

引用格式: ZHANG Yanna, GUO Fuxiang, WEI Wei, et al. Cross Calibration Method Based on the Multi-angle Apparent Reflectance Model[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7):0712004

张艳娜,郭傅翔,韦玮,等. 基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法[J]. 光子学报, 2023, 52(7):0712004

基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法

张艳娜¹, 郭傅翔^{2,3}, 韦玮², 李新²

(1 安徽工程大学 电气工程学院, 芜湖 241000)

(2 中国科学院合肥物质科学研究院 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(3 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要: 为了满足多类型光学载荷在轨空间辐射基准传递的需求, 减小角度差异对辐射定标频次和精度的影响, 开展基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法研究。利用高精度长时序卫星的多角度、高光谱表观反射率数据, 构建地球稳定目标利比亚 4 的大气层顶表观反射率模型。通过区域匹配、时间匹配和云剔除后, 利用该模型对 2019—2020 年风云三号 D 星中分辨率成像仪和 AQUA/MODIS 的可见-短波红外波段开展了 205 次交叉定标应用, 并与同步星下点观测的交叉定标方法进行了 26 次比对。结果表明, 两种方法的平均相对偏差优于 2.1%, 验证了该方法的适用性和准确性。该方法可以解决对人工测量定标场地表多角度数据的依赖, 适用于观测天顶角差异 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、观测波段 $400\sim 2400\text{ nm}$ 以内的多光谱、多角度载荷的交叉定标, 减小交叉定标中角度匹配误差, 显著提高多类型卫星的定标频次, 为空间辐射基准传递和多载荷数据融合应用提供基础技术支持。

关键词: 光学遥感; 辐射基准传递; 表观反射率模型; 交叉定标; 多角度; 高频次

中图分类号: TP79; O432.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235207.0712004

0 引言

光学传感器在轨运行时易受空间环境变化等影响导致性能改变, 通过高频次的辐射定标来跟踪载荷的在轨状态, 及时校正载荷性能变化, 可以保证观测数据的准确性, 为定量产品反演和多载荷融合应用提供基础的技术支撑^[1-2]。在太阳反射波段, 目前常用的高频次定标方法包括星上定标^[3]、交叉定标^[4]、稳定目标跟踪^[5]、自动化定标^[6-7]等, 其中星上定标精度较高且应用广泛, 主要利用卫星上搭载的灯、板等定标器实现载荷的在轨高频次定标^[3,8]。但是由于星上定标器的性能参差不齐, 载荷之间的观测数据量值基准有所差异, 导致不同载荷观测和反演的定量产品存在一定的系统误差^[8-9], 限制了星星之间的数据比对和融合应用。为此, 近年来国内外相继开展了空间基准载荷的研究, 通过在空间建立低温辐射计^[10-11]、相关光子等^[12]辐射初级基准的传递链路, 将辐射初级基准传递到高光谱对地成像仪, 利用高光谱对地成像仪和待定标载荷进行交叉定标实现量值传递, 来提高载荷之间的在轨辐射定标精度和数据一致性。

在进行空间辐射基准交叉定标传递时, 常以地球稳定目标作为交叉点, 通过同步星下点观测 (Simultaneously Nadir Observation, SNO), 利用视场匹配、时间匹配、光谱匹配、角度匹配和大气校正等手段, 实现待定标载荷的辐射基准传递^[4]。理论上通过 SNO 交叉定标, 待定标载荷可达到与基准载荷相当的定标精度, 但是受限于基准载荷和待定标载荷之间轨道不同, 载荷之间的观测角度存在较大差异, 因此满足 SNO 交叉匹配条件下的定标频次有限^[13], 为了提高定标频次, 目前多采用地表的双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 模型进行角度匹配^[4,14], 来扩大角度适用性, 减小地

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62005293), 国家重点研发计划 (Nos. 2018YFB0504800, 2018YFB0504802), 安徽工程大学引进人才科研启动基金 (No. 2022YQQ053)

第一作者 (通讯作者): 张艳娜, zhangyn2016@163.com

收稿日期: 2023-02-13; 录用日期: 2023-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

表BRDF效应带来的角度匹配误差。地表的BRDF模型常采用人工现场实测的方式获得^[4],但是在一些难以进行地面试验或者缺乏地面高光谱BRDF模型的国内外定标场,角度匹配成为限制交叉定标频次和精度的重要因素^[14]。为此,国内外研究人员开展了基于大气层顶表观反射率模型的定标研究,利用高精度的表观反射率数据构建稳定目标场模型,用于交叉定标^[15]或绝对辐射定标^[16],但是目前主要是针对小角度近垂直观测的载荷,难以直接应用在角度差异较大的空间基准传递中,限制了空间辐射基准在多星多载荷中的高频应用。

本研究针对空间辐射基准传递交叉定标中的角度匹配对定标频次和精度的影响,提出了基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法,利用高精度载荷的长时序多源数据,构建稳定目标场的多角度高光谱表观反射率模型,并利用该模型基于基准载荷中分辨率成像仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)开展了风云三号D星(Fengyun 3D satellite, FY3D)中分辨率光谱成像仪II型(Medium Resolution Spectral Imager II, MERSI-II)的交叉定标应用与对比,可以不依赖于人工地面试验数据实现大角度条件下的交叉定标,及时跟踪和校正载荷的在轨辐射变化。

1 基本原理

通过构建稳定目标场的多角度表观反射率模型开展空间辐射基准交叉定标,将初级基准的辐射量值传递到待定标载荷,具体原理如图1所示。在进行空间辐射基准交叉定标时,首先对基准载荷和待定标载荷开展观测区域匹配,采用稳定目标场作为地面交叉定标目标,然后进行云剔除获取晴空影像,最后进行时间匹配,减小大气条件非一致性带来的偏差。

