

引用格式: YANG Song, HUANG Shuai, BAI Yang, *et al.* On-orbit absolute radiometric calibration for the Multi-Spectral Imager of Jilin-1/GP02 based on multiple stable targets [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(4): 803-815. [杨松, 黄帅, 白杨, 等. 基于多个稳定目标的吉林一号光谱02卫星多光谱成像仪的在轨绝对辐射定标[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(4): 803-815.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0803

## 基于多个稳定目标的吉林一号光谱02卫星多光谱成像仪的在轨绝对辐射定标

杨松, 黄帅, 白杨, 贾益, 巴倩倩, 田世强, 钟兴  
(长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 卫星在轨后精准的绝对辐射定标是对其观测数据进行定量化应用的基础。与传统的场地定标法、交叉定标法相比, 基于稳定场景目标的定标方法具有成本低、频次高、可实现历史数据定标等优点。使用中分辨率成像光谱仪(MODIS)的MCD19A1产品、MCD43A1产品和MOD03(MYD03)产品模拟出MODIS band8在光谱02卫星观测条件下的方向反射率, 再结合MCD43A1产品中MODIS band1~band5的方向反射率、MCD19A2产品中的气溶胶参数、水汽参数以及MOD07(MYD07)产品中的臭氧参数, 对2021年10月光谱02卫星多光谱成像仪对多个稳定目标成像的入瞳辐亮度进行辐射传输模拟, 实现对其在轨绝对辐射定标。对该定标系数的真实性检验结果表明: 与发射前定标系数相比, 基于重新标定系数进行大气校正的结果与哨兵2号反射率产品的差异明显减小; 重新标定的观测辐亮度与包头地基自动辐射定标数据的平均相对差异为3.18%, 说明定标结果具有较高的精度。研究结果可以为使用稳定目标对中高空间分辨率光学遥感卫星在轨绝对辐射定标提供方法支撑。

**关键词:** 在轨绝对辐射定标; 吉林一号; 多光谱; 大气校正

**中图分类号:** TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)04-0803-13

### 1 引言

随着遥感在各领域应用的逐步深入, 遥感数据的定量化已经成为遥感技术进一步发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。遥感应用在起始阶段时, 最初的定量化应用是基于监督和非监督分类的定量估算, 这种应用方式不要求对传感器进行绝对辐射定标<sup>[2]</sup>。绝对辐射定标能够将传感器响应的灰度值DN(Digital Number)转换成入瞳处辐亮度或表观反射率, 从而进一步提高遥感影像定量反演和解译能力, 推动遥感定量化应用的发展。因此, 对卫星传感器进行精度可靠的绝对辐射定标, 对定量遥感的发展具有重要的

意义。

绝对辐射定标可分为发射前定标和在轨绝对辐射定标。发射前定标即实验室绝对辐射定标, 通过传感器对积分球的成像DN值与已知的积分球辐射能量进行拟合, 得到传感器各通道的绝对辐射定标系数。发射前定标实验的环境为可控环境, 故具有能够在传感器上天前对辐射性能进行充分探究并排查问题的优势<sup>[3]</sup>。由于卫星传感器在轨运行过程中, 辐射特性会随外界环境和系统老化等因素的影响发生一定变化<sup>[4]</sup>。因此除了发射前对传感器进行绝对辐射定标外, 在发射后还需要对传感器进行在轨绝对辐射定标。

收稿日期: 2022-05-12; 修订日期: 2023-06-15

基金项目: 国家重点研发计划“国产中高分辨率宽波段多光谱卫星数据集构建和高效国际化服务”(2019YFE0127000)。

作者简介: 杨松(1994—), 男, 吉林靖宇人, 工程师, 主要从事光学遥感卫星辐射定标与辐射预处理研究。E-mail: 1055174356@qq.com

通讯作者: 白杨(1983—), 女, 辽宁鞍山人, 博士, 研究员, 主要从事卫星遥感数据处理等方面的研究。E-mail: baiy776@163.com

在轨绝对辐射定标方法可分为4类:星上定标、场地定标、交叉定标和场景定标<sup>[5]</sup>。星上定标需要利用星上定标设备,通过内置的定标灯光源或引入太阳、月亮等外部光源,实现在轨定标<sup>[6]</sup>。星上定标具有定标精度高、效率高、可高频次定标、不受地表和大气影响等优点<sup>[7]</sup>,但需依赖星上定标设备,技术实现难度大,研制成本高。场地定标是在卫星过境时刻,通过星地同步试验测量地表、大气参数,结合大气辐射传输模型获取卫星过境时刻的表观辐亮度,从而与影像DN值拟合获取在轨绝对辐射定标系数<sup>[8]</sup>。该方法具有较高的精度,但需要开展星地同步实验,定标成本高。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、可实现历史数据定标等优点<sup>[9]</sup>。但其定标精度受两卫星的观测几何条件、成像时刻天气条件、波段匹配差异等因素影响。为减少上述因素对定标精度的影响,近些年国内外学者发展出了同步星下点过境 SNO (Simultaneous Nadir Overpass) 交叉定标方法。

该方法要求两传感器星下点交叉过境的时间间隔较小(如 $<10\text{ min}$ ),来减少两传感器入瞳辐亮度的相对差异,可实现 $5\%\sim 7\%$ 的定标精度,但对成像时间间隔和场地均匀性的较高要求使得该方法难以获得较多的定标样本<sup>[10-11]</sup>。场景定标方法利用地球表面的某一类稳定的场景作为研究对象,构建相应的场景模型,结合卫星不同时间下对场景成像的DN值来对卫星辐射性能进行评估。该方法起初主要用于对卫星传感器进行长时间序列的相对定标,或基于不同时间下的相对衰减关系和某一时刻的绝对定标系数来推演各时间下的绝对定标系数<sup>[12-13]</sup>。后有学者通过使用多个稳定场景目标对FY-3A/MERSI和FY-3C/MERSI等中等分辨率传感器进行了在轨绝对辐射定标,结果表明该方法可实现较高的定标精度<sup>[14-15]</sup>。使用多个稳定目标进行在轨绝对辐射定标具有人力物力成本低、可定标频次高、可实现历史数据定标等优点,但目前的研究主要集中在对搭载于气象卫星上、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。

鉴于此,本文以吉林一号光谱02卫星为例,探究使用基于多个稳定目标的方法对幅宽相对较小、无法实现每日全球覆盖的中高分辨率多光谱传感器进行在轨绝对辐射定标的可行性。

## 2 数据与研究区

### 2.1 研究区

用于定标的稳定目标场地需满足地表稳定、大气条件相对稳定、空间分布均匀且已被广泛用于卫星传感器辐射性能评估的条件。表1为所选取的稳定目标的位置信息,其中的多数场地为Cosnefroy利用Meteosat-4进行空间均匀性和时间稳定性评价、利用国际卫星云气候项目ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)数据和气象站点降雨数据进行大气稳定性评估以及利用SPOT-HRV的地形数据进行地形评估后所筛选的沙漠场<sup>[16]</sup>。另外,其中的Sonora场地为国际地球观测卫星委员会(GEOS)的定标与真实性检验工作组(WGCV)所推荐使用的一个沙漠场地<sup>[17]</sup>。

表1 文章使用的稳定场地位置列表

Table 1 The location list of multiple stable targets used in this article

场地名称	纬度/°	经度/°
Arabia1	18.88	46.76
Arabia2	20.13	50.96
Algeria 3	30.32	7.66
Algeria 5	31.02	2.23
Libya 1	24.42	13.35
Libya 4	28.55	23.39
Mali	19.12	-4.85
Mauritania 1	19.40	-9.30
Mauritania 2	20.85	-8.78
Niger2	21.37	10.59
Sonora	31.95	-114.1
Sudan1	21.74	28.22

### 2.2 光谱02卫星影像数据

吉林一号光谱02星又名“文昌超算一号”,为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个多光谱成像仪(PMS1、PMS2),每个多光谱成像仪具有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,覆盖了从405 nm到1 040 nm的光谱范围。具体指标如表2所示。

