

光学学报

基于月球定标的双相机辐射一致性校正

白杨^{1,2}, 王灵丽^{3*}, 武红宇¹, 程超¹, 杨松¹, 黄帅¹, 张浩¹, 钟兴¹, 叶中付²¹长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130000;²中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230026;³如你之视(北京)科技有限公司, 北京 100089

摘要 针对吉林一号光谱星双相机辐射响应不一致的现象, 提出基于月球定标的双相机辐射一致性校正方法。利用卫星敏捷成像特性获取双相机对月成像观测数据, 解算待定标传感器月球圆盘光谱辐照度, 比对 Robotic Lunar Observatory (ROLO) 辐照度模型, 选取双相机辐射响应一致且衰减较小的谱段作为基准谱段, 通过计算相对于基准谱段的辐照度比值, 核算各个谱段的辐射衰减量, 从而校正双相机辐射一致性。对吉林一号光谱 02 星进行了测试, 实验结果表明, 双相机辐射在各个谱段有不同程度的衰减, 最大衰减量超过 30%, 所提方法能够有效改善图像目视效果, 提高传感器辐射质量。

关键词 测量; 辐射一致性; 月球定标; ROLO 辐照度模型; 辐照度比值

中图分类号 P237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231216

1 引言

绝对辐射定标可以将传感器响应的灰度值转换为入瞳辐亮度或表观反射率, 因此其可应用于遥感的定量检测中^[1]。卫星发射在轨后可使用发射前的实验室定标系数进行辐射校正, 但卫星传感器在轨运行过程中, 辐射特性会受外界环境和系统老化等因素的影响发生一定变化, 从而使发射前的定标系数与传感器的真实响应特性存在偏差^[2]。因此需要对传感器进行在轨绝对辐射定标, 从而为传感器在轨后的业务化使用提供精度保障。在轨绝对辐射定标方法可分为四类: 天上定标、场地定标、交叉定标和场景定标^[3]。天上定标需要通过内置的定标灯或太阳光源来实现在轨定标, 具有定标精度高、不受地表和大气影响等优点, 但需要搭载相应的天上定标设备^[4-5]。场地定标也具有较高的定标精度, 但需要在卫星过境时, 通过星地同步试验测量地表、大气参数, 因此需要消耗较高的人力、物力和时间成本^[6-7]。交叉定标利用辐射定标精度较高的参考卫星标定待定标卫星, 具有成本低、可对历史数据进行定标等优点^[8-9], 但定标精度受到两卫星的谱段设置相似性、观测几何和成像时刻的天气等条件的约束, 这使得交叉定标的精度和可实现频率存在限制。场景定标方法以地球表面某一类稳定的场景作为研究对象, 构建相应的场景模型, 结合卫星对该场景的成像灰度计数值 Digital Number (DN) 来评估卫星辐射性

能, 具有人力物力成本低、可定标频次高、可对历史数据进行定标等优点, 但该方法需要大量场景地物的成像数据, 因此主要适用于搭载在气象卫星上且可以对稳定目标场地实现高频次覆盖成像的中分辨率多光谱成像仪^[10-11]。

月球作为宇宙中长期稳定存在的自然天体, 没有大气和液体的流动侵蚀, 其表面反射率稳定性非常高, 每年变化仅为 1×10^{-8} , 用它作为定标源有望避免复杂大气的干扰^[12-13]。21 世纪初, 国际上开始出现月球定标方法, 并作为天上定标方案的补充^[14-16]。为满足可见光遥感载荷在轨辐射定标需求, 需准确获取月球反射特性, 但由于月球表面的反射率无法直接测量, 因此需要基于地基或天基对月观测数据构建太阳反射谱段的月球辐射模型, 且模型的精度直接决定着月球定标的精度。目前国际上有代表性的模型有 Robotic Lunar Observatory (ROLO) 模型^[17] 和 Miller-Turner2009 (MT2009) 模型^[18], 这两种模型都是基于地基观测数据, 受地球大气影响而绝对精度有限。其中, ROLO 模型光谱覆盖范围为 300~2550 nm, 模型不确定度为 5%~10%; MT2009 模型光谱覆盖范围为 200~2800 nm, 不确定度为 7%~17%。因此, 目前主要通过对比不同月份、不同月相的卫星对月观测数据来监测卫星传感器的稳定性, 而非直接进行绝对辐射定标。虽然 ROLO 模型的不确定度大于场地定标或天上定标方法的不确定度, 但其相对稳定性可达到

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-08-19; 录用日期: 2023-10-09; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0127000)

通信作者: *wl1920707@sina.cn

1%~2%,可作为归一化基准监测传感器衰减量。

目前许多学者以月球辐照度模型为基础,对传感器进行辐射定标或稳定性监测。Zeng 等^[19]基于 MT2009 月球辐照度模型,对可见光红外成像辐射仪传感器(VIIRS)的微光成像谱段进行传感器稳定性监测。牛明慧等^[20]通过计算月球圆盘积分辐照度,对月球辐照度模型进行过采样修正、距离修正、月相修正和月球天平动效应修正,精确计算了辐射定标系数。吴荣华等^[21]提出基于月球反射的遥感器定标跟踪监测方法,选择辐射响应变化较小的谱段作为基准,利用计算谱段间月球辐照度比值的方法对其他谱段探测响应衰减进行修正。陈林等^[22]利用风云 2 号 E 星(FY-2E)不同时间下的对月成像数据对 FY-2E 进行了长时间序列的辐射性能监测,并与基于深空对流目标监测的辐射定标结果进行了对比分析。

吉林一号光谱 02 星已经进行了稳定的长期对月观测任务,获取了大量的对月观测数据,故本文基于月球稳定辐射响应特性,提出通过月球定标对搭载光谱

星的双相机进行传感器辐射一致性校正方法。首先通过双相机对月球同时成像获取对月观测数据,基于 ROLO 模型解算传感器不同谱段辐照度,选取辐照度变化较小且双相机辐照度响应接近的谱段作为参考谱段,利用不同谱段辐照度比值修正各个谱段的衰减,从而实现双相机辐射一致性校正。

2 数据及处理

2.1 光谱 02 星对月观测数据

吉林一号光谱 02 星又名“文昌超算一号”,是吉林一号两颗光谱系列卫星中的一颗,于 2019 年 1 月 21 日在酒泉卫星发射中心发射。卫星轨道高度为 528 km,回归周期为 28 d。其主要的多光谱载荷为两台多光谱成像仪(相机 1、相机 2),每台多光谱成像仪具有 20 个波段,其中有 7 个 5 m 空间分辨率的波段、6 个 10 m 空间分辨率的波段以及 7 个 20 m 空间分辨率的波段,所有波段都在太阳反射波段范围内,覆盖了 405~1040 nm 的光谱范围。具体指标如表 1 所示。

