

顾及 BRDF 和大气影响的摆扫式 航空高光谱边缘辐射畸变校正

田玉刚¹, 吴蔚¹, 杨贵²

(1. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 湖北 武汉, 430074;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 讨论了顾及传输路径差异和方向性反射差异的边缘辐射校正方法, 并根据 POS 数据改正了由于姿态变化引起的边缘畸变. 以实用型模块化成像光谱仪 (Operational Modular Imaging Spectrometer, OMIS-III) 影像为例, 采用上述方法进行边缘校正, 最后采用近似同一扫描行上的同类地物光谱进行对比, 得出校正后的光谱吻合度比校正前更高.

关键词: 摆扫式成像光谱仪; 边缘辐射畸变; 大气衰减; 方向性反射

中图分类号: TP721.1 **文献标识码:** A

Edge radiation distortion correction of whiskbroom airborne hyperspectral image by considering BRDF effect and atmospheric attenuation

TIAN Yu-Gang¹, WU Wei¹, YANG Gui²

(1. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A correction method in consideration both of the radiometric transfer path and BRDF effects was presented. It uses POS data to correct the change of radiation distortion caused by flight attitude. Taking the OMIS-III data for example, results show that the spectra of the same object in the middle and edge of corrected images can match better than uncorrected ones after using the correction methods proposed above.

Key words: whiskbroom hyperspectral imager, edge radiation distortion, atmospheric attenuation, bidirectional reflectance distribution function (BRDF)

PACS: 07.07.Df

引言

摆扫式航空高光谱影像在成像过程中会出现明显的边缘辐射畸变, 边缘畸变的存在导致高光谱影像出现同物异谱和异物同谱现象, 使得无法利用光谱特征对地物进行定量或半定量的分析与识别. 因此, 需对摆扫式航空高光谱影像边缘辐射畸变进行校正.

通常认为, 边缘辐射畸变是由于大气路径长度、仪器-太阳-目标几何关系以及地物反射非朗伯特性等因素综合作用的结果^[1]. 对于摆扫式航空高光谱影像边缘畸变的问题, 众多学者对此进行了研究. 概括来说, 该畸变校正的方法可以分为两大类, 即基于图像统计特征的方法和基于传感器成像机理和成像模型的方法. 前者主要从图像统计特征出发, 使用直方图匹配、矩匹配或低通滤波等方法^[2-6]. 该类方法

收稿日期: 2015-11-29, 修回日期: 2016-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0502603)

Foundation items: Supported by National Key Technologies Research and Development Program (2016YFB0502603)

作者简介 (Biography): 田玉刚 (1977-), 男, 湖北天门人, 副教授, 博士, 主要研究领域为航空高光谱影像处理及应用. E-mail: ygangtian@cug.edu.cn

Received date: 2015-11-29, revised date: 2016-04-01

可以取得较好的实验效果,然而并不具有物理意义,不能很好地解释边缘畸变产生的原因,因此,部分学者从成像机理和传感器模型出发,对引起辐射畸变的原因进行了分析与校正,如通过垂直航线的设计,对影像中心和边缘辐射进行归一化处理,修正了影像辐射畸变^[7];从辐射传输机理出发,推导了大气衰减和辐射传输路径对影像边缘辐射畸变的影响^[1]或使用伪不变特征结合地面实测光谱对影像进行辐射校正^[8].但以上方法存在费用较高,对导致辐射畸变的因素考虑不全面以及校正过程复杂、实用性低等问题.

综上所述,导致影像边缘畸变的主要原因有两点:一是辐射传输路径的差异,边缘像素辐射传输路径较长,大气衰减作用较强,导致影像边缘辐射强度减弱;二是由于边缘地物反射角较大导致影像边缘辐射强度较强.因此,本文以实用型模块化成像光谱仪(Operational Modular Imaging Spectrometer, OMIS-III)为例,从摆扫式航空高光谱影像成像过程出发,探讨了造成影像边缘畸变的原因,综合考虑以上两种因素的影响并使用 POS 数据修正因传感器姿态变化引起的误差,最后采用近似同一扫描行上的同类地物光谱进行对比分析.

