

FY-3C MERSI太阳反射波段的交叉定标

何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 郭强

引用本文:

何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. FY-3C MERSI太阳反射波段的交叉定标[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1462-1470.

HE Xing-wei, FENG Xiao-hu, HAN Qi, et al. Cross-calibration of FY-3C medium resolution spectral imager in reflective bands[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1462-1470.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202807.1462>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets

光学精密工程. 2015, 23(7): 1911-1920 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152307.1911>

VIRR/FY-3A分裂窗波段与AIRS/AQUA和IASI/METOP-A数据的交叉辐射定标

Cross-calibration of VIRR/FY-3A split-window channels with AIRS/AQUA and IASI/METOP-A data

光学精密工程. 2015, 23(7): 1892-1902 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152307.1892>

可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路

Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands

光学精密工程. 2015, 23(7): 前插1-前插2,1807-1812 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152307.1807>

星载成像仪观月数据提取和辐照度转换方法研究

Data collection and irradiance conversion of lunar observation for MERSI

光学精密工程. 2019, 27(8): 1819-1827 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192708.1819>

碳卫星CO₂探测器发射前的漫反射板定标

Preflight diffuser's calibration of carbon dioxide spectrometer of TanSat

光学精密工程. 2018, 26(8): 1967-1976 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182608.1967>

文章编号 1004-924X(2020)07-1462-09

FY-3C MERSI 太阳反射波段的交叉定标

何兴伟,冯小虎*,韩琦,郭强
(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘要:为了实现中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager, MERSI)太阳反射波段的星上绝对辐射定标,本文采用国际通用的 6 个北非沙漠目标即伪不变目标,以高质量的 SeaWiFS 数据为参考,对 FY-3C MERSI 数据进行交叉定标。首先利用高质量的 SeaWiFS 数据构建天顶双向反射分布函数模型;其次,构建两个传感器的参数化光谱匹配因子;最后,基于前两部分工作进行交叉定标。本文构建的天顶反射模型可以准确地表达伪不变目标的天顶反射率,波段预测误差基本都在 3%之内;考虑观测几何条件和吸收气体含量的参数化光谱匹配因子可以有效地预测 MERSI 的天顶反射率;交叉定标结果的时间序列十分稳定且无明显趋势,与伪不变目标的天顶辐射信号长期稳定且规律性变化的特点相一致,与 L1 定标结果存在一个系统偏差。该方法充分考虑和解决了交叉定标研究中轨道漂移、观测几何条件和光谱响应差异带来的不确定性问题,能够对卫星辐射性能进行有效的在轨监测和订正。

关键词:光谱成像仪;交叉定标;光谱匹配因子;双向反射分布函数

中图分类号: TP732; P414.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202807.1462

Cross-calibration of FY-3C medium resolution spectral imager in reflective bands

HE Xing-wei, FENG Xiao-hu*, HAN Qi, GUO Qiang

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: fengxiaohu@cma.gov.cn

Abstract: To ensure absolute calibration of the solar band of the Medium Resolution Spectral Imager (MERSI), a cross-calibration algorithm utilizing Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) instrument over six Pseudo-invariant Targets (PTs) is developed and used to calibrate FY-3C\MERSI data. The technique involves three key steps: Capturing the actual Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF) characteristics using the well-calibrated SeaWiFS radiance data; Parameterizing the Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) between SeaWiFS and MERSI sensor; and Cross-calibrating each screened MERSI observation based on the above two modules. The employed BRDF model can accurately predict ρ^{TOA} as observed by SeaWiFS with small biases (within approximately 3% for most cases). Furthermore, the fitted SBAF are nearly unbiased estimations of the simulated values. The time series of the cross-calibration result is very stable and exhibits no obvious trend, which is consistent with the characteristic of long-term stability and regular change of radiation signal of PTs. Hence, there is a systematic deviation from the calibration result of L1. This

收稿日期:2019-11-19;修订日期:2019-12-23.