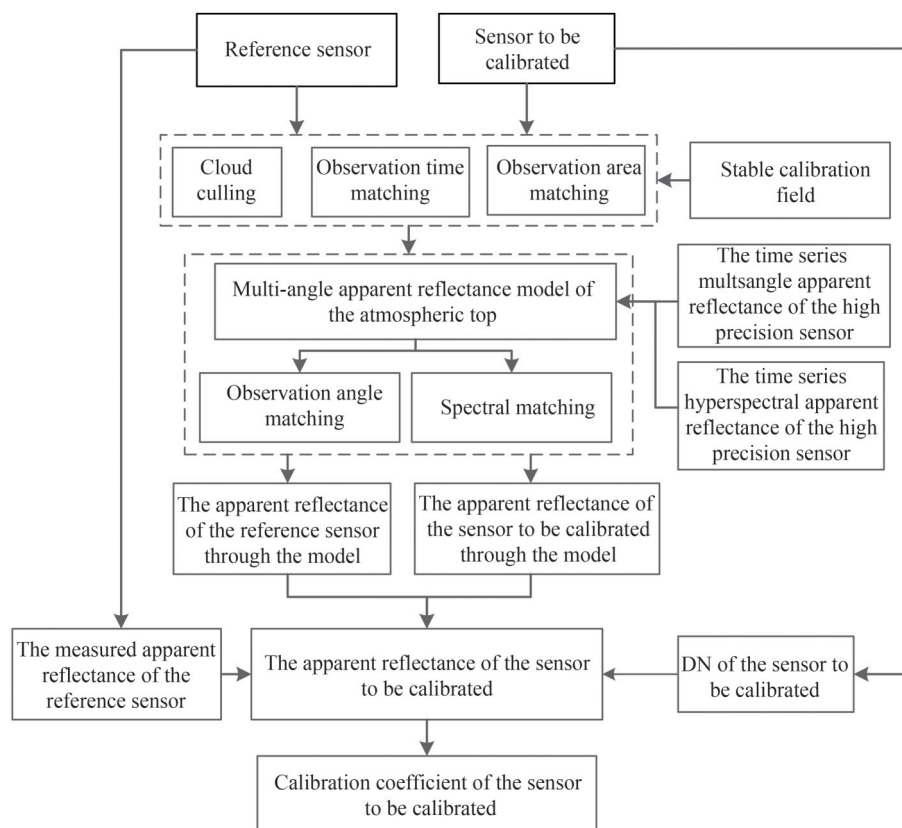


图1 基于表观反射率模型的交叉定标原理

Fig. 1 Cross calibration principle based on the apparent reflectance model

在进行角度匹配时,采用国外多角度、高精度载荷 Terra/MODIS、AQUA/MODIS 自2008—2019年共11年的观测角度、太阳角度和表观反射率,分组进行多角度模型构建。基于稳定目标场的准不变特性,忽略时间维场地的变化,利用Hyperion的平均光谱表观反射率数据构建适用于400~2400 nm波段的光谱匹配

函数。最终构建的多角度高光谱表观反射率模型为

$$\rho_{\text{MODEL}}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda_0) = (f_{\text{iso}} + f_{\text{vol}} K_{\text{vol}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}} K_{\text{geo}}(\theta_s, \theta_v, \varphi)) \times S(\lambda_0) \quad (1)$$

式中, ρ_{MODEL} 为模型计算的稳定目标场的表观反射率, θ_s 为卫星过境时刻的太阳天顶角, θ_v 为卫星过境时刻的观测天顶角, φ 为相对方位角, λ_0 为观测通道的中心波长, K_{vol} 为体散射核, K_{geo} 为几何散射核, $f_{\text{iso}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{geo}}$ 为各项核系数, 分别表示各向同性散射、体散射和几何光学散射所占的权重, $S(\lambda_0)$ 为光谱匹配因子, 为

$$S(\lambda_0) = \frac{\int_{\Delta\lambda} \rho_{\text{Hy}}(\lambda) R(\lambda) / \int_{\Delta\lambda} R(\lambda)}{\int_{\Delta\lambda} \rho_{\text{Hy}}(\lambda) R_r(\lambda) / \int_{\Delta\lambda} R_r(\lambda)} \quad (2)$$

ρ_{Hy} 为 Hyperion 的平均高光谱表观反射率, $R(\lambda)$ 和 $R_r(\lambda)$ 分别为待定标载荷和基准载荷的光谱响应函数。

式(1)所示的表观反射率模型主要有以下特点: 1) 角度分组建模: 利用表观反射率与卫星观测角度和太阳角度的关系, 将 Terra/MODIS、AQUA/MODIS 的表观反射率数据分为 16 组角度区间 (其中天顶角 8 组, 方位角 2 组), 拟合得到 16 组模型参数, 能够适用于天顶角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 角度差异范围内的大角度交叉定标。2) 高光谱匹配: 将高光谱卫星 Hyperion 多季节的大气层顶表观反射率光谱数据进行平均, 作为基准光谱开展光谱匹配, 使该模型的适用范围覆盖 $400 \sim 2400 \text{ nm}$ 整个波段载荷的定标。

基于式(1)的表观反射率模型开展待定标卫星的表观反射率计算, 即

$$\rho_{\text{TOA}}(\lambda) = \frac{\rho_{\text{MODEL}}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda)}{\rho_{\text{MODEL-r}}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda)} \times \rho_{\text{TOA-r}}(\lambda) \quad (3)$$