选取2021年10月光谱02卫星PMS2多光谱成像仪对表1中定标场地的成像影像,对该传感器进行辐射定标。影像选取标准为:各定标场地无云遮

挡、观测天顶角不大于 20°。

表 2 吉林一号光谱 02 星多光谱成像仪技术指标  
Table 2 The technical specifications of the Multi-Spectral Imager of Jilin-1/GP02

波段	中心波长/ nm	波段范围/ nm	空间分辨率/ m
B0	624.08	450~800	5
B1	415.21	403~423	5
B2	444.69	433~453	5
B3	483.36	450~515	5
B4	559.61	525~600	5
B5	656.75	630~680	5
B6	836.14	785~900	5
B7	487.41	485~495	10
B8	619.41	615~625	10
B9	660.75	650~680	10
B10	705.46	699~719	10
B11	742.51	733~748	10
B12	784.49	773~793	10
B13	863.44	855~875	20
B14	664.46	660~670	20
B15	681.94	678~685	20
B16	754.51	750~758	20
B17	758.87	759~763	20
B18	941.43	935~955	20
B19	1 013.97	1 000~1 040	20

## 2.3 MODIS 数据产品

基于多个稳定目标进行定标时,在对待定标卫星影像提取灰度值之外,还需模拟计算待定标传感器对稳定目标成像的入瞳辐亮度值。这个过程需要将稳定目标场地的地表反射率和大气参数输入大气辐射传输模型。定标场地的地表反射率数据使用 MODIS 的双向反射分布函数(BRDF)产品(MCD- 43A1)、双向反射比因子(BRF)产品(MCD19A1),大气参数中气溶胶光学厚度和水汽含量使用 MOD- IS 基于长时间序列多角度算法反演的气溶胶产品(MCD19A2),大气参数中的臭氧含量使用 MODIS 的 MOD07(MYD07)大气产品。

其中,MCD43A1 产品提供 MODIS 的 band1~band5 波长处的 BRDF 模型参数值,用于计算稳定目标场地在 MODIS band1~band5 波长处 500 m 空间分辨率的方向反射率值,MCD19A1 产品与 MCD- 43A1 产品、MOD03(MYD03)产品共同计算生成 MODIS band8 波长处 1 km 空间分辨率的方向反射率值。MCD19A2 气溶胶产品的空间分辨率为 500 m,MOD07 大气产品的空间分辨率为 1 km。

## 3 研究方法

反射率基法是场地定标方法中的一种,是在卫星飞越定标场地上空时,在地面进行地表反射率、大气参数的同步测量,将测量的地表、大气参数输入辐射传输模型计算出卫星传感器各通道入瞳处的表观辐亮度或表观反射率,与传感器对定标场地成像的影像 DN 值比较计算出卫星的在轨绝对定标系数<sup>[18-19]</sup>。使用反射率基法模拟计算传感器的入瞳处辐亮度,需要输入成像时刻各场地的地表反射率和大气参数。实验使用 MODIS 的数据产品来代替所缺少的同步地面测量数据。

因选用的稳定目标场地多为沙漠地区,多非平坦地形,不同的光照角度、观测角度对方向反射率的影响应该被考虑。故选用 MODIS 的 BRDF 产品来计算传感器成像时刻所对应光照、观测几何条件下的地表方向反射率值。考虑到光谱 02 卫星的空间分辨率相比于 MODIS 较高,故研究使用 MODIS 的 MCD43A1 产品,该产品为 BRDF 产品,空间分辨率为 500 m、1 km,相对于其 0.05°×0.05°空间分辨率的 MCD43C1 产品,与光谱 02 卫星具有更小的空间分辨率差异。根据半经验核驱动 BRDF 模型理论<sup>[20]</sup>,太阳反射波段内地表各波长处的方向反射率可表示为:

$$R(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) + f_{vol}(\lambda)k_{vol}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + f_{geo}(\lambda)k_{geo}(\theta_s, \theta_v, \varphi) \quad (1)$$

其中: $\theta_s$ 为太阳天顶角; $\theta_v$ 为观测天顶角; $\varphi$ 为相对方位角; $\lambda$ 为波长; $k_{vol}$ 为通过体散射辐射传输模型计算出的体散射核<sup>[21]</sup>; $k_{geo}$ 为通过几何光学模型理论计算出的几何光学核<sup>[22]</sup>; $f_{iso}$ 为描述方向反射率中各向同性分量的 BRDF 参数; $f_{vol}$ 和 $f_{geo}$ 为描述两个核函数分量各自权重的 BRDF 参数。

MCD43A1 提供 MODIS band1~band7(645 nm、859 nm、469 nm、555 nm、1 240 nm、1 640 nm、2 130 nm)500 m 空间分辨率的 BRDF 参数值,即 $f_{iso}$ 、 $f_{vol}$ 和 $f_{geo}$ <sup>[23-24]</sup>,同时提供使用窄波段-宽波段反射率转化算法所计算的 3 个宽波段(300~700 nm、700~5 000 nm、300~5 000 nm)的 BRDF 参数<sup>[25]</sup>。故使用 MCD43A1 产品可计算得到任意光照—观测几何条件下的方向反射率 $R_\lambda$ , $\lambda$ 为 MODIS 各波段中心波长或宽波段的波段范围。由于光谱 02 卫星多光谱成像仪 B1 波段和 B2 波段的波长范围低于 MODIS band1~band7 中的最短波长 469 nm,故需要更短波长处的地表反射率来共同覆盖光谱 02 卫



星的全部波段范围。MCD19A1 产品提供 MODIS band1~band12 的 1 km 空间分辨率的观测 BRF 值。其中, band8 的中心波长为 412 nm, 若能得到待定标卫星观测条件下在该波长处的地表方向反射率值, 可与 MCD43A1 产品中 MODIS band1~band5 的方向反射率共同覆盖光谱 02 卫星 PMS2 的全部波段范围。基于此, 定义从 MODIS 观测条件下方向反射率向光谱 02 卫星观测条件下方向反射率转化的系数:

$$k_{\lambda} = \frac{R_{\lambda, \text{GP02}}}{R_{\lambda, \text{MODIS}}} \quad (2)$$

其中: MODIS 的光照、观测几何参数需要根据 MCD19A1 产品的成像信息从 MOD03(MYD03) 产品中获取。在可见光波段, 包括宽波段方向反射率在内, 使用 MCD43A1 产品可计算出  $R_{645\text{nm}}$ 、 $R_{469\text{nm}}$ 、 $R_{555\text{nm}}$  和  $R_{300-700\text{nm}}$ 。其中宽波段方向反射率  $R_{300-700\text{nm}}$  的波段范围覆盖了 412 nm, 同时也包含了其他可见光波段的方向反射率信息。故研究假定波长范围覆盖了 412 nm 的宽波段转化系数  $K_{300-700\text{nm}}$  和其他 3 个可见光范围内的转化系数  $K_{645\text{nm}}$ 、 $K_{469\text{nm}}$ 、 $K_{555\text{nm}}$  较为一致时, 整个可见光范围内的转化系数差异较小, 则此时  $K_{412\text{nm}}$  可近似用  $K_{300-700\text{nm}}$  代替, 作为在 412 nm 处将 MODIS 观测条件下方向反射率向光谱 02 卫星观测条件下方向反射率转化的系数。设定描述  $K_{300-700\text{nm}}$ 、 $K_{645\text{nm}}$ 、 $K_{469\text{nm}}$ 、 $K_{555\text{nm}}$  之间相对差异 RD(Relative Divergence) 的计算方式:

$$\text{RD} = \frac{\text{std}(K_{645\text{nm}}, K_{469\text{nm}}, K_{555\text{nm}}, K_{300-700\text{nm}})}{\text{mean}(K_{645\text{nm}}, K_{469\text{nm}}, K_{555\text{nm}}, K_{300-700\text{nm}})} \quad (3)$$