基金项目:国家重点研发项目(No. 2018YFC1507803)

method fully considers and solves the uncertainty due to orbit drift, i. e., the difference between observed geometric conditions and spectral response in cross-calibration, and can effectively monitor and correct the radiation performance of satellites in orbit.

Key words: spectral imager; cross-calibration; spectral band adjustment factor; bi-directional reflectance distribution function

1 引 言

随着遥感技术的发展,利用卫星遥感数据反演地表各种地球物理化学参数已经成为当今的研究热点。仪器的定标精度直接影响卫星数据的定量化应用,卫星传感器发射升空后,其自身特性和周围环境的变化会造成传感器老化、灵敏度下降,严重影响其辐射性能,因此需要对卫星辐射性能进行有效的在轨监测和订正。对于具有完备的星上定标系统的 MODIS 和 SeaWiFS 传感器,数据质量较高,其绝对辐射定标精度分别达到了 5% 和 3%,相对精度分别达到了 1% 和 0.16%。搭载在 NOAA 上的 AVHRR 传感器的可见光近红外通道缺少星上定标系统,通过场地定标获取卫星过境时刻的同步测量数据,监测传感器的性能变化并进行订正。风云三号是我国第二代极轨气象卫星,中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager, MERSI)是星上搭载的主要仪器之一。尽管 MERSI 具有可见光星上定标设备,但是只能用于仪器响应的衰减追踪,因此必须采用其他定标手段来保证数据的辐射精度^[1]。

太阳反射波段的定标跟踪和监测方法包括恒定定标场的替代定标^[2-3]、基于均匀稳定目标的辐射跟踪^[4-8]、利用月亮目标的辐射跟踪^[9]、基于高精度参考传感器的交叉定标^[10]。目前, MERSI 的绝对定标主要采用基于同步现场测量的敦煌场地替代定标,敦煌场地替代定标在星地同步测量时受各种自然因素(大气条件,天气状况等)和人为因素(观测仪器等)的影响,且需要投入大量的人力物力,获取的同步测量数据有限,每年一次的定标频次低,不能有效地检测仪器辐射性能的变化。交叉定标方法主要是将定标精度高、数据质量较好的传感器(如 SeaWiFS 和 MODIS)作为参考传感器,对定标精度较低的卫星传感器进行定标,被定标传感器理论上可以达到参考传感器的定标精度,其核心思想就是利用参考传感器,通过

光谱匹配和时空匹配,模拟待定标传感器的天顶辐射值。相对于场地替代定标,交叉定标需要的地面测量数据较少,定标精度主要取决于参考传感器的精度和光谱、时空匹配带来的误差,适用于历史数据的重定标工作。

本文采用国际上通用的 6 个北非沙漠目标,基于高质量的 SeaWiFS 数据对 FY-3C MERSI 在轨运行期间(2013 年 10 月—2015 年 1 月)数据进行了交叉定标研究。

2 数 据

2.1 SeaWiFS 数据

SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)是搭载在 SeaStar 太阳同步轨道卫星上的美国第二代海色遥感传感器。SeaWiFS 共有 8 个光谱通道(波段设置见表 1),包括 6 个可见光通道和 2 个近红外通道。

表 1 SeaWiFS 光谱波段指标

Tab.1 Spectral band specifications of SeaWiFS

Band	Central wavelength/ μm	Bandwidth/ μm	SNR
1	0.412	0.02	499
2	0.443	0.02	674
3	0.490	0.02	667
4	0.510	0.02	640
5	0.555	0.02	596
6	0.670	0.02	442
7	0.765	0.04	455
8	0.865	0.04	467

为了将 SeaWiFS 的观测辐亮度的不确定性限制在 0.1% 以内^[11], NASA 的海色遥感小组进行了发射前定标、星上定标、海面替代定标及月球定标等一系列系统而严格的定标工作,最终 SeaWiFS 的天顶辐射数据的绝对定标精度小于 3%,相对精度小于 0.16%,时间稳定性偏差不超过 0.3%^[12]。高质量的 SeaWiFS 辐射观测数据