表 1 吉林一号光谱 02 星多光谱成像仪技术指标

Table 1 Technical specifications of multi-spectral imager of Jilin-1/GP02

Band	Center wavelength /nm	Spectrum range /nm	Spatial resolution /m	Band	Center wavelength /nm	Spectrum range /nm	Spatial resolution /m
B0	624.08	450-800	5	B10	705.46	699-719	10
B1	415.21	403-423	5	B11	742.51	733-748	10
B2	444.69	433-453	5	B12	784.49	773-793	10
B3	483.36	450-515	5	B13	863.44	855-875	20
B4	559.61	525-600	5	B14	664.46	660-670	20
B5	656.75	630-680	5	B15	681.94	678-685	20
B6	836.14	785-900	5	B16	754.51	750-758	20
B7	487.41	485-495	10	B17	758.87	759-763	20
B8	619.41	615-625	10	B18	941.43	935-955	20
B9	660.75	650-680	10	B19	1013.97	1000-1040	20

吉林一号光谱 02 星具有全向机动成像的能力,可以对满足光照和跟踪条件的任意方向的目标进行惯性空间凝视、追踪和推扫成像。当对月球进行推扫成像时,需选取轨道内无杂光干扰的位置,故选取光谱 02 星位于深海深晚上空(一般选取 120°~180°W,升轨经过赤道附近)时开展对月球推扫成像。同时由于吉林一号光谱卫星姿态追踪能力超过 1(°)/s,依据吉林一号的天基空间目标观测研究,在对月成像过程中,可以根据卫星与月球间的相对位置及速度关系来计算拍摄时的卫星姿态,确定相应的姿态追踪角速度,实现卫星沿俯仰轴相对惯性系匀速转动拍摄,保证影像行列分辨率的一致性^[23]。

光谱 02 星在入轨后经过在轨调试与测试,已具备了对月成像能力,自 2019 年 4 月起,光谱 02 星每月定期对月球进行不同月相的观测成像,以 2020 年农历 8 月为例,相机 2 在不同月相下对月成像的缩略图如图 1

所示。

由于两台相机在光谱 02 星在轨后出现了色彩表现不一致的情况,因此在 2020 年 5 月 7 日使用两台相机同时进行对月成像,通过对月定标实现对双相机辐射的一致性校正。双相机依次对月成像,两次成像时间相差较小,可以忽略两次成像的月相角差异、日月距离差异,以及观测几何差异,双相机获取的月球成像可以认为是对应相同的月球辐照度模型。

2.2 月球观测辐照度计算

根据双相机获取的月球影像,通过阈值分割计算月球圆盘光谱辐照度。需要先剔除背景信号噪声,如图 2 所示,月球灰度值 DN 为 G_{DN} ,同行两侧像素灰度均值 DN_0 为 G_{DN0} ,则剔除背景杂光后的月球灰度值 DN_{Moon} 为 G_{DN-DN0} ,将影像中月球的像素范围在剔除杂光后自动提取出的大于 5% 最大灰度值的像素作为月球像素。同时,在图像处理中为了避免单谱段月球边

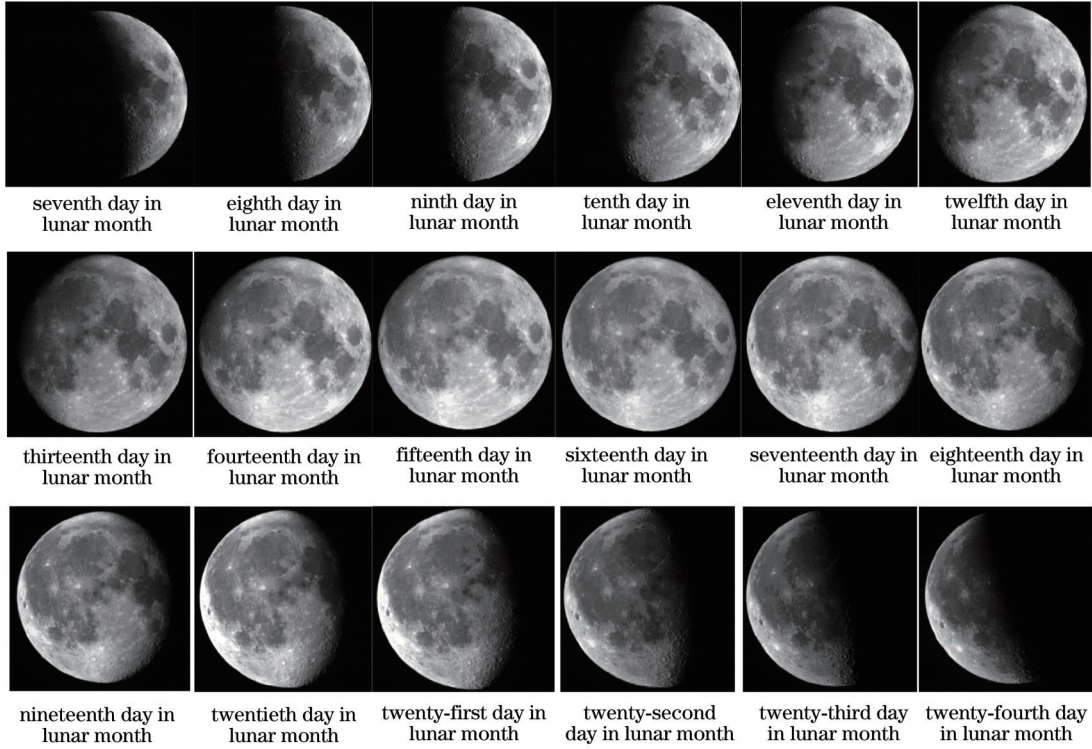


图 1 2020 年农历 8 月不同月相红谱段月球观测影像

Fig. 1 Lunar observation images of different phases in red spectrum of the eighth lunar month in 2020

缘辉光对二值化的影响,通过各个谱段的月球中心点,计算有效半径范围内的区域作为月球的圆盘,且各个谱段月球区域一致。

通过各个谱段绝对辐射定标系数计算月球圆盘各个像素点的入瞳辐亮度值,其表达式为

$$L_{i,k} = g_{\text{gain},k} \times G_{i,k} + o_{\text{offset},k}, \quad (1)$$

式中: $L_{i,k}$ 为谱段 k 月球影像像元 i 的辐亮度; $g_{\text{gain},k}$ 与 $o_{\text{offset},k}$ 为绝对定标增益和偏置系数; $G_{i,k}$ 为月球影像像元 i 的灰度值。