1 边缘辐射畸变校正

1.1 大气衰减影响校正

摆扫式航空高光谱传感器在成像过程中从机下点向两侧扫描角度逐渐增大,由机下点向两侧的大气传输路径也在逐渐增大.由于大气的衰减作用,传感器接收到的能量由机下点向两侧递减,由此造成影像边缘与中心辐亮度出现差异.根据布格—朗伯(Bouguer-Lambert)透射定律^[9],传感器探测到距离机下点第 i 个像元经过大气衰减后的辐射强度为:

$$E_i(\lambda) = E_0(\lambda) e^{-\int_0^H K(\lambda, h) \sec\theta_i dh}, \quad (1)$$

其中: E_0 为地物的辐射强度, H 为航高, K 为衰减系数, θ_i 为距离机下点第 i 个像元到机下点的角度. 大气衰减系数表示通过单位距离辐射能量衰减的比例,反映了大气对于地面辐射能量吸收和散射能力的强弱,大气衰减系数定义为^[10]:

$$K(\lambda, h) = -dE(\lambda)/(E(\lambda) * dh), \quad (2)$$

其中: $E(\lambda)$ 为辐射强度, dh 为通过大气的厚度, $dE(\lambda)$ 为通过厚度为 dh 的大气辐射强度的衰减量.

机载成像光谱仪数据采集一般在晴朗的气象条件下进行,飞行高度较低(一般为 1 000 m 左右).可

以假设大气衰减系数仅与大气的垂直分布特性和波长有关,与像元在区域内所处位置无关.因此,对式(1)进行简化可得,在同一扫描行上对于同种地物,处于机下点像元接收到的辐亮度与距离机下点第 i 个像元接收到的辐亮度的差异为:

$$E_i(\lambda) = E_{\perp}(\lambda) e^{-K(\lambda) * \Delta H}, \quad (3)$$

其中: ΔH 为扫描行上距离机下点第 i 个像元与机下点的大气传输路径差, E_{\perp} 为机下点辐亮度.

假设传感器的瞬时视场角为 ϑ , 则:

$$\Delta H = H/\cos(1 * \vartheta) - H, \quad (4)$$

其中, H 为航高, i 为距离机下点像元数.

1.2 BRDF 影响修正

自然地物并不是朗伯体,其方向性反射/辐射会随着角度的变化而变化.对于不同像元,其辐射/反射光进入传感器的角度不同,造成了不同位置像元的辐亮度不同^[11-13].由于 OMIS-III 传感器具有较大(73°)的视场角,由地物方向性反射引起的辐射畸变不能忽略,本文采用 Lommel-Seeliger 函数对地物的方向性反射进行校正^[14-15].

该模型可以表示为:

$$R(\theta_i, \theta_v) = 2\rho_0/(\cos\theta_i + \cos\theta_v), \quad (5)$$

其中, ρ_0 为校正系数, θ_i 为太阳天顶角, θ_v 为传感器观测天顶角.

在机下点传感器垂直接收时,观测天顶角为 0,由式(5)可知,机下点像元的方向性反射校正系数为:

$$R(\theta_i, \theta_v) = 2\rho_0/(\cos\theta_i + \cos 0). \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可知将距离机下点的第 i 个像素校正到机下点的校正系数为:

$$\rho = (\cos\theta_i + 1)/(\cos\theta_{i_i} + \cos\theta_i), \quad (7)$$

其中: θ_{i_i} 为距离机下点第 i 个像素的传感器观测天顶角, θ_i 为太阳天顶角.

1.3 使用 POS 数据修正因传感器姿态引起的边缘辐射误差

在航空高光谱数据获取过程中,由于飞行姿态的变化导致影像扫描行中心与机下点不重合,而飞行姿态的变化也会导致大气传输路径改变而造成边缘辐射畸变误差.为了对边缘辐射畸变进行精确校正,本文使用 POS 数据对因飞行姿态变化导致的边缘辐射畸变误差进行校正^[16].

姿态变化对成像的影响由侧滚角和俯仰角构成,具体分析如下:

(1) 侧滚角的影响及校正

由飞机侧滚角引起的在扫描行方向上的角度变

化如图 1 所示。

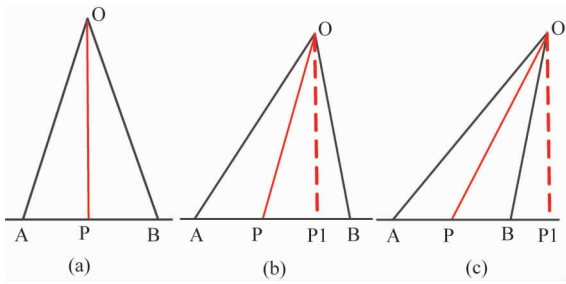


图 1 侧滚角畸变示意图 (a) 无畸变, (b) 侧滚角较小, (c) 侧滚角较大
Fig. 1 Roll angle schematic diagram (a) no roll angle, (b) small roll angle, (c) big roll angle