可以用于多种产品的数值反演,如气溶胶和海上遥感,并作为辐射定标的优良参考“数据源”用于其他传感器如 MODIS 的交叉定标工作中。

本文为了避免后期 SeaWiFS 数据质量衰减和轨道漂移问题,选取了 1997~2001 年 GAC (Global Area Coverage, 4.5 km) 长时间序列数据用于交叉定标研究。

2.2 MERSI

FY-3C 是我国第二代极轨气象卫星的首颗业务星, MERSI 是其搭载的一个关键光学成像仪器,它应用了 45° 扫描镜和消旋 K 镜的跨轨多探元并扫式辐射计,扫描周期为 1.5 s,可对星下点 ±55° 的视场进行对地观测。MERSI 拥有 19 个可见光通道和 1 个近红外通道,具体指标如表 2 所示。可以看出, MERSI 的 Band1~4 和 SeaWiFS 对应的 Band3, 5, 6, 8 通道设置很相似,故可以将 SeaWiFS 作为参考数据,对 MERSI 的 band1-4 进行交叉定标。

表 2 MERSI 光谱波段指标

Tab. 2 Spectral band specifications of MERSI

Band	Central wavelength/ μm	Bandwidth/ μm	Spatial resolution/m	Danamic range
1	0.470	0.05	250	100%
2	0.550	0.05	250	100%
3	0.650	0.05	250	100%
4	0.865	0.05	250	100%
5	11.250	2.50	250	330 K
6	1.640	0.05	1 000	90%
7	2.130	0.05	1 000	90%
8	0.412	0.02	1 000	80%
9	0.443	0.02	1 000	80%
10	0.490	0.02	1 000	80%
11	0.520	0.02	1 000	80%
12	0.565	0.02	1 000	80%
13	0.650	0.02	1 000	80%
14	0.685	0.02	1 000	80%
15	0.765	0.02	1 000	80%
16	0.865	0.02	1 000	80%
17	0.905	0.02	1 000	90%
18	0.940	0.02	1 000	90%
19	0.980	0.02	1 000	90%
20	1.030	0.02	1 000	90%

2.3 伪不变目标

伪不变目标多指沙漠、极地冰雪等地表反射特性和大气状况长期保持稳定,且人类活动较少的地区,另外还可以泛指月球等地外目标。伪不变目标的天顶辐射信息长期保持稳定且有规律,经常作为辐射参考标准用于辐射定标^[13-14]。本文选用地球观测卫星委员会的红外和可见光遥感器定标和验证工作小组 (Committee on Earth Observation Satellites-Working Group for Calibration and Validation-subgroup on Infrared Visible Optical Sensors, CEOS WGCV IVOS) 评估选定的 6 个北非沙漠目标,如图 1 所示。

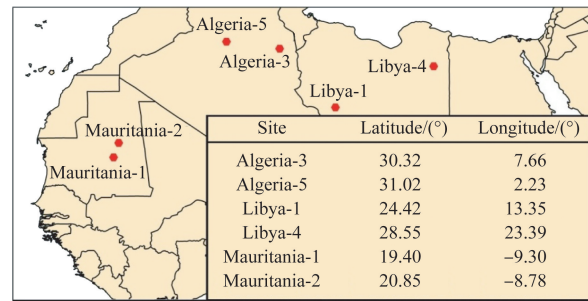


图 1 六个伪不变目标的地理分布

Fig. 1 Distribution of six CEOS endorsed pseudo-invariant targets

3 方法

对 MERSI 进行交叉定标研究需要考虑和解决轨道漂移、不同卫星传感器观测几何条件差异和辐射光谱响应差异带来的不确定性。本文主要分为 3 个模块来进行 MERSI 的交叉定标,图 2 为定标方法的模块流程(虚线框为 3 个工作模块)。

3.1 目标天顶方向性反射模型

SeaWiFS 传感器为了减少太阳耀斑的影响,仪器设计成 ±20° 倾斜扫描,再加上后期的轨道漂移问题,不能提供一般交叉定标要求的星下点观测,因此引入 BRDF 双向反射模型来描述天顶反射率。本文借助伪不变目标上空大气干洁稳定,SeaWiFS 天顶反射率受大气影响较小的特点,将角度信息和地表反射率特性一起考虑,用一个统一的 BRDF 模型来表达各伪不变目标不同波段的天顶反射率。

