

星上辐射定标精度验证方法研究

李鑫^{1,2*}, 张黎明^{1,2}, 司孝龙^{1,2}, 陈洪耀^{1,2}, 黄文薪^{1,2}, 宋庆君³

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031;

³国家卫星海洋应用中心, 北京 100089

摘要 星上定标光谱仪(SCS)是 HY-1C 搭载的标准定标载荷,用于实现对同平台上其他多光谱载荷的辐射定标。基于星上定标光谱仪获得的星上定标结果,与 MODIS 的影像数据进行交叉定标,比较星上定标光谱仪与 MODIS 对相同地面区域的辐亮度数据和反射率数据,实现了对星上定标精度的评估与验证。通过对 4 次定标数据的处理和分析,结果表明,两者的最大相对偏差小于 3%,满足同平台其他载荷的定标要求。

关键词 遥感; 星上定标; 高光谱辐射定标; 交叉定标

中图分类号 TP79; O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0928001

Accuracy Verification of On-Board Radiometric Calibration

Li Xin^{1,2*}, Zhang Liming^{1,2}, Si Xiaolong^{1,2}, Chen Hongyao^{1,2},

Huang Wenxin^{1,2}, Song Qingjun³

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100089, China

Abstract In this study, a satellite calibration spectrometer (SCS), as a standard calibration load on HY-1C, was used for calibrating the remaining instruments on the same satellite platform. Further, the cross-calibration method was used to evaluate and verify the accuracy of on-board calibration by comparing the radiances and reflectances obtained via SCS and moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) with respect to the same ground area. By processing the calibration data four times on different dates, the maximum relative deviation of the radiance is observed to become less than 3%, which meets the calibration requirement with respect to the remaining loads on the HY-1C platform.

Key words remote sensing; on-board calibration; hyperspectral radiometric calibration; cross calibration

OCIS codes 280.4788; 110.4234; 150.1488

1 引 言

星上定标光谱仪(简称 SCS)是 HY-1C 上搭载的定标载荷,可实现 345~900 nm 的全谱段成像,其中在 400~900 nm 范围内,使用光栅分光实现的连续光谱成像,其光谱分辨率为 5 nm,星下点空间分辨率为 1.1 km。SCS 作为整星的辐射基准源,使用双板法进行星上辐射定标,然后对同平台的水色水温扫描仪、紫外成像仪进行交叉定标,实现了同平台的辐射标准传递^[1]。SCS 自 2018 年 9 月发射以

来,工作正常,并下传了许多相关的定标数据。基于这些定标数据,研究学者已经获得多次星上辐射定标结果。但在对其他载荷进行交叉定标前,均需先对 SCS 的辐射定标精度进行验证。张可立等^[1]从工程设计角度对 SCS 的星上定标流程以及定标不确定度进行了分析,最终得到可见近红外波段的星上定标不确定度约为 2%。该文献对星上定标过程中各种不确定源进行了综合考虑,具有很高的参考价值,但对于真实的星上定标结果,还需作进一步分析研究。

收稿日期: 2019-10-11; 修回日期: 2020-01-03; 录用日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(41601388)

* E-mail: lixin110@aiofm.ac.cn

交叉定标法是利用辐射定标精度较高的参考遥感器对目标遥感器进行定标,选择参考遥感器和目标遥感器对同一区域同步或准同步影像进行获取,通过几何配准和光谱响应匹配,建立两个遥感器图像之间的联系,能够实现高频次且低成本的在轨性能评价和数据产品校验^[2-3]。杨爱霞通过将辐射精度与光谱匹配后的 MODIS 大气表观(TOA)反射率的交叉定标完成了 HJ-1/CCD 和 FY-3 中分辨率光谱成像仪(MERSI)和可见光红外扫描辐射计(VIRR)共 8 个传感器在可见光-近红外(VNIR)波段的辐射性能评价,并指出利用交叉定标的方法能更有效地监测遥感器辐射性能的变化情况。肖艳芳等^[4]基于 LandSat-5 TM 数据对 HJ-1A 星多光谱遥感器的星上定标精度进行了交叉验证,共选择了建筑物、裸地、水体和植被 4 类地物,每类地物分别采集 10 个样点,结果发现基于 HJ-1A 的 CCD 影像进行星上定标得到的辐亮度与在 LandSat-5 TM 上获得的辐亮度存在较大差异,说明 HJ-1A 的星上定标系数达不到水体定量反演的精度要求,最终还需通过 MODIS 的影像数据利用交叉定标的方法得到精度较高的辐射定标系数^[4]。另外人们还提出了利用伪不变场来跟踪遥感器的定标精度,如 Helder 等^[5]提出了识别伪不变场的相关算法。但该方法受当地天气、定标场地面反射率、大气参数等因素的影响,可供使用的伪不变场数量不多,且会影响定标精度验证的时效性。