式中, ρ_{TOA} 为待定标载荷经交叉匹配后计算得到的表观反射率, ρ_{MODEL} 为利用模型计算的待定标载荷的表观反射率, $\rho_{\text{MODEL-r}}$ 为利用模型计算的基准载荷的表观反射率, $\rho_{\text{TOA-r}}$ 为基准载荷实测的表观反射率。由此可根据式(4)计算待定标卫星的定标系数, D 为实测值, D_0 为冷空观测值, Cal 为定标系数。

$$\text{Cal} = \frac{\rho_{\text{TOA}}(\lambda)}{D(\lambda) - D_0(\lambda)} \quad (4)$$

2 交叉定标应用

2.1 应用载荷与交叉场地

由于国内外的空间基准载荷均在研制阶段, 难以开展应用。为了对基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法进行验证, 采用国外高精度载荷 AQUA/MODIS 作为基准载荷, 对国产卫星风云三号 D 星上搭载的多角度观测载荷 MERSI-II 开展交叉定标。MERSI-II 于 2017 年 11 月发射, 包含 16 个可见光-近红外通道、3 个短波红外通道和 6 个中长波红外通道, 主要任务为地球海洋、陆地、大气等环境要素的动态监测^[17]。采用的交叉定标通道是 FY3D/MERSI-II 的 1、2、3、4、6、7 共 6 个通道, 具体参数和对应的 AQUA/MODIS 的观测通道如表 1 所示。

表 1 FY3D/MERSI-II 和 AQUA/MODIS 的交叉定标通道
Table 1 Cross calibration bands of FY3D/MERSI-II and AQUA/MODIS

MERSI-II observation channel	MERSI-II central wavelength/nm	MERSI-II spectral bandwidth/nm	MODIS observation channel	MODIS channel band/nm
1	470	50	3	459~479
2	550	50	4	545~565
3	650	50	1	620~670
4	865	50	2	841~876
6	1 640	50	6	1 628~1 652
7	2 130	50	7	2 105~2 155

采用难以获得人工实测数据的国外稳定目标场利比亚4作为交叉点,利比亚4是国际卫星对地观测委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)推荐的准不变定标场,如图2所示,选取中心位置(28.55°N, 23.39°E),大小为75 km×75 km的场地作为定标区域(图中红色方框区域),地表空间非均匀性小于2%,地表年非稳定性优于2%,气溶胶、水汽、臭氧含量较为稳定,存在一定的季节性变化特点^[18]。根据多角度表观反射率模型构建原理,利用长时间序列的MODIS和Hyperion载荷数据,完成了式(1)所示的共16组的多角度、高光谱表观反射率模型的构建。

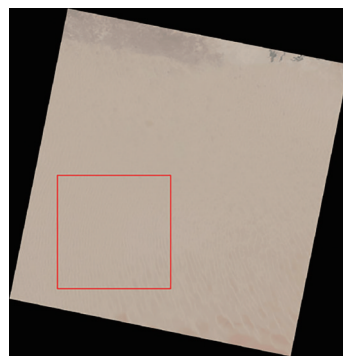


图2 利比亚4场地图
Fig. 2 Site map of Libya4

2.2 基于模型的交叉定标应用

在利用多角度表观反射率模型开展交叉定标时,首先观测2019—2020年区域匹配提取基准载荷和待定标载荷利比亚4场地的数据,并进行云剔除获得晴空条件下FY3D/MERSI和AQUA/MODIS两载荷对应通道的表观反射率,如图3所示。