可进一步通过光谱辐亮度解算月球光谱辐照度,其表达式为

$$I'_{k,\text{Sensor}} = \Omega_p \sum_{i=1}^{N_p} L_{i,k}, \quad (2)$$

式中: $I'_{k,\text{Sensor}}$ 为通过传感器观测谱段 k 月球影像直接解算的辐照度,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; N_p 为月球图像像元数目; Ω_p 为像元的瞬时视场角,单位为 sr ,与传感器相关。

对图像直接解算的月球辐照度进行距离修正,从而解算各个谱段的月球辐照度,其表达式为

$$\begin{cases} I_{k,\text{Sensor}} = f_d I'_{k,\text{Sensor}} \\ f_d = \left(\frac{D_{\text{S-M}}}{1 \text{ AU}} \right) \left(\frac{D_{\text{V-M}}}{384400} \right), \end{cases} \quad (3)$$

式中: $I_{k,\text{Sensor}}$ 为传感器观测月球谱段 k 光谱辐照度,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; f_d 为距离修正参数; $D_{\text{S-M}}$ 为太阳与月球的距离,单位为 km ; $D_{\text{V-M}}$ 为观测点与月球的距离,

单位为 km ; 1 AU 为一个天文单位,为常数 $1.49597870 \times 10^{11}$,单位为 m 。

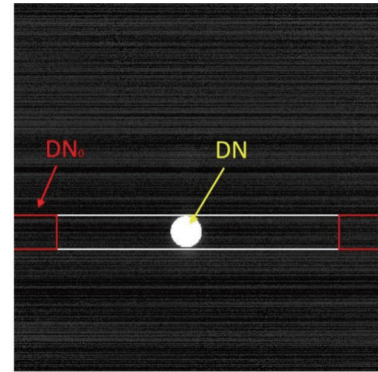


图 2 月球影像背景信号剔除

Fig. 2 Lunar image background signal exclusion

3 定标原理与方法

3.1 ROLO 月球辐照度模型

月球辐照度模型是月球定标的基础,ROLO 和 MT2009 为两种常用的月球辐照度模型,由于 ROLO 模型相对精度较好,更适合用于地球遥感卫星的可见光近红外谱段的标定^[24],本文采用 ROLO 辐照度模型。ROLO 模型基于美国地质调查局于 1995—2001 年的地基观测站观测数据,包括可见近红外谱段和短波波段 32 个通道共 83000 次月球观测数据。该模型利用图像灰度值,通过大气校正、恒星辐射校正和几何校

正过程解算月球辐照度,建立月球辐照度模型,月球各个谱段光谱辐照度为

$$I_{k, \text{ROLO}} = A_k \Omega_M E_k / \pi, \quad (4)$$

式中: $I_{k, \text{ROLO}}$ 为谱段 k 的月球光谱辐照度,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; A_k 为谱段 k 的月球反射率; Ω_M 为在平均

日地距离条件下月球相对于地基观测的立体角, $\Omega_M = 6.4177 \times 10^{-5} \text{sr}$, 为常数项; E_k 为谱段 k 的太阳辐照度,单位为 W/m^2 。

谱段 k 的月球等效圆盘反射率 A_k 是根据经验模型构建的多项式和,具体表达式为

$$\ln A_k = \sum_{i=0}^3 a_{ik} g^i + \sum_{j=1}^3 b_{jk} \Phi^{2j-1} + c_1 \theta + c_2 \varphi + c_3 \Phi \theta + c_4 \Phi \varphi + d_{1k} e^{-g/\rho_1} + d_{2k} e^{-g/\rho_2} + d_{3k} \cos [(g - \rho_3)/\rho_4], \quad (5)$$

式中: g 为月球的相位角,单位为 rad ,取值范围为 $[-180, 180]$; Φ 为太阳的月面经度,单位为 rad ; φ 和 θ 分别为观测点的月面经度和纬度,单位为 $^\circ$; $a_{0k} \sim a_{3k}$ 为与谱段相关的系数,依赖于相位角, a_{0k} 无量纲, $a_{1k} \sim a_{3k}$ 单位分别为 rad^{-1} 、 rad^{-2} 、 rad^{-3} ; $b_{1k} \sim b_{3k}$ 为与谱段相关的系数,依赖于太阳入射的能量,描述月表高低起伏,单位分别为 rad^{-1} 、 rad^{-2} 、 rad^{-3} ; $d_{1k} \sim d_{3k}$ 为与谱段相关的系数,无量纲,前两项为利用指数分布对相位角的非线性修正,最后一项为月球的反向效应修正; $c_1 \sim c_4$ 为系数,考虑月球可见面,与观测角度相关, c_1 与 c_2 的单位为 $(^\circ)^{-1}$, c_3 与 c_4 的单位为 $[(^\circ) \cdot \text{rad}]^{-1}$; $\rho_1 \sim \rho_4$ 为常数,单位为 $^\circ$ 。

3.2 双相机一致性校正

提出基于 ROLO 辐照度模型的双相机辐射一致性校正算法,其主要原理为在解算出两传感器获取的月球光谱辐照度后,选取基准谱段,利用待标传感器与 ROLO 模型的辐照度比值来同时修正双相机其他的非基准谱段的绝对辐射系数。

首先根据待标传感器光谱响应建立对应的 ROLO 模型,根据式(5)计算模型中 32 个谱段的反射率,对应待标传感器的月球反射率则利用传感器光谱响应曲线进行积分计算相应谱段内的等效反射率,具体表达式为

$$A_{k, \text{Sensor}} = \frac{\int A(\lambda) R_k(\lambda) d\lambda}{\int R_k(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

式中: $A_{k, \text{Sensor}}$ 为待标传感器谱段 k 的等效反射率; $A(\lambda)$ 为利用 ROLO 模型 32 个谱段反射率插值获取的月球反射率曲线; $R_k(\lambda)$ 为待标传感器谱段 k 的光谱响应曲线; λ 为波长。根据式(5)计算得到 ROLO 模型 32 个谱段的反射率 ROLO 模型中月球相位角、观测点月面经纬度,以及基于月球固定坐标系模拟或许的太阳月面经度,如图 3 所示。

根据 New Kurucz(NEWKUR)太阳辐照度光谱计算对应谱段 k 的太阳辐照度 $E_k^{[25]}$,通过式(3)逐谱段计算待标传感器对应的 ROLO 模型光谱辐照度。