高慧婷等^[6]认为,光谱响应匹配不确定性对交叉定标的影响较大,他们通过仿真模拟将水温水色扫描仪(COCTS)与其他高光谱遥感器进行了交叉定标,得到以下结论:当参考遥感器的光谱分辨率为 5 nm 时,光谱重构法引入的误差小于 0.05%。但该方法只是基于模拟仿真的过程来实现交叉定标精度的验证,没有对具体真实数据进行分析。由于 SCS 的光谱分辨率正好约为 5 nm,因此本文在交叉定标验证的过程中,将使用光谱重构的方法来实现 SCS 与 MODIS 的光谱匹配。

针对辐射定标精度的验证方法,王玲等^[7]以 Aqua/MODIS 观测值作为参考,对提出的非线性辐射定标模型进行了验证,并使用相对偏差的方法来计算模型精度。本文借鉴该评估方法,使用交叉定标来验证辐射定标精度。

本文利用真实得到的 SCS 星上定标结果与 MODIS 数据进行交叉定标,通过比较两者对相同区域的大气层顶辐亮度数据和反射率数据,对 SCS

的星上定标精度进行评估,为后期 SCS 星上定标计划的制定以及定标算法的改进提供了数据基础,为同平台的交叉定标过程提供了基础技术。

2 基于交叉定标的定标精度评估流程

2.1 基于交叉定标的定标精度评估算法

根据两种遥感器的两行根数文件,进行遥感器轨道预报^[8-10],选择两种遥感器在 30 min 内经过同一均匀区域的影像数据,其中 MODIS 选择其 L1B 级的辐亮度产品,而 SCS 选择 L1A 级的影像数据产品,同时获取两遥感器在定标时间段内太阳角度数据。由于两种遥感器获取影像间隔时间较短,因此忽略期间大气变化的影响。

利用最近一次 SCS 星上定标过程中计算得到的辐射定标系数对 SCS 目标区域的影像进行辐射定标,得到高光谱的星上辐亮度数据,定标公式可以表示为

$$L_{SCS}(i, j) = k_2(j) \cdot k_4(i, j) \cdot [k_5(\text{ceiling}(\mathbf{R}_{DN}), j) - b_2(j)], \quad (1)$$

式中: $k_2(j)$ 为第 j 谱段参考元绝对辐射定标增益; \mathbf{R}_{DN} 为表示当前通道的相机响应值; $k_4(i, j)$ 为第 j 谱段第 i 个像元相对辐射校正增益; $k_5(\mathbf{R}_{DN}, j)$ 为第 j 谱段参考元非线性修正; $b_2(j)$ 为第 j 谱段参考元绝对辐射定标偏置。

同时截取 MODIS 在该区域的辐亮度数据,MODIS 的辐射定标公式可以表示为

$$L_{MODIS}(i) = [\mathbf{R}_{DN}(i) - b(i)] \cdot \mathbf{K}(i), \quad (2)$$

式中: $L_{MODIS}(i)$ 表示第 i 通道对应的辐亮度; $\mathbf{R}_{DN}(i)$ 表示第 i 通道的响应值统计结果; $b(i)$ 表示第 i 通道的辐射定标系数偏置; $\mathbf{K}(i)$ 表示该通道的辐射定标系数。

由于 SCS 与 MODIS 之间存在光谱响应特性的差异,因此需要首先进行光谱匹配。本文使用反卷积的方法来得到高光谱的辐亮度数据,再与 MODIS 各通道的光谱响应函数进行卷积,得到对应 MODIS 通道下的 SCS 辐亮度数据。

在反卷积计算过程中采用三次样条插值并累次迭代逐步逼近的方法^[7],其基本思想是用某个简单函数在满足一定条件、某个范围内近似替代另一个较为复杂或解析式难以给出的函数,以简化后者的某些性质。具体计算过程如下:

1) 设

$$L^{(0)}(\lambda) = \text{splineInterp}(L^{(0)}), \\ L^{(0)} = \mathbf{L} = (L_{1,0}, L_{2,0}, \dots, L_{i,0}, \dots, L_{n,0}), \quad (3)$$

式中: splineInterp 表示三次样条插值函数; $\mathbf{L}^{(0)}$ 表示初始各通道得到的辐亮度向量, 即第 0 次插值后得到的高光谱辐亮度; \mathbf{L} 为初始高光谱遥感器测量得到的辐亮度向量; $\mathbf{L}_{i,0}$ 为初始第 i 通道的辐亮度测量值; i 表示通道号, $i=1, 2, \dots, n$; $\mathbf{L}^{(0)}(\lambda)$ 为 $\mathbf{L}^{(0)}$ 经过三次样条插值后得到的光谱间隔为 1 nm 的高光谱辐亮度, 这里将光谱间隔为 1 nm 的辐亮度看作是连续光谱的辐亮度。第 m 次光谱响应插值结果为

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{L}}_i^{(m)} &= \frac{\sum \mathbf{L}^{(m)}(\lambda) \mathbf{S}_{i,0}(\lambda)}{\sum \mathbf{S}_{i,0}(\lambda)} \\ \overline{\mathbf{L}}^{(m)} &= \{\overline{\mathbf{L}}_i^{(m)} \mid (i=1, 2, \dots, n)\} \quad (4) \\ \mathbf{L}^{(m+1)} &= \mathbf{L}^{(m)} + a(\mathbf{L} - \overline{\mathbf{L}}^{(m)}) \\ \mathbf{L}^{(m+1)}(\lambda) &= \text{splineInterp}(\mathbf{L}^{(m+1)}) \end{aligned}$$