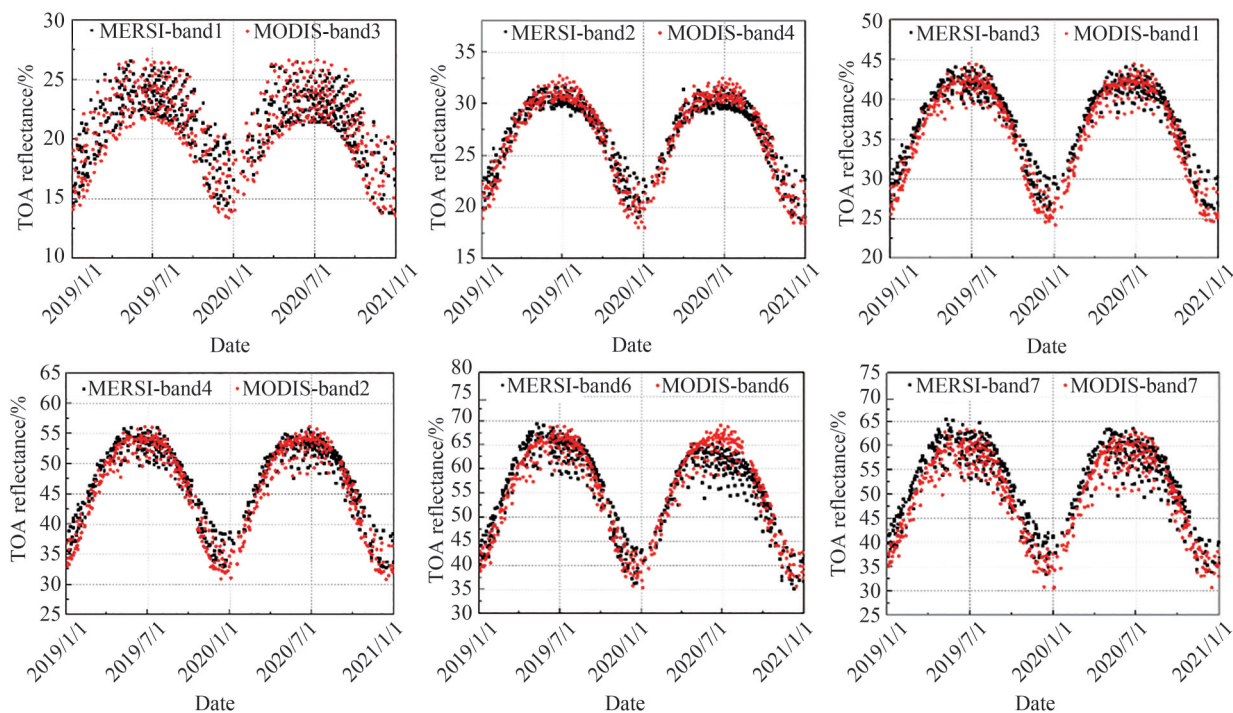


图3 MERSI和MODIS在利比亚4的表观反射率
Fig. 3 Apparent reflectance of MERSI and MODIS at Libya 4

然后进行观测时间匹配,提取MERSI和MODIS观测时间在30 min内的观测数据,减小大气条件非一致性带来的偏差。在30 min的观测时间差内,观测天顶角小于60°的MERSI和MODIS观测影像对共205个。如图4所示,两载荷观测天顶角的差异从0.49°到56.87°,两载荷观测方位角的差异从0.04°到235.68°。其中,MERSI和MODIS的观测天顶角和观测方位角差异在5°以内的影像对共26个。

对观测天顶角差异在0°~60°范围内的205个影像对开展交叉定标,基于多角度高光谱表观反射率模型的定标原理,具体步骤为:

1)将MERSI的观测天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角输入模型,得到各个通道模型计算的表观反射率;根据模型计算结果对Hyperion的光谱线进行比例平移,得到全谱段的光谱表观反射率;将全谱段表观反射率卷积到MODIS的观测波段,得到MODIS各个通道的表观反射率 ρ_{MODEL} ;

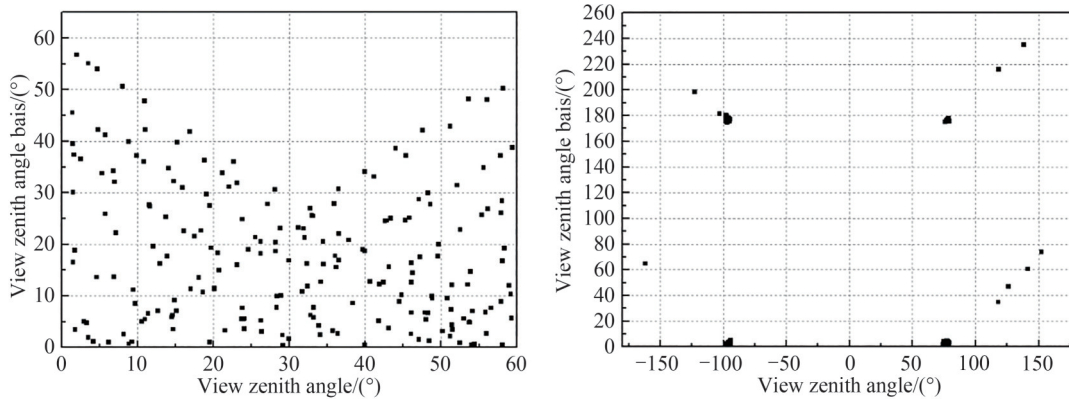


图4 MERSI和MODIS观测天顶角、方位角的角度偏差

Fig. 4 Zenith angle and azimuth angle angular deviation of MERSI and MODIS

- 2)将MODIS的观测天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角输入模型,得到表观反射率 $\rho_{\text{MODEL-T}}$;
- 3)根据MODIS的实测表观反射率,利用式(3)即可计算得到MERSI的交叉表观反射率 ρ_{TOA} ;
- 4)结合MERSI的观测值,根据式(4)计算得到定标系数Cal。

根据上述步骤计算得到MERSI在2019—2020年6个观测通道的交叉定标系数,如图5所示,通道1~4无明显衰减,通道6和7随时间有一定的衰变趋势。各波段定标结果均有一定的季节性变化趋势,由于交叉定标存在一定的时间差异,会受到不同时间大气变化、不同季节大气模式的影响,这与采用稳定目标场进行跟踪定标产生的季节性波动现象一致^[5]。