将经过距离修正后传感器观测到的月球光谱辐照度与 ROLO 模型辐照度进行比对。考虑选择一个辐射响应变化小的谱段作为基准,根据传感器谱段衰减

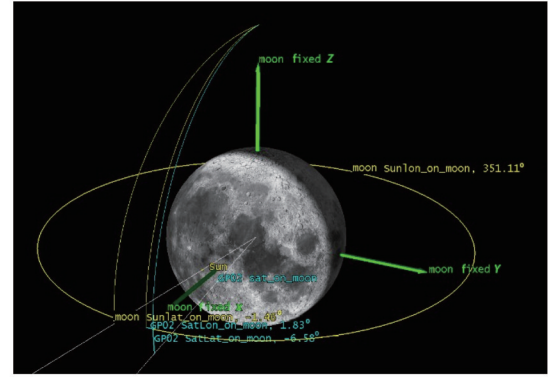


图 3 仿真太阳入射与卫星观测参数

Fig. 3 Simulation solar incident and satellite observation parameters

特性,选取光谱范围为 630~700 nm 且双相机辐照度较为接近的谱段作为基准谱段。基准谱段被认为是无衰减谱段,可计算各个谱段相对于基准谱段的辐照度比值

$$\begin{cases} R_{k, \text{PMS 1}} = \frac{I_{k, \text{ROLO}}/I_{\text{base, ROLO}}}{I_{k, \text{PMS 1}}/I_{\text{base, PMS 1}}} \\ R_{k, \text{PMS 2}} = \frac{I_{k, \text{ROLO}}/I_{\text{base, ROLO}}}{I_{k, \text{PMS 2}}/I_{\text{base, PMS 2}}} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $R_{k, \text{PMS 1}}$ 、 $R_{k, \text{PMS 2}}$ 分别为待标传感器相机 1、相机 2 的辐照度比值; $I_{\text{base, PMS 1}}$ 为传感器相机 1 基准谱段辐照度; $I_{\text{base, ROLO}}$ 为 ROLO 模型所选择的光谱星基准谱段波长处的辐照度。最后通过辐照度比值修正各个谱段的绝对辐射系数,实现双相机辐射一致性校正。

4 实验结果分析

通过吉林一号光谱 02 星在轨对月成像试验验证所提算法。在 2020 年 5 月 7 日的一次成像任务中分别利用相机 1、相机 2 依次对月球成像,全色谱段月球影像如图 4 所示,图 4(a)与图 4(b)分别为相机 1、相机 2 月球影像。测试成像任务结果如表 2 所示,日月距离、星月距离,以及观测角度是通过仿真实验得到的,所记录的成像时间为北京时间,其中 $\Omega_{p, 5m}$ 为 5 m 分辨率单元的瞬时视场角。

根据第三部分校正方法,分别计算双相机月球辐照度,并对比 ROLO 模型辐照度,绘制 ROLO 模型辐

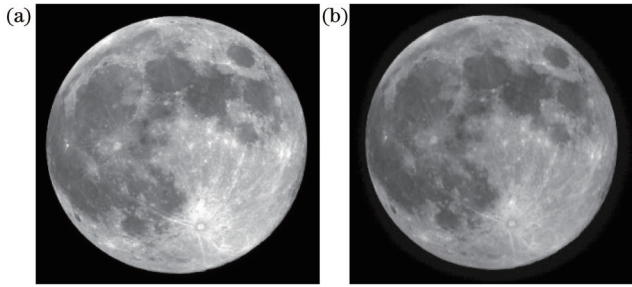


图 4 双相机月球成像。(a)相机 1 月球成像结果;(b)相机 2 月球成像结果

Fig. 4 Lunar images of dual camera. (a) Lunar imaging results of camera 1; (b) lunar imaging results of camera 2

表 2 系统比例尺的标定结果

Table 2 Calibration results of the system scale

Parameter	Sensor	
	JL1GP02_camera 1	JL1GP02_camera 2
Imaging time (BJT)	2020-05-07T18:34:24	2020-05-07T18:42:24
Ω_p /sr	$\Omega_{p.5m}=8.518220412476446 \times 10^{-11}$ (5 m); $4\Omega_{p.5m}$ (10 m); $16\Omega_{p.5m}$ (20 m);	
D_{S-M} /km	151328095.123439	151327881.708937
D_{V-M} /km	356193.985365	354436.011071
g /(°)	-0.123	-0.123
Φ /(°)	2.730	2.798
φ /(°)	3.052	2.842
θ /(°)	-3.815	-4.291

照度与传感器双相机光谱辐照度曲线,如图 5 所示。

图 5 中横坐标为谱段中心波长,纵坐标为谱段对应的光谱辐照度。根据测试结果曲线,可见双相机月球成像时间间隔较短 (<10 min),ROLO 模型的月球辐照度曲线基本一致,而双相机观测的光谱辐照度有一定差异,特别地,相机 1 与相机 2 在中心波长为 413、620、842 nm 谱段与月球辐照度曲线趋势偏差较大。

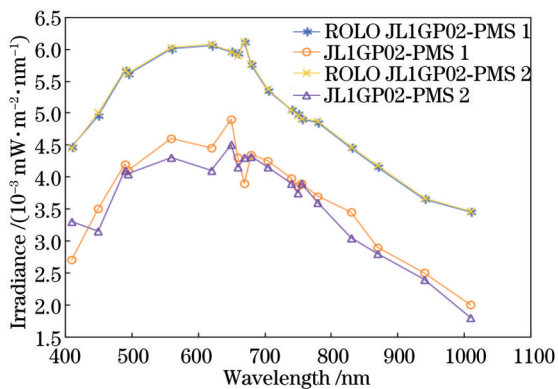


图 5 双相机月球辐照度观测值与 ROLO 模型辐照度

Fig. 5 Dual camera lunar irradiance observation value and ROLO model irradiance

选取辐照度曲线中双相机差异较小的谱段,以 B15(682.5 nm)作为基准谱段。根据式(7)计算各个谱段相对于基准谱段的辐照度比值,将其作为谱段的绝对辐射系数修正值,计算结果如表 3 所示。

