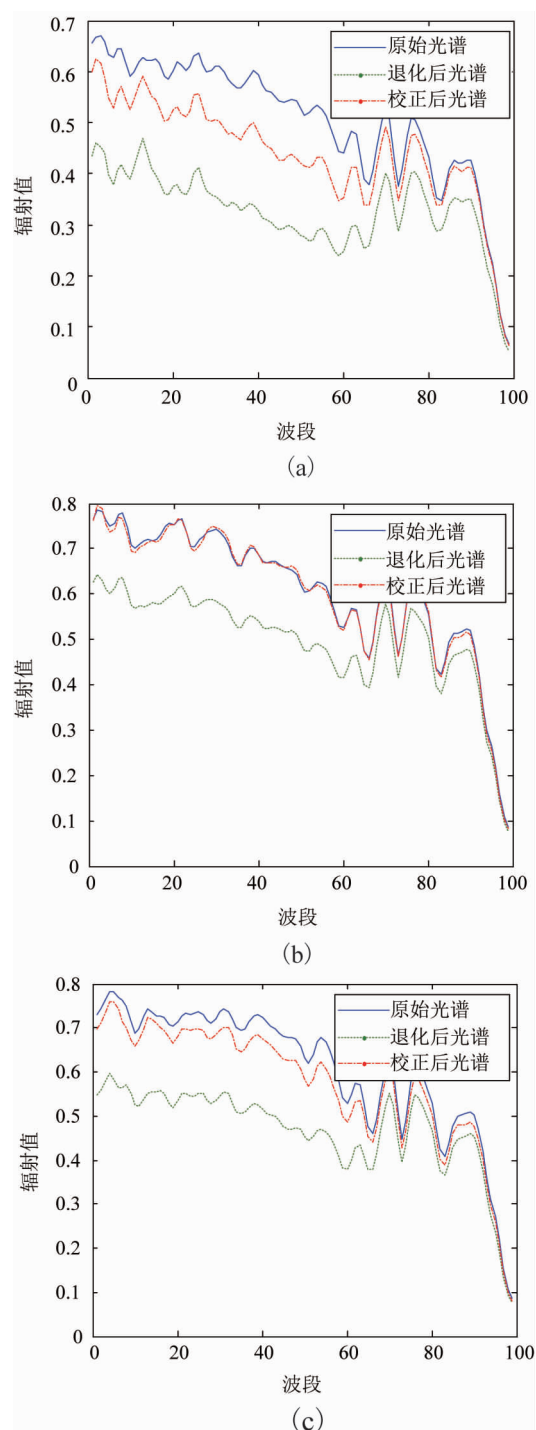


图8 三种模式下的光谱曲线校正结果 (a)大振幅低频, (b)小振幅高频, (c)随机振动

Fig. 8 Spectral curves correction results of (a) large vibration amplitude with low frequency, (b) small amplitude with high frequency, and (c) random vibration

线更加接近原始光谱. 其中, 近红外波段的光谱曲线局部变化和特征峰较明显, 校正后近红外波段的光谱更加接近原始光谱, 其校正效果也优于可见光波段.

通过以上仿真实验和评价结果可以看出,尽管退化函数未知,但经过本文提出的基于波段选择高光谱图像盲校正方法的校正,空间维和光谱维的数据质量都有了明显的提升.而且该算法对大振幅低频、小振幅高频和随机振动等振动模式造成的高光谱图像退化情况,具有较广泛的适用性.

3.2 双盲校正实验

真实获取的高光谱图像数据本身也是受卫星运动误差影响的结果,因此在原始清晰图像和退化函数都未知的情况下,利用本文的方法直接对得到的 HJ-1A 高光谱图像进行校正,并采用无参评价方法对校正前后的图像质量进行评价.

图 9 给出了校正前后所有波段的灰度平均梯度 (GMG)^[28]和拉式算子(L)^[29]评价结果.可以看出,经过本文算法的校正,除最后几个灰度值本身极低的波段外,其余各波段图像的清晰度都有所提高;红外波段 GMG 和 L 评价结果分别从 0.022 6、0.108 0 提高到 0.024 9、0.121 2.