图 1(a) 为无畸变的成像过程, 则影像中心点即为机下点; 图 1(b)、(c) 为存在侧滚角畸变的影像扫描行, 其中 P_1 为机下点, P 为影像扫描行中心, 平台飞行方向垂直于扫描行方向。因此对侧滚角影响的校正为:

当 roll 小于 $FIFOV/2$ 时, 如图 1(b) 所示, PP_1 对应的像元个数为: $x = \text{int}(-\alpha_{\text{roll}}/\vartheta)$, 当左倾时, α_{roll} 为负, x 为正; 当右倾时, α_{roll} 为正, x 为负。其中 α_{roll} 为侧滚角, ϑ 为传感器的瞬时视场。机下点 P_1 左侧的像元数为 $254 + x$ (OMIS-III 的行像元数为 508), 机下点 P_1 右侧的像元数为 $254 - x$, 则有:

$$n = \begin{cases} 255 - m, & 1 \leq m \leq 254 + x \\ m - 254, & 255 + x \leq m \leq 508 \end{cases} \quad (8)$$

当 roll 大于 $FIFOV/2$ 时, 如图 1(c) 所示, PP_1 对应的的像元数 $x = \text{int}(|-\alpha_{\text{roll}} - FIFOV/2|/\vartheta)$, 当左倾时, α_{roll} 为负; 当右倾时, α_{roll} 为正。

$$n = \begin{cases} 509 - m + x, & 1 \leq m \leq 508, \quad \alpha_{\text{roll}} < 0 \\ m + x, & 1 \leq m \leq 508, \quad \alpha_{\text{roll}} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, α_{roll} 为侧滚角, ϑ 为传感器的瞬时视场角, $FIFOV$ 为总视场角, m 为影像扫描行上像元的位置, n 为距离实际机下点的等效像元数。

考虑侧滚角的影响, 对式(7)进行修正可得:

$$\rho' = (\cos\theta_i + 1)/(\cos\theta_n + \cos\theta_i) \quad (10)$$

其中: ρ' 为经过侧滚角校正后距离机下点等效像素为 n 的像素相对于机下点的方向性反射校正系数, θ_n 为距离机下点等效像素为 n 的像素相对于机下点的偏转角度。

(2) 俯仰角的影响及校正

由飞机姿态俯仰变化引起的在垂直于扫描行方向上的角度变化, 如图 2 所示。

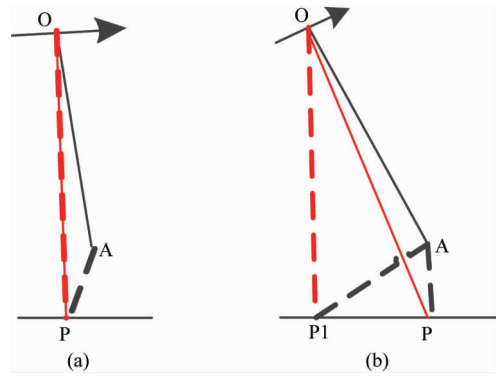


图 2 俯仰角畸变示意 (a) 无畸变, (b) 存在俯仰角畸变
Fig. 2 Pitch angle schematic diagram (a) no pitch angle, (b) exist pitch angle

图 2(a) 为无俯仰角畸变的成像过程, 图 2(b) 为存在俯仰角畸变的成像过程, 其中 P_1 为机下点, P 为视场中心, 无俯仰角畸变时 P 与 P_1 重合, 箭头方向为飞行方向, AP 为扫描行方向, A 和 P 为同一扫描行上的点。

俯仰角的存在影响辐射传输路径长度, 俯仰角越大则辐射传输路径越长。在综合考虑侧滚角和俯仰角畸变的情况下, 对式(4)进行修正, 可得距离影像中心点等效距离为 n 个像元与影像中心点的辐射路径差为:

$$\Delta H' = \frac{1}{\cos(\alpha_{\text{pitch}})(H/\cos(n, \vartheta) - H)} \quad (11)$$