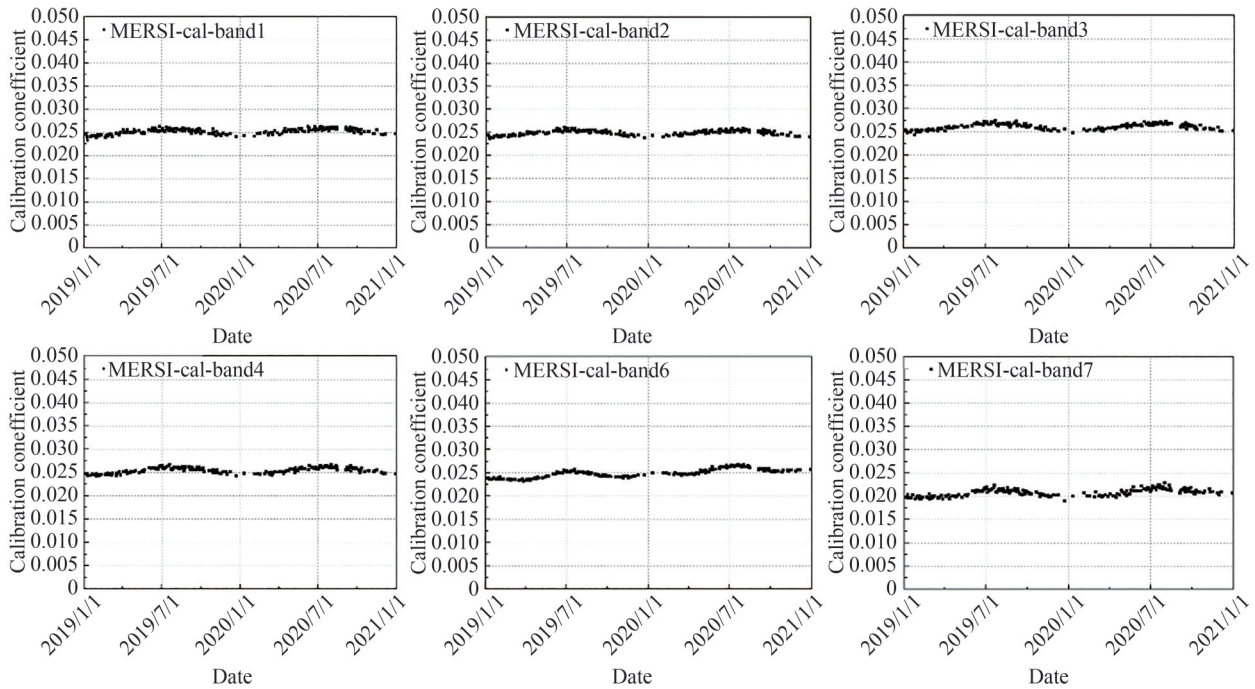


图5 FY3D/MERSI-II的定标系数

Fig. 5 Calibration coefficients of FY3D/MERSI-II

3 结果验证与分析

为了验证基于多角度高光谱表观反射率模型交叉定标结果的准确性,采用与传统的严格角度限制的SNO交叉定标方法进行比对分析。

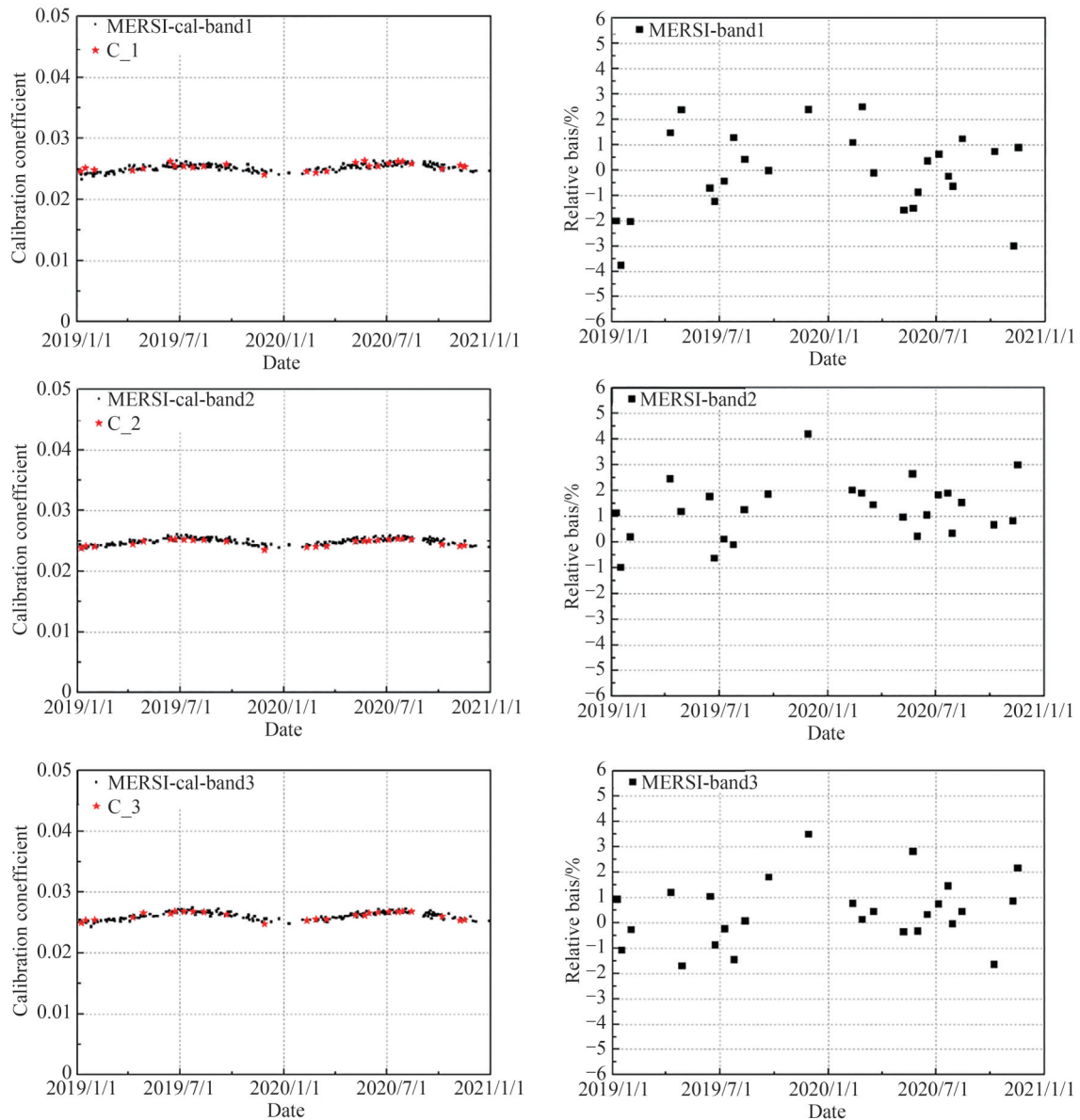
筛选MERSI和MODIS在观测天顶角和观测方位角偏差 5° 以内、观测时间偏差30 min以内的数据,只进行光谱匹配不进行角度匹配,利用式(5)直接计算交叉定标系数。