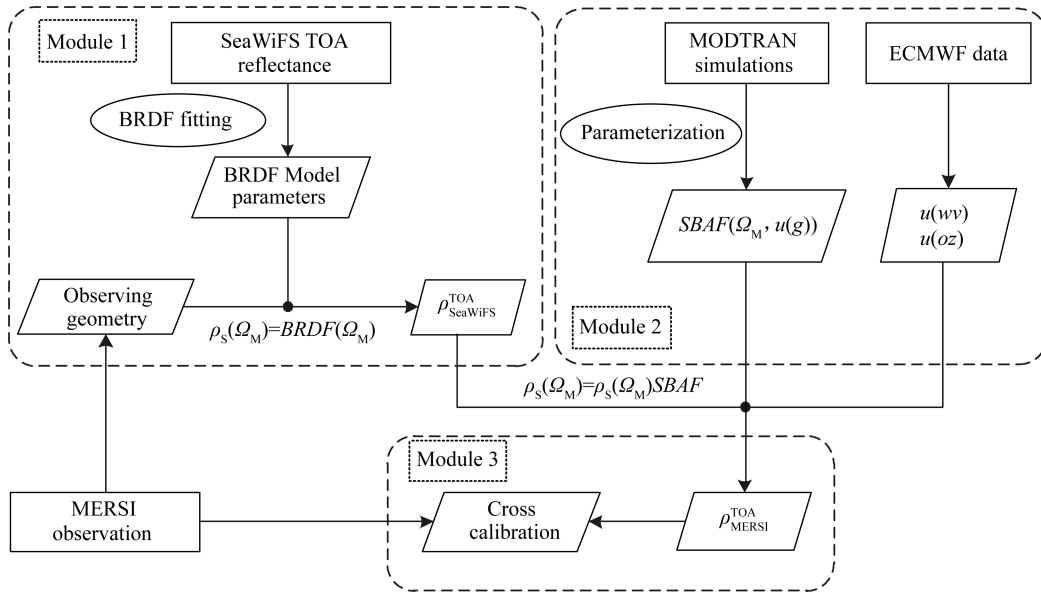


图 2 定标方法的模块流程

Fig. 2 Flowchart of proposed calibration procedure

首先进行 6 个沙漠目标上空 SeaWiFS 数据的预处理,挑选无云、均一的观测数据 ρ^{TOA} ,对于某目标某波段的时间序列 ρ^{TOA} 及角度信息,使用 Ross-Thick Li-Sparse 模型(简称 Ross-Li 模型),进行拟合,获得相关的 BRDF 参数。Ross-Li 模型是一种半经验的核驱动模型,地表对入射光的散射可分为 3 种类型:各向同性散射、针对水平均一片冠层的辐射传输体散射和考虑了目标三维场景(包括阴影和相互遮挡)的几何光学散射。BRDF 的数学表达式为^[15]:

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \varphi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{vol}} K_{\text{vol}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}} K_{\text{geo}}(\theta_s, \theta_v, \varphi), \quad (1)$$

其中: ρ 是双向反射率(在这里用来表达天顶反射率); f 是核系数,与波段有关; K 是核,与角度有关;下标 iso, vol, geo 依次代表各向同性、体散射和几何光学; θ_s, θ_v 和 φ 分别为太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。

K_{vol} 和 K_{geo} 的表达式为:

$$K_{\text{vol}} = \frac{(\pi/2 - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} - \frac{\pi}{4},$$

$$K_{\text{geo}} = O(\theta_s, \theta_v, \varphi) - \sec \theta'_s - \sec \theta'_v + \frac{1}{2} [1 + \cos \xi'] \sec \theta'_s \sec \theta'_v. \quad (2)$$