2) 利用与迭代初值的差值逐次减少误差, 一般将系数 a 设置为 1, 直到满足

$$\|\overline{\mathbf{L}}^{(k)} - \mathbf{L}\|_2 \leq c \quad (5)$$

时认为得到的结果近似等于真实的入瞳辐亮度, 其中 $\|\cdot\|_2$ 表示 L2 范数, 设 $c=10^{-6}$ 。

由于 SCS 的辐射定标系数是由星上定标得到的, 定标精度可以表示为

$$\sigma = \frac{\Delta L \cos(\theta_{\text{SCS}})}{L_{\text{onboard}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

式中: ΔL 表示 SCS 与 MODIS 定标得到的辐亮度的偏差; L_{onboard} 表示 SCS 星上定标时刻对应的白板反射的辐亮度; θ_{SCS} 为漫反射板坐标系下太阳入射天顶角。

根据 ISO/IEC 17043 2010, 定标精度能力验证的公式可以表示为^[11]

$$E = \frac{|\mathbf{L}_{\text{SCS}} - \mathbf{L}_{\text{MODIS}}|}{\sqrt{(\mathbf{L}_{\text{SCS}} * \sigma_{\text{SCS}})^2 + (\mathbf{L}_{\text{MODIS}} * \sigma_{\text{MODIS}})^2}}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{L}_{SCS} 表示由 SCS 得到的辐亮度值; $\mathbf{L}_{\text{MODIS}}$ 表示交叉定标区域 MODIS 对应的辐亮度值; σ_{SCS} 表示 SCS 所能达到的辐射定标不确定度; E 表示定标精度所能达到的能力水平值, 只有其小于 1 时, 才表示指定的 SCS 定标不确定度是合理的。

本文所提总交叉定标流程如图 1 所示。具体流程如下: 1) 获取 MODIS L1B 级辐亮度影像数据以及 SCS L1A 级对地影像数据, 分别对其进行几何校正; 2) 根据两幅影像对应的经纬度数据, 得到影像的重叠区域, 该区域就是可用于进行交叉验证的地面区域, 提取该区域内 550 nm 波段的影像数据, 并统计得到较均匀的区域作为最终的目标区域; 3) 对该区域应用对应的辐射定标系数进行定标, 得到辐亮

度数据; 4) 对 SCS 的结果应用三次样条算法得到高光谱辐亮度, 并与 MODIS 各通道的光谱响应函数进行卷积, 得到多光谱辐亮度值; 5) 将该值与 MODIS 的辐亮度值进行比较, 计算相对偏差, 完成定标精度验证。

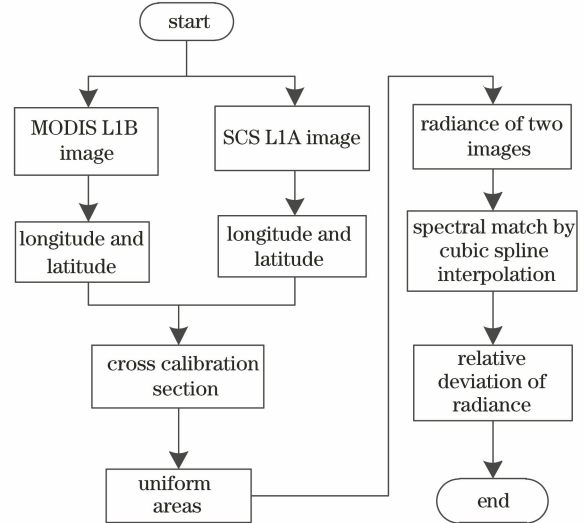


图 1 交叉验证流程图

Fig. 1 Flow chart of the cross validation

2.2 定标数据处理流程

在定标数据处理中, MODIS 使用的是 L1B 级的辐亮度数据产品, 星上定标光谱仪使用的是 L1A 级的数据产品, 并使用最近一次的星上辐射定标结果对其进行处理, 得到辐亮度数据。在进行星上辐射定标前, 已经使用星上搭载的稀土板对遥感器进行了光谱定标^[12], 且对各波段进行了波长校正。

本文共进行了四次交叉验证, 下面首先对 2019 年 1 月 24 日进行的交叉定标数据处理过程进行介绍。

本次定标中 MODIS 影像数据文件名为 MOD021KM.A2019024.0250.061.2019024092232.hdf; 对应的地理信息 MOD03 文件名为 MOD03.A2019024.0250.061.2019024091955.hdf; SCS 文件名为 H1C_OPER_SCS_L1A_20190124T024234_20190124T025853_01993_10.h5。

对两种遥感器影像中各像元对应的经纬度数据进行分析, 确定出两者的公共区域, 该区域就是可供交叉定标的区域, 如图 2 所示, 其中椭圆标识的区域就是可供交叉定标的区域。提取两种遥感器对应区域的影像数据, 并进行分辨率和纹理匹配, 结果如图 3 所示。