其中: H 为航高, n 为距离机下点的等效像元数, α_{pitch} 为传感器的俯仰角。

1.4 大气衰减系数求解

对于同种地物, 由式(3)、式(10)和式(11)可得在某一波段 λ , 同一扫描行上距离机下点第 i 个像元的辐亮度为:

$$E_i(\lambda) = E_{\perp}(\lambda)e^{-K(\lambda)\Delta H'}\rho' \quad (12)$$

其中, $E_{\perp}(\lambda)$ 为同一扫描行上机下点像元辐亮度, $K(\lambda)$ 为大气衰减系数, $\Delta H'$ 为经过 POS 数据修正后的影像机下点和距离机下点第 i 个像素位置的大气传输路径差, ρ' 为使用 POS 数据修正后的方向性反射校正系数。假设影像上地物分布均匀, 地形平坦且航带足够长, 则在无边缘辐射畸变的情况下影像亮度的列均值应该为一条直线, 即:

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E_{ij}(\lambda) = \rho' \cdot \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E_{\perp j}(\lambda)e^{-K(\lambda)\Delta H'_j} \quad (13)$$

其中, m 为影像行数, j 为影像行号, i 为影像列号.

根据影像的经纬度和影像获取的时间可以求出飞行时刻的太阳高度角. 由于传感器姿态不稳定, 即使在相同列上大气传输路径也不相同, 根据机载 POS 数据可以求出各扫描行的大气传输路径 $\Delta H'$, 那么剩下的问题归结为如何求解大气衰减系数.

由于式(13)其解析解难以获得, 令:

$$f(K(\lambda)) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E_{ij}(\lambda) - \frac{\rho'}{m} \sum_{j=1}^m E_{\perp j}(\lambda) e^{-K(\lambda)\Delta H'_{ij}}, \quad (14)$$

则问题转换为求解函数 $f(K(\lambda))$ 的极小值, 即等价于求解目标函数 $(f(K(\lambda)))^2$ 的极小值, 由于 $f(K(\lambda))$ 是非线性函数, 因此采用 POWELL 搜索算法^[17] 在区间 $(0, 1)$ 内求得 $(f(K(\lambda)))^2_{\min}$ 所对应的 $K(\lambda)$ 值, 再带入式(12)对影像进行边缘辐射畸变校正.

2 实验结果与分析

2.1 实验

研究数据采集于 2012 年 12 月, 江苏某地区, 航高 1 000 m, 地面分辨率 3 m. 传感器包含从可见光到短波红外 128 个波段, 由于短波红外波段信噪比较低, 影像噪声也可能导致光谱差异, 因此本次实验只选取了可见光/近红外的 80 个波段进行处理. 由于 OMIS-III 影像波段并不是按顺序排列, 首先需要按照波长顺序对波段顺序进行重排, 然后通过辐射定标系数对影像进行辐射定标得到辐亮度影像.

图 3 为 OMIS-III 影像真彩色合成显示结果 (18, 8, 5 波段真彩色合成). 从图中可以看出影像存在明显的边缘辐射畸变, 图 3(a) 中箭头所指的为同一条道路上不同位置, 图 3(b) 为各个箭头所对应像元的光谱曲线, 从图 3 可以看出近似在同一条扫描行上的同一条道路, 由于存在边缘畸变, 影像边缘与中心像素光谱差异较大.

图 4 为任意选取的两个波段统计的影像不同列均值间的差异曲线, 从曲线中可以看出影像边缘的列均值辐亮度明显大于影像中心列, 说明影像存在明显的边缘偏亮的现象.

通过式(13)求取影像的大气衰减系数时, 由于航带不可能无限长, 且地物在影像上分布也存在不规则的现象, 不同列之间的影像均值存在差异, 使用不同列进行求解得到的结果可能会出现微小差异. 为了减小由于地物分布不均匀造成的差异, 在对影像进行边缘辐射畸变校正过程中对每一列求其大气