其中:  $\text{std}(K_{645\text{nm}}, K_{469\text{nm}}, K_{555\text{nm}}, K_{300-700\text{nm}})$  和  $\text{mean}(K_{645\text{nm}}, K_{469\text{nm}}, K_{555\text{nm}}, K_{300-700\text{nm}})$  分别为  $K_{645\text{nm}}$ 、 $K_{469\text{nm}}$ 、 $K_{555\text{nm}}$ 、 $K_{300-700\text{nm}}$  的标准差和均值。使用 MCD43A1 产品计算出各波段的  $R_{\lambda, \text{GP02}}$ 、 $R_{\lambda, \text{MODIS}}$ , 并进一步得到最终的 RD 后, 若 RD 不大于 0.04, 则有:

$$R_{412\text{nm}, \text{GP02}} = K_{300-700\text{nm}} \times \text{BRF}_{412\text{nm}, \text{MODIS}} \quad (4)$$

其中:  $\text{BRF}_{412\text{nm}, \text{MODIS}}$  为从 MCD19A1 产品中获取的定标场地在 MODIS 观测条件下的方向反射率。若 RD 大于 0.04, 则该定标点数据将不被用于 412 nm 波段的定标。

上述 MODIS band 1~band 5 和 band 8 的方向反射率可对光谱 02 星所有谱的波段构成的总光谱分布范围进行覆盖。经数据筛选与计算, 共有 22 景光谱 02 星测试影像的方向反射率结果, 如图 1 所示。

对光谱 02 卫星的入瞳辐亮度进行辐射传输模拟时, 除地表反射率之外还需输入同步的大气参

数, 包括气溶胶光学厚度、水汽含量和臭氧含量。由于缺少地面同步测量的大气数据, 文章使用 MODIS 大气产品中的大气参数作为辐射传输模拟的输入。MODIS 提供的包含气溶胶含量的大气产品主要有基于深蓝算法进行反演的 MOD04 数据和基于长时间序列多角度算法反演的 MCD19A2 产品<sup>[26-27]</sup>。由于 MOD04 产品对于具有浓密植被的区域具有较好的反演精度, 而稳定目标多为缺少植被地物的沙漠地区, 因此文章直接使用 MCD19A2 产品中的 550 nm 处气溶胶光学厚度作为辐射传输模拟的输入。同时, MCD19A2 产品中的水汽含量也一并被提取作为输入。对于臭氧含量, 可使用 MOD07 大气数据中的臭氧含量值。各场地成像时刻的卫星观测高度角以及成像时刻最接近的各 MODIS 大气参数以及 MODIS 数据采集时间与成像时间的时间差如表 3 所示。由于 Libya1 场地于 2021 年 10 月 28 日的 MODIS 臭氧数据为无效值, 故该天的定标数据不被使用于此次在轨定标计算中。

将上述 6 个波段的方向反射率、气溶胶光学厚度、水汽含量和臭氧含量重采样到 1 km 分辨率后输入 MODTRAN5.0 大气辐射传输模型对光谱 02 星的入瞳辐亮度进行模拟计算。计算过程中设置输出表观辐亮度的波长采样间隔为 1 nm, 即在波长维度由离散的各波段反射率值向连续的表观辐亮度进行波长插值的过程由 MODTRAN 辐射模型实现, 最后得到光谱 02 卫星的入瞳辐亮度光谱  $L_{\text{TOA}}(\lambda)$ 。根据光谱 02 星波段  $i$  的光谱响应函数  $f_i(\lambda)$ , 计算出该波段的入瞳辐亮度值:

$$L_{\text{TOA}, i} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_{\text{TOA}}(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

对于每景光谱 02 星对定标场地成像影像可得到各个波段的一组 DN 值、辐亮度结果, 受数据量限制各波段测试结果的响应动态范围较窄, 因此文章使用单点法计算在轨定标系数, 即将所有测试结果的辐亮度均值与 DN 均值的比值作为各个波段的在轨绝对定标系数:

$$\text{Gain}_{\text{onorbit}, i} = \frac{\overline{L_{\text{TOA}, i}}}{\overline{\text{DN}_i}} \quad (6)$$

其中,  $\text{Gain}_{\text{onorbit}, i}$  为波段  $i$  的在轨绝对定标增益系数,  $\overline{L_{\text{TOA}, i}}$  为波段  $i$  的入瞳辐亮度均值:

$$\overline{L_{\text{TOA}, i}} = \frac{\sum_{1 \leq p \leq n} L_{\text{TOA}, i}(p)}{n} \quad (7)$$

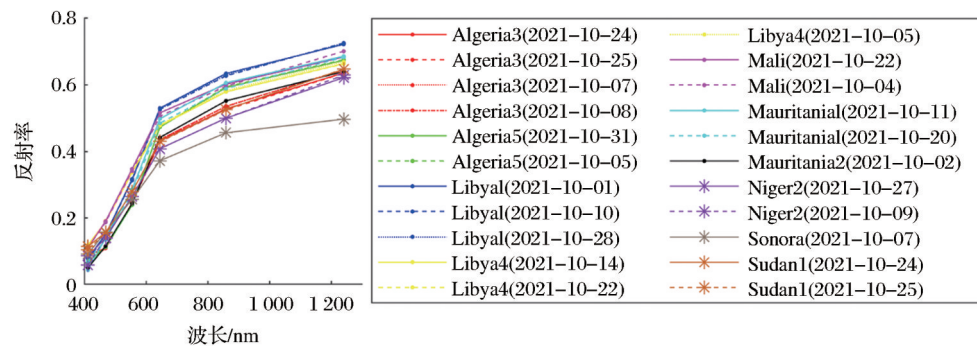


图 1 各个稳定目标的方向反射率

Fig.1 The directional reflectance of multiple stable targets

表 3 各场地的成像几何参数和大气参数

Table 3 The acquisition geometry parameter and atmospheric parameters

场地名称	成像日期	观测天顶角 /°	550 nm 气溶胶光学厚度	水汽含量 /cm	臭氧密度 /多布森	MODIS 数据与光谱 02 成像间隔/min
Algeria3	2021-10-24	59	0.200	1.916	271	76
Algeria3	2021-10-25	82	0.105	1.376	264	32
Algeria3	2021-10-07	62	0.237	2.059	262	38
Algeria3	2021-10-08	82	0.052	1.585	259	89
Algeria5	2021-10-31	70	0.050	1.592	247	70
Algeria5	2021-10-05	62	0.264	1.138	253	27
Libya1	2021-10-01	61	0.210	1.891	268	95
Libya1	2021-10-10	73	0.088	1.101	256	95
Libya1	2021-10-28	75	0.563	1.894	-	95
Libya4	2021-10-14	79	0.373	2.019	260	80
Libya4	2021-10-22	78	0.534	2.377	256	64
Libya4	2021-10-05	80	0.226	1.78	258	21
Mali	2021-10-22	71	0.548	1.844	25	61
Mali	2021-10-04	77	0.478	1.609	239	67
Mauritania1	2021-10-11	78	0.284	1.268	235	54
Mauritania1	2021-10-20	80	0.180	1.52	258	54
Mauritania2	2021-10-02	64	0.165	1.39	251	55
Niger2	2021-10-27	80	0.442	1.3	263	38
Niger2	2021-10-09	66	0.204	0.782	259	43
Sonora	2021-10-07	65	0.067	3.044	293	99
Sudan1	2021-10-24	70	0.333	1.502	246	70
Sudan1	2021-10-25	74	0.329	1.852	0.262	69

$\overline{DN_i}$ 为波段  $i$  的 DN 均值:

$$\overline{DN_i} = \frac{\sum_{1 \leq p \leq n} DN_i(p)}{n} \quad (8)$$

其中:  $L_{TOA,i}(p)$  为第  $p$  组测试结果中波段  $i$  的入瞳辐亮度,  $DN_i(p)$  为第  $p$  组测试结果中波段  $i$  的 DN 值,  $n$  为测试结果的组数。

## 4 结果与分析

### 4.1 定标结果

光谱 02 卫星对各稳定目标场地的所有 DN 值一模拟辐亮度测试结果如图 2 所示。用 Pearson 相关系数  $r_i$  描述波段  $i$  辐亮度模拟值与 DN 值的相关性<sup>[28]</sup>:

$$r_i = \frac{1}{n-1} \sum_{1 \leq p \leq n} \left( \frac{DN_i(p) - \overline{DN_i}}{\sigma DN_i} \right) \left( \frac{L_{TOA,i}(p) - \overline{L_{TOA,i}}}{\sigma L_{TOA,i}} \right) \quad (9)$$