表 3 绝对辐射定标系数修正值

Table 3 Correction value for absolute radiation calibration coefficient

Spectrum	Center wavelength /nm	JL1GP02_camera 1/%	JL1GP02_camera 2/%
B1	414.2	22.56	0.36
B2	443.6	6.35	19.26
B3	484.7	2.97	3.92
B4	561.7	-0.61	4.55
B5	654.9	-8.25	-1.08
B6	833.5	-1.83	9.90
B7	487.2	5.00	4.28
B8	618.8	2.88	10.48
B9	660.7	4.70	8.28
B10	706.8	-5.17	-3.16
B11	742.7	-3.35	-2.33
B12	783.7	0.23	2.32
B13	862.2	7.20	12.06
B14	664.4	17.39	5.43
B15	682.5	0.00	0.00
B16	752.6	-1.82	-0.81
B17	759.8	-3.82	-4.94
B18	941.4	11.84	16.91
B19	1011.2	29.79	39.37

表 3 中列出了各个谱段的绝对辐射定标系数修正值,列出 $(1 - R_{k,PMS1}) \times 100\%$,其中修正值大于 0 表示衰减,衰减较大的谱段为相机 1 的 B1、B19 谱段和相机 2 的 B2、B19 谱段,可见卫星在轨运行后各个谱段均发生了一定的波动,个别谱段甚至有超过 30% 的衰减量。

对比双相机辐射一致性校正前后的图像响应,如图 6 所示,图 6 展示了沙漠场景 RGB 真彩色地表反射率图像。

相对平均光谱误差 (RASE) 与相对维数整体误差 (ERGAS)^[26] 两项指标常用于表征融合图像对原始多光谱图像光谱信息的继承能力,能够有效评估融合图像与多光谱图像光谱信息的一致性,其对评估具有相同或相似地物的两幅多光谱影像的光谱一致性具有很好的参考价值,因此使用这两项指标来评估两幅图像搭接区域的光谱信息相似程度,其表达式为

$$E_{RASE} = \frac{1}{\mu_g} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L f_{RMSE}^2(B_i)}, \quad (8)$$

$$E_{ERGAS} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left[\frac{E_{RMSE}^2(B_i)}{\mu_i^2(B_i)} \right]}, \quad (9)$$

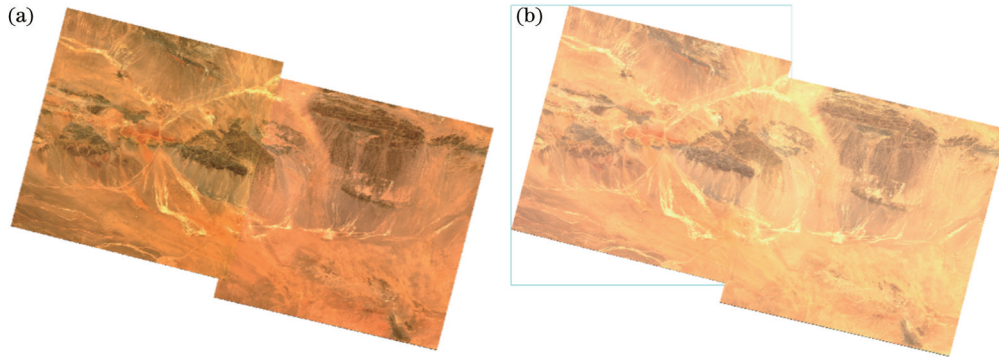


图 6 沙漠场景双相机一致性校正前后对比。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 6 Comparison of consistency of dual camera calibration in desert scenes before and after calibration. (a) Before calibration; (b) after calibration

式中: L 为波段数; h, l 分别为待检测图像与参考图像的分辨率,二者相等; $\mu_l(B_i)$ 、 $\mu_g(B_i)$ 分别为待检测图和参考图在 B_i 波段上的均值。RMSE为均方根误差, B_i 谱段的RMSE计算方法为

$$f_{\text{RMSE}}(B_i) = \sqrt{[\mu_l(B_i) - \mu_g(B_i)]^2 + [\sigma_l(B_i) - \sigma_g(B_i)]^2}, \quad (10)$$

式中: $\sigma_l(B_i)$ 、 $\sigma_g(B_i)$ 分别为待检测图和参考图在 B_i 波段上的标准差

RASE使用百分数来表示,ERGAS的值域则为 $[0, +\infty)$,两项指标的数值越小,代表着待检测图像与参考图像的光谱信息一致性越好,两幅图像在视觉效果上的色彩偏差越小。为验证双相机辐射一致性校正后图像响应是否得到改善,使用RASE与ERGAS评价校正前以及校正后双相机同时成像的整幅图像及搭接区的光谱一致性。如图7所示,从不同的地物类型数据中选取四组进行测试,评价校正前后的双相机成像数据的光谱一致性。

分别计算校正前双相机图像之间与校正后双相机图像之间的RASE和ERGAS,结果如表4所示。

获取每幅测试图像的搭接区范围,并裁剪出各图像搭接区域。图8为各组测试数据局部搭接区域图像示例,其中图8(a)为校正前的双相机局部区域图像,图8(b)为校正后的双相机局部区域图像,各组测试数

据的局部区域选取位置记为 P ,如图7中标注所示。

分别计算校正前后双相机搭接区图像之间的RASE和ERGAS,结果如表5所示。

实验结果显示,与校正前相比,校正后无论是整图还是搭接区域,双相机之间的RASE与ERGAS计算结果都优于校正前。实验结果证明,本文提出的双相机辐射一致性校正方法对辐射一致性改善明显,尤其与搭接区域图像相比校正后双相机的辐射一致性有显著提升。

5 结 论

基于吉林一号光谱02星两台相机同时对月观测的成像数据,提出了基于月球定标的双相机辐射一致性校正方法。首先利用光谱星敏捷成像特性,通过一次成像任务,获得双相机同时对月观测的数据,计算待定标传感器月球圆盘光谱辐照度,以及对应谱段的ROLO模型辐照度;然后选取基准谱段,采用相对于基准谱段得到的辐照度比值来核算各个谱段衰减量。测试结果表明光谱02星部分谱段发生了明显的衰减,对衰减进行补偿后,光谱星双相机反射率产品的真彩色图像目视效果一致性更好,双相机搭接区的相对平均光谱误差和相对维数整体误差也明显变小。

目前常规的对月定标方法主要用于对传感器的在轨辐射性能进行不同时相下的相对变化的追踪,而未

表 4 校正前后各组数据双相机之间的RASE与ERGAS计算结果

Table 4 RASE and ERGAS of dual camera calibration results for each group of test data before and after calibration

Test data group	Process	RASE / %	ERGAS
1	Before calibration	17.888	410.503
	After calibration	10.465	119.468
2	Before calibration	13.350	370.728
	After calibration	3.490	19.373
3	Before calibration	33.925	893.463
	After calibration	11.187	96.364
4	Before calibration	10.503	157.556
	After calibration	10.189	150.062