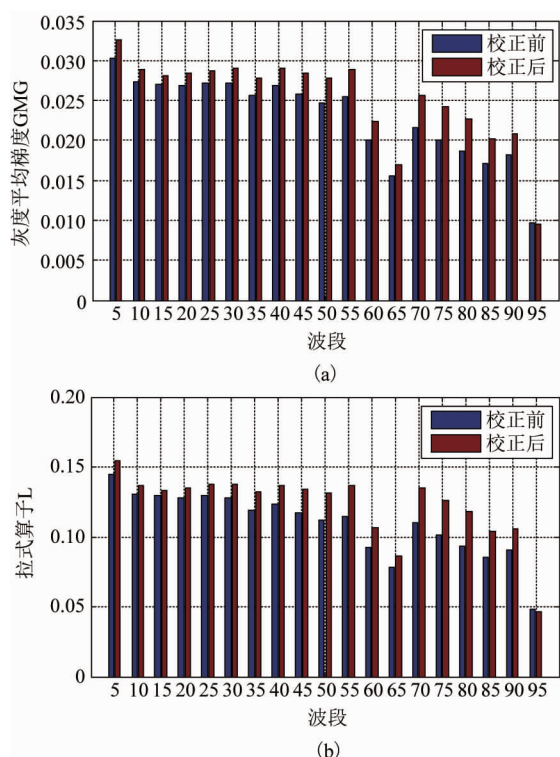


图 9 评价结果(a)GMG,(b)L
Fig.9 Assessment of (a) GMG, and (b) L

图 10 所示为校正前后,第 40、80 波段的灰度图像.同样可以看出,校正后图像更加清晰、细节更加丰富.

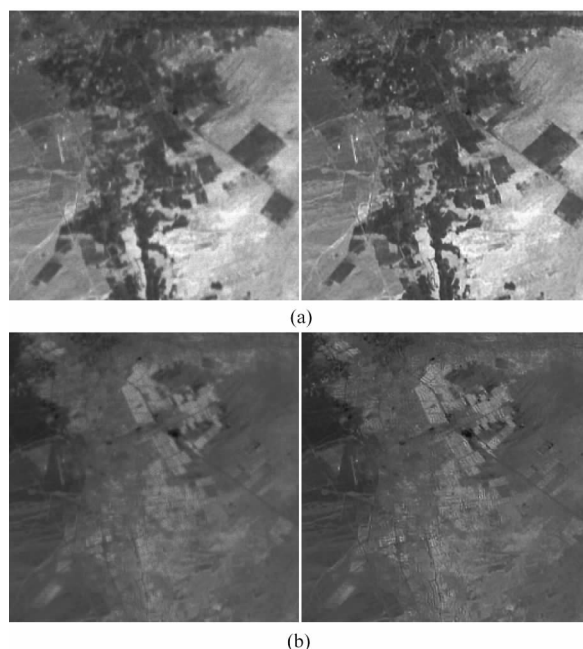


图 10 校正前(左)后(右)图像对比,(a)、(b)分别为第 40、80 波段

Fig. 10 Comparison of images before (left) and after correction (right), (a) and (b) represent images from band 40 and band 80, respectively

4 结论

为了提高由卫星平台运动误差造成的模糊高光谱图像的数据质量,针对点扩散函数未知的情况,进行了退化高光谱图像的盲校正研究.分析了传统波段选择方法,在此基础上提出了基于高光谱图像特征的波段选择方法,该方法能够有效的选择出信息量大、纹理结构特征丰富并最具代表性的图像.另外,针对高光谱图像退化函数支持域小的特点,通过对图像做双三次插值处理以便更加精确地估计出模糊核和点扩散函数.综合考虑上述问题,提出了基于波段选择估计图像 PSF 的高光谱图像盲校正方法.实验结果表明,本文提出的方法能够对不同卫星振动模式引入的误差进行校正,能够在有效地提高各波段高光谱数据的空间维图像质量和清晰度的同时,大大减小光谱维的失真.

References

- [1] Bongard S, Soulez F, Thiebaut E, et al. 3-D deconvolution of hyper-spectral astronomical data[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, **418**(1):258-270.
- [2] Soulez F, Thiebaut E, Denis L. Restoration of hyperspectral astronomical data with spectrally varying blur[J]. *Eas Publications*, 2013, **59**:403-416.