其中:  $\sigma DN_i$  为波段  $i$  的 DN 值的标准差;  $\sigma L_{TOA,i}$  为波段  $i$  的入瞳辐亮度值的标准差, 所有波段的 Pearson 相关系数  $r_i$  均在图 2 中进行了标注。  $r_i$  的数值范围在 0 和 1 之间, 数值越大说明相关性越强。从图 2 中可以看出, 所有波段的 DN 值与辐亮度相关系数都大于 0.8, 说明各波段 DN 值与辐亮度相关性很强, 且除 B1 波段和 B2 波段之外的所有波段相关性系数均大于 0.95。分析 B1、B2 波段相关性系数低于其他波段的原因, 一方面, 在太阳反射波段大气中各种粒子对电磁波总体的衰减作用随着波长的减少而增加, 故大气吸收作用对 B1、B2 波段的影响更大<sup>[29]</sup>; 另一方面, 在获取 MODIS 各波段的地表方向反射率时, 450 nm 以下波段的反射率是由宽波段的 BRDF 产品进行角度校正转化得到, 与其他波段的反射率相比引入了更多的不确定度。光谱 02 卫星 B0~B6 波段的量化位数为 12 位, B7~B12 波段的量化位数为 14 位, B13~B19 波段的量化位数为 16 位。从测试结果中可以看出, 多数波段所响应的 DN 值动态范围较窄, 主要是由所成像目标场地的特性所致, 因此使用单点法而不是多点拟合法计算在轨绝对定标增益系数具有更高的可靠性。

基于式(6)计算的各个波段在轨绝对定标系数和发射前的实验室定标系数如表 4 所示, 其中在轨定标系数  $Gain_{onorbit}$  与发射前定标系数  $Gain_{lab}$  的相对

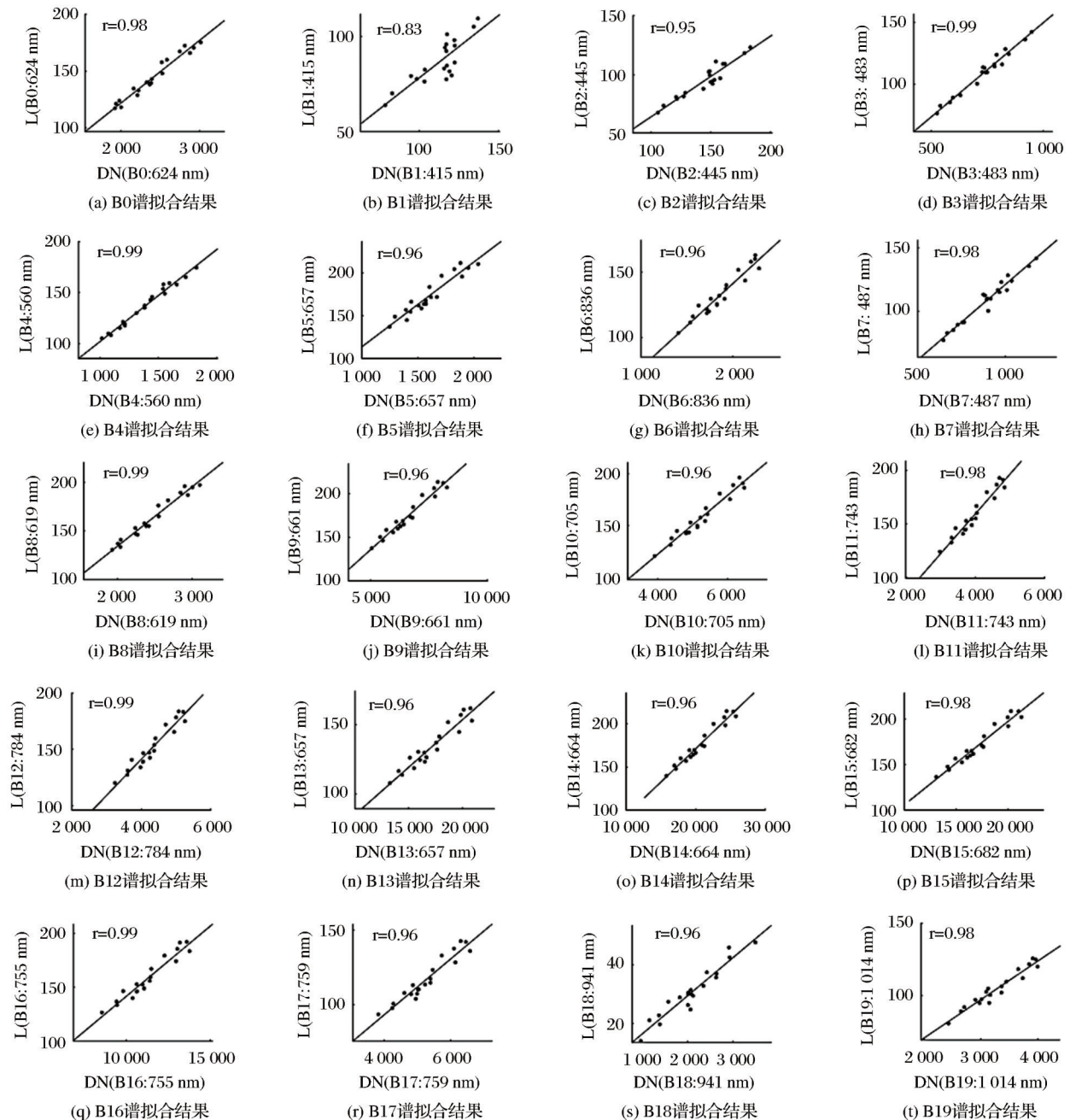


图2 光谱02卫星对各稳定场地成像DN值与模拟辐亮度结果

Fig.2 GP02's DNs and simulated radiances of multiple stable targets

差异通过  $(Gain_{\text{onorbit}} - Gain_{\text{lab}}) / Gain_{\text{lab}}$  计算得出。由表4中的结果可知,光谱02卫星多数波段与发射前定标系数的相对差异在10%以内,相对差异大于10%的波段为可见光波段中600 nm以下的波段(B1~B4, B7)和近红外波段(B6, B13, B18, B19),同时波长小于450 nm的B1和B2波段相对差异明显大于其他波段。

#### 4.2 基于包头地基自动辐射定标数据的真实性检验

包头定标场位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗,有面积不小于300 m×300 m的沙地场地

(40.865 87°N, 109.615 5°E),并在场地内布设了光谱自动观测系统和大气参数自动观测系统<sup>[30-31]</sup>。整个系统可实现每日地表反射率和大气参数(气溶胶光学厚度、水汽含量)的自动测量,其中地表反射率的测量时间间隔为2 min。利用测量的地表反射率和大气参数结合卫星过境时刻的观测角度信息,可模拟计算2 nm光谱步长的卫星入瞳处光谱辐亮度。其在450~1 000 nm波长范围内的天顶辐射模拟精度优于5%,并被全球自主辐射定标网RadCalNet(Radiometric Calibration Network)纳入到其业务化



表 4 重新标定的定标系数与发射前系数对比  
Table 4 The comparison between re-calibration coefficients and pre-launch calibration coefficients

波段	在轨定标 增益系数 $Gain_{onorbit}$	发射前定标 增益系数 $Gain_{lab}$	相对 差异
B0	0.060 208	0.056 278	6.98%
B1	0.797 496	0.618 878	28.86%
B2	0.656 255	0.460 650	42.46%
B3	0.149 111	0.128 934	15.65%
B4	0.099 611	0.084 930	17.29%
B5	0.108 881	0.101 792	6.96%
B6	0.071 452	0.061 210	16.73%
B7	0.124 888	0.109 087	14.49%
B8	0.067 739	0.062 695	8.05%
B9	0.026 596	0.024 451	8.77%
B10	0.030 525	0.029 954	1.91%
B11	0.040 713	0.039 350	3.46%
B12	0.035 697	0.033 301	7.20%
B13	0.007 881	0.006 600	19.40%
B14	0.008 639	0.008 129	6.28%
B15	0.010 173	0.009 710	4.77%
B16	0.014 402	0.013 719	4.98%
B17	0.023 070	0.021 864	5.52%
B18	0.015 955	0.013 414	18.94%
B19	0.033 178	0.025 452	30.35%