式(2)中各参量的表达式如下:

$$\cos \xi = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \varphi,$$

$$O = \frac{1}{\pi} [t - \sin t \cos t] [\sec \theta'_s + \sec \theta'_v],$$

$$\cos t = \frac{h}{b} \cdot \frac{\sqrt{D^2 + [\tan \theta'_s \tan \theta'_v \sin \varphi]^2}}{\sec \theta'_s + \sec \theta'_v},$$

$$D = \sqrt{\tan^2 \theta'_s + \tan^2 \theta'_v - 2 \tan \theta'_s \tan \theta'_v \cos \varphi},$$

$$\cos \xi' = \cos \theta'_s \cos \theta'_v + \sin \theta'_s \sin \theta'_v \cos \varphi,$$

$$\theta'_s = \arctan \left[\frac{b}{r} \tan \theta_s \right],$$

$$\theta'_v = \arctan \left[\frac{b}{r} \tan \theta_v \right],$$

其中: ξ 为相位角, b 是球体垂直半径, h 是球体水平半径, r 是球心高度, $h/b=2$ 和 $b/r=2$ 是无量纲的量,用以描述植被的相对高度和形状^[16]。

通过拟合伪不变目标上天顶反射率 ρ^{TOA} 的时间序列,求取最优的 3 个核系数 f 使得拟合误差达到最小:

$$\sum_{i=1}^n [\rho_i^{\text{TOA}} - \rho(\theta_s, \theta_v, \varphi)]^2 = \min, \quad (3)$$

其中: ρ_i^{TOA} 为 SeaWiFS 观测值, $\rho(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 为 BRDF 的模拟值。这样我们构建了各伪不变目标上不同波段的天顶反射率角度分布模型,为了评估模型的预测精度,计算了每个目标上 BRDF 的模拟值和 SeaWiFS 观测值的平均偏差和 RMS。表 3 总结了各目标各波段模型拟合的 RMS 情况,对于北非沙漠目标,Libya-4 的拟合精度最好,Mauritania-2 的精度最低;分波段,6~8 波段的拟合精度都在 1.5% 以内,1~5 波段的模型精度相比 6~8 三个波段的精度相对较低,Mauritania-2 第三波段的精度

达到了 3.216%。通过分析可以看出,基于高质量的 SeaWiFS 数据构建的天顶反射模型可以准确地

表达伪不变目标的天顶反射率,用于交叉定标的 3,5,6,8 波段的预测误差基本都在 3%以内。

表 3 SeaWiFS 不同波段 BRDF 拟合 RMS

Tab. 3 Comparison between model predicting and SeaWiFS measurements

(%)

Band	Algeria-3	Algeria-5	Libya-1	Libya-4	Manritania-1	Manritania-2
1	2.014	1.907	1.952	1.197	2.501	2.730
2	2.352	2.282	2.103	1.094	2.815	3.136
3	2.615	2.430	2.046	1.147	2.800	3.216
4	2.324	2.187	1.881	1.104	2.537	2.935
5	1.600	1.610	1.489	1.135	1.967	2.055
6	0.992	1.031	0.833	0.908	1.445	1.480
7	1.003	1.021	0.840	0.910	1.365	1.379
8	1.176	1.067	0.895	0.968	1.408	1.397

3.2 光谱匹配模型

通过构建精确的目标天顶方向反射模型,可以计算任意观测角度上 SeaWiFS 的天顶反射率。而要对 MERSI 进行定标,则需要将 SeaWiFS 预测得到的天顶反射率转换到 MERSI 对应通道观测的天顶反射率。

在相同的地表、大气和观测几何条件下,两传感器相似通道的天顶反射率比值叫光谱匹配因子(Spectral Band Adjustment Factor, SBAF),主要与地表特性、大气状况、观测几何和光谱响应函数(Spectral Response Function, SRF)等因素相关^[17-18],每次 MERSI 观测时的 SBAF 都不同,为了得到每次 MERSI 观测的 DN 值对应的天顶反射率,我们分析了伪不变目标上不同观测条件下 SBAF 的主要影响参数,使用参数化模型估计 SBAF。由于伪不变目标的地表和大气散射作用变化不大,SBAF 主要的影响因素是吸收气体水汽(wv , g/cm^2)和臭氧(oz , ATM-cm)。图 3 显示了 MERSI 传感器 1~4 波段和 SeaWiFS 对应通道的光谱响应函数情况。为了表现不同传感器通道辐射信号受气体吸收情况的差异,在图 3 中叠加不同水汽和臭氧含量条件下模拟得到的沙漠上空的天顶反射率曲线。可以看出,SeaWiFS 通道的 SRF 比 MERSI 要窄很多,避免了大多数气体吸收谱段,相比之下 MERIS 对应通道受气体吸收影响