提取该区域的 SCS 影像数据, 并进行均匀性统计, 选择出均匀、无云, 且总像素数大于 150 的目标区域作为交叉定标目标区, 最终确定出区域经纬度

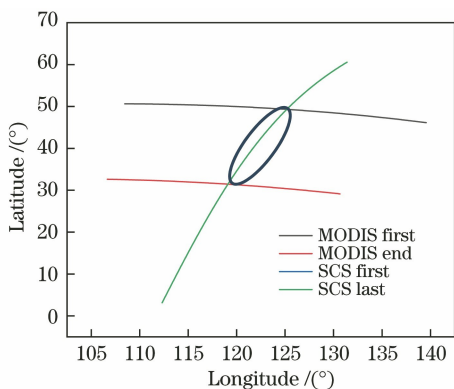


图 2 SCS 与 MODIS 公共区域(2019-01-24)
Fig. 2 Common region of SCS and MODIS obtained on January 24, 2019

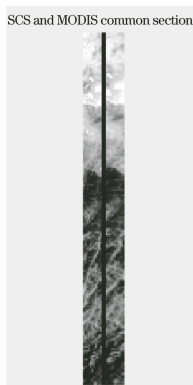


图 3 SCS 与 MODIS 公共区域纹理匹配情况
Fig. 3 Texture matching in the common region of SCS and MODIS

范围为 $[121.34^{\circ} \sim 121.40^{\circ}, 39.15^{\circ} \sim 39.35^{\circ}]$, 该区域在 MODIS 影像和 SCS 影像中的位置如图 4 所示, 该区域位于接近于陆地的海洋区域。

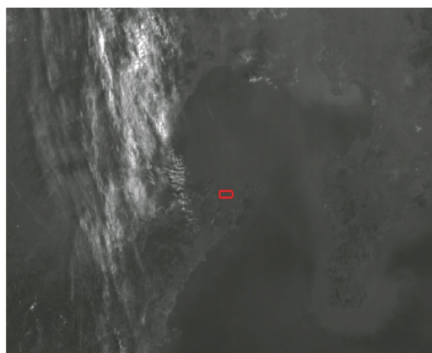


图 4 交叉定标区域在 MODIS 影像中的位置(2019-01-24)
Fig. 4 Cross calibration region in the MODIS image obtained on January 24, 2019

对选择出的定标区域影像数据进行统计, 判断两种遥感器在该区域内的均匀性, 结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 选区内数据均匀性较好, 适用于交叉定标。

表 1 选定区域中 SCS 和 MODIS 影像数据统计结果(2019-01-24)

Table 1 Statistic results of image data in the selected regions from SCS and MODIS obtained on January 24, 2019

| Sensor | Average | Standard deviation | Uniformity / % |
|--------|-----------|--------------------|----------------|
| SCS | 8908.000 | 95.940 | 1.08 |
| MODIS | 13558.148 | 417.247 | 3.08 |

在该区域内, SCS 与 MODIS 数据对应的太阳入射几何角度以及观测角度如表 2 所示。由表 2 可以看出, 由于成像时刻比较接近, 太阳角度偏差较小, 因此由太阳角度带来的偏差可以忽略, 同时本次定标中, 忽略了地面目标双向反射分布函数(BRDF)的影响。

表 2 在选定区域内 SCS 与 MODIS 的太阳角度和观测角度(2019-01-24)

Table 2 Solar and view angles in the selected regions from SCS and MODIS on January 24, 2019 (°)

| Sensor | Solar zenith | Solar azimuth | View zenith | View azimuth |
|--------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| SCS | 61.278 | 159.021 | 0 | 291.2880 |
| MODIS | 61.050 | 160.100 | 1.690 | -85.3700 |

MODIS 的辐射定标系数可以从影像中获取, 最终得到 SCS 与 MODIS 对交叉定标区域的辐亮度曲线, 如图 5 所示, 由图可以看出, 两种遥感器的辐亮度值是一致的, 这说明星上辐射定标得到的定标系数与 MODIS 辐亮度以及反射率均是匹配的。根据(6)式计算的两种遥感器的反射率相对偏差以及辐亮度相对偏差, 结果如表 3 所示。

表 3 辐亮度与反射率偏差统计(2019-01-24)

Table 3 Deviation statistics of radiance and reflectance obtained on January 24, 2019

| Band | Radiance deviation / $(\mu W \cdot cm^{-2} \cdot sr \cdot nm^{-1})$ | Reflectance deviation |
|------|---|-----------------------|
| B8 | 0.012 | 0.016 |
| B9 | 0.016 | 0.012 |
| B10 | 0.009 | 0.017 |
| B11 | 0.029 | 0.036 |
| B12 | 0.011 | 0.009 |
| B13 | 0.048 | 0.054 |
| B14 | 0.076 | 0.083 |
| B15 | 0.037 | 0.046 |

接着, 按相同的方法对另外几次的定标结果进行交叉定标计算, 每次选择的交叉定标区域如图 6 所示。提取区域内的影像数据, 并进行均匀性统计, 定标区域统计值如表 4 所示。在选定均匀区