服务的定标数据源中<sup>[32]</sup>。使用该定标场产品对高分七号卫星进行在轨绝对辐射定标,其与包头场人工靶标场地定标结果相比相对差异小于4%<sup>[33]</sup>;该定标场地提供的模拟表观反射率与使用 Landsat-8 OLI 星上观测表观反射率的对比结果表明,其与 Landsat 8 星上定标系统辐射基准的平均偏差小于3%,说明该定标场的定标数据具有较高的绝对精度<sup>[34]</sup>。光谱 02 卫星于 2021 年 10 月 18 日对包头定标场的沙地场地进行了成像,中国科学院空天信息创新研究院针对此次成像中光谱 02 卫星的成像时间、观测角度,提供了当天光谱 02 星对包头定标场沙地的入瞳辐亮度光谱模拟结果,再结合各波段的光谱响应函数可计算出各个波段的入瞳辐亮度。同时根据光谱 02 卫星对沙地成像的 DN 值和重新标定的在轨定标系数,可计算出传感器观测辐亮度。使用多点线性拟合法计算的定标系数计算得到的观测辐亮度和使用公式(6)的单点法定标系数计算得到的观测辐亮度如表 5 所示,同时与定标场提供的模拟辐亮度值进行对比。从对比结果中可以看出,除少数谱段外,使用单点法计算出的定标

表 5 重新标定的观测辐亮度与包头场地标定辐亮度对比  
Table 5 The comparison between GP02's re-calibrated measured radiance and simulated radiance of

Baotou Site					
波段	多点法定标观 测辐亮度 $/Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$	单点法定标 观测辐亮度 $/Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$	场地定标辐 亮度 $/Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$	多点法 相对差异	单点法 相对差异
B0	64.64	66.60	67.90	-4.80%	-1.93%
B1	47.75	51.83	52.22	-8.55%	-0.75%
B2	60.35	58.48	58.70	2.82%	-0.38%
B3	66.35	63.95	64.56	2.77%	-0.94%
B4	65.78	68.87	68.33	-3.73%	0.79%
B5	74.00	75.98	74.59	-0.79%	1.87%
B6	60.16	62.04	58.07	3.60%	6.84%
B7	67.10	66.33	63.61	5.48%	4.27%
B8	70.29	73.35	74.86	-6.11%	-2.02%
B9	73.95	75.84	74.87	-1.22%	1.29%
B10	70.03	71.94	71.96	-2.68%	-0.02%
B11	67.29	69.97	71.53	-5.93%	-2.17%
B12	63.80	66.77	67.20	-5.06%	-0.64%
B13	55.61	58.42	54.95	1.21%	6.31%
B14	74.77	77.86	76.06	-1.69%	2.37%
B15	72.71	76.18	73.92	-1.63%	3.06%
B16	65.46	68.99	65.72	-0.39%	4.97%
B17	42.59	47.98	52.90	-19.48%	-9.31%
B18	23.62	28.25	31.19	-24.27%	-9.43%
B19	41.13	46.75	48.82	-15.76%	-4.25%

系数相对包头场定标结果相对差异更小,由于目前本方法未进行大规模、多次数的验证对比,因此本文将单点法作为定标系数计算方法而不采用不同谱段使用不同计算方法的方式。对于单点法定标结果,光谱 02 卫星所有波段观测辐亮度与包头场的场地定标模拟辐亮度的相对差异均小于10%,各波段相对差异取绝对值后的均值为3.18%;其中的 B17 波段与 B18 波段差异较大,可能是水汽影响严重导致。除此之外的 18 个波段与场地定标结果的差异均小于7%,其中波长大于 800 nm 的 B6 波段和 B13 波段与场地定标相对差异分别为 6.84% 和 6.31%,其余 16 个波段对场地定标的相对差异小于5%,说明该方法的总体定标精度较高。

#### 4.3 基于大气校正结果的真实性检验

对光谱 02 卫星 PMS2 传感器各波段影像进行大气校正,可以在地面尺度上对在轨定标系数进行真实性检验。文章使用 ENVI(The Environment for Visualizing Images)遥感处理平台中的 FLAASH 大气校正模块对光谱 02 卫星进行大气校正,该大气校

正模块已被广泛用于多光谱卫星影像的大气校正<sup>[35]</sup>。使用 FLAASH 模块进行大气校正需要输入成像时刻的能见度与水汽含量,由于大气校正结果的精度既与传感器在轨定标精度有关,也与大气校正模型及输入参数自身精度有关,为了尽可能减少大气校正过程中由大气参数自身精度引入的误差,模型输入的大气参数从 AERONET (Aerosol Robotic Network) 气溶胶站点提供的大气参数中计算获取。AERONET 是 NASA 组织并发起的全球气溶胶监测网络,其站点广泛分布于全球各个国家、地区,可提供各站点每天 30 min 测量间隔的气溶胶光学厚度、水汽含量、臭氧含量等大气参数<sup>[36]</sup>。由于 AERONET 未提供 550 nm 波长处的气溶胶光学厚度,可使用 Angstrom 指数拟合的方式根据其他波段处的气溶胶光学厚度进行拟合推算<sup>[37-38]</sup>,并根据 550 nm 气溶胶光学厚度计算能见度<sup>[39]</sup>。

使用发射前定标系数与在轨定标系数分别进行大气校正并进行对比,可根据反射率光谱的形状对定标系数进行定性的评估,除此之外,可使用空间分辨率相近的哨兵 2A/2B 同地物的反射率影像产品进行定量的对比评估。哨兵 2 号卫星为欧洲航天局“全球环境与安全监测”计划中两颗高分辨率多光谱成像卫星,其多光谱成像仪覆盖 13 个波段,空间分辨率为 10~60 m。哨兵 2 号包含哨兵 2A 卫星和哨兵 2B 卫星,可提供精度为 5% 的 L2A 级地表反射率产品<sup>[40]</sup>。真实性检验过程需要选择与光谱 02 卫星多光谱成像仪光谱范围设置相似的哨兵 2 号数据进行对比。筛选哨兵 2 号与光谱 02 卫星中心波长差异小于 10 nm 的波段并参考波段宽度设置的差异,最终使用哨兵 2 号的第 2、3、4、5、6、7、8、8a 波段与光谱 02 卫星的第 3、4、5、10、11、12、6、13 波段进行对比。综上所述,通过大气校正结果对光谱 02 卫星重新标定的 2021 年 10 月的在轨定标系数进行评估,影像筛选条件为:

(1) 考虑地物反射率随时间的变化,光谱 02 卫星影像和哨兵 2 号卫星影像对测试场地区域成像时间间隔小于 2 d。

(2) 考虑 AERONET 站点大气参数对周围测试场地的适用性,测试场地中心位置与 AERONET 站点距离不大于 10 km。

(3) 光谱 02 卫星影像与哨兵 2 号卫星影像中测试场地均无云雾遮挡。

(4) 考虑保证 10 月份在轨定标系数的适用性,

光谱 02 卫星影像的成像时间在 2021 年 9 月至 11 月之间。

(5) 考虑光谱 02 卫星影像和哨兵 2 号卫星影像空间匹配误差,要求测试场地均匀,需满足光谱 02 卫星所有波段 100 m×100 m 范围内灰度值的非均匀性(标准差与均值的比值)小于 0.04,并最终提取场地 80 m×80 m 范围内的反射率均值。

