

引文格式:韩杰,陶醉,谢勇,等.顾及多积分时间特性的 GF-4 卫星 PMS 传感器交叉辐射定标[J].测绘学报,2020,49(10):1311-1320. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200057.
HAN Jie,TAO Zui,XIE Yong,et al.Radiometric cross-calibration of GF-4 satellite PMS sensor considering the characteristics of multiple integration times[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2020,49(10):1311-1320. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200057.

顾及多积分时间特性的 GF-4 卫星 PMS 传感器交叉辐射定标

韩 杰¹,陶 醉²,谢 勇³,刘其悦²,石宏斌¹

1. 许昌学院城市与环境学院,河南 许昌 461000; 2. 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100101;
3. 南京信息工程大学地理与遥感学院,江苏 南京 210044

Radiometric cross-calibration of GF-4 satellite PMS sensor considering the characteristics of multiple integration times

HAN Jie¹,TAO Zui²,XIE Yong³,LIU Qiyue²,SHI Hongbin¹

1. School of Urban and Environment Sciences, Xuchang University, Xuchang 461000, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Integrating the five integration times characteristics of GF-4 satellite PMS sensor,a radiometric cross-calibration method based on the radiometric block adjustment is proposed. Taking Dunhuang radiometric calibration sites (DRCS) in China as the radiometric transfer platform. Firstly, collecting the valid time-series MODIS images over DRCS to build the BRDF model. Secondly, considering the SBAF and BRDF, the radiometric control points (RCPs) are extracted from the image pairs of Landsat-8 OLI and PMS over DRCS. Thirdly, after setting the restrictive conditions of DN and CV, the radiometric tie points (RTPs) are extracted from PMS images in different integration times under the stare imaging condition. Finally, the radiometric cross-calibration coefficients of five integration times are solved based on the proposed method. The validation results show that the average absolute calibration relative errors of five integration times are all less than 5.18% and the relative radiometric correction errors of five integration times reduce up to 36.64%. Meanwhile, the influences of the RCPs distribution, the restrictive conditions in the process of RTPs extraction, SBAF and BRDF on the calibration results are discussed, which is beneficial to further optimize the radiometric cross-calibration program of PMS.

Key words: GF-4;multiple integration times;radiometric block adjustment;BRDF;SBAF

Foundation support: The Science and Technology of Henan Province (Nos. 202102310015;182102310924);The National Natural Science Foundation of China (No. 41671345); The Guangxi Innovative Development Grand Grant (No. GuikeAA18118038); The Land Observation Satellite Supporting Platform of National Civil Space Infrastructure Project

摘 要:针对 GF-4 卫星 PMS 传感器具备 5 个积分时间的成像特性,提出一种基于辐射区域网平差的交叉辐射定标方法。首先,利用敦煌辐射校正场地区时间序列有效 MODIS 影像集,构建该区域高精度 BRDF 模型。其次,考虑 BRDF 和 SBAF 校正,从该地区 Landsat-8 卫星 OLI 影像和 PMS 影像中提取辐射控制点。然后,设置 DN 值和 CV 限制条件,在凝视成像状态下从不同积分时间 PMS 影像中提取辐射连接点。最后,利用新建定标模型计算各积分时间状态下的定标系数。验证结果表明,不同积分时间的各波段平均绝对定标精度均优于 5.18%,且不同积分时间影像间各波段辐射差异最高降低 36.64%。同时,探讨了辐射控制点分布、BRDF、SBAF 和辐射连接点筛选条件对定标结果的影响,为进一步优化 PMS 传感器交叉辐射定标流程提供重要参考。

关键词:GF-4;多积分时间;辐射区域网平差;BRDF;SBAF

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)10-1311-10

基金项目:河南省科技攻关项目(202102310015;182102310924);国家自然科学基金(41671345);广西创新驱动发展专项(科技重大专项)(桂科 AA18118038);国家民用空间基础设施项目(陆地观测卫星共性应用支撑平台)

高分四号卫星(GF-4)自2015年12月29日成功发射后,凭借其静止轨道、高时空分辨率、凝视成像等优势^[1],已经为地震灾害防御^[2]、水体污染监测^[3]、干旱遥感监测^[4]、雪盖监测^[5]等领域提供重要的数据输入。与其他卫星传感器一样,在利用GF-4卫星PMS传感器数据开展定量遥感研究前,同样需要开展在轨辐射定标工作,精确获取其在轨辐射定标系数,将影像DN值转换为表观辐亮度信息^[6-7]。

目前在现有的辐射定标方法中,交叉定标方法凭借频率高、可再定标等优势,已经在众多卫星传感器辐射定标工作中得到广泛应用。例如,文献[8]针对GF-1卫星四相机拼接成像WFV传感器特点,以敦煌辐射校正场为辐射传递平台,对比分析了基于影像与基于辐射传输模型的两种交叉定标方法,并利用Landsat-8卫星OLI数据评价了定标结果的精度。文献[9]以敦煌辐射校正场为研究区,考虑可见光波段地表均一性和影像表观亮温后,对时间序列MODIS数据进行筛选,进而利用筛选后MODIS数据,构建该区域双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)模型,实现了GF-1卫星PMS传感器在轨交叉定标,并探讨了定标结果的不确定度。文献[10]详细阐述了利用时间序列MODIS影像构建BRDF模型的方法,实现了GF-1卫星WFV传感器在轨交叉定标,基于此还分析了该传感器的衰变情况。文献[11]利用ZY-3卫星TLC影像,构建了巴丹吉林沙漠地区数字高程模型,结合Landsat-8卫星OLI影像构建该区域BRDF模型,完成了GF-4卫星PMS传感器交叉定标。文献[12]将SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona)算法引入交叉定标之中,求解研究区BRDF参数和最佳的GF-4卫星PMS传感器定标系数,其定标不确定度优于7%。

虽然上述研究已经在此领域取得众多研究成果,但是其目标大多是仅含有单一积分时间的星载传感器,即使对于具备5个积分时间的GF-4卫星PMS传感器而言,由于缺乏足够多的有效