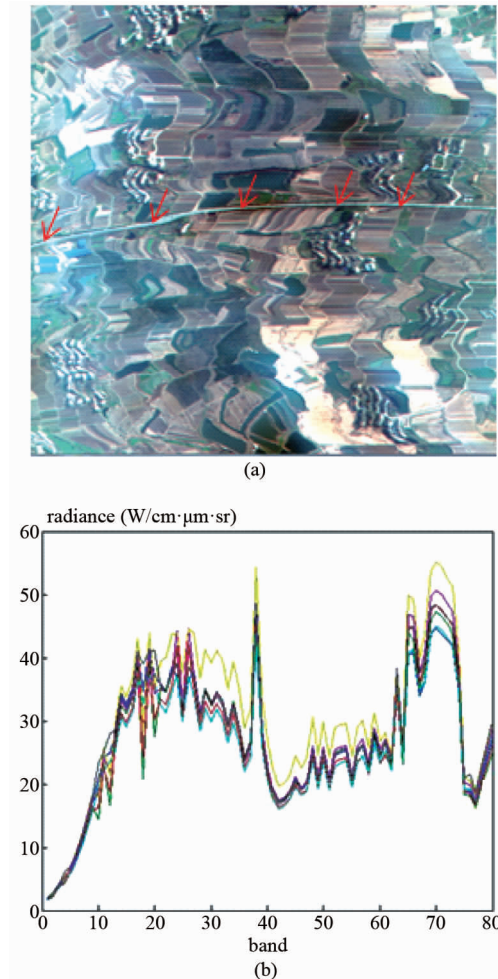


图 3 校正前影像与影像光谱 (a) 辐射定标后影像, (b) 同一地物不同位置光谱曲线

Fig. 3 Image and spectrum before correction (a) Image of radiometric calibration, (b) Spectra of the same object at different position

衰减系数并获取大气衰减系数的均值, 通过大气衰减系数均值进行校正.

图 5 为边缘辐射畸变校正前后影像 (18, 8, 5 波段真彩色合成). 图 5(a) 为边缘辐射畸变校正前影像, 从影像上可以看出, 校正前影像存在较明显的边缘畸变, 影像边缘像素亮度明显高于中心像素;

图 5(b) 为边缘辐射畸变校正后影像, 从图像上可以看出影像边缘畸变得到了较好的抑制, 同时影像色调与校正前基本一致.

图 6 为校正前后同一条道路在边缘和中心处光谱曲线差异对比, 图 7 为校正前后同一水体在边缘和中心处光谱曲线差异对比, 从以上两景影像的对比可以看出, 对于近似同一扫描行上的同一地物, 校正前中心与边缘位置光谱曲线存在明显的差异, 而校正后中心位置与边缘位置光谱曲线差异有了明显

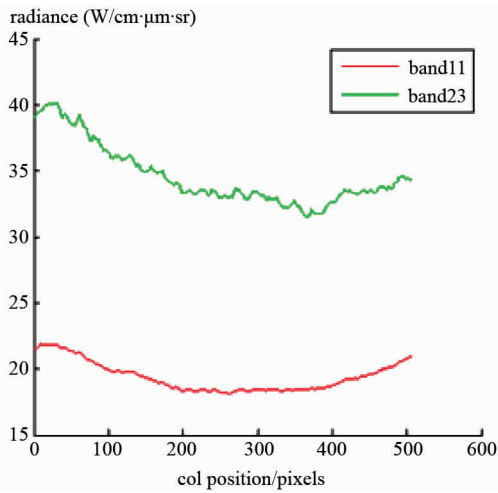


图 4 校正前影像列均值曲线,红色曲线为第 11 波段,绿色曲线为第 23 波段
Fig.4 Column mean value of different bands in image. The red line is for band 11 and green for band 23

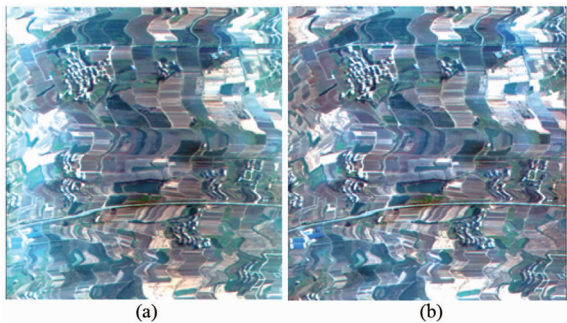


图 5 影像边缘辐射畸变校正结果比较 (a)边缘辐射畸变校正前,(b)边缘辐射畸变校正后
Fig.5 Comparison of the image, (a) before and (b) after correction

的减弱,同一地物中心与边缘处像素光谱趋向于一致,达到了较好的校正效果.同时校正前后影像光谱形状保持一致,因此本文提出的边缘辐射校正方法并没有改变地物的光谱特性.