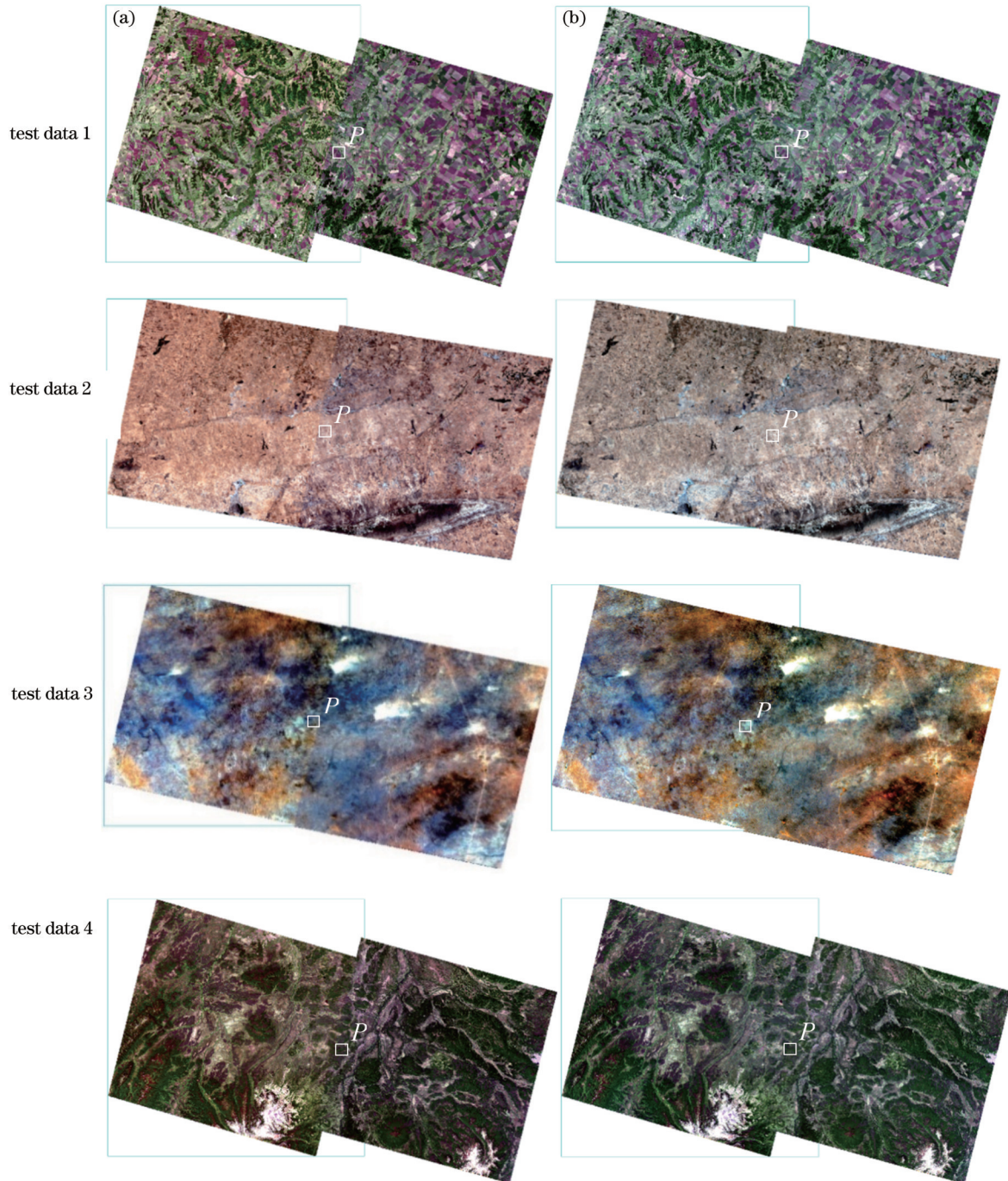


图 7 四组不同地物类型的测试数据。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 7 Test data of four different types of ground objects. (a) Before calibration; (b) after calibration

考虑用于对不同传感器间、不同波段间辐射性能的一致性修正。所提方法先通过在一次成像任务中,选取两台相机月球辐照度结果最接近的波段作为各自波段间校正的基准,实现了对两台相机单个波段辐射基准一致性的锚定;进一步以 ROLO 辐照度模型中各波段间的相对关系作为参考,对双相机所有波段进行波段间的校正,使剩余波段双相机一致性向基准波段一致性靠拢。

但所提方法也存在一些不足:1)只关注了不同传感器间、每个传感器不同波段间相对关系的校正,而未

以某个绝对精度较为可靠的辐射基准作为参考,因此定标结果的绝对精度有待进一步验证;2)采用阈值法对影像中的月球像素进行提取,但这种方法在月球边缘位置的提取精度会受到相机调制传递函数的影响^[27],有待进一步分析研究;3)在进行月球定标时出于对信噪比的考虑,选择了接近满月的情景,未考虑“过冲”现象的影响,可能会导致双相机在间隔成像时实际输入辐亮度与模型解算结果存在一定偏差,导致定标精度的下降。在后续研究中,考虑补充月相角在 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 范围的月球影像数据并对其进行定标,对所提方法