交叉影像对和地面实测数据,相关研究仅获得了某一到两个积分时间状态下的定标系数,这严重影响了其他积分时间影像的定量化应用效果及在轨辐射性能衰变监测^[11-12]。同时,上述传统交叉定标方法均是直接利用由参考传感器影像模拟得到的待定标传感器影像表观辐亮度除以相应DN值,进而得到定标系数。但是对于具有多种积分时间的传感器而言,该过程并未充分考虑不同积分状态下影像间的相对辐射校正问题。

因此,本文针对GF-4卫星PMS传感器具备5个不同积分时间的成像特性,以敦煌辐射校正场为研究区,将辐射区域网平差算法引入到传统的交叉定标模型之中,尝试解决在缺少足够有效交叉定标影像对或地面实测数据的情况下,实现不同积分时间状态下PMS传感器高精度辐射定标与不同积分时间影像间相对辐射校正的一体化处理。同时分析辐射控制点分布、BRDF、光谱波段校正因子(spectral band adjustment factor, SBAF)和辐射连接点筛选条件对定标结果的影响,为进一步优化GF-4卫星PMS传感器在轨辐射定标策略提供重要的理论支持。

1 数据介绍

以敦煌辐射校正场(40.2°N, 94.2°E)为研究区,如图1所示,本文收集了2019年研究区OLI和PMS有效影像对,其相关信息列于表1中。该影像对无云层遮盖,且时间间隔小于1h,满足交叉定标的要求^[13]。OLI和PMS传感器光谱响应函数如图2所示。同时,本文还收集了研究区2019年时间序列有效MODIS影像集,共计111景,用于构建该区域高精度BRDF模型,削弱地表双向反射效应对交叉定标结果的影响。其中,时间序列有效MODIS影像应满足如下筛选条件:①分别计算研究区中心区域(约2500m×2500m)蓝、绿、红和近红外波段差异系数CV(coefficient of variation),选取4个波段的CV值均小于3%的影像^[9];②利用MOD06_L2产品,剔除被云层遮盖的影像^[14];③利用归一化雪盖指

数,剔除被雪覆盖的影像^[15]。

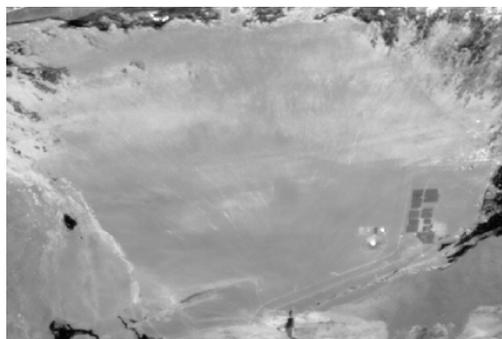


图 1 敦煌辐射校正场 PMS 影像

Fig.1 The PMS image in the Dunhuang radiometric calibration test site

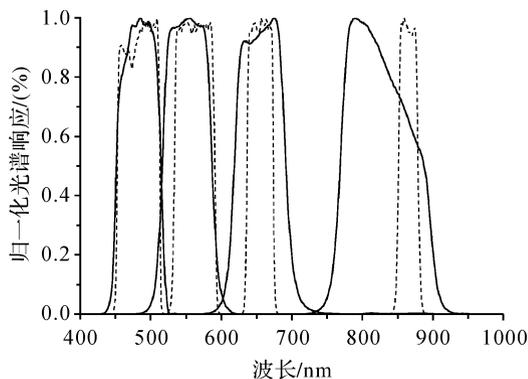


图 2 PMS(实线)和 OLI(虚线)传感器归一化光谱响应
Fig.2 The relative spectral response of PMS (the solid line) and OLI (the dash line) sensors

表 1 2019 年敦煌辐射校正场地区 OLI 和 PMS 有效影像对信息

Tab.1 The information of the valid PMS and OLI image pairs in the Dunhuang radiometric calibration test site in 2019

参数	OLI 影像			PMS 影像		
成像日期	2019-07-25			2019-07-25		
成像时间	12:26	13:00	13:03	13:07	13:14	13:10
卫星天顶角/(°)	0	48.793 8	48.795 1	48.794 5	48.793 1	48.794
卫星方位角/(°)	98.5	162.646	162.645	162.645	162.647	162.647
太阳天顶角/(°)	37.866 63	23.767 3	23.452 4	23.152 1	22.616 5	22.874 8
太阳方位角/(°)	147.225 1	149.805	151.666	153.586	157.516	155.528
积分时间/ms	—	a:6,4,6,6	b:16,12,16,16	c:20,16,20,20	d:30,20,30,30	e:40,30,40,40

2 原理与方法

2.1 辐射区域网平差简介

辐射区域网平差 (radiometric block adjustment, RBA) 的基本思想类似于几何区域网平差^[16]。它是将含有辐射测量数据的区域作为辐射控制点 RCP(radiometric control point), 将影像重叠区域内光谱均一地区作为辐射连接点 RTP(radiometric tie point), 在构建整体平差模型后, 利用迭代最小二乘方法计算未知参数^[17]。

目前,辐射区域网平差方法已经成功地应用于多种影像辐射处理之中。例如,文献[6]针对 GF-1 卫星 WFV 传感器四相机拼接成像特点, 利用辐射区域网平差方法, 完成了各相机在轨辐射定标与相机间相对辐射校正处理。文献[18]利用辐射区域网平差方法, 构建了一种全局最优的无人机影像辐射校正模型, 该模型能够有效降低全局辐射的不一致性, 且大多数反射波段的残差优于 5%。文献[19]将辐射区域网平差方法应用于

多条带航空雷达数据辐射处理之中, 结果证明, 处理后的辐射连接点辐射一致性提高 60%。文献[20]在利用无人机点云和高光谱影像进行独立树识别和分类时, 采用辐射区域网平差方法补偿了高光谱数据的辐射差异。

