

珠海一号高光谱卫星辐射精度真实性检验研究

刘 宁, 刘其悦, 朱 霞, 张文豪, 金永涛, 郭子阳
(北华航天工业学院 廊坊 065000)

摘要:“珠海一号(OHS)”高光谱商业遥感卫星数据在国民经济建设中发挥着越来越重要的作用。当前,针对商业遥感卫星数据质量精度的验证和评价研究成果较少。本文基于地面实测数据,对OHS卫星高光谱数据的辐射精度进行了真实性检验和定量分析。结果表明:OHS卫星表观辐亮度与实测结果具有较好的线性相关关系,相关系数 R^2 大于0.7。与实测结果相比,OHS卫星各通道表观辐亮度值整体偏低,但两者光谱曲线形态基本一致。随着时间的推移,OHS传感器性能可能存在衰减,不同通道的衰减程度不一;在31个通道中,与实测值之间的相对差异在20%以内的通道数为9个;在20%~30%之间为14个,30%~40%为8个。

关键词: OHS星;辐射精度;真实性检验;高光谱遥感卫星;商业卫星

中图分类号: TP212.14; TP202+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0098-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221108003

引用格式: 刘宁,刘其悦,朱霞,等.珠海一号高光谱卫星辐射精度真实性检验研究[J].遥测遥控,2023,44(3):98-106.

Research on the validation of radiometric accuracy of ZhuHai-1 hyperspectral satellite

LIU Ning, LIU Qiyue, ZHU Xia, ZHANG Wenhao, JIN Yongtao, GUO Ziyang
(North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: ZhuHai-1 (OHS) hyperspectral commercial remote sensing satellite data is playing an increasingly important role in national economic construction. At present, there are few research results on the verification and evaluation of the quality and accuracy of commercial remote sensing satellite data. In this paper, based on the measured data on the ground, the radiation accuracy of OHS satellite hyperspectral data is tested and quantitatively analyzed. The results show that: firstly, the apparent radiance of OHS satellite has a good linear correlation with the measured results, and the correlation coefficient R^2 is greater than 0.7. Secondly, compared with the measured results, the apparent radiance of each channel of OHS satellite is generally low, but the spectral curve shape of both channels is basically consistent. Thirdly, as time goes on, the performance of OHS sensor may be attenuated, and the attenuation degree of different channels is different. Among the 31 channels, the number of channels whose relative difference with the measured value is within 20% is 9. There are 14 in 20% - 30% and 8 in 30% - 40%.

Keywords: OHS satellite; Radiometric accuracy; Validation; Hyperspectral remote sensing satellite; Commercial satellite

Citation: LIU Ning, LIU Qiyue, ZHU Xia, et al. Research on the validation of radiometric accuracy of ZhuHai-1 hyperspectral satellite[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 98-106.

引 言

“珠海一号(OHS)”高光谱卫星是国内首个完成发射并组网的商用高光谱卫星星座。自发射升

空以来,OHS高光谱遥感数据已经在农业、林业、环境监测及海洋监测等领域得到广泛应用^[1-4],发挥了巨大效益。遥感数据产品的真实性检验指独立地、量化地评价遥感卫星数据和产品的精度

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0127300);河北省全职引进高端人才科研项目(2020HBQZY002);北华航天工业学院博士基金项目(BKY-2022-13, BKY-2021-30);河北省自然科学基金(D2020409003);国防基础科研项目(JCKY2020908B001, JCKY2019407D004);高分辨率对地观测系统重大专项(30-Y30F06-9003-20/22);廊坊市科技局(2021011078);国家科技重大专项(67-Y50G04-9001-22/23)

收稿日期: 2022-11-08 **修回日期:** 2022-11-25

和不确定性的过程,是目前遥感领域的研究热点^[5-11]。通过真实性检验研究,可促进遥感数据质量的提高,从而增加用户对数据产品的认可度。辐射精度作为表征遥感卫星数据质量的基础指标,其决定了遥感卫星数据的应用效果和准确性^[25,26]。目前,国内针对非商业遥感卫星数据辐射精度开展了长期真实性检验研究并积累了大量研究成果。如文献[9]运用地面观测太阳总辐射检验并校正FY-4A反演的地表太阳入射辐射;文献[12]采用信噪比、动态范围两个指标评价了GF-6星辐射质量;文献[13]和文献[14]通过对GF-1星进行了长时间序列的定标,检验了GF-1星的辐射定标系数的稳定性;文献[15]在敦煌辐射定标场开展试验,验证了GF-2卫星的辐射精度变化情况;文献[16]对GF-5卫星AHSI高光谱相机的辐射性能进行了综合评估;文献[17]基于HJ-1A/B卫星地面同步测量数据,验证HJ-1A/B卫星CCD相机多次在轨辐射定标结果的精度;文献[18]在四个不同站点对北京一号小卫星传感器和数据的辐射精度进行了测试和验证评价;文献[19-21]对MO-DIS影像辐射精度的准确性以及辐射状态进行了真实性检验与定量评价。