2.2 结果分析

为了定量评价校正效果,通过计算校正前后近似同一扫描行上同种地物在不同位置的光谱标准差进行定量比较,求取光谱标准差如下:

$$std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} [(s_i - \bar{s})^T \cdot (s_i - \bar{s})]}{(n_1 - 1)}}}, \quad (15)$$

其中, std 为光谱标准差, s_i 为第 i 个点的光谱曲线, \bar{s} 为均值光谱曲线, n_1 近似同一扫描行上同种地物选取的点的个数.

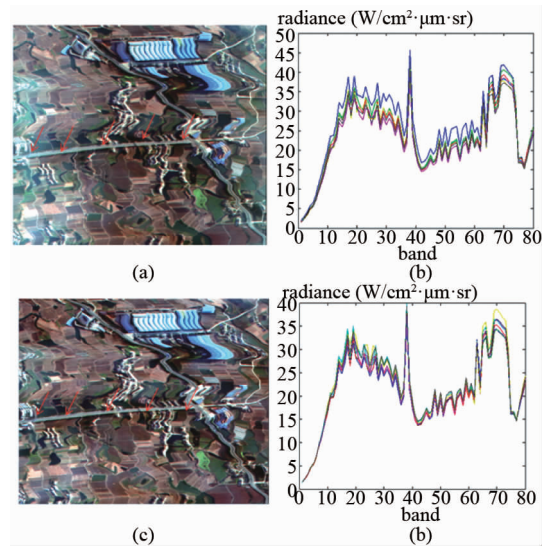


图 6 校正前后道路在不同位置光谱曲线的差异 (a)校正前影像,(b)校正前同一地物边缘与中心像素光谱曲线,(c)校正后影像,(d)校正后同一地物边缘与中心像素光谱曲线
Fig.6 Spectral difference of the same road at difference position, (a) and (c) show images before and after correction, respectively. (b) and (d) are spectra of the same road at different position before and after correction, respectively

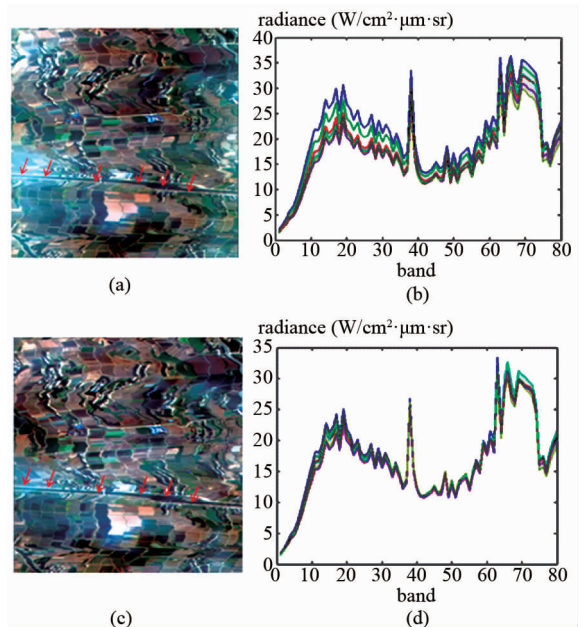


图 7 校正前后水体光谱曲线对比 (a)校正前影像,(b)校正前同一河流边缘与中心像素光谱曲线,(c)校正后影像,(d)校正后同一河流边缘与中心像素光谱曲线
Fig.7 Spectral difference of the same river at difference position. (a) and (c) show images before and after correction, respectively (b) and (d) are spectra of the same river at different position before and after correction, respectively

表 1 校正前后近似同一行同种地物光谱标准差
Table 1 Standard deviation of the same object at almost the same line before and after correction

地物类别	校正前光谱标准差 ($W/cm^2 \cdot \mu m \cdot sr$)	校正后光谱标准差 ($W/cm^2 \cdot \mu m \cdot sr$)
水体 1	9.75	6.09
水体 2	23.33	14.27
道路	16.56	9.57

表 1 为校正前后近似同一行扫描行上同种地物不同位置的光谱标准差,对于同种地物其光谱应该保持一致,标准差较小,然而在实际成像过程中由于受到边缘辐射畸变的影响,影像边缘与中心同种地物光谱存在比较大的差异.从表 1 中可以看出,校正前不同位置同种地物光谱差异较大,校正后同种地物光谱差异得到修正,光谱标准差有了明显的下降.