虽然辐射区域网平差方法已经在辐射定标和辐射一致性校正方面得到了较好的应用效果。但是该方法是否能被成功应用于 GF-4 卫星 PMS 传感器交叉辐射定标之中, 在保证获取高精度绝对辐射定标结果的同时, 实现不同积分时间影像间辐射差异最小化的目的, 仍需进一步分析与研究。

2.2 交叉辐射定标模型建立

本文将辐射区域网平差方法引入星载传感器交叉定标模型之中, 定标模型构建的具体过程如下。图 3 为本文建立的交叉辐射定标方法流程。

(1) 基于 6S 辐射传输方程及相关模拟参数, 计算 PMS 和 OLI 传感器各波段 SBAF 参数。

(2) 利用 2019 年敦煌辐射校正场地区时间

序列有效 MODIS 影像集,采用核驱动模型计算该区域 BRDF 参数。

(3) 利用 BRDF 参数和 SBAF 参数,将研究区 OLI 影像表观反射率转换为 PMS 影像表观辐射亮度,将其与研究区 DN 值均值作为辐射控制点。

(4) 设置 CV 和 DN 限制条件,从凝视成像

状态下获取的不同积分时间影像中,提取光谱均一地物,将其 DN 值均值作为辐射连接点。

(5) 将辐射控制点和辐射连接点代入新建定标模型之中,利用迭代最小二乘方法计算各积分时间状态下的绝对定标系数。

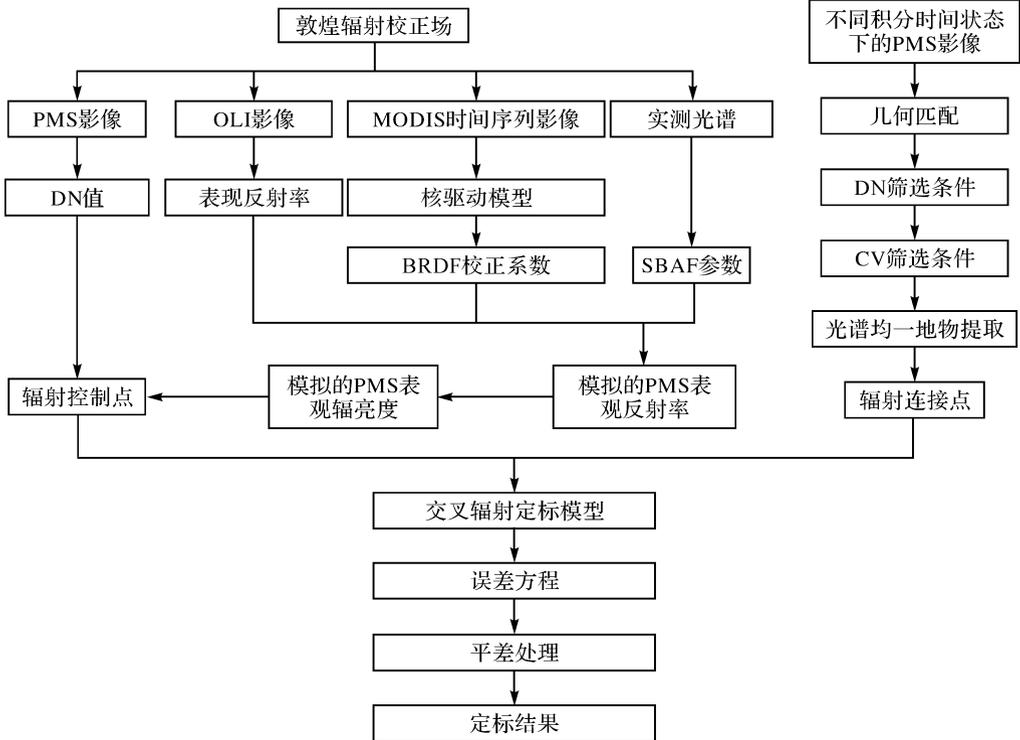


图3 交叉辐射定标方法

Fig.3 The radiometric cross-calibration method

2.2.1 辐射控制点提取方法

2.2.1.1 OLI 影像表观反射率计算

利用式(1),计算研究区处 OLI 影像第 i 波段表观反射率

$$\rho_i^{OLI} = (DN_i^{OLI} \times gain_i^{OLI} + offset_i^{OLI}) / \cos \theta_s^{OLI} \quad (1)$$

式中, ρ_i^{OLI} 和 DN_i^{OLI} 分别为 OLI 影像第 i 波段表观反射率和影像 DN 值均值; $gain_i^{OLI}$ 、 $offset_i^{OLI}$ 和 θ_s^{OLI} 分别为 OLI 影像第 i 波段定标系数的增益、偏移量和太阳天顶角,可从 OLI 影像附带 txt 文件中获取, $i=2,3,4,5$,下同。

2.2.1.2 SBAF 参数计算

从图2可以看出,OLI和PMS传感器各波段光谱响应差异较大,尤其是近红外波段。因此,需要利用SBAF削弱光谱响应差异对交叉定标的影响^[21-22]。利用表2中所列的模拟参数,其中550 nm处气溶胶数据是从当天MOD04_L2气溶

胶产品中提取的,结合式(2),计算各波段SBAF参数,列于表3中

$$SBAF_i = \frac{\int \rho(\lambda) RSR_{PMS}(\lambda) d\lambda}{\int RSR_{PMS}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int \rho(\lambda) RSR_{OLI}(\lambda) d\lambda}{\int RSR_{OLI}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中, $SBAF_i$ 为 PMS 和 OLI 影像第 i 波段光谱校正因子; $\rho(\lambda)$ 为敦煌辐射校正场实测光谱; $RSR_{PMS}(\lambda)$ 和 $RSR_{OLI}(\lambda)$ 分别为波段 λ 处 PMS 和 OLI 传感器光谱响应函数。