与国内气象卫星、资源卫星、高分卫星、环境卫星等成熟遥感卫星系统相比,国内商业遥感卫星在快速发展的同时,对卫星载荷的性能与数据产品精度综合评价和验证研究方面稍显落后,相关成果较少。OHS卫星自发射至今已在轨运行超过2年,针对其高光谱载荷数据辐射精度开展真实性检验研究具有实际意义。

本文以OHS高光谱载荷为研究对象,以格尔木试验场为研究区,选择大面积均一下垫面,通过实地采集光谱数据的方式,模拟得到了卫星入瞳处的表观辐亮度,采用直接检验的方法实现了对OHS卫星的辐射精度的真实性检验,定量分析了其误差分布、误差大小和规律。

1 研究区概况

本文研究区为青海省格尔木市大灶火东,位

于市区以西约50 km处,海拔高度约2 780 m,中心经纬度坐标为E94°33'56.59", N36°21'42.96"。研究区内地物类型主要为沙地,核心面积大于3 km×3 km。研究区内地域开阔,地势平坦均一,周边无重工业,远离人类污染源,大气清洁且人烟稀少,受人为因素干扰少,稳定性较好,适合开展真实性检验研究工作。研究区如图1所示。

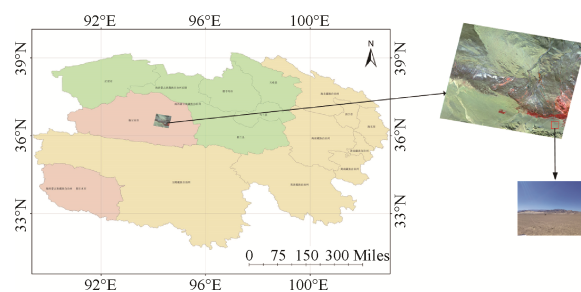


图1 研究区域

Fig.1 The study area

2 数据

本文试验数据主要包括:OHS高光谱数据,地表实测光谱数据和大气参数数据。

2.1 OHS高光谱数据

“珠海一号(OHS)”是珠海欧比特宇航科技股份有限公司在2019年9月19日发射升空的高光谱遥感卫星。OHS卫星搭载3个CMOS探测器,采用推扫式成像,见表1。本文采用的影像数据是2021年9月28日过境研究区域的卫星数据,如图2所示。成像当天研究区上空无云覆盖,影像质量较高。影像信息见表2。

2.2 地表实测光谱数据与大气数据

2021年9月20日,在研究区内开展了实地数据采集。选取研究区内地势平坦、地物类型单一且大于3 km×3 km的场地作为实验区,以保证实测数据的代表性。共选择了6个采样点位,如图3所示,为了降低尺度效应和边缘效应,每个采样点位的面积均大于30 m×30 m,在每个采样点位中心区域用SVC HR-1024光谱仪共采集5条地表光谱数

表1 OHS卫星及载荷信息

Table 1 OHS satellite and spaceships informations

卫星/ 载荷	发射 时间	光谱 范围(nm)	通道数	空间 分辨率(m)	光谱 分辨率(nm)	运行 轨道	轨道 高度(km)	轨道 倾角(°)
OHS/CMOS	2019.9.19	400~1 000	32	10	2.5	太阳同步轨道	500	98

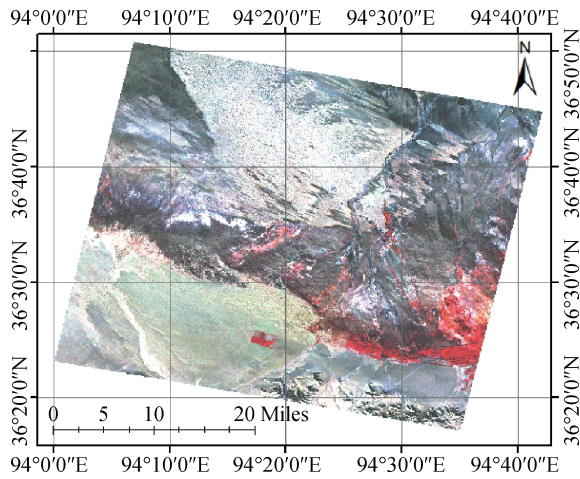


图 2 待检验 OHS 影像

Fig.2 The OHS image to be verified

据。数据采集时间为 11:00-14:00。为了降低太阳角度以及大气变化的影响, 每 5 分钟左右重新测量参考板, 以重新优化调整仪器的积分时间和积分次数。在采集光谱数据的同时, 记录采样点位的几何定位信息。将每个采样点位采集的 5 条地表光谱数据求均值, 作为该采样点的地表反射率数据, 如图 4 所示。