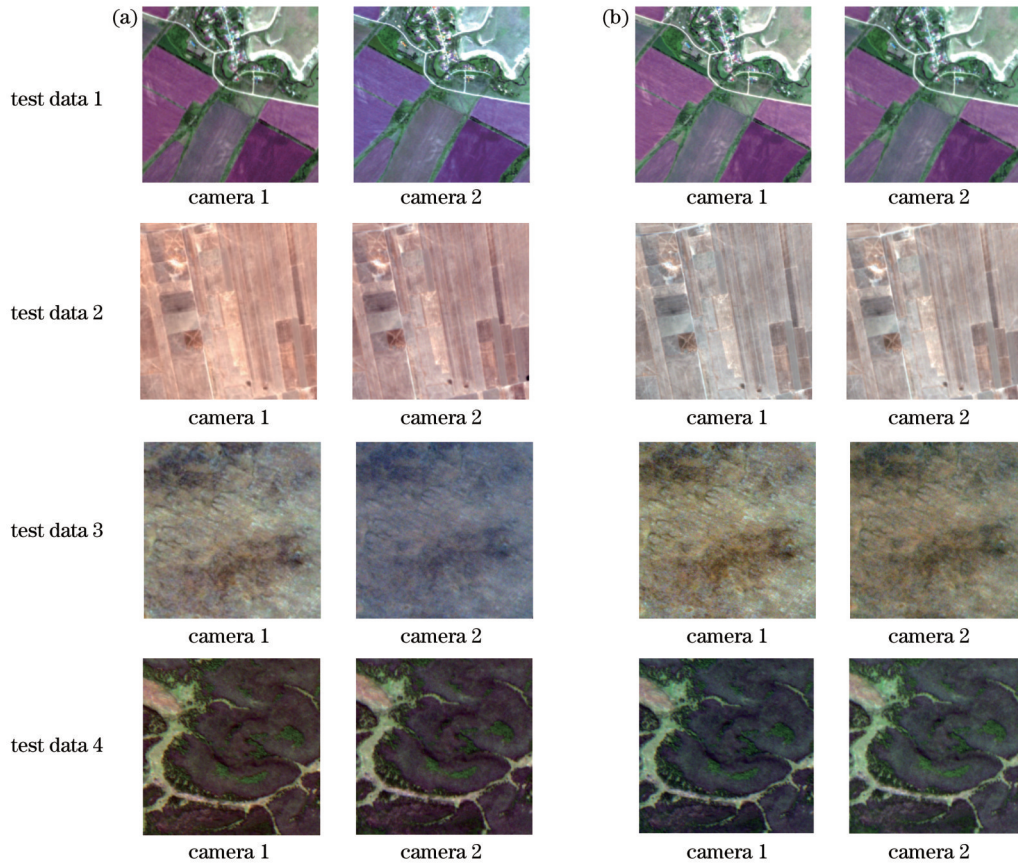


图 8 四组不同地物类型对应的局部区域的测试数据。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 8 Test data of local areas corresponding to four different types of ground objects. (a) Before calibration; (b) after calibration

表 5 校正前后各组数据双相机搭接区之间的 RASE 与 ERGAS 计算结果

Table 5 Calculation results of RASE and ERGAS between double camera lap area of each data group before and after calibration

Test data group	Process	RASE / %	ERGAS
1	Before calibration	16.565	438.955
	After calibration	6.736	75.252
2	Before calibration	10.680	231.993
	After calibration	3.523	23.647
3	Before calibration	106.855	2578.530
	After calibration	34.861	220.924
4	Before calibration	20.985	791.818
	After calibration	10.773	156.961

进一步验证,并增加对地定标结果的整合,以特定传感器、特定谱段绝对精度较为可靠的定标结果作为基准,在实现多传感器、多谱段间辐射性能相对关系校正的同时提高传感器定标的绝对精度。

参 考 文 献

[1] 张玉环. HJ1-CCD 交叉辐射定标[D]. 青岛: 山东科技大学, 2012.

Zhang Y H. HJ1-CCD cross-radiation calibration[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2012.

[2] 王付刚, 张伟, 汪洪源, 等. 运动状态对卫星多谱段光学特性的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1004002.

Wang F G, Zhang W, Wang H Y, et al. Influence of motion status on multispectral optical characteristics of satellites[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1004002.

[3] Dinguirard M, Slater P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 194-205.

[4] 计忠瑛, 相里斌, 王忠厚, 等. 干涉型超光谱成像仪的星上定标技术研究[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(4): 280-283.

Ji Z Y, Xiangli B, Wang Z H, et al. Research of calibration technology of interference hyperspectral imager on secondary planet[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(4): 280-283.

[5] 许和鱼, 张黎明, 黄文薪, 等. 基于 HY-1C SCS 太阳漫反射板的星上绝对辐射定标与验证[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0928002.

Xu H Y, Zhang L M, Huang W X, et al. On-board absolute radiometric calibration and validation based on solar diffuser of HY-1C SCS[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0928002.

[6] Thome K J, Gellman D I, Parada R J, et al. In-flight radiometric calibration of landsat-5 thematic mapper from 1984 to the present[J]. Proceedings of SPIE, 1988: 126-130.

[7] 包诗薇, 陈洪耀, 张黎明, 等. 光学遥感器复杂环境下在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0628001.

Bao S W, Chen H Y, Zhang L M, et al. On-orbit radiometric calibration method of optical remote sensor in complex environment[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0628001.

[8] 徐磊, 马灵玲, 胡坚, 等. 基于 Terra/MODIS 数据的 HJ-1B/

- CCD1 交叉定标方法研究[J]. 遥感信息, 2011, 26(2): 26-31.
- Xu L, Ma L L, Hu J, et al. Cross-calibration of HJ-1B/CCD1 against Terra/MODIS[J]. Remote Sensing Information, 2011, 26(2): 26-31.
- [9] 朱思峰, 伽丽丽, 许华, 等. DPC/GaoFen-5 与 MODIS/Aqua 在轨交叉辐射定标[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1828008.
- Zhu S F, Qie L L, Xu H, et al. In-flight cross radiometric calibration of DPC/GaoFen-5 and MODIS/Aqua[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1828008.
- [10] Staylor W F. Degradation rates of the AVHRR visible channel for the NOAA 6, 7, and 9 spacecraft[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(3): 411-423.
- [11] 谢玉娟. 基于沙漠场景的 HJ-1 CCD 相机在轨辐射定标研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- Xie Y J. Research on on-orbit radiation calibration of HJ-1 CCD camera based on desert scene[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.
- [12] Kieffer H H. Photometric stability of the lunar surface[J]. Icarus, 1997, 130(2): 323-327.
- [13] Kieffer H H, Wildey R L. Absolute calibration of Landsat instruments using the moon[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1985, 51: 1391-1393.
- [14] Wu Y Z, Hapke B. Spectroscopic observations of the Moon at the lunar surface[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 484: 145-153.
- [15] 吴荣华, 张鹏, 郑小兵, 等. 星载成像仪观月数据提取和辐照度转换方法研究[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1819-1827.
- Wu R H, Zhang P, Zheng X B, et al. Data collection and irradiance conversion of lunar observation for MERSI[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1819-1827.
- [16] Zhang L, Zhang P, Hu X Q, et al. A novel hyperspectral lunar irradiance model based on ROLO and mean equigonal albedo[J]. Optik, 2017, 142: 657-664.
- [17] Kieffer H H, Stone T C. The spectral irradiance of the moon[J]. The Astronomical Journal, 2005, 129(6): 2887-2901.
- [18] Miller S D, Turner R E. A dynamic lunar spectral irradiance data set for NPOESS/VIIRS day/night band nighttime environmental applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2316-2329.
- [19] Zeng X Z, Shao X, Qiu S, et al. Stability monitoring of the VIIRS day/night band over dome C with a lunar irradiance model and BRDF correction[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 189.
- [20] 牛明慧, 陈福春. 基于月球反射的遥感仪器在轨定标方法[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(2): 337-341.
- Niu M H, Chen F C. Methods of on-orbit calibration of satellite radiometer reflective solar bands using the moon[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(2): 337-341.
- [21] 吴荣华, 张鹏, 杨忠东, 等. 基于月球反射的遥感器定标跟踪监测[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 278-289.
- Wu R H, Zhang P, Yang Z D, et al. Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 278-289.
- [22] 陈林, 张鹏, 吴荣华, 等. 月球目标监测风云二号静止气象卫星可见光辐射响应变化[J]. 遥感学报, 2018, 22(2): 211-219.
- Chen L, Zhang P, Wu R H, et al. Monitoring radiometric response change of visible band for FY-2 geostationary meteorological satellite by lunar target[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(2): 211-219.
- [23] 解延浩, 马驰, 钟兴, 等. 基于“吉林一号”视频卫星的天基空间目标观测研究[J]. 空间碎片研究, 2019, 19(4): 13-20.
- Xie Y H, Ma C, Zhong X, et al. Research on space-based space target observation based on “jilin-1” video satellite[J]. Space Debris Research, 2019, 19(4): 13-20.
- [24] 张璐, 张鹏, 胡秀清, 等. 月球辐射照度模型比对及地基对月观测验证[J]. 遥感学报, 2017, 21(6): 864-870.
- Zhang L, Zhang P, Hu X Q, et al. Comparison of lunar irradiance models and validation of lunar observation on Earth[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(6): 864-870.
- [25] Gueymard C A. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models[J]. Solar Energy, 2004, 76(4): 423-453.
- [26] Wald L. Data fusion: definitions and architectures-fusion of images of different spatial resolutions[M]. Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines, 2002: 160-161.
- [27] 陈林, 陈海龙, 张鹏, 等. 基于月球目标的 FY-2G 在轨调制传递函数评估[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 3012-3018.
- Chen L, Chen H L, Zhang P, et al. On-orbit modulation transfer function measurements based on lunar limb for FY-2G [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 3012-3018.