经过数据筛选,光谱 02 卫星分别于 2021 年 9 月 5 日 19 时 14 分和 10 月 20 日 4 时 33 分(UTC 时间,下文同)对 NERL-Golden AERONET 站点(39.744 °N, 105.178 °W)和 Beijing\_PKU AERONET 站点(39.992 °N, 116.31 °E)进行了成像。对于 NERL-Golden 站点,哨兵 2A 卫星成像时间为 9 月 5 日 22 时 25 分,测试场地为位于站点东北方向约 1.2 km 处的空地(39.750 °N, 105.166 °W);对于 Beijing\_PKU 站点,哨兵 2A 卫星成像时间为 10 月 21 日 6 时 7 分,测试场地为北京市海淀区西郊机场的水泥路面(39.964 °N, 116.260 °E)和颐和园的湖面(39.994 °N, 116.269 °E)。

对前述数据进行处理,针对各个测试场地,对比使用 FLAASH 大气校正模块对光谱 02 卫星基于发射前定标系数和在轨定标系数进行大气校正后的地表反射率,并从哨兵 2 号 10~20 m 分辨率波段的 L2A 反射率产品中提取各场地反射率,结果如图 3 所示。基于在轨定标系数的大气校正结果与哨兵 2 号反射率产品的相对差异如表 6 所示。

由图 3 可见,光谱 02 卫星使用发射前定标系数与在轨定标系数所反演的地物反射率曲线的总体形状均符合典型地物光谱形状特征。使用在轨定

表 6 光谱 02 卫星重新标定的反演反射率与哨兵 2 号反射率产品对比

Table 6 The comparison between GP02's re-calibrated retrieval reflectance and Sentinel-2's reflectance product

光谱 02 波段	哨兵 2 号波段	相对差异 (空地)	相对差异 (水泥路)	相对差异 (湖水)
B3(483.36 nm)	B02(490 nm)	0.68%	1.58%	5.45%
B4(559.61 nm)	B03(560 nm)	2.26%	4.37%	1.27%
B5(656.75 nm)	B04(665 nm)	0.91%	3.40%	9.53%
B10(705.46 nm)	B05(704 nm)	-5.51%	-3.75%	-0.99%
B11(742.51 nm)	B06(740 nm)	-0.67%	-0.56%	99.59%
B12(784.49 nm)	B07(783 nm)	-0.30%	-2.74%	98.23%
B6(836.14 nm)	B08(835 nm)	3.57%	-1.32%	70.22%
B13(863.44 nm)	B8A(865 nm)	5.34%	4.43%	185.27%



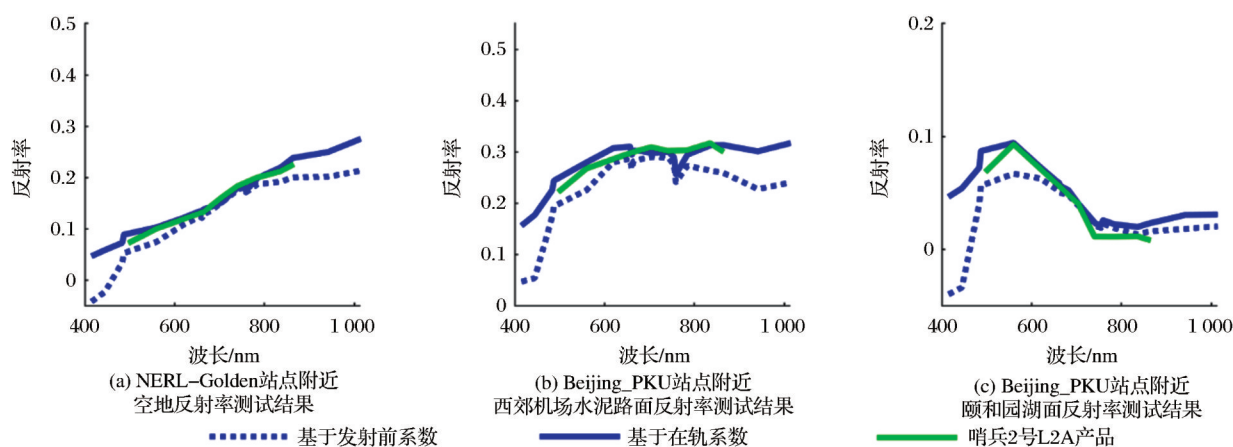


图3 各大气校正均匀场地反射率测试结果

Fig.3 The reflectance results of the uniform sites for atmosphere correction

标系数反演的地物光谱曲线中,在487.41 nm处B7波段的反射率与483.36 nm处B3波段相比有剧烈的“抬升”,这种形状上的异常可能在于:两个波段的宽度差异较大,对于B3波段而言,作为宽波段其反射率值对中心波长处反射率的表征能力不如波段宽度较窄的B7波段。在西郊机场水泥路面反射率反演结果中,发射前系数与在轨系数的大气校正结果均在660.75 nm处的B9波段出现了微小的形状“凹陷”,而该形状异常未出现在NERL-Golden站点空地的测试结果中,说明此现象更可能是源于大气校正过程的精度不足而非定标系数误差。在各个场地中,两组系数大气校正结果中均出现的758.87 nm处B17波段的形状“凹陷”异常,一方面可能由大气参数精度有限和定标系数精度有限引起,另一方面可能由FLAASH模型自身反演精度有限以及该波段位于氧气吸收带附近而受氧气分子含量影响较大引起。

在定量结果方面,从图3可以明显看出使用在轨定标系数的大气校正结果与哨兵2号的反射率产品的平均相对差异更小。同时在可见光的蓝光波段,对于低反射率地物,使用发射前的定标系数所反演的反射率出现了负值,而在在轨定标系数所反演的结果则未出现这种现象。从表6中可以看出,对于空地与机场路面,基于在轨系数的反演结果在各波段与哨兵2号的相对差异均小于6%,其中B12波段相对差异均小于1%。对于颐和园湖面,在可见光波段范围内反射率的相对差异均小于10%。水体的表面反射率可认为是水面镜面反射率和离水辐亮度造成的遥感反射率之和,前者受水面波动影响,后者受水体内的生化参数和悬浮物浓度特性

影响<sup>[41]</sup>。而Beijing\_PKU站点的光谱02卫星数据与哨兵2号相差1 d,故认为颐和园湖面反射率相对差异大于空地和机场路面的反射率差异可能是由湖水表面波动和水中生化参数、悬浮物浓度等随时间变化造成。另外水体在近红外波段的反射率幅值较低,也会导致相对差异的结果较大。

## 5 讨论

使用传统的场地定标方法进行在轨定标需要同步测量地表参数和大气参数,人力、物力成本高。研究所使用的基于多次对稳定目标场地成像并结合MODIS大气产品、地表反射率产品的定标方式,具有极低的定标成本,且易于进行长时间序列定标。MCD43A1产品作为定标过程中的反射率输入,可以模拟计算任何观测角度的方向反射率。文章使用光谱02卫星光照—观测几何与MODIS光照—观测几何下300~700 nm宽波段方向反射率的比值作为将MODIS MCD19A1产品中412 nm方向反射率转化为光谱02卫星观测条件下方向反射率的转化系数。将从MCD43A1、MCD19A1产品中得到的方向反射率与MCD19A2、MOD07中的大气参数一同输入MODTRAN5.0辐射传输模型模拟出光谱02卫星的入瞳辐亮度光谱,结合光谱响应曲线计算各波段辐亮度值。B1、B2波段反射率由宽波段转化系数计算得到,故其灰度值与辐亮度值的Pearson相关系数低于其他波段。最后根据所有场地的辐亮度均值与灰度值均值计算出基于本文方法的在轨绝对辐射定标系数,这种定标系数的计算方案出于两方面原因:一是单个场地或单次成像的计算不确定度较大,使用单次成像的辐亮度与DN

值计算定标结果的精度难以保证,故需要在假设光谱02卫星辐射性能在一定时间范围内的变化可忽略不计的前提下,利用所有组测试结果计算出一组针对该时间范围内的定标系数;二是受数据量和场地特性限制,对多个稳定目标的成像难以实现,对各个波段较宽的动态范围覆盖,同时光谱02卫星发射后的长时间序列深海夜间成像结果表明其暗电流响应较为稳定,因此未采用多点拟合法而是用将辐亮度和DN值求均值后强制过零点的方式进行在轨绝对定标系数计算。