$$C = \frac{\rho_{\text{TOA-MODIS}}(\lambda)}{\text{DN}(\lambda) - \text{DN}_0(\lambda)} \times \frac{\int_{\Delta\lambda} \rho_{\text{Hy}}(\lambda) R_{\text{MERSI}}(\lambda) / \int_{\Delta\lambda} R_{\text{MERSI}}(\lambda)}{\int_{\Delta\lambda} \rho_{\text{Hy}}(\lambda) R_{\text{MODIS}}(\lambda) / \int_{\Delta\lambda} R_{\text{MODIS}}(\lambda)} \quad (5)$$

式中, $\rho_{\text{TOA-MODIS}}$ 为基准载荷 MODIS 实测的表观反射率, R_{MERSI} 和 R_{MODIS} 分别为 MERSI 和 MODIS 的光谱响应函数。

利用式(5)共完成 26 次的 SNO 交叉定标, 与基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法进行比对, 各通道的定标系数结果和相对偏差如图 6 所示。左列图中黑点为各个波段基于多角度表观反射率模型的 205 次定标系数, 红点为严格角度匹配的 26 次交叉定标系数, 右列图为相对偏差曲线。

由图 6 可以看出, 采用 SNO 交叉定标与本研究采取的基于多角度高光谱表观反射率模型的交叉定标, 在测量趋势上具有较好的一致性, 其中 1、2、3、4 通道相对偏差结果均在 4% 以内, 第 6、7 通道相对偏差结果在 5.5% 以内。计算两种方法的平均相对偏差、标准差如表 2 所示, 在应用的 6 个波段, 两种方法的平均相对偏差均在 2.1% 以内, 其中 1~6 波段的标准差优于 1.7%, 7 波段的标准差优于 2.52%。但是由图 6 可以看出, 定标系数具有一定的季节性变化规律, 这主要由于稳定目标场的大气特性存在一定的季节性变化规律,