更大,这也导致二者之间 SBAF 因吸收气体含量的不同而不同。700 nm 以下的波段主要受臭氧含量的影响,700 nm 以上的波段主要受水汽含量的影响,除了吸收气体,观测几何条件也会影响 SBAF,太阳角度和卫星角度越大,辐射信号传输路径越长,气体吸收对 SBAF 的影响就更为明显。

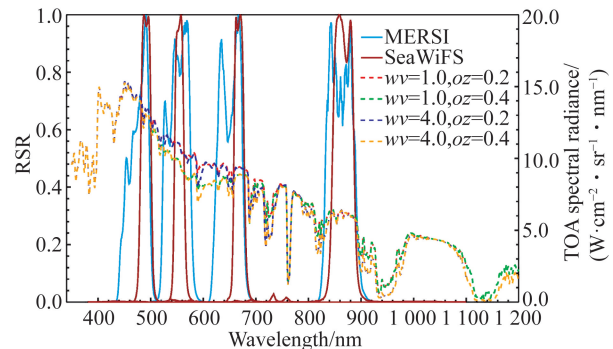


图 3 MERSI 和 SeaWiFS 的光谱响应函数,以及不同吸收气体含量下沙漠目标上模拟的天顶辐射光谱曲线

Fig. 3 Spectral response functions of SeaWiFS and MODTRAN simulated TOA spectral radiance for four different scenarios of gaseous absorption

为了将 SBAF 参数化,首先使用辐射传输模式 MOTRAN 对不同观测几何条件和吸收气体含量下的 SBAF 进行了大量模拟^[19],模拟条件见表 4。

表 4 MODTRAN 模拟条件(括号内为模拟值间隔)
Tab.4 Parameters specification for MODTRAN 4.0 simulations

Surface	Desert
Aerosol model	Desert
Solar zenith angle/(°)	0 (15)60
Viewing zenith angle/(°)	0(10)60
Relative azimuth angle/(°)	0(36)180
Total water vapor/(g · cm ⁻²)	0.0(1.0)5.0
Total ozone(ATM-cm)	0.0(0.1)0.4

模拟得到 MERSI 和 SeaWiFS 共 8 个通道的天顶辐亮度,进一步转换为 MERSI 通道和 SeaWiFS 对应通道的 SBAF。通过前面的分析,本文将 SBAF 的影响参数限定为吸收气体含量和观测角度,将几何大气质量因子(Geometry Air Mass Factor, M)与吸收气体含量(wv 和 oz)一起作为参数化因子构建 SBAF 模型,得到:

$$\begin{aligned}
 SBAF_1 &= \sum_{k=0}^1 a_k(M) \times oz^k, \\
 a_k(M) &= \sum_{i=0}^4 b_i \times M^i, \\
 SBAF_2 &= a_0 + \sum_{k=1}^4 a_k(M) \times wv^k, \\
 a_k(M) &= \sum_{i=0}^2 b_i \times M^i, \\
 M &= \frac{1}{\cos \theta_s} + \frac{1}{\cos \theta_v}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中 a, b 为拟合系数。

$SBAF_1$ 表示小于 700 nm 的 1,2,3 通道的模型表达式,主要受臭氧和观测角度的影响; $SBAF_2$ 则为大于 700 nm 的 4 个通道的模型表达式,主要受水汽和观测角度的影响。