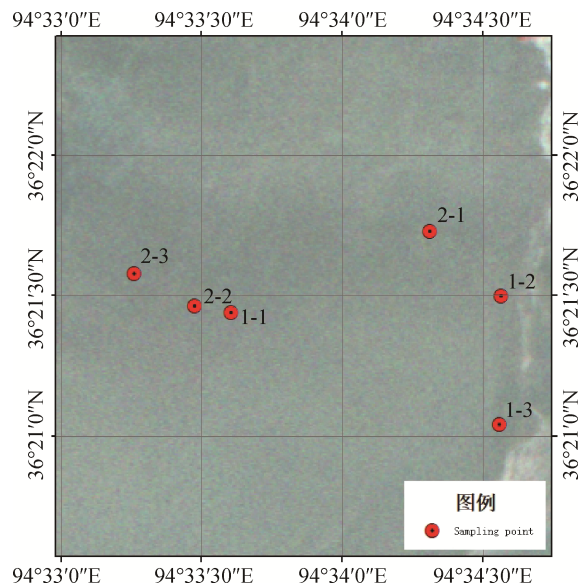


图 3 采样点位分布

Fig.3 Distribution of sampling points

大气参数主要为气溶胶光学厚度。本文利用 OHS 影像成像当天的 MODIS 气溶胶产品, 如图 5 所示, 通过计算得到波长 550 nm 处的气溶胶光学厚度值为 0.103。

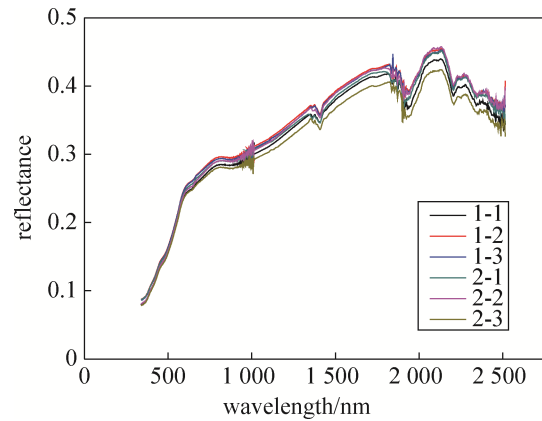


图 4 地表实测光谱数据

Fig.4 Surface measured spectral data

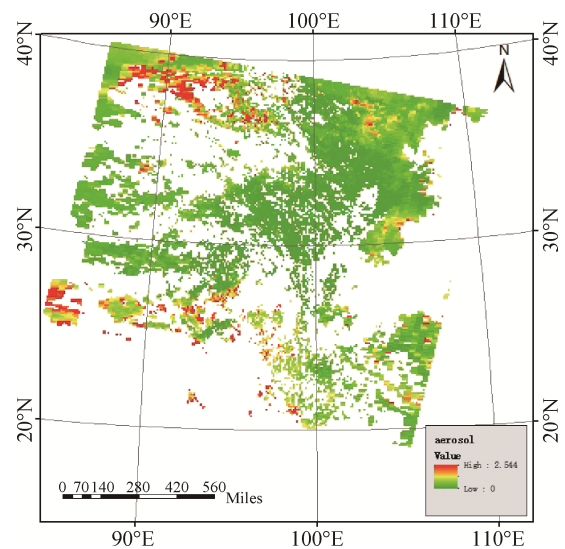


图 5 MODIS 气溶胶产品

Fig.5 MODIS aerosol products

3 研究方法

遥感数据辐射精度的真实性检验实质是对卫星传感器定标系数的准确性进行检验验证, 并通过表观辐射亮度或表观反射率等物理量来实

表 2 待检验 OHS 影像信息

Table 2 The OHS image informations

卫星/载荷	成像日期	成像时间/UTC	太阳高度角/°	太阳方位角/°	观测高度角/°	观测方位角/°
OHS-3C/CMOS1	2021.9.28	6:48	347.589 180	208.697 490	76.873 673	115.844 799

现^[23,24]。使用官方发布的OPenOHS软件对OHS数据进行了辐射定标,得到OHS表观辐亮度。利用地面实测光谱以及气溶胶数据,通过6S辐射传输模型^[22]计算等得到OHS各通道入瞳处的等效表观辐亮度。最后,计算等效表观辐亮度与OHS表观辐亮度的相关系数、相对差异、均方根误差。方法流程图如图6所示。