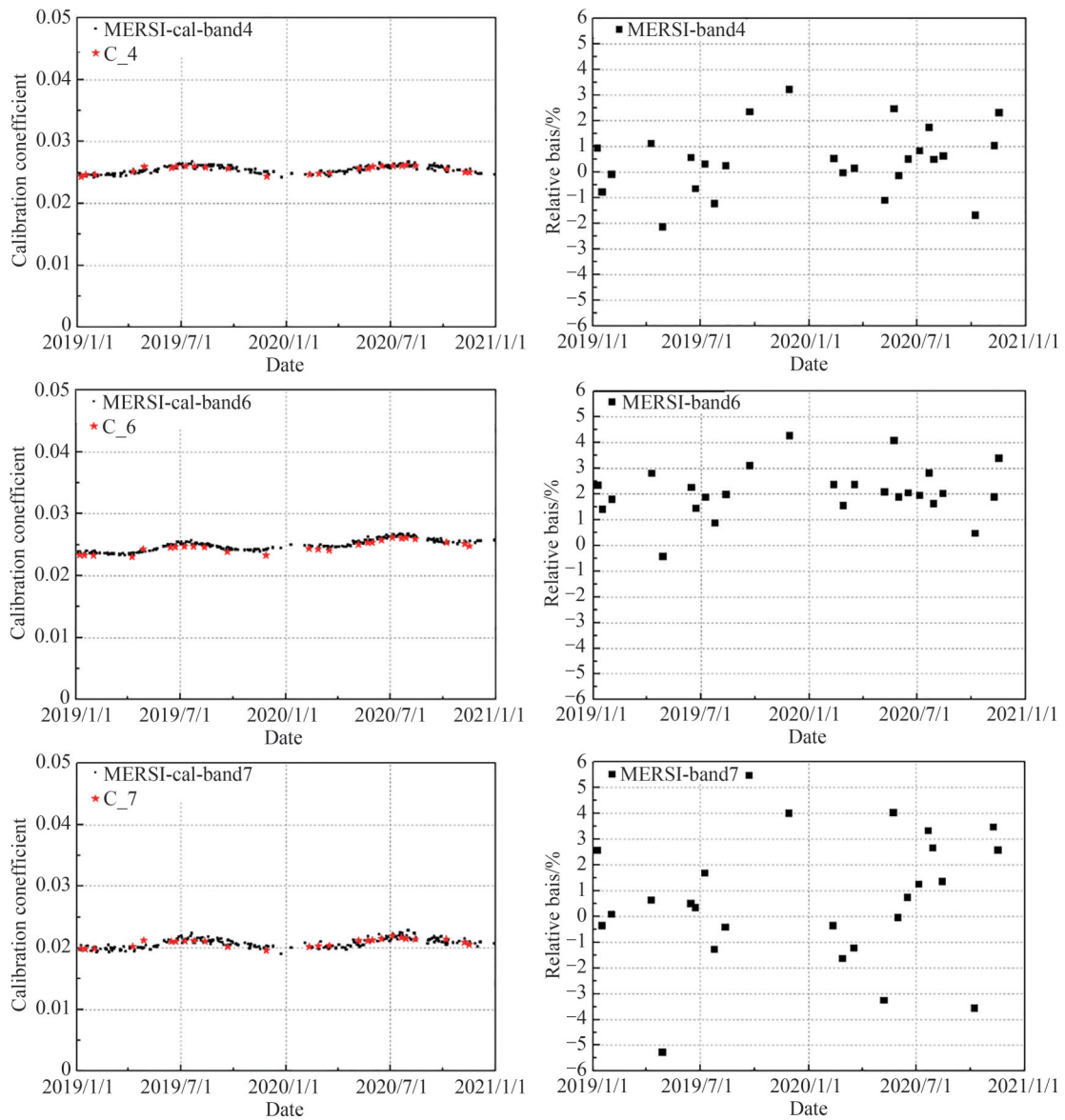


图6 交叉定标系数比对和相对偏差

Fig. 6 Cross calibration coefficients and relative bias

表2 交叉定标方法比对的平均相对偏差和标准差

Table 2 Average relative deviation and standard deviation of cross-calibration results

MERSI-II observation channel	MERSI-II central wavelength/nm	Mean relative deviation/%	Standard deviation/%
1	470	-0.09	1.62
2	550	1.28	1.15
3	650	0.43	1.29
4	865	0.46	1.30
6	1 640	2.10	0.99
7	2 130	0.68	2.52

在进行大气层顶多角度表观反射率模型的构建时,忽略了时间维的变化,这样会引入一定的大气影响因素,为了消除这种影响,后期应该改进模型,增加大气校正因子来减小大气季节性波动带来的影响。

由比对结果可以看出,采用多角度高光谱表观反射率模型的交叉定标方法,与传统的SNO交叉定标方

法之间具有较好的一致性和准确性,证明了本研究中构建的多角度高光谱表观反射率模型,可以较好地应用于大角度差异条件下的交叉定标,减少对现场测量定标场多角度地表数据的依赖和角度差异对交叉定标结果的影响,显著提高定标频次。在利比亚4稳定目标场的应用验证了基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法的可行性,该方法应用的前提是定标场地具有稳定的地表和大气特性,目前我国卫星定标常用的敦煌国家辐射校正场等目标场的地表、晴空日气溶胶、水汽、臭氧等特性都较为稳定且有一定的规律,因此后续可以在多个稳定场进行推广应用,来进一步验证该方法的适用性。

4 结论

本文针对多星多载荷空间辐射基准交叉定标提出一种基于多角度表观反射率模型的交叉定标方法,利用长时序、多角度、高光谱的国外高精度卫星数据构建了稳定目标场利比亚4的表观反射率模型,适用于天顶角在 60° 以内、观测波段 $400\sim 2400\text{ nm}$ 以内载荷的多角度交叉定标,通过对2019—2020年FY3D/MERSI与AQUA/MODIS开展的交叉定标应用表明,与严格角度限制的SNO交叉定标方法相比,定标频次由26次提高到205次,平均相对偏差在 2.1% 以内,验证了该定标方法的可行性和准确性。该方法可以应用于高频交叉定标,能及时跟踪和校正载荷在轨变化趋势,提升遥感数据质量。但是在单点定标的准确性、季节性波动方面还有待进一步的分析和改进,后续将开展国内外多个稳定目标场的建模,通过对多类型载荷开展应用与比对验证,更好地服务于空间辐射基准传递和多星遥感数据融合应用。

参考文献

- [1] GYANESH C, TIM J H, NIGEL F, et al. Overview of intercalibration of satellite instruments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1056-1080.
- [2] LIANG Shunlin. Some thoughts on the development of quantitative remote sensing in China [J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(9): 1889-1895.
梁顺林. 中国定量遥感发展的一些思考[J]. 遥感学报, 2021, 25(9): 1889-1895.
- [3] XIONG X, AMIT A, KEVIN A, et al. MODIS reflective solar bands on-orbit calibration and performance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(9): 6355-6371.
- [4] XU Wenbin, ZHENG Xiaobing, YI Weining, et al. Cross-calibration method based on hyperspectral imager hyperion [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0528002.
徐文斌, 郑小兵, 易维宁, 等. 基于超光谱成像仪Hyperion的交叉定标方法[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528002.
- [5] SUN L, HU X, XU N, et al. Postlaunch calibration of Fengyun-3B MERSI reflective solar bands [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1383-1392.
- [6] ZHANG Meng, WEI Wei, ZHANG Yanna, et al. High-frequency on-orbit radiometric calibration of SNPP VIIRS based on in-site automated observation technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0428001.
张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. 基于场地自动化观测技术的SNPP VIIRS高频次在轨辐射定标[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0428001.
- [7] YANG Min, LIU Zhaoyan, ZHAO Yongguang, et al. On-orbit radiometric calibration method for satellites based on TOA reflectance at Baotou Site [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1828001.
杨敏, 刘照言, 赵永光, 等. 基于包头场TOA反射率的卫星在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1828001.
- [8] XU H, ZHANG L, HUANG W, et al. Onboard absolute radiometric calibration and validation of the satellite calibration spectrometer on HY-1C [J]. Optics Express, 2020, 28: 30015-30034.
- [9] ANGAL A, XIONG X, WU A, et al. Multitemporal cross-calibration of the terra MODIS and Landsat 7 ETM+ reflective solar bands [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 51(4): 1870-1882.
- [10] FOX N, GREEN P, BRINDLEY H, et al. Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial and Heliostudies (TRUTHS): a benchmark mission for climate [C]. Proceedings of SPIE, 2014, 10563: 1056325.
- [11] WIELICKI B A, YOUNG D F, MLYNCZAK M G, et al. Achieving climate change absolute accuracy in orbit [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(10): 1519-1539.
- [12] LU Naimeng, DING Lei, ZHENG Xiaobing, et al. Introduction of the radiometric of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(6): 672-680.
卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 等. 中国空间辐射测量基准技术[J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 672-680.
- [13] CHEN Xuan, QI Wenwen, TAN Wei, et al. The analysis of cross-matching constraint mechanism based on the satellite joint observation [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 43(4): 1-7.