2.2.1.3 BRDF 参数计算

本文利用敦煌辐射校正场地区2019年时间序列有效MODIS影像集,基于RossThick-LiSparseR核驱动模型,如式(3)所示^[23-24],计算

敦煌辐射校正场 BRDF 参数。其中体散射核为 RossThick 模型,几何光学散射核为 LiSparseR 核。

表 2 用于计算 SBAF 的主要模拟参数

Tab.2 The main simulative parameters used to calculate the SBAF

参数	值
PMS 传感器观测几何	见表 1
成像日期	7 月 25 日
大气条件	中纬度夏季
气溶胶类型	沙漠型
500 nm 气溶胶厚度	0.037
海拔/m	1200
地物光谱	敦煌辐射校正场实测光谱数据

表 3 SBAF 参数

Tab.3 The SBAF values

参数	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
SBAF	1.013 4	1.007 5	0.983 7	0.931 2

$$\rho_i(\theta_v, \theta_s, \phi) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{geo}}(\lambda)k_{\text{geo}}(\theta_v, \theta_s, \phi) + f_{\text{vol}}(\lambda)k_{\text{vol}}(\theta_v, \theta_s, \phi) \quad (3)$$

式中, $\rho_i(\theta_v, \theta_s, \phi)$ 为地表的双向反射率; θ_s, θ_v 分别为太阳和观测天顶角; ϕ 为太阳和观测方向间的相对方位角; $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 是朗伯反射系数; $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 和 $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 分别是对应的几何光学系数和体散射系数; $k_{\text{geo}}(\theta_v, \theta_s, \phi)$ 和 $k_{\text{vol}}(\theta_v, \theta_s, \phi)$ 是几何光学核和体散射核。

为了获取高精度的 BRDF 参数,本文首先从 MODIS 影像集中选取不同数量的影像,利用式(3)获取 BRDF 参数。然后,利用该参数模拟一景 MODIS 影像表观反射率数据(本文挑选 2019 年 7 月 24 日敦煌地区 MODIS 影像)。最后,计算 MODIS 影像蓝、绿、红和近红外波段模拟表观反射率与真实表观反射率之间的差异。当各波段差异值的绝对值之和最小,且保持稳定时,取该 BRDF 参数为最终计算结果,用于辐射控制点计算。由图 4 可知,当所选 MODIS 影像数小于 70 景时,各波段差异值的绝对值之和出现较大波动。随着所选 MODIS 影像数量的增加,该差异变得较为稳定。经统计后发现,当选择 104 景时,该差异最小,即各波段差异值的绝对值之和为 0.83%。4 个波段的相对误差分别为 -1.29%、-3.14%、-4.80% 和 -6.11%。这证明本文构建的 BRDF 模型具有较高的精度。最终研究区 BRDF 参数见表 4。

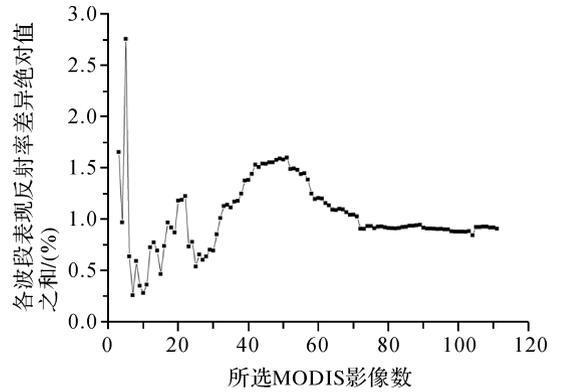


图 4 所选 MODIS 影像数量与各波段表观反射率差异绝对值之和之间的关系

Fig. 4 The relationship between the total absolute average differences of four bands and the number of the selected MODIS images

表 4 敦煌地区 2019 年 BRDF 参数

Tab.4 The BRDF coefficients of the Dunhuang radiometric calibration test site in 2019

参数	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
f_{iso}	0.209 2	0.231 9	0.256 5	0.278 5
f_{vol}	0.246 3	0.150 9	0.128 8	0.139 7
f_{geo}	-0.003 0	0.017 5	0.024 8	0.025 3

2.2.1.4 辐射控制点计算

利用敦煌辐射校正场 BRDF 参数,结合表 1 中 PMS 和 OLI 影像太阳/卫星角度信息,利用式(4)计算出第 i 波段 BRDF 校正参数 C_i ;利用式(5)将 OLI 影像表观反射率换算为与 PMS 传感器具有相同成像角度的 OLI 影像表观反射率 $\rho_i^{\text{OLI-PMS}}$

$$C_i = \rho_i(\theta_s^{\text{PMS}}, \theta_v^{\text{PMS}}, \phi^{\text{PMS}}) / \rho_i(\theta_s^{\text{OLI}}, \theta_v^{\text{OLI}}, \phi^{\text{OLI}}) \quad (4)$$

$$\rho_i^{\text{OLI-PMS}} = \rho_i^{\text{OLI}} \times C_i \quad (5)$$

结合表 3 中的 SBAF 参数,利用式(6)计算得到 PMS 传感器模拟表观反射率 $\rho_i^{\text{PMS-sim}}$

$$\rho_i^{\text{PMS-sim}} = \rho_i^{\text{OLI-PMS}} \times \text{SBAF}_i \quad (6)$$

根据式(7),计算得到 PMS 传感器第 i 波段模拟表观辐亮度 $L_i^{\text{PMS-sim}}$

$$L_i^{\text{PMS-sim}} = \frac{\rho_i^{\text{PMS-sim}} \times \text{ESUN}_i^{\text{PMS}} \times \cos \theta_s^{\text{PMS}}}{\pi d^2} \quad (7)$$

式中, $\text{ESUN}_i^{\text{PMS}}$ 为 PMS 传感器第 i 波段大气顶层太阳辐照度; d 为成像时刻日地间距。

最终,将模拟的 PMS 表观辐亮度和研究区 DN 值均值作为辐射控制点。

2.2.2 辐射连接点提取方法

受卫星轨道稳定性影响,PMS 传感器在对地凝视观测时,不同积分时间状态下获取的影像间存

在一定的相对几何错位^[25]。为了更精确地自动化提取辐射连接点信息,利用影像配准技术消除几何错位问题。然后设置移动窗口(21 像素×21 像素),在不同积分时间影像中提取光谱均一地物。