虽然校正后光谱标准差有了较大的降低,然而其值依旧较大,究其原因主要有三点:①同一地物不同位置的组份状况不同(如水体叶绿素含量、道路的磨损状况等)导致其光谱本身存在差异;②由于影像分辨率原因,可能存在混合像元效应从而导致地物光谱出现差异;③在进行比较过程中难以获取严格同一扫描行上同种地物,而是选取近似同一扫描行同种地物,由此光谱依然出现一定差异.

再对每个波段求取其光谱标准差:

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_1} (s_{j,i} - \bar{s}_i)^2 / (n_1 - 1)}, \quad (16)$$

其中: σ_i 为波段 i 的光谱标准差, $s_{j,i}$ 为第 j 条光谱曲线在波段 i 上的辐亮度, \bar{s}_i 为第 i 个波段光谱均值, n_1 为同一地物不同位置光谱条数.

通过图 8 校正前后同种地物在各个波段光谱标准差图可知,处于不同位置的同一地物校正后各个波段标准差有明显的下降,即校正后同一地物光谱趋向一致,影像同物异谱现象得到抑制.光谱差异主要由外部环境(大气衰减、方向性反射)和地物本身的差异(局部组份的差异)造成,采用本文方法校正后,外部环境造成的光谱差异得到较好的修正,校正后各波段光谱标准差产生明显的下降.由于地物本身差异产生的光谱差异依然存在,所以校正后的波段光谱标准差依然呈现出一定程度相似性.

3 结论

对于航空摆扫式高光谱影像存在边缘辐射畸变的问题,本文认为该畸变主要由传输路径差异引起的大气衰减不一致和地物的方向性反射两者的综合

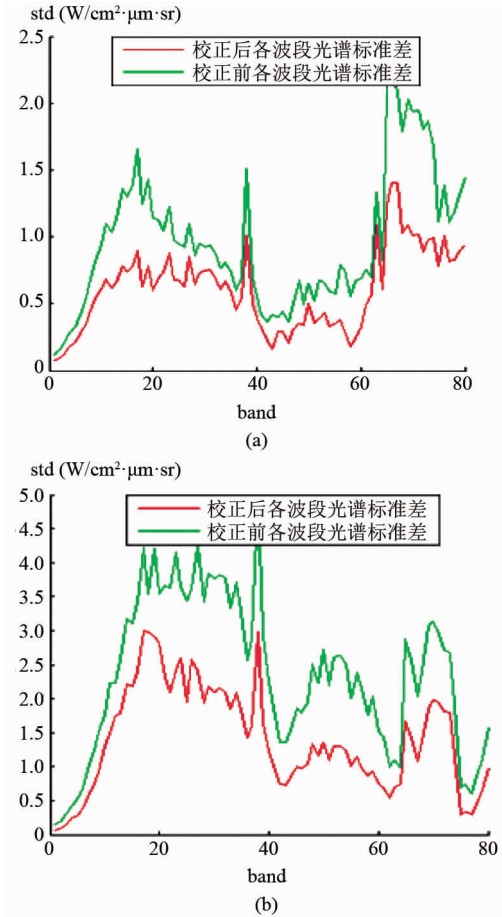


图 8 校正前后各个波段标准差曲线 (a) 校正前后道路光谱标准差, (b) 校正前后水体光谱标准差
Fig. 8 Standard deviation of each band (a) spectra of water before and after correction (b) spectra of road before and after correction

影响所致.同时,在数据获取过程中,飞行姿态的变化会导致大气传输路径的变化,因而也会引起边缘辐射畸变误差.

通过分析大气衰减和地物的 BRDF 效应,以影像机下点辐亮度为参考基准建立了影像边缘到机下点的校正模型,并使用机载 POS 数据获取影像每一扫描行的机下点位置和飞行器姿态,修正了由于飞行姿态变化引起的机下点位置误差、传感器入射角的误差以及大气传输误差改变对于影像边缘辐射畸变的影响.