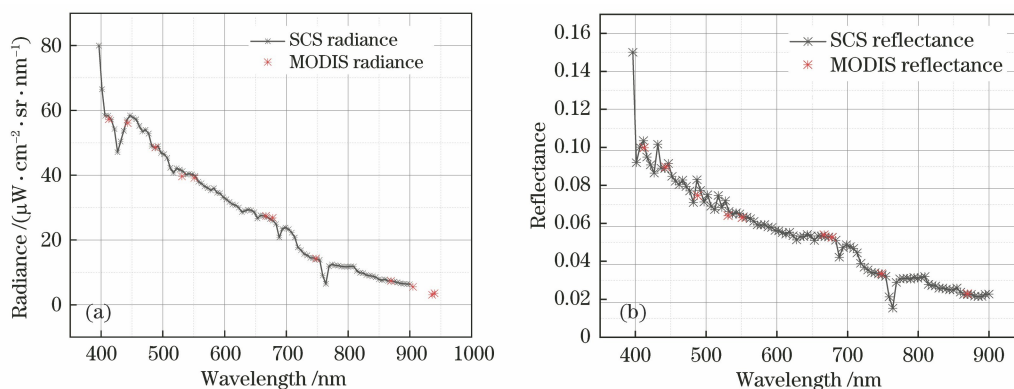


图 5 SCS 与 MODIS 影像中的辐亮度数据和反射率数据(2019-01-24)

Fig. 5 Radiance and reflectance from SCS and MODIS images obtained on January 24, 2019

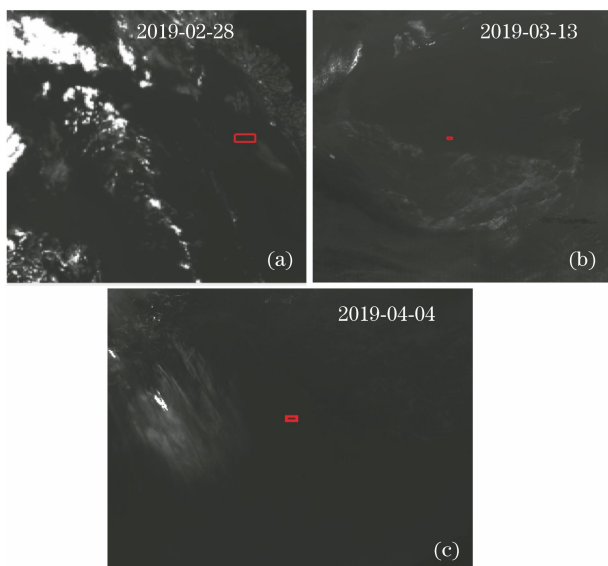


图 6 交叉定标区域在 MODIS 影像中的位置。(a) 2019-02-28 选择的交叉验证区域;(b)2019-03-13 确定的交叉验证区域;(c)2019-04-04 确定的交叉验证区域

Fig. 6 Cross calibration regions in the MODIS image.

- (a) Uniform region selected on February 28, 2019;
- (b) uniform region selected on March 13, 2019;
- (c) uniform region selected on April 4, 2019

表 4 其他时间段下定标区域中 SCS 和 MODIS 影像数据统计结果

Table 4 Statistic results of image data in the selected regions from SCS and MODIS on different dates

| Date | Sensor | Average | Standard deviation | Uniformity / % |
|------------|--------|---------|--------------------|----------------|
| 2019-02-28 | SCS | 8600.0 | 83.542 | 0.97 |
| 2019-02-28 | MODIS | 9834.2 | 119.289 | 1.21 |
| 2019-03-13 | SCS | 9532.8 | 90.302 | 0.95 |
| 2019-03-13 | MODIS | 11178.0 | 55.864 | 0.50 |
| 2019-04-04 | SCS | 7211.3 | 73.047 | 1.01 |
| 2019-04-04 | MODIS | 7914.5 | 70.045 | 0.89 |

域内可以从影像文件中读取各像元对应的太阳入射角度和观测角度,其相关角度数据统计结果如表 5 所示。

从 MODIS 影像数据中读取各通道对应的辐亮度和反射率定标系数,应用于影像并对得到的辐亮度和反射率进行统计平均,同时,对 SCS 影像数据应用对应的辐亮度和反射率定标系数,结果如图 7~9 所示。

表 5 均匀区域内 SCS 与 MODIS 太阳角度和观测角度

Table 5 Solar and view angles in the selected regions from SCS and MODIS on different dates (°)

| Date | Sensor | Solar zenith | Solar azimuth | View zenith | View azimuth |
|------------|--------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| 2019-02-28 | SCS | 34.571 | 135.424 | 0 | 180.203 |
| 2019-02-28 | MODIS | 34.390 | 135.800 | 4.3600 | 103.400 |
| 2019-03-13 | SCS | 30.443 | 130.025 | 0 | 180.158 |
| 2019-03-13 | MODIS | 30.040 | 130.680 | 1.1100 | 104.050 |
| 2019-04-04 | SCS | 35.942 | 150.039 | 0.1811 | 142.627 |
| 2019-04-04 | MODIS | 35.950 | 150.030 | 2.9200 | 98.410 |