通过拟合辐射传输模式计算的 SBAF,即求取最优的模型参数($SBAF_1$ 共 10 个参数, $SBAF_2$ 共 13 个参数)使得拟合误差达到最小:

$$\sum_{i=1}^n [SBAF_{i,\lambda}^{mod} - SBAF_{i,\lambda}^{cal}]^2 = \min, \quad (5)$$

其中: $SBAF_{i,\lambda}^{mod}$ 为参数化公式的预测值, $SBAF_{i,\lambda}^{cal}$ 为辐射传输模式的计算结果。

为了评估模型的有效性,这里将参数化公式预测的 SBAF 和模拟得到的 SBAF 进行了比较,见表 5。可以看出,四个波段的参数化计算结果相

对于模拟结果的平均偏差几乎为 0,误差在 5% 以内,可以有效地预测 MERSI 的天顶反射率。

表 5 公式预测的 SBAF 和模拟得到的 SBAF 的差异
Tab.5 Difference between parameterized and original simulated SBAFs

Band	bias	RMS	max	min
1	0.000 4	0.216 1	0.577 7	-0.923 9
2	0.000 1	0.106 9	0.175 1	-0.352 8
3	0.002 3	0.485 7	0.719 9	-1.476 8
4	0.000 1	0.085 3	0.323 1	-0.334 6

3.3 交叉定标

首先对伪不变目标上的 MERSI 观测数据进行筛选和提取,剔除云污染及异常观测带来的影响。读取 MERSI 的观测角度 $\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)$,通过 BRDF 模型(式(1))预测该角度上 SeaWiFS 传感器应观测到的天顶反射率 $\rho_{SeaWiFS}^{TOA}$;然后从 ERA-Interim 再分析资料中获取观测时刻目标上空的吸收气体含量,使用 SBAF 模型(式(4))计算光谱匹配因子,最后得到 MERSI 此时应观测到的天顶反射率理论值:

$$\rho_{MERSI}^{TOA} = \rho_{SeaWiFS}^{TOA} \times SBAF(\Omega, oz, wv). \quad (6)$$

4 定标结果

4.1 定标结果趋势分析

由于伪不变目标本身具有天顶信号 ρ^{TOA} 长期稳定且有规律的特点,因此可以用来检验各个目标上定标结果 ρ^{TOA} 的时间序列稳定性。为了验证定标结果的精度,将本文交叉定标得到的天顶反射率和通过国家卫星气象中心公布的 L1 业务化定标系数计算得到的天顶反射率进行了对比分析,图 4 为 6 个伪不变目标上二者的长时间序列分布和时间变化趋势。从图中可以看出,L1 业务化定标系数计算的天顶反射率时间变化趋势不稳定,定标系数更新前后,天顶反射率明显变化,说明场地定标频次不够,官方公布的业务化定标系数的精度也有一定的不确定性。而交叉定标结果的时间序列十分稳定且无明显趋势,与伪不变目标的天顶辐射信号长期稳定且规律性变化的特点相一致。