本文以 OMIS-III 为例,采用本文提出的方法进行校正,通过比较校正前后的影像可得,通过本文校正模型校正后影像边缘偏亮的现象得到较大改善.校正后对于不同位置的同一地物,影像光谱趋向一致.通过比较校正前后位于近似同一扫描行同一地物,其中心与边缘光谱的标准差以及每个波段的光谱标准差可知,从整体上看,边缘辐射畸变校正后的

影像整体光谱标准差有了明显的降低,同时每个波段光谱标准差也有了显著降低。

与传统的基于统计信息的校正方法相比,本文提出的方法以辐射传输模型为基础,具有明确的物理意义,同时本文综合考虑了大气衰减和 BRDF 的影响,并结合 POS 数据修正了飞行姿态变化对边缘辐射畸变的影响,理论更加严密,且直接使用影像数据进行边缘辐射畸变校正,具有较强的实用性。

References

- [1] GUO Xiao-Fang, WANG Run-Sheng. Radiometric correction of airborne imaging spectrometer data[J]. *Journal of Image and Graphics* (郭小方,王润生. 机载成像光谱图像边缘辐射畸变校正. *中国图象图形学报*), A 辑. 2000, **5** (1): 16-22.
- [2] YANG Hang, ZHANG Xia, HE Hai-Xia, et al. The optimal choice of edge- radiation- distortion correction methods for OMIS- II hyperspectral images [J]. *Remote Sensing for Land & Resources* (杨杭,张霞,和海霞,等. OMIS-II 机载高光谱遥感图像边缘辐射畸变校正方法优选. *国土资源遥感*), 2010, **22**(2): 17-21.
- [3] FAN Wen-Yi. Studies on calibration of edge radiation for images of airborne hyperspectral imaging spectrometer[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (范文义. 机载成像光谱仪图像边缘辐射校正的研究. *红外与毫米波学报*), 2002, **2** (6): 451-454.
- [4] LIU Shun-Xi, XIA Xue-Qi, YOU Shu-Cheng, et al. A radiometric correction method of airborne imaging spectrometer OMIS- I in Yixing based on low pass filtering. *China Land Science* (刘顺喜,夏学齐,尤淑撑,等. 一种基于低通滤波的宜兴市 OMIS- I 成像光谱数据辐射畸变校正方法. *中国土地科学*), 2006, **19**(6): 50-53.
- [5] Kautsky J, Nichols N K., Jupp D Lb. Smoothed histogram modification for image processing [J]. *Computer vision, graphics, and image processing*. 1984, **26**(3): 271-291.
- [6] Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*. 1998, **65**(3): 227-248.
- [7] YANG Chao-Wu, TIAN Jiu-Qin, ZHANG Man-Lang. Normalization and simplified correction of atmospheric path radiative effect to airborne imaging spectrometer image. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. (杨超武,田庆久,张满郎. 机载成像光谱仪图像大气程辐射影响归一化及其简化校正. *测绘学报*), 1997, **26**(4): 358-364.
- [8] Schott J R., Salvaggio C, Volchok W J. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features [J]. *Remote Sensing of Environment*. 1988, **26**(1): 1-16.
- [9] Patterson E M, Gillette D A, Stockton B H. Complex index of refraction between 300 and 700 nm [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1977.
- [10] TANG Ding-Yuan, CHEN Ning-Qiang. *Manual of remote sensing first volume* [M]. National Defence Industry Press. (汤定元,陈宁锵. *遥感手册* (第一分册). 国防工业出版社), 1979, **1**: 979.
- [11] Danaher T, Wu X, Campbell N. Bi-directional reflectance distribution function approaches to radiometric calibration of Landsat ETM + imagery [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001. *IGARSS'01. IEEE, 2001 International*. IEEE, 2001, **6**: 2654-2657.
- [12] Chander G, Markham B L., Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM +, and EO-1 ALI sensors [J]. *Remote sensing of environment*. 2009, **113**(5): 893-903.
- [13] LI Xiao-Wen, ZHU Qi-Jiang, LIU Yi, et al. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of ground objects and its progress in measurement [J]. *Remote Sensing for Land & Resources* (李小文,朱启疆,刘毅,等. 地物二向性反射几何光学模型和观测的进展 [J]. *国土资源遥感*), 1991, **3**(1): 9-19.
- [14] LIANG Shun-Lin, FAN Wen-Jie. *Quantitative remote sensing* [M]. Science Press. (梁顺林,范闻捷. *定量遥感*. 科学出版社), 2009.
- [15] Fairbairn M B. Planetary Photometry: The lommel-seeliger law [J]. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*. 2005, **99**: 92.
- [16] HE Ting, WANG Jing, CHENG Ye, et al. Study on geometric correction of OMIS images [J]. *Geography and Geo-Information Science* (何挺,王静,程烨,等. OMIS 图像几何校正研究. *地理与地理信息科学*), 2005, **1**: 23-26.
- [17] Powell M Jd. *A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations* [M]. Numerical analysis, Springer, 1978, 144-157.