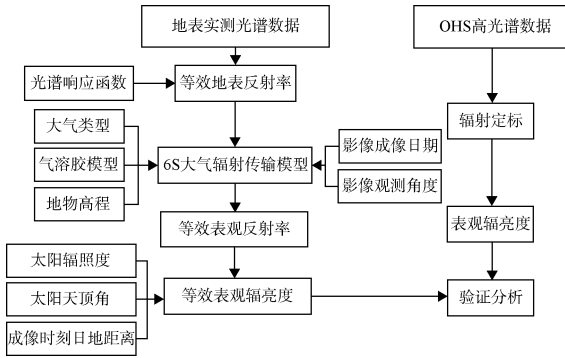


图6 方法流程图

Fig.6 Flow-process diagram

3.1 等效地表反射率

利用如图7所示的OHS卫星传感器光谱响应函数将地面实测光谱数据进行卷积计算,得到OHS等效地表反射率。计算公式如下:

$$\rho_i(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中, $\rho_i(\lambda)$ 表示传感器第*i*通道等效地表反射率; $\rho(\lambda)$ 表示地面实测光谱数据; $R_i(\lambda)$ 表示传感器第*i*通道光谱响应函数; λ_1 、 λ_2 为传感器第*i*通道的下限和上限。

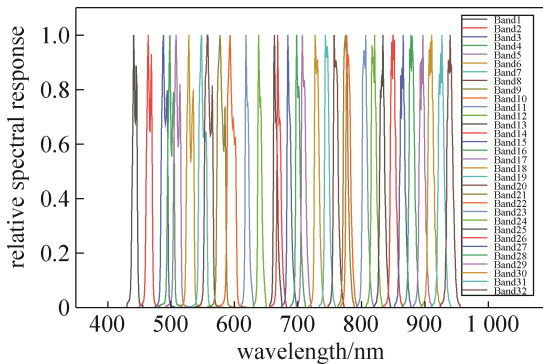


图7 OHS卫星CMOS1传感器的光谱响应曲线

Fig.7 Spectral response of CMOS1 sensor of OHS

3.2 6S辐射传输模型

6S辐射传输模型^[22,27]模拟了大气顶层太阳辐射能量通过大气传递到地表,以及地表的反射辐射通过大气到达传感器的整个辐射传输过程。该模型考虑了水蒸气、二氧化碳、臭氧、氧气的吸收、分子和气溶胶的散射,以及非均匀地面和双向反射问题。假定反射率 ρ_r^u 的目标物为均一朗伯面,传感器所接受的大气顶层反射率可表示为:

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + \frac{\rho_i^u T(\theta_s) T(\theta_v)}{1 - \rho_i^u S} \quad (2)$$

式中, $\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi_v)$ 是传感器所接受的大气顶层反射率; $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v)$ 是瑞利散射和气溶胶散射引起的程辐射; S 是大气球面反射率; $\theta_s, \theta_v, \phi_v$ 分别为太阳天顶角、观测天顶角和方位角; $T(\theta_s) = e^{-\tau \mu_s} + t_d(\theta_s)$ 是下行辐射总透射率; $T(\theta_v) = e^{-\tau \mu_v} + t_d(\theta_v)$ 是上行辐射总透射率; $t_d(\theta_s)$ 代表下行散射辐射透射率因子; $t_d(\theta_v)$ 代表上行散射辐射透射率因子; $e^{-\tau \mu_s}$ 和 $e^{-\tau \mu_v}$ 为下行直射辐射和直接透射到传感器上行辐射; $\mu_s = \cos(\theta_s)$ 、 $\mu_v = \cos(\theta_v)$ 分别为太阳和卫星天顶角的余弦值; τ 为大气光学厚度。

3.3 OHS入瞳处等效表观辐亮度

利用6S辐射传输模型计算等效表观反射率,然后将等效表观反射率、日地距离修正因子、等效太阳辐照度、太阳天顶角等参数输入到式(3)中,计算等效表观辐亮度。

$$L_i^* = \frac{\rho_i^* \cos(\theta_s) E_s}{\Pi d_s} \quad (3)$$

式中, θ_s 为太阳天顶角; E_s 为日地平均距离处大气层外等效太阳辐照度(单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$); d_s 为日地距离修正因子; ρ_i^* 为等效表观反射率。

4 结果与分析

通过卷积运算,得到各通道等效地表反射率数据。将6S辐射传输模型的输入参数(表3)输入模型中,得到等效表观反射率数据。将等效表观反射率数据、太阳天顶角、太阳辐照度、日地距离修正因子输入式(3),得到等效表观辐亮度。

由于OHS第20通道等效表观辐亮度计算结果存在异常,本文辐射精度验证研究结果中不包括该通道。OHS各通道6个点位的等效表观反射率和等效表观辐亮度如图8、图9所示。

从图10中可以看出,采用官方定标系数计算

表 3 6S 主要输入参数

Table 3 Main input parameters of 6S

参数名	参数值
太阳天顶角(°)	42.410 82
太阳方位角(°)	208.697 490
卫星天顶角(°)	13.126 327
卫星方位角(°)	115.844 799
成像日期	2021.9.28
大气类型	中纬度夏大气
气溶胶模型	沙漠型气溶胶模式
550 nm 处气溶胶光学厚度	0.103
高程(km)	-2.780
传感器高度(km)	-1 000