- 陈轩, 齐文雯, 谭伟, 等. 基于卫星联合观测的交叉匹配约束机制分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(4): 1-7.
- [14] GAO Shuai, LI Yuan, BAI Tingzhu, et al. Uncertainty analysis in cross-calibration and optimization calculation of calibration coefficients [J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 568-576.
高帅, 李元, 白廷柱, 等. 交叉定标中的不确定度分析及定标系数计算改进[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 568-576.
- [15] LIU Q, YU T, GAO H. Radiometric cross-calibration of GF-1 PMS sensor with a new BRDF model [J]. Remote Sensing, 2019, 11(707): 1-22.
- [16] RAUT B, KAEMANEE M, ANGAL A, et al. Empirical absolute calibration model for multiple pseudo-invariant calibration sites [J]. Remote Sensing, 2019, 11(9): 1105-1126.
- [17] XU Na. Guidelines for the use of medium-resolution spectral imager data in the ground application system engineering of Fengyun-3 Satellite. (V2.1) [EB/OL]. (2019-07). <http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/satellite/FY3D.html>.
徐娜. 风云三号(02批)气象卫星地面应用系统工程D星中分辨率光谱成像仪数据使用指南(V2.1) [EB/OL]. (2019-07). <http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/satellite/FY3D.html>.
- [18] WEI Wei. Research on long time series radiometric calibration of satellite sensor based on global calibration site network [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 53-65.
韦玮. 基于全球定标场网的卫星传感器长时间序列定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 53-65.

Cross Calibration Method Based on the Multi-angle Apparent Reflectance Model

ZHANG Yanna¹, GUO Fuxiang^{2,3}, WEI Wei², LI Xin²

(1 School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

(2 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(3 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: High-frequency radiometric calibration can track and correct the on-orbit state of the remote sensors in time to ensure the accuracy of observation data. In order to improve the accuracy and data consistency between the different remote sensors, the radiometric benchmark satellites have been developed in recent years. However, during the radiometric transmission of the radiometric benchmark satellite, due to the different orbits between the benchmark satellite and the remote sensor to be calibrated, the observation angles between the satellites are quite different, so the calibration frequency is limited under the condition of Simultaneously Nadir Observation (SNO) cross calibration. In order to improve the calibration frequency and reduce the impact of angle matching on calibration accuracy, a cross calibration method based on the multi-angle apparent reflectance model is proposed in this paper. The multi-angle apparent reflectance model of the stable target site is constructed to carry out the cross calibration of the benchmark satellite. The stable site used for the cross calibration is selected, and the multi-angle model of the site is constructed by grouping the observation angles, solar angles, and apparent reflectance of Terra/MODIS and AQUA/MODIS for 11 years from 2008 to 2019 under the multi-angle and high-precision remote sensors. The multi-angle model is suitable for the large angle cross calibration in the range of $0^\circ \sim 60^\circ$ zenith angle. Based on the pseudo-invariance property of the stable site, the spectral matching function suitable for 400~2400 nm band is constructed by using the average spectral apparent reflectance data of Hyperion, ignoring the variation of the time-dimensional. In the process of the benchmark satellite cross calibration, regional matching, time matching, and cloud removal are carried out for the reference sensor and the sensor to be calibrated at first. Then, the apparent reflectance measured by the reference sensor and the sensor to be calibrated is obtained using the model to complete angle matching and spectral matching. Finally, the calibration coefficients are calculated by combining the DN value of the sensor to be calibrated. According to the calibration principle in this paper, a multi-angle apparent reflectance model of the pseudo-invariance field Libya 4, which is recommended by CEOS, was constructed. Using AQUA/MODIS as the benchmark sensor, 205 times cross-calibration applications were performed on MERSI II of the Fengyun-3D satellite at six solar reflection bands from 2019 to 2020. The calibration coefficient and

in-orbit variation trend of FY3D/MERSI II high frequency were obtained. In order to verify the accuracy of the cross calibration method in this study, 26 times a comparison of results was compared with SNO cross calibration method with strict angle limitation. The two methods have good consistency in the measurement trend. Compared with SNO cross calibration method, the calibration frequency increased from 26 times to 205 times, and the average relative deviation was less than 2.1%, which proved that the multi-angle hyperspectral apparent reflectance model constructed in this study could be better applied to cross calibration under the condition of large angle difference. The apparent reflectance model of the stable site is constructed by using the long-sequence, multi-angle and hyperspectral high-precision satellite data. The apparent reflectance model is suitable for the multi-angle cross calibration of the remote sensors within 60° observation angle and observation band within 400~2 400 nm. The calibration method in this study can solve the dependence on the multi-angle ground site data from the manual measurement, significantly improve the calibration frequency of the multi-type satellites. The calibration method timely track and correct the variation trend of load in orbit, and improve the quality of remote sensing data. However, the accuracy of the single point calibration and the seasonal fluctuations need to be further analyzed and improved. Through the application and comparison verification of more stable sites and more remote sensors, this method will promote the application of the multi-satellite quantitative remote sensing.

Key words: Optics remote sensing; Radiometric benchmark transfer; Apparent reflectance model; Cross calibration; Multi-angle; High frequency

OCIS Codes: 120.0280; 010.0280; 120.4800