本文所提取的光谱均一地物应同时满足以下两个约束条件:①地物在 4 个波段影像中的 CV 值均小于阈值。通过对同一光谱均一地物在不同积分影像中的 CV 值进行分析后发现,光谱均一地物在积分时间 b 的影像的 CV 值均略大于其他积分时间影像,因此本文将其他积分时间影像的 CV 阈值设定为 3%,而积分时间 b 影像的 CV 阈值设定为 3.5%;②考虑 PMS 影像可能出现过饱和和非线性响应影响,本文取积分时间 e 影像 DN 值均值小于 900 且积分时间 a 影像 DN 均值大于 100 的光谱均一区域。

2.2.3 定标模型构建

假设在 5 个积分时间影像中,分别提取了 m 、 n 、 p 、 q 和 h 个辐射控制点。为了方便表达定标模型构建过程,本文假设在凝视成像状态下的 5 个积分时间影像中提取了 f 个辐射连接点。需要指出的是,辐射连接点可以在凝视状态下任意两个不同积分时间影像中提取。根据辐射控制点信息,可以列立辐射控制方程,如式(8)所示。根据辐射连接点信息,可以列立辐射约束方程,如式(9)所示。进而将式(8)和式(9)联合,构建基于辐射区域网平差的 PMS 传感器交叉辐射定标模型,如式(10)所示

$$V^C = AX - L \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} DN_1^{Ca} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & & & \\ DN_m^{Ca} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & DN_1^{Cb} & 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & & & \\ 0 & DN_n^{Cb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & DN_1^{Cc} & 0 & 0 \\ & \vdots & & & \\ 0 & 0 & DN_p^{Cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DN_1^{Cd} & 0 \\ & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & DN_q^{Cd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & DN_1^{Ce} \\ & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & DN_h^{Ce} \end{bmatrix}$$

$$X = [G^a \quad G^b \quad G^c \quad G^d \quad G^e]^T$$

$$L = [L_1^{Ca} \quad \dots \quad L_m^{Ca} \quad L_1^{Cb} \quad \dots \quad L_n^{Cb} \quad L_1^{Cc} \quad \dots \quad L_p^{Cc} \quad L_1^{Cd} \quad \dots \quad L_q^{Cd} \quad L_1^{Ce} \quad \dots \quad L_h^{Ce}]^T$$

式中, DN_m^{Ca} 和 L_m^{Ca} 是在积分时间 a 影像中的第 m 个辐射控制点所对应的 DN 值均值和模拟表观辐亮度值; $G^{(a)}$ 是积分时间 a 状态下 PMS 传感器定标系数;其他参数具有相似的含义

$$V^D = BX \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} DN_1^{Ta} & -DN_1^{Tb} & 0 & 0 & 0 \\ DN_1^{Ta} & 0 & -DN_1^{Tc} & 0 & 0 \\ DN_1^{Ta} & 0 & 0 & -DN_1^{Td} & 0 \\ DN_1^{Ta} & 0 & 0 & 0 & -DN_1^{Te} \\ \vdots & & & & \\ DN_f^{Ta} & -DN_f^{Tb} & 0 & 0 & 0 \\ DN_f^{Ta} & 0 & -DN_f^{Tc} & 0 & 0 \\ DN_f^{Ta} & 0 & 0 & -DN_f^{Td} & 0 \\ DN_f^{Ta} & 0 & 0 & 0 & -DN_f^{Te} \end{bmatrix}$$

式中, DN_f^{Ta} 为积分时间 a 影像中第 f 个辐射连接点对应的 DN 值均值;其他参数具有相似的含义

$$V = \begin{bmatrix} V^C \\ V^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} X - \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix} = JX - K \quad (10)$$

以残差值 V 的平方和最小为准则,即采用最小二乘法求解改变量 dX ,如式(11)所示

$$dX = (J^T J)^{-1} J^T K \quad (11)$$

最后利用式(12)将改变量 dX 和相应初始值 $X^{(0)}$ 进行叠加,得到不同积分时间状态下传感器绝对辐射定标系数。此过程为迭代计算,当改变量 dX 小于限差时,计算终止

$$\left. \begin{aligned} X &= X^{(0)} + dX \\ X^{(0)} &= [G^{a(0)} \quad G^{b(0)} \quad G^{c(0)} \quad G^{d(0)} \quad G^{e(0)}]^T \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3 结果与分析

3.1 定标结果

为了评价新建定标模型优势,本文分别基于传统交叉定标模型和新建交叉定标模型,获取 PMS 传感器不同积分时间状态下的绝对定标系数(表 5)。

3.2 绝对辐射定标精度检验

以中国资源卫星应用中心发布的 2019 年 GF-4 卫星 PMS 传感器场地定标系数为参考,对本文定标结果和传统交叉定标系数进行绝对辐射定标精度检验,并计算相对误差(表 6)。由表 6 可知:①传统交叉定标结果的相对误差最大值为 9.48%,而本文定标结果相对误差最大值为 8.29%;②传统交叉定标结果在 4 个波段的平均

相对误差分别为 7.33%、3.44%、0.45%和4.44%，而本文结果在 4 个波段的平均相对误差分别为 0.89%、7.17%、2.00%和 1.79%。因此，本文定标

结果相对于传统交叉定标方法具有更高的绝对定标精度。

表 5 传统交叉定标系数和本文定标系数

Tab.5 The traditional cross-calibration coefficients and the proposed method coefficients

积分时间	传统交叉定标系数				本文定标系数			
	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
a	1.069 6	1.003 8	0.798 2	0.592 2	1.002 6	0.975 8	0.790 1	0.584 5
b	0.409 9	0.373 2	0.328 4	0.245 0	0.377 8	0.354 3	0.320 3	0.236 6
c	0.375 3	0.264 1	0.291 3	0.210 3	0.349 8	0.253 4	0.286 2	0.205 0
d	0.200 9	0.194 9	0.156 8	0.113 8	0.187 1	0.187 1	0.153 8	0.110 4
e	0.150 5	0.126 8	0.116 9	0.085 7	0.140 3	0.122 5	0.116 2	0.083 6