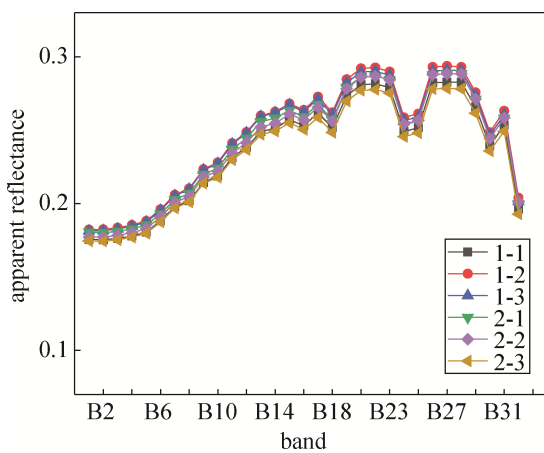


图 8 OHS 等效表观反射率

Fig.8 Apparent reflectance of OHS

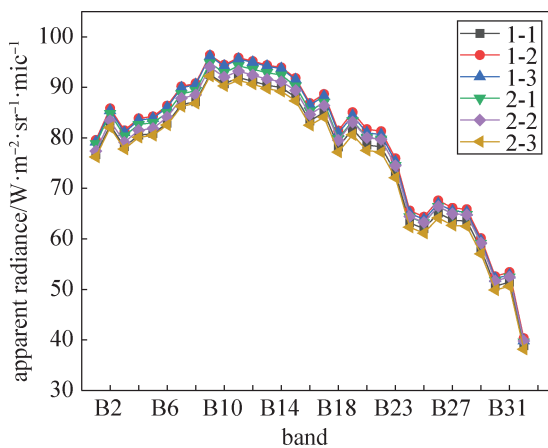


图 9 OHS 等效表观辐亮度

Fig.9 Apparent radiance of OHS

的 OHS 表观辐亮度与地面实测数据得到等效表观辐亮度具有较好的线性相关关系, 6 个点位的相关系数 R^2 均大于 0.7。其中, 1-1、2-3 点位相关系数

最大, 为 0.77; 2-1 点位相关系数最小, 为 0.74。从图 11 可以看出, 与实测结果相比, OHS 表观辐亮度值整体偏低, 但是 OHS 各通道表观辐亮度曲线随波长的变化趋势与实测结果基本一致。计算了 6 个点位各通道的均方根误差 RMSE(表 4), 可以看到大部分通道的 RMSE 在 10~30(W/m²/sr/mic)之间, 通道数为 24 个; RMSE 小于 10 的通道只有 3 个, 其中第 24 通道 RMSE 最小。

此外, 通过公式 (4) 计算 OHS 各通道表观辐亮度与实测结果的相对差异 $Rela_diff$ 。

$$Rela_diff_i = \frac{\hat{y}_i - y_i}{\hat{y}_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $Rela_diff_i$ 表示 OHS 第 i 通道表观辐亮度与实测结果的相对差异, $i=1,2,3,\dots,32$; \hat{y}_i 表示第 i 通道等效表观辐亮度; y_i 表示第 i 通道 OHS 表观辐亮度。

按 $Rela_diff \leq 10\%$, $10\% < Rela_diff \leq 20\%$, $20\% < Rela_diff \leq 30\%$ 和 $Rela_diff > 30\%$ 进行分组(表 5)。从表 5 中可以看出, 第 24 通道的 $Rela_diff$ 在 10% 以内; 6 个点位中, 第 2-3 点位 $Rela_diff \leq 20\%$ 的通道数最多, 数量为 9 个; $Rela_diff$ 在 20%~30% 为 14 个, 30%~40% 为 8 个。其他点位的结果差异不大, 总体来看大部分通道的 $Rela_diff$ 都在 30% 以内。总体来看, OHS 高光谱相机的表观辐射亮度与实测结果存在一定差异, 原因可能是卫星在轨运行近三年后传感器辐射性能发生了衰减, 但是不同通道的衰减程度不一样; 初始辐射定标系数已经难以适用高精度的应用需求, 为了保证数据质量精度, 提高 OHS 数据的应用准确性, 可通过广泛使用且精度较高的场地定标计算绝对定标系数, 其精度通常可以达到 95% 以上^[28]。

5 结束语

本文基于地表实测光谱数据, 采用直接检验法实现了对珠海一号高光谱遥感卫星表观辐亮度的真实性检验。① OHS 卫星影像的表观辐亮度与等效表观辐亮度具有较好线性相关关系, 相关系数 R^2 位于 0.74~0.77 之间。② 整体上看, 与实测结果相比 OHS 表观辐亮度值偏低, 但 OHS 表观辐亮度随波长变化趋势与等效表观辐亮度基本一致。③ OHS 卫星传感器辐射性能可能发生了衰减, 不同通道的衰减程度不一。在 31 个通道中, 部分通道具有较高的辐射精度。其中, 相对差异小于