Radiation Consistency Correction of Dual Cameras Based on Lunar Calibration

Bai Yang^{1,2}, Wang Lingli^{3*}, Wu Hongyu¹, Cheng Chao¹, Yang Song¹, Huang Shuai¹,
Zhang Jie¹, Zhong Xing¹, Ye Zhongfu²

¹Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, Jilin, China;

²School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Realsee Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100089, China

Abstract

Objective Due to the influence of the external environment and system aging, the radiation characteristics of the camera will change after launch. It is of great importance to carry out on-orbit radiometric calibration, which converts the image grayscale value of the sensor response into spectral radiance or top of atmosphere reflectance, for remote sensing data quantitative application. Common methods of on-orbit radiometric calibration can be divided into four categories: on-board calibration, site calibration, cross calibration, and scene calibration. As a long-term stable natural celestial body in the

universe, the moon has very high surface reflectivity stability. It can be used as a calibration source to avoid interference from complex atmospheres and as a supplement to the on-board calibration. At present, the internationally representative lunar radiation models are the Robotic Lunar Observatory (ROLO) model and the Miller-Turner 2009 (MT2009) model. The spectral coverage of the ROLO model used in this study is 300–2550 nm, and the model uncertainty is 5%–10%. Although the ROLO model has larger uncertainty than the site calibration or on-board calibration, its relative stability can reach 1%–2%, which can be used as a normalized reference to monitor the attenuation of sensors. Many scholars use the lunar irradiance model as the basis to carry out radiometric calibration or monitor the stability of the satellite sensor by comparing the data of different months and different moon phases. However, these studies only focus on multi-temporal tracking of the on-orbit radiation performance of sensors and do not consider the consistency correction of radiation performance between different sensors and different spectral bands. In the present study, we propose a radiation consistency correction method based on lunar calibration. We hope that method can help the inconsistent radiation response of dual cameras installed on the Jilin-1 GP satellite.

Methods We propose a radiation consistency correction method for dual cameras equipped with Jilin-1 GP satellite by lunar calibration based on the stable radiation response characteristics of the moon. Firstly, the lunar imaging data of the two cameras are obtained successively by adjusting the satellite attitude. Then, the lunar spectral irradiances of different spectral channels of the two sensors are calculated based on the image data. The calculation results are compared with the ROLO lunar irradiance model and the spectral band with small irradiance change and close irradiance response of the two cameras is selected as the reference band. At last, the ratio irradiance of each band to the reference band is calculated to correct the attenuation of each band, to achieve dual-camera radiometric consistency correction of Jilin-1 GP satellite.

Results and Discussions The correction value of the absolute radiometric calibration coefficient of each spectral band indicates that after the satellite has been on orbit for a period of time, certain fluctuations have occurred in each band, and some spectral bands even have an attenuation of more than 30% (Table 3). Four sets of data from different imaging scene types are selected for testing, of which the red, green, and blue spectral bands are combined into true color images. Visually, the corrected dual-camera images have better color consistency (Figs. 7 and 8). Relative average spectral error (RASE) and relative global dimensional synthesis error (ERGAS) are adopted to evaluate the spectral consistency of the entire image and lap region imaged by both cameras before and after correction. Compared with the calculation results of the indicators before and after the correction, the calculation results of RASE and ERGAS between the two cameras after the correction are better than those before the correction, whether it is the entire area or the overlapping area (Table 5). Experimental results show that our dual-camera radiometric consistency correction method significantly improves the radiometric consistency, especially in the overlapping area.

Conclusions In the present study, based on the imaging data of the simultaneous observation of the moon by two cameras of the Jilin-1 GP02 satellite, we propose a dual-camera radiation consistency correction method based on lunar calibration. Firstly, based on acquired observation data of the moon, the consistency of the single spectral band radiation reference of the two cameras is determined by selecting the spectral band with the closest lunar irradiance results of the two cameras as the benchmark for the correction between the respective bands. Furthermore, the relative relationship between each spectral band in the ROLO model is used as a reference, and all bands of the two cameras are corrected relatively to realize the consistency of the remaining spectral bands of the dual cameras to the consistency of the reference band. The test results show that some spectral bands of the Jilin-1 GP02 satellite have obvious attenuation. After compensating for the attenuation, the visual effect of the true color images taken by the two cameras of the Jilin-1 GP02 satellite is more consistent, and the relative average spectral error and the relative adimensional global error in synthesis of the overlapping area of the dual camera are also significantly smaller.

Key words measurement; radiation consistency; lunar calibration; Robotic Lunar Observatory irradiance model; irradiance ratio