表 6 传统方法和本文方法的绝对定标相对误差

Tab.6 The relative errors of the traditional and proposed calibration coefficients

积分时间	官方定标系数				绝对定标相对误差(传统/本文)/(%)			
	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
a	1.002 8	1.041 8	0.801 7	0.565 5	6.60/0.02	3.65/6.33	0.43/1.45	4.72/3.36
b	0.380 3	0.386 3	0.329 9	0.234 3	7.78/0.66	3.38/8.29	0.46/2.92	4.59/0.99
c	0.353 1	0.272 5	0.294 6	0.203 8	6.28/0.93	3.09/7.02	1.11/2.84	3.21/0.61
d	0.188 7	0.203	0.156 9	0.108 4	6.47/0.85	4.01/7.85	0.04/1.96	4.96/1.80
e	0.137 5	0.130 8	0.117 1	0.081 8	9.48/2.01	3.08/6.35	0.20/0.79	4.72/2.21

3.3 相对辐射校正精度检验

为了检验本文定标结果和传统定标结果对不同积分时间状态下的影像间相对辐射校正精度，利用辐射连接点提取方法，在敦煌地区其他时间凝视状态下获取的不同积分时间 PMS 影像中提取检验点。利用本文定标结果、传统定标结果和官方定标结果，计算检查点在不同积分时间影像中的表观反射率。统计同一检查点在不同积分时间影像中的表观辐亮度最大值和最小值，将其最大值和最小值的差值，作为相对辐射校正误差。本文共提取了 208 个检查点，3 种定标结果的相对辐射校正误差列于表 7 之中。从图 5 和表 7 可以看出，本文定标结果在 4 个波段的相对辐射校正误差均比官方定标结果和传统定标结果低。相对于官方定标结果和传统定标结果，本文结果能够将不同积分时间影像间辐射差异最高分别降低 36.64%和 36.61%。结合表 6 可以看出，本文定标结果具有较高的绝对定标精度，同时能够有效降低不同积分时间影像间的辐射差异。

3.4 辐射控制点分布对定标结果的影响

为了分析新构建的交叉定标模型能否在缺少辐射控制信息的情况下，有效获取不同积分时间状态下的绝对辐射定标系数，本文设置了 5 种辐

射控制点分布方案，探讨辐射控制点分布位置与绝对定标精度和相对辐射校正精度之间的关系。

表 7 官方定标结果、传统定标结果和本文定标结果的相对辐射校正误差统计结果

Tab.7 The statistical results of the relative radiometric correction errors of the official, traditional and proposed calibration results (%)

定标结果	相对辐射校正误差			
	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
官方	1.44	1.09	1.17	1.31
传统	1.35	1.12	1.00	1.08
本文	0.98	0.71	0.80	0.83

由表 8 可知，当仅利用单一辐射控制点进行交叉定标时，例如辐射控制点仅位于积分时间 a 影像中，绝对定标相对误差最大，而相对辐射校正误差最小。这主要是因为辐射控制点数量较少，无法起到较好的辐射控制效果，而其他积分时间状态下的绝对定标系数则只能依靠辐射约束方程计算。当利用两个积分时间影像的辐射控制点时，例如辐射控制点位于积分时间 a 和 b 之中，绝对定标相对误差有了大幅度降低。随着辐射控制点数量的增加，绝对定标相对误差的最大值从 22.06%降低到 7.17%，而相对辐射校正误差并无

明显的增加现象,但均小于官方和传统定标结果

相对辐射校正误差。

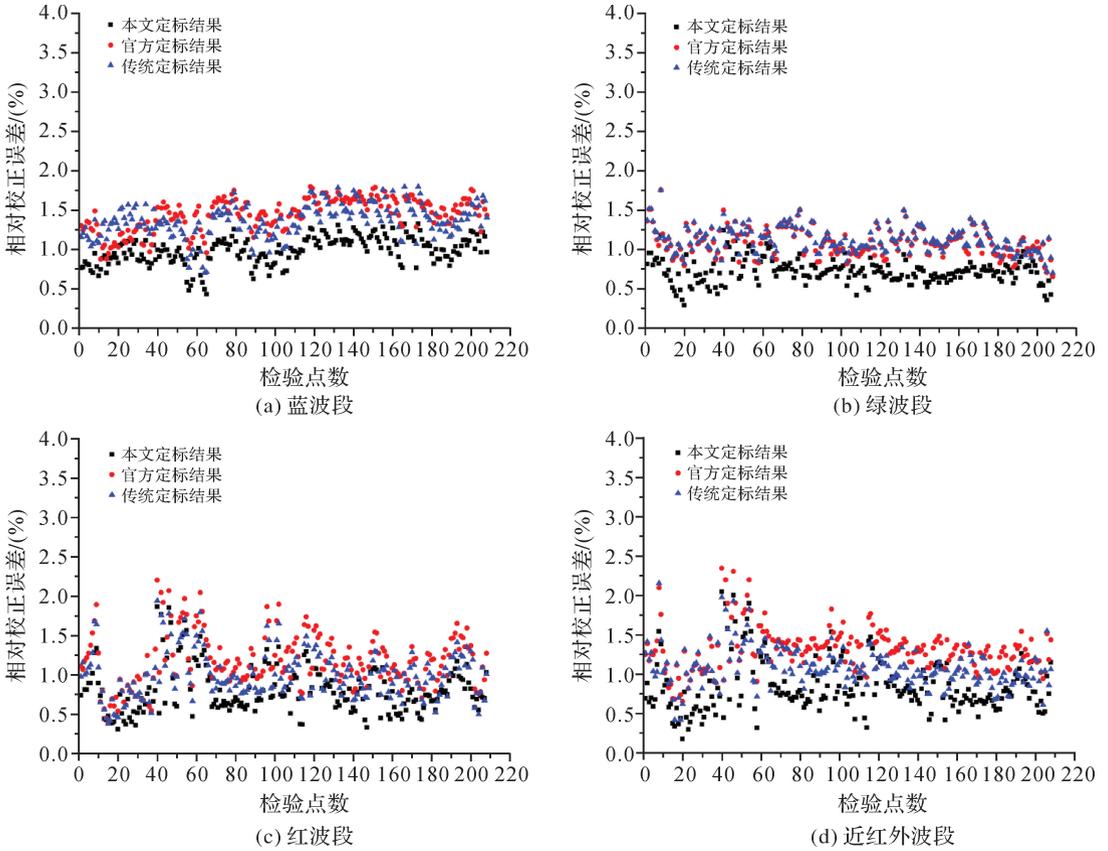


图5 官方定标结果、传统定标结果和本文定标结果的相对辐射校正误差

Fig.5 The relative radiometric correction errors of the official, traditional and proposed calibration results