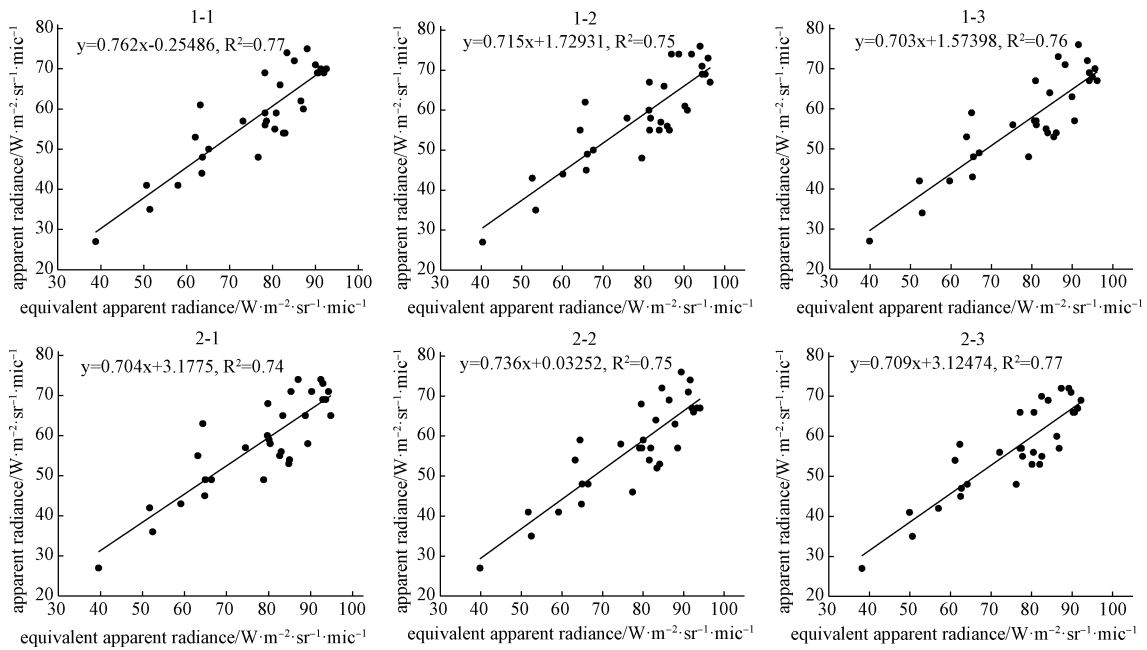


图 10 等效表观辐亮度与表观辐亮度散点图

Fig.10 Scatter plot of equivalent apparent radiance and apparent radiance

20%的通道最高有9个，第24通道精度最高；此外，相对差异在20%~30%为14个，30%~40%为8个。说明OHS的辐射精度方面整体上存在一定误差，因此，需要及时更新在轨辐射定标系数，以保证OHS数据质量与精度。

表 4 均方根误差(RMSE)

Table 4 Root Mean Square Error

均方根误差/W·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·mic ⁻¹	通道数
<5	1(B24)
5~10	2(B25,B30)
10~20	12
20~30	12
>30	4

本文在研究过程中没有获取地面实测的大气参数，且OHS数据与地面数据存在时间差，可能会对结果带来不确定性。此外，本研究的检验场地、地物类型和数据量较单一，未来将针对OHS开展多场地、长时间序列下不同地物的综合评价，以研究OHS辐射精度的变化规律，进一步提高研究结果的代表性。

参考文献

[1] MO Y, ZHONG R, CAO S. Orbita hyperspectral satellite image for land cover classification using random forest classifier[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15 (1): 014519.
 [2] LI Q, ZHONG R, WANG Y. A method for the destriping

表 5 相对差异

Table 5 Relative difference

点位	通道数			
	Rela_diff≤10%	10%<Rela_diff≤20%	20%<Rela_diff≤30%	Rela_diff>30%
1-1	1(B24)	7(B15,B16,B17,B18,B19,B25,B30)	15	8
1-2	1(B24)	7(B14,B15,B16,B17,B18,B25,B30)	11	12
1-3	1(B24)	6(B15,B16,B17,B18,B25,B30)	13	11
2-1	1(B24)	6(B14,B16,B17,B18,B25,B30)	14	10
2-2	1(B24)	5(B13,B15,B16,B18,B25)	15	9
2-3	1(B24)	8(B14,B15,B16,B17,B18,B19,B25,B30)	14	8