对在轨定标系数的检验在两个方面展开:一方面的真实性检验可将观测辐亮度与精度可靠的天顶辐亮度基准进行比对;另一方面针对大气校正后的影像,关注其对典型地物的反演反射率曲线形状并与其他载荷高精度的反射率数据产品进行定量比对。与包头场地定标结果对比时,需要考虑本文定标数据与包头场定标数据的时间差异,若两者时间差异较大,则被定标载荷在时间差异过程中可能产生的定标性能差异将使得两者的定标结果对比不具备可比性。结果表明所有波段与包头定标场的模拟辐亮度差异均小于10%,说明文章的定标方法在400~1 040 nm范围内的定标精度总体较高。中心波长小于800 nm的波段定标误差小于5%,中心波长大于800 nm的波段定标误差大于5%,可能源于输入的MODIS地表方向反射率数据主要集中在可见光波段,而在近红外波段数量较少,使得近红外波段在辐射传输模拟生成小波长采样间隔的辐亮度光谱过程中存在更大的插值误差;另一方面可能在于近红外波段受水汽影响更大,用MODIS水汽数据代替地面同步测量水汽数据引入的误差对近红外波段的定标精度产生了更大影响,尤其对于中心波长为941.43 nm处于典型水汽吸收波段的第18波段,其定标误差大于其他所有波段。

在通过大气校正结果进行真实性检验时,为了减少大气校正过程中的精度误差,选取AERONET气溶胶站点附近的地物进行大气校正,并将AERONET站点提供的大气参数作为大气校正过程的输入。使用发射前绝对定标系数和重新标定的在轨绝对定标系数,对两个AERONET站点(NERL-Golden、Beijing、PKU)附近的3处均匀地物(土壤空地、水泥路面、湖面)进行了大气校正,使用两组系数反演的地物反射率与典型地物光谱形状基本一致。在波长较短的蓝波段,发射前系数所反演的反

射率出现负值,说明该波段确实存在衰减,而使用在轨绝对定标系数进行反演可解决出现负值的问题。若反演的地物反射率曲线出现不光滑现象,主要可能由4种原因形成:定标精度有限、反演精度有限(包括输入的大气校正参数精度有限)、中心波长相近波段的波段宽度差异较大、以及地物为非典型自然地物的人工地物。由于所选取的反演地物为典型自然地物,因此排除第四种原因。当反射率形状的突变只发生在一处地物而没有发生在其他影像或其他地物中时,认为更有可能受该地物局部区域的大气校正精度影响。经分析认为,3种地物反演光谱在B3波段与B7波段处的反射率形状剧变是由B7波段为窄波段而B3波段为宽波段所造成;在B17波段,3种地物的反演光谱都出现了“凹陷”形状,认为此波长处的形状异常一方面可能来源于大气参数精度误差和该波段定标结果精度不足,另一方面可能源于FLAASH模型的反演精度误差;北京西郊机场反演光谱曲线在B9波段出现的“凹陷”形状未出现在使用相同定标系数进行反演的NERL-Golden空地反演光谱曲线中,认为反演曲线在该波段处的形状异常来源于大气校正过程的精度误差。

将3处地物反演光谱与哨兵2号L2A反射率产品对比,结果表明对于两处非水体地物,各波段的相对差异均小于6%。颐和园湖水的反演反射率与哨兵2号数据的相对差异大于非水体地物,认为原因有两方面。一方面在于水体的反射率受水面波动和水中生化参数影响,反射率更容易随时间发生变化。而光谱02卫星对颐和园湖面成像的时间与哨兵2号相差1 d,湖面反射率自身可能发生变化。另一方面湖面反射的能量较低,使得其各波段平均差异大于非水体地物,同时水体在近红外波段吸收作用较强,极低的反射率使得相对差异计算结果与其他波段相比进一步增大。

## 6 结 论

传统的反射率基法场地定标方法需要在卫星过境时刻进行人工同步场地测量,且需要有昂贵的硬件测量设备,具有较高的人力物力成本;传统的交叉定标方法对于波段较多的卫星因波段匹配限制难以保证对所有波段实现定标,且由于对定标场地、两卫星成像条件的限制难以保证足够的定标频次。本文使用了一种对多个稳定目标成像的定标

方法。该方法以MODIS地表产品和大气产品作为输入,经辐射传输模拟计算获得待定标卫星各成像时刻的天顶入瞳辐亮度,结合待定标卫星对多个稳定目标的成像灰度值,实现在轨绝对辐射定标。本文方法具有输入数据易于获取,方法流程易于实现、定标成本低的优点。

针对吉林一号光谱02卫星PMS2多光谱成像仪2021年10月对多个稳定目标的成像数据,使用本方法对其20个波段进行在轨绝对辐射定标。使用发射前系数与重新标定的在轨系数,结合AERONET站点大气参数,对3处均匀地物进行大气校正,并将反演结果与哨兵2号反射率产品对比,结果表明使用在轨系数反演的反射率相比使用发射前定标系数,具有与哨兵2号产品更小的差异,且改正了蓝波段反演出现负值的现象。与包头地基自动辐射定标数据的对比结果表明,光谱02卫星20个波段的平均定标误差为3.18%,定标误差最大的波段不超过10%,说明对于可见—近红外短波波段的各光谱传感器,此方法定标精度总体较高。

未来可通过对多个稳定目标进行更长时间的观测与算法测试,探究该方法在不同季节、月份的通用性,并通过与更多场地的场地定标结果对比来进一步丰富此方法的真实性检验结果。另外本文采用了单点法进行绝对定标系数的求解,后续可考虑对各波段下的亮、暗目标进行更高频次的拍摄,例如对GEOS/WGCV选择的全部49个分布于不同地区、差异显著的定标场地进行拍摄,增加各波段定标数据样本的灰度响应范围<sup>[42]</sup>,从而在更大的灰度动态范围、更多组测试数据的情况下使用多点拟合法进行定标系数的计算。同时后续有望进行更高频次的拍摄,从而获取更丰富的定标数据点,实现对天气条件、成像参数、大气和地表数据精度等方面对最终定标结果精度影响的进一步量化研究,从而为未来使用本文方法进行卫星业务化定标提供更丰富详尽的理论支持。

#### 参考文献(References):

[1] GAO Hailiang, GU Xingfa, 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.[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.]

[2] ZHANG Yuhuan. Cross-calibration of HJ1-CCD[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2012.

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

[3] MA Lingling, WANG Ning, GAO Caixia, *et al.* On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: Progress and trends[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(5): 1061-1087.[马灵玲, 王宁, 高彩霞, 等. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势[J]. 遥感学报, 2023, 27(5): 1061-1087.]

[4] WANG Fugang, ZHANG Wei, WANG Hongyuan, *et al.* Influence of motion status on multispectral optical characteristics of satellites[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 21-28.[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): 21-28.]

[5] DINGUIRARD M, SLATER P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors-the quantitative approach[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 194-205. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00111-4

[6] JI Zhongying, XIANG Libin, WANG Zhonghou, *et al.* Research of calibration technology of interference hyperspectral imager on secondary planet[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(4):280-283.[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.]

[7] WANG Wei, ZHANG Liming, SI Xiaolong, *et al.* On-orbit degradation monitoring technology for solar diffuser reflectance[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7):373-380.[汪伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 太阳漫射板反射率在轨衰退监测技术研究[J]. 光学学报, 2019, 39(7):373-380.]

[8] THOME K, GELLMAN D, PARADA R, *et al.* In-flight radiometric calibration of Landsat-5 Thematic Mapper from 1984 to present[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1993, 1938(14): 126-130. DOI: 10.1117/12.161537

[9] XU Lei, MA Lingling, HU Jian, *et al.* Cross-calibration of HJ-1B/CCD1 against Terra/MODIS[J]. Remote Sensing Information, 2011, 28(2):26-31.[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, 28(2):26-31.]