表8 辐射控制点分布对定标结果的影响

Tab.8 The influence of RCPCs distribution on the calibration results

(%)

辐射控制点 分布位置	5个积分时间的绝对定标相对误差平均值				相对辐射校正误差			
	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
a	22.06	20.24	8.18	8.52	0.76	0.61	0.75	0.75
a和b	9.47	12.25	4.07	2.12	0.92	0.67	0.79	0.81
a、b和c	4.50	9.43	2.83	0.78	0.96	0.70	0.80	0.83
a、b、c和d	1.91	8.10	2.47	1.09	0.96	0.71	0.80	0.84
a、b、c、d和e	0.89	7.17	2.00	1.79	0.98	0.71	0.80	0.83

该验证结果为地面数据处理部门和研究人员提供了一个重要参考信息,即若缺少足够数量的辐射控制点时(有效交叉定标影像对或星地同步测量数据),利用本文定标模型也能够完成不同积分时间状态下的绝对辐射定标和相对辐射校正的一体化处理。但是由于本文仅在每一个积分时间状态下获取了一个辐射控制点,今后将进一步探讨,若仅利用某个积分时间下的多个辐射控制点,能否进一步提高5个积分时间状态下的整体定标精度。

3.5 BRDF和SBAF对定标结果的影响

在获取辐射控制点时,BRDF和SBAF是两

个重要的影响因素。本环节将重点分析仅考虑BRDF或者SBAF时,获取的辐射控制点对定标结果的影响。由表9可知:①若仅考虑BRDF影响获取辐射控制点时,前3个波段的绝对定标误差明显小于近红外波段,因此可以看出,若以敦煌辐射校正场为研究区开展交叉定标时,蓝、绿和红波段的定标结果更受场地的BRDF影响。②若仅考虑SBAF影响获取辐射控制点时,前3个波段的绝对定标误差明显大于近红外波段。这主要是因为OLI和PMS传感器在近红外波段光谱响应函数差异最大。因此,近红外波段的定标精度

更受 SBAF 影响。③ 无论仅考虑 BRDF 还是 SBAF,利用本文定标模型获得的定标结果均能

更好地消除不同积分时间状态下影像间的辐射差异。

表 9 BRDF 和 SBAF 对定标结果的影响

Tab.9 The influences of BRDF and SBAF on the calibration results

(%)

考虑因素	定标方法	5 个积分时间的绝对定标相对误差平均值				相对辐射校正误差			
		蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
仅考虑	本文	1.67	7.86	0.78	9.32	0.97	0.71	0.82	0.90
BRDF	传统	5.91	4.16	1.21	12.16	1.35	1.11	1.02	1.17
仅考虑	本文	16.08	16.13	9.43	5.74	0.82	0.64	0.74	0.78
SBAF	传统	9.85	12.76	8.00	3.29	1.14	1.03	0.91	1.02

3.6 辐射连接点筛选条件对定标结果的影响

本文在提取辐射连接点时,设置了两个光谱均一地物筛选条件(DN 值和 CV 值筛选条件)。本节将具体分析这两个筛选条件对定标结果的影响。由表 10 可知,若剔除 DN 值筛选条件而仅将满足 CV 阈值的光谱均一地物作为辐射连接点,则会大大降低绝对辐射定标精度,5 个积分时间的绝对定标相对误差平均值的最大值从 7.17% 增长至 18.19%。这说明 PMS 传感器可能确实存在过饱和或者非线性响应问题。从表 11 可以看出,若将积分时间 b 的 CV 阈值降低为 3.4%,则其绝对定标精度有了一定的提升,尤其是最大误差从 7.17% 降低到 5.18%。但进一步降低该阈值时,本文试验并未得到有效的辐射连接点。

表 10 DN 值筛选条件对定标结果的影响

Tab.10 The influence of DN filtered condition on the calibration results (%)

光谱均一地物筛选	5 个积分时间的绝对定标相对误差平均值			
	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
全部	18.19	14.06	9.13	6.55
经 DN 值筛选	0.89	7.17	2.00	1.79

表 11 CV 值筛选条件对定标结果的影响

Tab.11 The influence of CV restrictive condition on the calibration results (%)

积分时间 b 的 CV 阈值	5 个积分时间的绝对定标相对误差平均值			
	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
3.4	3.37	5.18	1.24	3.05
3.5	0.89	7.17	2.00	1.79

4 结论与展望

本文针对 GF-4 卫星 PMS 传感器具备 5 个积分时间的特性,以敦煌辐射校正场为研究区,将 Landsat-8 卫星 OLI 传感器作为辐射参考,利用

该区域时间序列有效 MODIS 影像集,构建高精度 BRDF 模型。详细介绍了辐射控制点和辐射连接点的提取方法,并将辐射区域网平差方法引入到现有交叉辐射定标模型之中,实现了 PMS 传感器高精度在轨辐射定标和不同积分时间影像间的相对辐射校正的一体化处理。同时探讨了辐射控制点分布、BRDF、SBAF 和辐射连接点限制条件对定标结果的影响,为进一步优化该类传感器辐射定标流程,实现在缺少辐射控制数据情况下的辐射定标提供了重要理论支撑。在今后的研究中将重点分析能否利用某一个积分时间影像中多组辐射控制点,提高 PMS 传感器不同积分时间状态下的整体定标精度。

致谢:特别感谢中国资源卫星应用中心为本文研究提供 GF-4 影像数据。

参考文献:

[1] 王殿中,何红艳."高分四号"卫星观测能力与应用前景分析[J]. 航天返回与遥感,2017,38(1):98-106.
WANG Dianzhong, HE Hongyan. Observation capability and application prospect of GF-4 satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(1): 98-106.