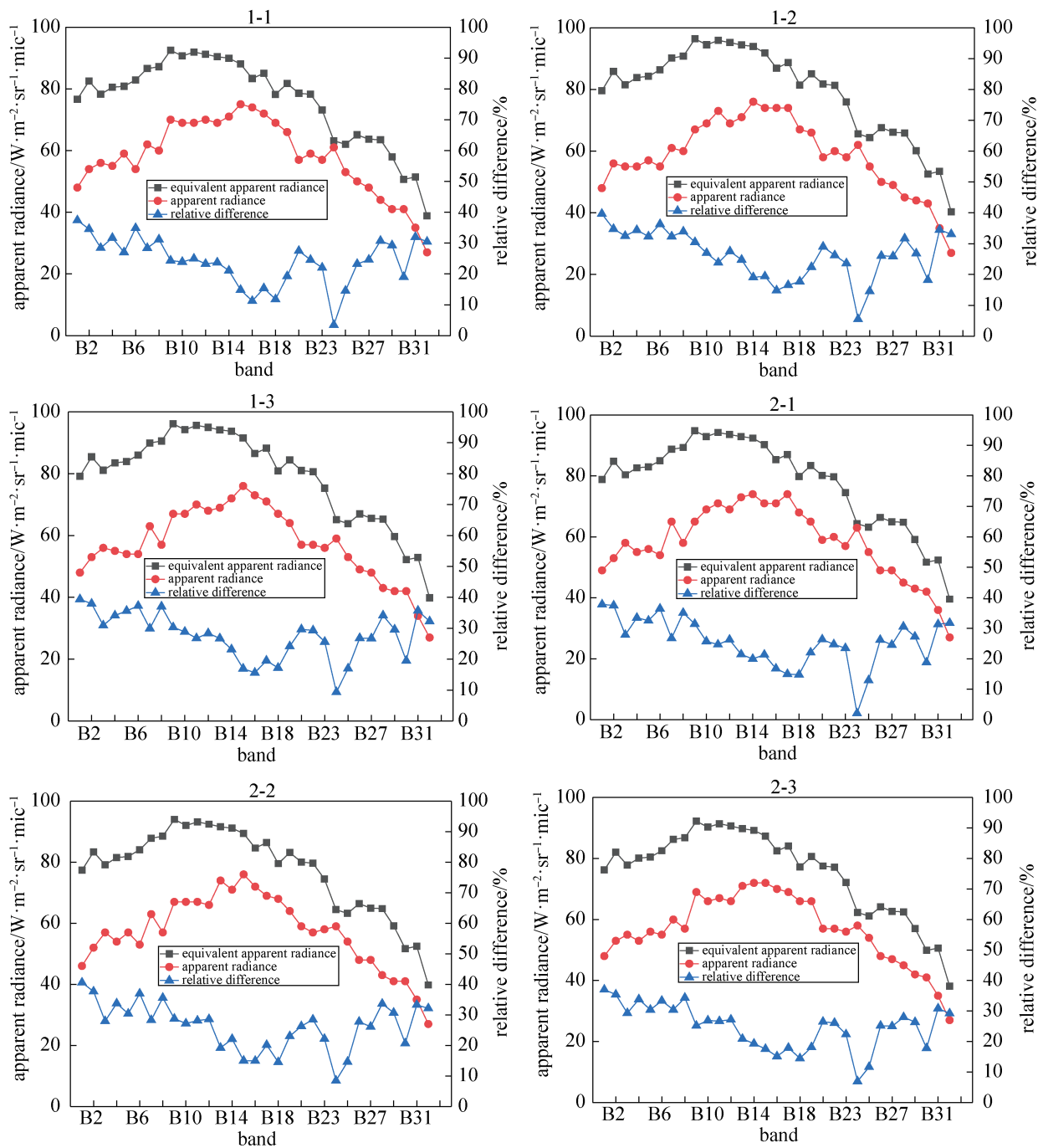


图 11 表观辐亮度曲线
 Fig.11 Apparent radiance

of an orbita hyperspectral image with adaptive moment matching and unidirectional total variation[J]. Remote Sensing, 2019, 11(18): 2098.

[3] 纪婵, 张赫林. 珠海一号高光谱卫星数据农业遥应用[J]. 卫星应用, 2019(8): 23-28.
 [4] 边福强, 王晓宇, 杨志, 等. 应用珠海一号卫星高光谱数据的红树林遥感提取方法[J]. 航天器工程, 2021, 30(6):

182-187.