- [3] Zhang Y, Duijster A, Scheunders P. A combined hyper-spectral image restoration and fusion approach[C]. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009. IEEE, 2009.
- [4] Borel C C, Spencer C H. Novel methods for panchromatic sharpening of multi/hyper-spectral image data[C]. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009. IEEE, 2009.
- [5] LI Qing-Li, XUE Yong-Qi, WANG Jian-Yu, *et al.* Atmospheric correction of PHI hyperspectral imagery[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李庆利, 薛永祺, 王建宇, 等. PHI 高光谱图像的大气校正算法. *红外与毫米波学报*). 2006, **25**(04):316-320.
- [6] NAN Yi-Bing, TANG Yi, ZHANG Li-Jun, *et al.* A sectioned method to correct spectral imaging data degraded by satellite vibrations[J]. *Acta Physica Sinica* (南一冰, 唐义, 张丽君, 等. 一种卫星平台振动光谱成像数据分块校正方法. *物理学报*). 2014, **63**(1):010701-1~010701-9.
- [7] Duijster A, Scheunders P, De Backer S. Wavelet-based EM algorithm for multispectral-image restoration[J]. *Geoscience & Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2009, **47**(11):3892-3898.
- [8] Lia O, Goossens W, Aelterman B, *et al.* Hyperspectral image deblurring with PCA and total variation[C]. 5th workshop on hyperspectral image and signal processing: evolution in remote sensing, 2013.
- [9] Rasti B, Sveinsson J R, Ulfarsson M O, *et al.* Wavelet based hyperspectral image restoration using spatial and spectral penalties[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, **8892**(24):1504-1507.
- [10] Mahgoub A, Nguyen T, Desbiens R, *et al.* Aligning the frames of a non stationary imaging Fourier transform spectrometer for spectrum retrieval[C]. In Image Processing (ICIP), 2009 16th IEEE International Conference on. IEEE, 2009.
- [11] LI Xiang-Bin, CHEN De-Rong, YU Cheng-Wei, *et al.* Image correction techniques for large-aperture static imaging spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering* (李湘滨, 谌德荣, 余成伟, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪图像校正技术. *光电工程*). 2004, **31**(8):8-11.
- [12] CAO Hai-Xia. Forward image motion compensation of hyper spectral image based on image restoration[J]. *Chinese Optics* (曹海霞. 基于图像复原的高光谱图像前向像移补偿. *中国光学*). 2013, **6**(6):856-862.
- [13] Zhu J, Hou W, Zhang X, *et al.* Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(1):015605.
- [14] Yang T, Zhu J, Hou W, *et al.* Design method of freeform off-axis reflective imaging systems with a direct construction process [J]. *Optical Express*, 2014, **22**(8):9193-9205.
- [15] LIU Xue-Song, GE Liang, WANG Bin, *et al.* An unsupervised band selection algorithm for hyperspectral imagery based on maximal information [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘雪松, 葛亮, 王斌, 等. 基于最大信息量的高光谱遥感图像无监督波段选择方法. *红外与毫米波学报*). 2012, **31**(2):166-170.
- [16] Chavez P S, Berlin G L, Sowers L B. Statistical-method for selecting landsat MSS ratios [J]. *Journal of Applied Photographic Engineering* [J]. 1982, **8**(1):23-30.
- [17] LIU Chun-Hong, ZHAO Chun-Hui, ZHANG Ling-Yan. A new method of hyperspectral remote sensing image dimensional reduction [J]. *Journal of Image and Graphics* (刘春红, 赵春晖, 张凌雁. 一种新的高光谱遥感图像降维方法. *中国图象图形学报*). 2005, **10**(2):218-222.
- [18] ZHAO Hui-Jie, LI Ming-Kang, LI Na, *et al.* A band selection method based on improved subspace partition [J]. *Infrared and Laser Engineering* (赵慧洁, 李明康, 李娜, 等. 一种基于改进子空间划分的波段选择方法. *红外与激光工程*). 2015, **44**(10):3155-3160.
- [19] LIU Heng-Shu, PENG Feng-Hua, HUANG Lian-Qing. Feature analysis of hyperspectral image [J]. *Optics and Precision Engineering* (刘恒殊, 彭风华, 黄廉卿. 超光谱遥感图像特征分析. *光学精密工程*). 2001, **9**(4):392-395.
- [20] Zhong L, Cao S, Metaxas D, *et al.* Handling noise in single image deblurring using directional filters [C]. In 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition IEEE, 2013.
- [21] BIAN Zhi-Qiang, CAI Chen-Sheng, LV Wang, *et al.* High accuracy and high stability control technology of remote sensing satellite [J]. *Aerospace Shanghai* (边志强, 蔡陈生, 吕旺, 等. 遥感卫星高精度高稳定度控制技术. *上海航天*). 2014, **31**(3):24-33.
- [22] Cho S, LEE S. Fast motion deblurring [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2009, **28**(5):89-97.
- [23] Toyoda M. Acquisition and tracking control of satellite-borne laser communication systems and simulation of downlink fluctuations [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(3):036001-036001-9.
- [24] Wittig M E, Van Holtz L, Tunbridge D E L, *et al.* In-orbit measurements of micro accelerations of ESA's communication satellite OLYMPUS [C]. In OE/LASE 90. International Society for Optics and Photonics, 1990.
- [25] TANG Qiu-Yan, TANG Yi, CAO Wei-Liang, *et al.* Simulation of imaging spectrometers degraded by satellite vibrations [J]. *Acta Physica Sinica* (唐秋艳, 唐义, 曹玮亮, 等. 卫星平台复杂振动引起的光谱成像退化仿真研究. *物理学报*). 2012, **61**(7):6-14.
- [26] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2004, **13**(4):600-612.
- [27] ZHANG Xiu-Bao, YUAN Yan, JING Juan-Juan, *et al.* Spectral discrimination method information divergence combined with gradient angle [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (张修宝, 袁艳, 景娟娟, 等. 信息散度与梯度角正切相结合的光谱区分方法. *光谱学与光谱分析*). 2011, **31**(3):853-857.
- [28] LI Hang, LU Yang, CUI Hui-Juan, *et al.* Image quality assessment based on frequency domain based structural similarities [J]. *Tsinghua Science and Technology* (李航, 路羊, 崔慧娟, 等. 基于频域的结构相似度的图像质量评价方法. *清华大学学报*). 2009, **29**(4):26-28.
- [29] Harris S. Image evaluation and restoration [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, **56**(5):569-570.