[2] 荆风,徐岳仁,张小咏,等."高分四号"卫星在地震行业中的应用潜力分析[J]. 航天返回与遥感,2016,37(4):110-115.
JING Feng, XU Yueren, ZHANG Xiaoyong, et al. Potential application in earthquake research using data from GF-4 satellite [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(4): 110-115.

[3] 宋挺,龚绍琦,刘军志,等.浑浊二类水体的高分四号卫星大气校正效果分析[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(4):1191-1197.
SONG Ting, GONG Shaoqi, LIU Junzhi, et al. Performance assessment of atmospheric correction for multispectral data of GF-4 on inland case II turbid water[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(4): 1191-1197.

[4] 聂娟,邓磊,郝向磊,等.高分四号卫星在干旱遥感监测中的应用[J]. 遥感学报,2018,22(3):400-407.
NIE Juan, DENG Lei, HAO Xianglei, et al. Application

- of GF-4 satellite in drought remote sensing monitoring: a case study of Southeastern Inner Mongolia[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(3): 400-407.
- [5] ZHANG Tianyuan, REN Huazhong, QIN Qiming, et al. Snow cover monitoring with Chinese Gaofen-4 PMS imagery and the restored snow index (RSI) method: case studies[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 1871.
- [6] 韩杰, 谢勇. 星载多相机拼接成像传感器在轨辐射定标方法[J]. *测绘学报*, 2017, 46(11): 1830-1840. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170071.
- HAN Jie, XIE Yong. On-orbit radiometric calibration method of spaceborne multi-camera mosaic imaging sensor[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(11): 1830-1840. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170071.
- [7] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. CCD 卫星相机时间序列定标: 以 CBERS02B 为例[J]. *测绘学报*, 2011, 40(2): 180-187, 193.
- GAO Hailiang, GU Xingfa, YU Tao, et al. Time-series calibration for CCD camera: taking CBERS02B satellite as an example[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(2): 180-187, 193.
- [8] 李娟, 冯炼, 庞小平. 针对 GF-1 遥感影像的基于影像与基于辐射传输模型的两种交叉定标方法比较[J]. *测绘学报*, 2017, 46(7): 882-890. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160315.
- LI Juan, FENG Lian, PANG Xiaoping. Comparison of the cross-calibration methods between image-based and RTM-BRDF for GF-1 images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(7): 882-890. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160315.
- [9] LIU Qiyue, YU Tao, GAO Hailiang. Radiometric cross-calibration of GF-1 PMS sensor with a new BRDF model[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 707.
- [10] LIU L, GAO H L, PAN Z Q, et al. Satellite-based time series calibration of GF-1 WFV sensors for large view zenith angle observations[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(22): 1-24.
- [11] YANG Aixia, ZHONG Bo, WU Shanlong, et al. Radiometric cross-calibration of GF-4 in multispectral bands[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 232.
- [12] CHEN Yepi, SUN Kaimin, LI Deren, et al. Radiometric cross-calibration of GF-4 PMS sensor based on assimilation of Landsat-8 OLI images[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 811.
- [13] 韩杰, 谢勇. GF-1 卫星 WFV 影像间匀色方法[J]. *测绘学报*, 2016, 45(12): 1423-1433. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160248.
- HAN Jie, XIE Yong. Image dodging algorithm for GF-1 satellite WFV imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(12): 1423-1433. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160248.
- [14] BRENNAN J I, KAUFMAN Y J, KOREN I, et al. Aerosol-cloud interaction-misclassification of MODIS clouds in heavy aerosol[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 911-915.
- [15] SALOMONSON V V, APPEL I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 351-360.
- [16] YAN W Y, SHAKER A. Radiometric correction and normalization of airborne LiDAR intensity data for improving land-cover classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12): 7658-7673.
- [17] OLSEN D, DOU Changyong, ZHANG Xiaodong, et al. Radiometric calibration for AgCam[J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(2): 464-477.
- [18] HONKAVAARA E, KHORAMSHAHI E. Radiometric correction of close-range spectral image blocks captured using an unmanned aerial vehicle with a radiometric block adjustment[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 256.
- [19] TEO T A, WU H M. Radiometric block adjustment for multi-strip airborne waveform Lidar data[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16831-16848.
- [20] NEVALAINEN O, HONKAVAARA E, TUOMINEN S, et al. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 185.
- [21] CHANDER G, MISHRA N, HELDER D L, et al. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for cross-calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1267-1281.
- [22] CHANDER G, HELDER D L, AARON D, et al. Assessment of spectral, misregistration, and spatial uncertainties inherent in the cross-calibration study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(13): 1282-1296.
- [23] LUCHT W, SCHAAF C B, STRAHLER A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 977-998.
- [24] WANNER W, LI X, STRAHLER A H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(D10): 21077-21089.
- [25] 韩杰, 谢勇, 李慧娜, 等. GF-4 卫星不同成像状态下影像定位误差特性分析[J]. *测绘通报*, 2019(8): 59-62, 67. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0252.
- HAN Jie, XIE Yong, LI Huina, et al. Geo-positioning error characteristic analysis of GF-4 imagery under different imaging states[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(8): 59-62, 67. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0252.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-02-19

修回日期: 2020-03-27

第一作者简介: 韩杰(1987—),男,博士,讲师,研究方向为高分辨率卫星传感器定标和真实性检验。

First author: HAN Jie(1987—), male, PhD, lecturer, majors in calibration and verification of high-resolution satellite sensors.

E-mail: hanjie@radi.ac.cn

通信作者: 陶醉

Corresponding author: TAO Zui

E-mail: taozui@radi.ac.cn