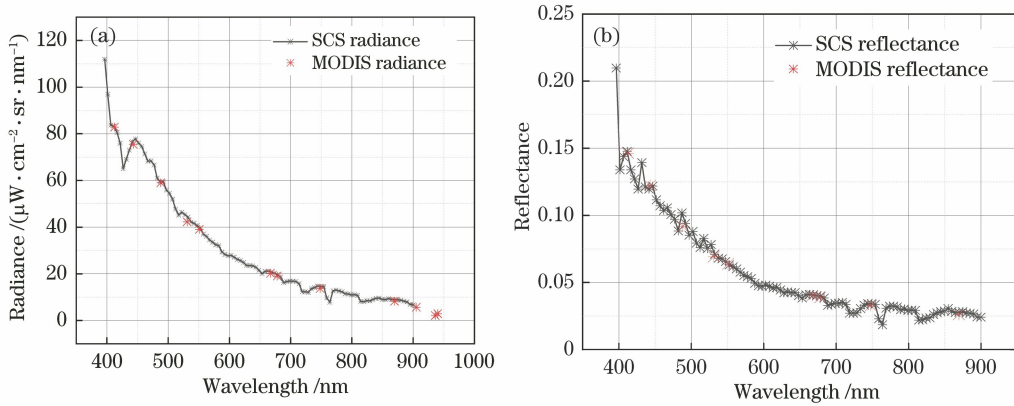


图 7 SCS 与 MODIS 定标后辐亮度和反射率计算结果(2019-02-28)。(a)辐亮度计算结果;(b)反射率计算结果
Fig. 7 Radiance and reflectance results from SCS and MODIS images obtained on February 28, 2019.

(a) Radiance; (b) reflectance

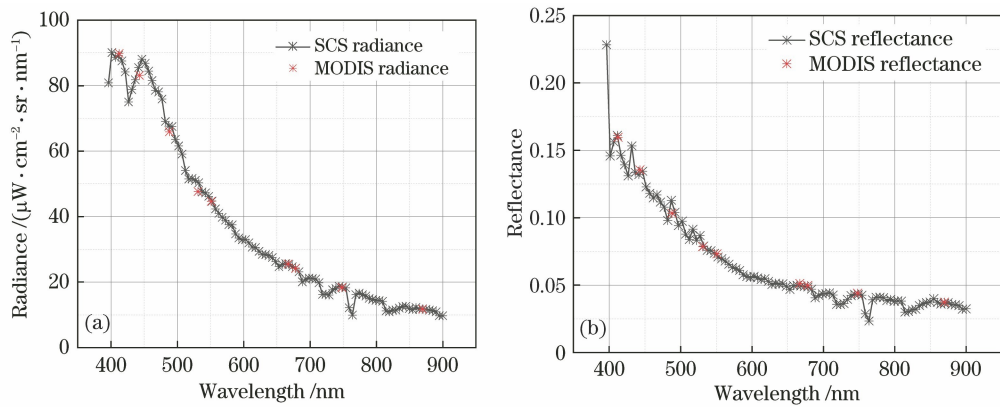


图 8 SCS 与 MODIS 定标后辐亮度和反射率计算结果(2019-03-13)。(a)辐亮度计算结果;(b)反射率计算结果
Fig. 8 Radiance and reflectance results from SCS and MODIS images obtained on March 13, 2019.

(a) Radiance; (b) reflectance

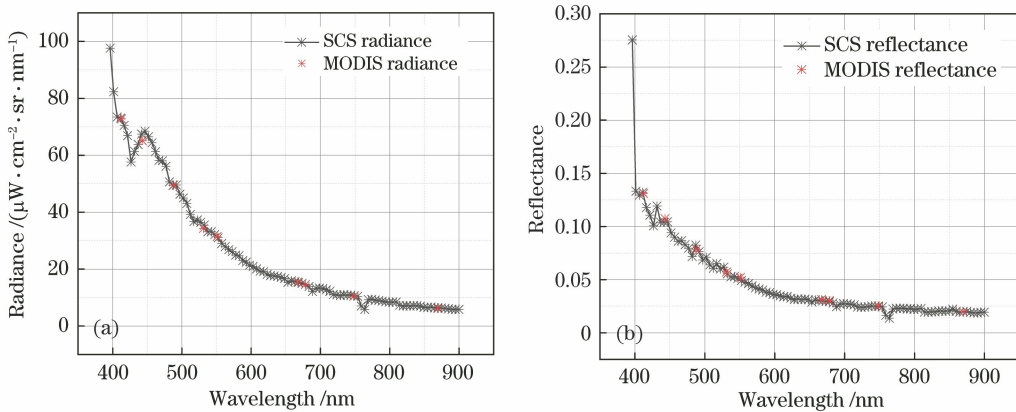


图 9 SCS 与 MODIS 定标后辐亮度和反射率计算结果(2019-04-04)。(a) SCS 与 MODIS 辐亮度计算结果;
(b) SCS 与 MODIS 反射率计算结果

Fig. 9 Radiance and reflectance results from SCS and MODIS images obtained on April 4, 2019.
(a) Radiance; (b) reflectance