[10] GAO H, GU X, YU T, *et al.* Cross-calibration of GF-1 PMS sensor with Landsat-8 OLI and Terra MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(8):4847-4854. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2552242

[11] ZHAO Y, MA L, LI C, *et al.* Radiometric Cross-calibration of Landsat-8 OLI and GF-1/PMS sensors using an instrumented sand site[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(10): 3822-3829. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2862638

[12] FRANK W. 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. DOI: 10.1175/1520-0426(1990)0072.0.CO;2

[13] XIE Yujuan. The in-orbit radiometric calibration research for



- the HJ-1 CCD cameras based on desert scene[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.[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.]
- [14] SUN L, HU X, GUO M, *et al.* Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12):4929-4942.
- [15] WANG Ling, HU Xiuqing, CHEN Lin. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7):1911-1920.[王玲, 胡秀清, 陈林. 基于多种亮度稳定目标的FY-3C/中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射定标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7):1911-1920.]
- [16] COSNEFROY H, LEROY M, BRIOTTET X. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(1):101-114. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00211-1
- [17] TEILLET P M, BUTLER J J, XIONG J, *et al.* Prime candidate earth targets for the post-launch radiometric calibration of space-based optical imaging instruments[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2007, 6677:66770S-66770S-12. DOI: 10.1117/12.733156
- [18] SLATER P N. Reflectance and radiance-based methods for the inflight absolute calibration of multispectral sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 22(1):11-37. DOI: 10.1016/0034-4257(87)90026-5
- [19] GONG Hui, TIAN Guoliang, YU Tao, *et al.* Radiometric calibration and validation of CCD cameras on HJ-1 satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 7(5):371-393.[巩慧, 田国良, 余涛, 等. HJ-1星CCD相机场地辐射定标与真实性检验研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 7(5):371-393.]
- [20] ROUJEAN J L, LEROY M, DESCHANPS P Y. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(D18):20455-20468. DOI: 10.1029/92JD01411
- [21] ROSS J. The radiation regime and architecture of plant stands[M]. Springer Science and Business Media, 1981. DOI: 10.1007/978-94-009-8647-3
- [22] LI X, STRAHLER A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing[J]. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2):276-292. DOI: 10.1109/36.134078
- [23] SCHAAF C L B, LIU J, GAO F, *et al.* MODIS albedo and reflectance anisotropy products from Aqua and Terra[J]. Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS, 2011, 11:549-561. DOI: 10.1007/978-1-4419-6749-7\_24
- [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. DOI: 10.1029/95JD02371
- [25] LIANG S, STRAHLER A H, WALTHALL C. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: A simulation study[J]. Journal of Applied meteorology, 1999, 38(6):712-725. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0712:ROLSAF>2.0.CO;2
- [26] VERMOTE E F, SALEOUS N Z E, JUSTICE C O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2):97-111. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00089-5
- [27] LYAPUSTIN A, WANG Y. MAIAC-multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS[C]// AGU Spring Meeting Abstracts. 2007, 2007: A51B-05.
- [28] PEARSON K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1895, 58(1):240-242.
- [29] WANG Xishi, MIN Xiangjun, WU Rong. Measurement Method Research on the Atmospheric Spectral Optical Depth[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1997, 12(2):9-17.[王喜世, 闵祥军, 吴荣, 等. 大气光谱光学厚度测量方法研究[J]. 遥感技术与应用, 1997, 12(2):9-17.]
- [30] LI C, TANG L, MA L, *et al.* Comprehensive calibration and validation site for information remote sensing. The international archives of photogrammetry[J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 40(7):1233. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1233-2015
- [31] NING W, MA L, LIU Y, *et al.* Ground-based automated radiometric calibration system in Baotou site, China[C]// Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, 2017. DOI: 10.1117/12.2278072
- [32] MA L, ZHAO Y, WOOLLIAMS E R, *et al.* Uncertainty analysis for radcalnet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11):1696. DOI: 10.3390/rs12111696
- [33] TANG Hongzhao, TANG Xinming, XIE Junfeng, *et al.* On-orbit radiometric calibration and validation of GF-7 satellite based on RadCalNet Baotou site[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(5):1194-1204.[唐洪钊, 唐新明, 谢俊峰, 等. 基于RadCalNet包头场的高分七号卫星在轨绝对辐射定标及精度验证[J]. 遥感学报, 2023, 27(5):1194-1204.]
- [34] PANG Bo, CHEN Zhiming, WANG Guozhu, *et al.* Ground-based Automatic radiometric calibration of land observation satellite optical sensors and cross validation analysis[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(1):146-154.[庞博, 陈志明, 王国珠, 等. 陆地卫星光学载荷地基自动辐射定标与验证分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1):146-154.]
- [35] MATTHEW M W, ADLER-GOLDEN S M, BERK A, *et al.* Atmospheric correction of spectral imagery: Evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data[C]// Applied Im-

- agery Pattern Recognition Workshop, 2002. Proceedings. IEEE, 2002: 157-163.
- [36] HOLBEN B N, ECK T F, SLUTSKER I, *et al.* AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1-16.
- [37] WEI Haining, WANG Weizhen, HUANG Guanghui, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth based on Himawari-8[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 797-807.[韦海宁, 王维真, 黄广辉, 等. 基于 Himawari-8 的气溶胶反演研究[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(4): 797-807.]
- [38] ÅNGSTRÖM A. The parameters of atmospheric turbidity[J]. *Tellus*, 1964, 16(1): 64-75. DOI: 10.1016/0038-092X(65)90225-2
- [39] ELTERMAN L. Relationships between vertical attenuation and surface meteorological range[J]. *Applied optics*, 1970, 9(8): 1804-1810. DOI: 10.1364/AO.9.001804
- [40] MAIN-KNORN M, PFLUG B, LOUIS J, *et al.* Sen2Cor for sentinel-2[C]// *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10427: 1042704.
- [41] ZHOU G, YANG S, SATHYENDRANATH S, *et al.* Canopy modeling of aquatic vegetation: A geometric optical approach (AVGO)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111829
- [42] BERTHELOT B, SANTER R. Calibration test sites selection and Characterisation: Site equipment and Auxiliary data [EB/OL]. [https://calvalportal.ceos.org/c/document\\_library/get\\_file?uuid=807d522f-b77d-413f-84de-69426b3e712c&groupId=10136](https://calvalportal.ceos.org/c/document_library/get_file?uuid=807d522f-b77d-413f-84de-69426b3e712c&groupId=10136).

## On-orbit Absolute Radiometric Calibration for the Multi-Spectral Imager of Jilin-1/GP02 based on Multiple Stable Targets

YANG Song, HUANG Shuai, BAI Yang, JIA Yi, BA Qianqian,  
TIAN Shiqiang, ZHONG Xing  
(Chang Guang Satellite Technology Company Limited, Changchun 130000, China)

**Abstract:** The precise absolute radiometric calibration of satellite on orbit is the basis for quantitative application of its observation data. Compared with the traditional site calibration method, the on orbit calibration method based on stable targets has the advantages of low cost, high frequency and historical data calibration. The MCD19A1 product, MCD43A1 product and MOD03 (MYD03) product of the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) are applied to simulate the directional reflectance of MODIS band8 under the observation conditions of GP02 satellite. Then combined with the directional reflectance of MODIS band1~band5 in MCD43A1 products, aerosol parameters and water vapor parameters in MCD19A2 products and ozone parameters in MOD07 (MYD07) products, the radiation transfer process of the incoming pupil radiance of multiple stable targets imaged by Multi-Spectral Imager of GP02 satellite in October 2021 was simulated to achieve the absolute radiometric calibration in orbit. The validation results of these calibration coefficients show that a smaller difference between GP02's atmospheric correction results and Sentinel-2 reflectance products is performed when the re-calibration coefficients rather than pre-launch coefficients are applied; the average relative difference between GP02's measured radiance of all bands after re-calibration and the automatic radiometric calibration data of Baotou is 3.18%, indicating the high accuracy of the calibration results. The research results can provide a methodological support for the on-orbit absolute radiometric calibration of medium or high spatial resolution optical remote sensing satellites using stable targets.

**Key words:** On-orbit radiometric calibration; Jilin-1; Multispectral; Atmosphere correction