BIAN Fuqiang, WANG Xiaoyu, YANG Zhi, et al. Remote sensing extraction method of mangrove forest using Zhuhai-1 Satellite hyperspectral data[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(6): 182-187.
 [5] CLAVERIE M, VERMOTE E F, WEISS M, et al. Validation of coarse spatial resolution LAI and FAPAR time

- series over cropland in southwest France[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139(4): 216-230.
- [6] HAO L, XIANQIANG H, JING D, et al. Validation of the remote sensing products retrieved by geostationary ocean color imager in Liaodong Bay in spring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401002.
- [7] LIANG S, FANG H, CHEN M, et al. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: Methods and preliminary results[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 149-162.
- [8] MINGGUO M, TAO C, XIN L, et al. A prototype network for remote sensing validation in China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 5187-5202.
- [9] 王传辉, 申彦波, 翟振芳, 等. FY-4A星地面太阳辐射产品检验与订正—以安徽省为例[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(09): 159-169.
- WANG Chuanhui, SHEN Yanbo, ZHAI Zhenfang, et al. Verifications and corrections of surface solar radiation products from FY-4A satellite—As a case study in Anhui Province[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(9): 159-169.
- [10] MORISETTE J T, BARET F, LIANG S. Special Issue on global land product validation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2004, 42(3): 687.
- [11] JUSTICE C, BELWARD A, MORISETTE J, et al. Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(17): 3383-3390.
- [12] 纪睿. 高分六号卫星辐射精度标定与分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [13] 丁闯. 高分一号宽幅多光谱时间序列定标[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [14] 巫兆聪, 许诗旋. 基于同步观测的高分一号卫星影像辐射质量评价[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(7): 10-14.
- [15] HAN Q J, MA L L, LIU L, et al. On-orbit calibration and evaluation of GF-2 satellite based on wide dynamic ground target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 372-379.
- [16] LIU Y N, SUN D X, CAO K Q, et al. Evaluation of GF-5 AHSI on-orbit instrument radiometric performance[J]. *Journal of Remote Sensing(Chinese)*, 2020, 24(4): 352-359.
- [17] HAN Q J, FU Q Y, ZHANG X W, et al. Validation and analysis of in-flight radiation properties of CCD camera on HJ-1A/B satellite[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 29-36.
- [18] CHEN Z C, ZHANG B, LUO W F, et al. On-orbit performance assessment of Beijing-1 microsatellite sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 468-476.
- [19] 巩慧, 田国良, 余涛, 等. MODIS可见近红外通道定标与真实性检验[J]. *北京交通大学学报*, 2010, 34(1): 109-113.
- GONG Hui, TIAN Guoliang, YU Tao, et al. Calibration and validation of MODIS visible and near-infrared bands [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2010, 34(1): 109-113.
- [20] XIONG X, BRIAN W, AMIT A, et al. Status of MODIS instrument and radiometric calibration[C]//IGARSS, 2013: 4419-4412.
- [21] WU A, XIONG X, CAO C, et al. Assessment of SNPP VIIRS VIS/NIR radiometric calibration stability using Aqua MODIS and invariant surface targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(5): 2918-9224.
- [22] VERMOTE E F, TANRE D. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [23] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 环境卫星HJ-1A超光谱成像仪在轨辐射定标及真实性检验[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(11): 1312-1321.
- GAO Hailiang, GU Hangfa, YU Tao, et al. HJ-1A HIS on-orbit radiometric calibration and validation research[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2010, 40(11): 1312-1321.
- [24] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 基于内蒙研究区域的定标系数真实性检验方法研究与不确定性分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(2): 287-294.
- GAO Hailiang, GU Hangfa, YU Tao, et al. Method study and uncertainty analysis of calibration coefficients validation based on the Inner Mongolia test site[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(2): 287-294.
- [25] 高海亮, 顾行发, 周翔, 等. 遥感共性产品真实性检验系统框架设计[J]. *无线电工程*, 2021, 51(12): 1389-1396.

- GAO Hailiang, GU Hangfa, ZHOU Xiang, et al. Framework design of remote sensing common product validation system[J]. Radio Engineering, 2021, 51(12): 1389-1396.
- [26] 李传荣, 马灵玲, 唐伶俐, 等. 面向定量遥感的高分辨遥感综合定标场及其应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 198-219.
- LI Chuanrong, MA Lingling, TANG Lingli, et al. A comprehensive calibration site for high resolution remote sensors dedicated to quantitative remote sensing and its applications[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 198-219.
- [27] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(4): 611-618.
- GHULAM Abduwasit, QIN Qiming, ZHU Lijiang. 6S model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(4): 611-618.
- [28] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展[J]. 遥感信息, 2010(4): 117-128.
- GAO Hailiang, GU Hangfa, YU Tao, et al. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors[J]. Remote Sensing Information, 2010(4): 117-128.

[作者简介]

刘 宁 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感产品真实性检验。

刘其悦 1985 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为辐射定标和遥感产品真实性检验。

朱 霞 1989 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为地理时空数据挖掘与分析。

张文豪 1986 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气遥感。

金永涛 1977 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为遥感技术与应用和计算机网络与信息安全。

郭子阳 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为辐射定标。

(本文编辑: 杨秀丽)