3 分析与讨论

对已有的辐亮度和反射率定标结果进行总结,

结果如表 6 和表 7 所示。

根据张可立等^[1]的研究结果,星上定标光谱仪漫反射板反射辐亮度的不确定度分配情况如表 8 所示。

表 6 辐亮度验证结果汇总
Table 6 Verification results of radiance ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}^{-1}$)

| Band | Radiance deviation | | | | Average |
|------|--------------------|------------|------------|------------|---------|
| | 2019-01-24 | 2019-02-28 | 2019-03-13 | 2019-04-04 | |
| B8 | 0.014 | 0.009 | 0.007 | 0.012 | 0.011 |
| B9 | 0.011 | 0.007 | 0.008 | 0.023 | 0.012 |
| B10 | 0.008 | 0.017 | 0.010 | 0.010 | 0.011 |
| B11 | 0.044 | 0.054 | 0.039 | 0.041 | 0.045 |
| B12 | 0.027 | 0.043 | 0.024 | 0.024 | 0.030 |
| B13 | 0.021 | 0.016 | 0.016 | 0.011 | 0.016 |
| B14 | 0.047 | 0.015 | 0.018 | 0.011 | 0.023 |
| B15 | 0.029 | 0.053 | 0.011 | 0.032 | 0.031 |

表 7 反射率验证结果汇总
Table 7 Verification results of reflectance

| Band | Reflectance deviation | | | | Average |
|------|-----------------------|------------|------------|------------|---------|
| | 2019-01-24 | 2019-02-28 | 2019-03-13 | 2019-04-04 | |
| B8 | 0.014 | 0.013 | 0.011 | 0.013 | 0.013 |
| B9 | 0.008 | 0.007 | 0.010 | 0.016 | 0.010 |
| B10 | 0.007 | 0.014 | 0.009 | 0.022 | 0.013 |
| B11 | 0.026 | 0.035 | 0.028 | 0.030 | 0.030 |
| B12 | 0.016 | 0.025 | 0.016 | 0.033 | 0.023 |
| B13 | 0.012 | 0.006 | 0.007 | 0.054 | 0.020 |
| B14 | 0.029 | 0.006 | 0.008 | 0.056 | 0.025 |
| B15 | 0.010 | 0.016 | 0.005 | 0.067 | 0.025 |

表 8 星上定标过程中漫反射板反射辐亮度不确定度

Table 8 Radiance uncertainty of on-board calibration %

| Uncertainty factor | Uncertainty |
|---|-------------|
| BRDF | 0.80 |
| Uniformity (including attenuation screen) | 0.60 |
| Incident solar angle | 0.35 |
| Transmittance of attenuation screen | 0.50 |
| Pre-launch monitoring | 0.50 |
| Reference diffuser | 0.54 |
| Solar irradiance | 1.00 |
| Stray light and other factors | 1.00 |
| Synthetic uncertainty | 1.97 |

另外辐射定标还需要考虑遥感器响应非线性以及影像相对定标精度等,其不确定度约 1%,因此辐射定标过程的综合不确定度优于 3%。星上反射率定标不确定度与辐亮度定标相比,不需要考虑太阳辐照度的稳定性以及遥感器响应的非线性,因此,最后反射率定标的不确定度约为 1.9%。

根据最近 Xiong 等^[13]对 MODIS L1B 星上定标算法的更新结果,其太阳反射率波段辐亮度定标不确定度约为 5%,反射率定标不确定度约为 2%。

利用定标精度能力验证的公式[(7)式],对以上 4 次的数据进行处理,对星上定标光谱仪的辐射定标精度能力进行验证,结果如表 9 所示,从表中可以看出,所有通道各定标日期的定标精度能力均小于 1,因此将 SCS 的辐射定标不确定度设置为 3%是可行的,另外该定标过程没有考虑地面目标 BRDF 等因素的影响,如果考虑到该不确定度来源,该验证精度将更高。

星上定标光谱仪的辐射定标精度还与其光谱定标以及漫反射板退化情况相关。星上定标光谱仪使用双板法进行定标漫反射板 BRDF 衰减特性的监测^[14],通过对已有定标结果的分析,可以发现,漫反射板衰减小于 0.1%,这是因为单次辐射定标过程中,漫反射板曝光时间小于 30 s,所以在轨半年时间里,漫反射板总曝光时间小于 2 h,其带来的不确定度可以忽略。

表 9 星上定标光谱仪辐射定标精度能力验证结果

Table 9 Verification results of on-board calibration capability

| Band | Calibration capability | | | |
|------|------------------------|------------|------------|------------|
| | 2019-01-24 | 2019-02-28 | 2019-03-13 | 2019-04-04 |
| B8 | 0.512 | 0.838 | 0.730 | 0.589 |
| B9 | 0.462 | 0.497 | 0.465 | 0.335 |
| B10 | 0.055 | 0.272 | 0.134 | 0.236 |
| B11 | 0.507 | 0.690 | 0.421 | 0.719 |
| B12 | 0.251 | 0.543 | 0.210 | 0.542 |
| B13 | 0.582 | 0.152 | 0.517 | 0.166 |
| B14 | 0.890 | 0.319 | 0.420 | 0.287 |
| B15 | 0.165 | 0.851 | 0.112 | 0.776 |

从星上定标不确定度来源可以看出,地面漫反射板 BRDF 是影响星上定标的重要因素,因此,要进一步提高辐射定标精度,就需提高漫反射板 BRDF 的实验室测量精度和监测精度,这需要研究高精度 BRDF 测量装置以及新的 BRDF 衰减监测算法。

为进一步验证星上定标精度,后期将与 VIIRS 等其他经高精度定标的遥感器进行交叉验证,经过长期匹配验证后可以得到更准确的定标精度评估结果,另外该方法也可扩展应用于对其他遥感器定标精度的验证。

综上所述,星上定标光谱仪星上定标结果真实可靠,可作为标准遥感器对同平台的其他载荷进行辐射标准传递。

4 结 论

通过比较星上定标光谱仪与 MODIS 对相同地面区域的辐亮度数据和反射率数据,实现了对星上定标精度的评估。经初步验证,星上定标光谱仪辐射定标精度优于 3%,表示星上定标光谱仪具备了对同平台其他遥感器进行在轨定标的能。基于长期星上定标的成像光谱仪,可建立高光谱、高精度、全谱段的星上辐射标准,为提高国产光学载荷定量化水平、辐射定标精度自主可控,以及基于高光谱定标载荷的同平台和异平台的辐射标准传递提供了技术基础,加快了我国迈向航天强国的步伐。

参 考 文 献

- [1] Zhang K L, Zhang Y C, Ma Y. Design of on orbit cross calibration method for HYG1 C/D satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(2): 24-29.
张可立, 张永超, 马越. 海洋一号 C/D 卫星在轨交叉定标设计[J]. 航天器工程, 2019, 28(2): 24-29.
- [2] Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 971-987.
- [3] Yang A X. Research on method and system for radiometric cross-calibration of China's Optical Satellite Remote Sensing Data on VNIR bands[M]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 90-109.
杨爱霞. 国产光学卫星遥感数据 VNIR 波段交叉辐射定标方法与体系研究[M]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 90-109.
- [4] Xiao Y F, Zhu L, Zhao W J. Precision verifications of radiance calibration and coastal water atmospheric correction for satellite HJ-1A[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(1): 54-62.
肖艳芳, 朱琳, 赵文吉. HJ-1A 星辐射定标及近海水体大气校正的精度验证[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(1): 54-62.
- [5] Helder D L, Basnet B, Morstad D L. Optimized identification of world wide radiometric pseudo-invariant calibration sites [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 527-539.
- [6] Gao H T, Ma Y, Liu W, et al. Analysis and simulation of cross calibration precision of ocean color remote sensing [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(2): 116-125.
高慧婷, 马越, 刘薇, 等. 海洋水色遥感交叉定标精度分析与仿真[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(2): 116-125.
- [7] Wang L, Hu X Q, Chen L. Wide dynamic nonlinear radiometric calibration of optical satellite sensors using multiple stable earth targets [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(6): 893-906.
王玲, 胡秀清, 陈林. 多目标的卫星仪器宽动态非线性定标[J]. 遥感学报, 2017, 21(6): 893-906.
- [8] Qi C L, Hu X Q, Zhang L Y, et al. Cross-calibration of FY-1C/1D satellite based on hyperspectral data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(4): 892-901.
漆成莉, 胡秀清, 张里阳, 等. 基于高光谱资料对 FY-1C/1D 气象卫星进行交叉定标[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 892-901.
- [9] Liu W, Miao Y X. Tests of the accuracies of SGP4/SDP4 model predictions [J]. Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China, 2011, 8(2): 128-131.
刘卫, 缪元兴. SGP4/SDP4 模型预报可靠性分析[J]. 天文研究与技术—国家天文台台刊, 2011, 8(2): 128-131.

- [10] Chen X, Qi W W, Xu P. Research on orbit prediction for proper satellite radiometric calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0312003.
陈轩, 齐文雯, 徐鹏. 基准星辐射定标的轨道预报研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0312003.
- [11] China National Accreditation Service for Conformity Assessment. Rules for the accreditation of proficiency testing provider: CNAS-CL03 [S]. [S. l.: s. n.], 2010-12-31.
中国合格评定国家认可委员会. 能力验证提供者认可准则: CNAS-CL03 [S]. [出版者不详: 出版地不详], 2010-12-31.
- [12] Liu Y X, Fu R M, Li M, et al. On-board spectral calibration technologies with rare earth doped diffuser plate [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(6): 48-54.
刘宇翔, 伏瑞敏, 李明, 等. 稀土掺杂漫反射板上光谱定标技术 [J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(6): 48-54.
- [13] Xiong X X, Angal A, Barnes W L, et al. Updates of Moderate resolution imaging spectroradiometer on-orbit calibration uncertainty assessments [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(3): 034001.
- [14] Xu H Y. The research of on-board calibration method based on double-solar diffusers [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 32-35.
许和鱼. 基于双太阳漫反射板上定标方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 32-35.