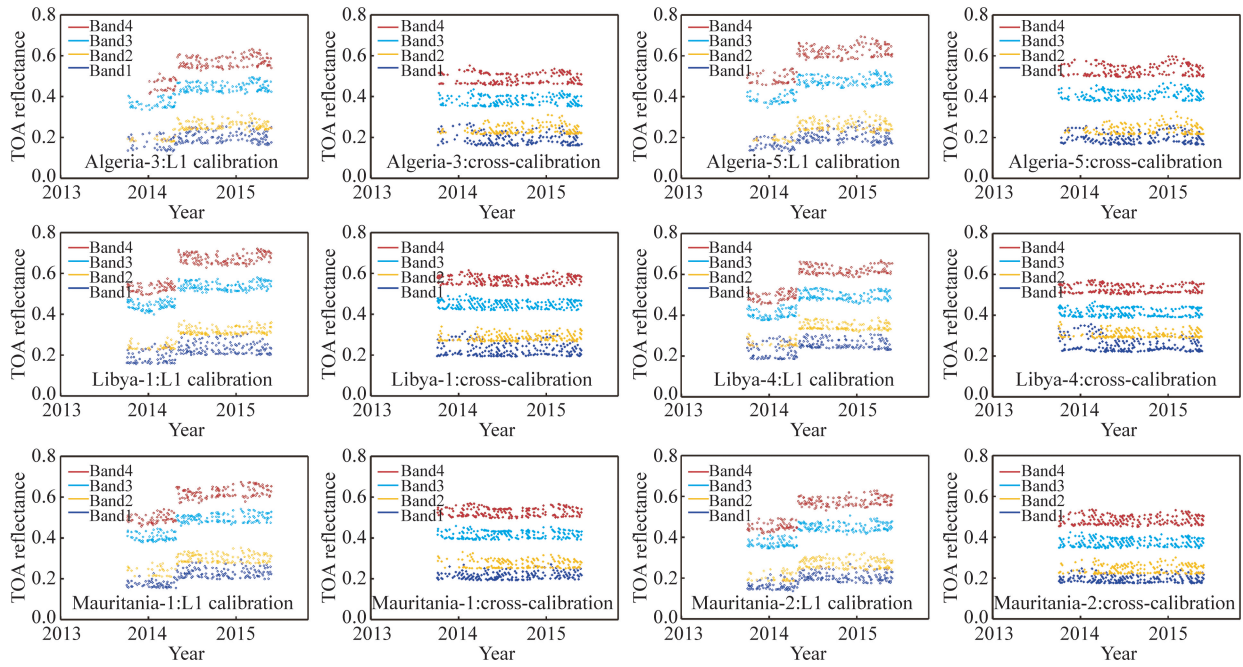


图 4 L1 定标系数和交叉定标得到的天顶反射率时间序列

Fig. 4 ρ^{TOA} time series of L1 calibration and cross-calibration

4.2 定标结果精度

图 5 为交叉定标得到的天顶反射率和 L1 业务化定标结果的比值的时间变化趋势及计算得到的均值和标准差。从图中可以看出,由于 L1 业务化定标系数在 2014 年 4 月 26 日进行了更新,定标系数更新前后天顶反射率出现跳变,两种定标结果的比值也出现了断层,4 月 26 日之前,对于 band1 和 band2,我们的定标结果明显高于 L1,比值在 1.2~1.3 之间,差异比较大,而对于 band3 和 band4,比值在 1~1.1 之间;在 4 月 26 日之后,band1 和 band2 的比值在 0.95~1 之间,而 band3 和 band4 差异较大,比值在 0.9 左右。说明官方业务化定标系数和我们的定标结果存在一个系统性偏差。如果 MERSI 的场地定标精度非常高,同时在本文的交叉定标中又完全消除了待定标传感器 MERSI 和参考传感器 SeaWiFS 之间的差异,那么二者比值的理论值应该为 1,显然实际上并非如此。分析原因,首先,L1 业务化定标系数更新前后天顶反射率出现跳变,不符合伪不变目标天顶信号 ρ^{TOA} 长期稳定且有规律的特点,说明场地定标频次低,不能有效地检测仪器辐射性能的变化,此外,交叉定标过程中,两个传感器之间的光谱响应差异、大气效应的影响等因素并未完全消除。

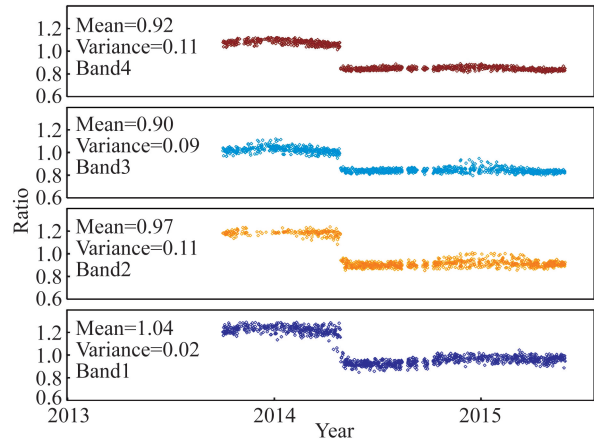


图 5 交叉辐射定标结果与 L1 定标结果的比较

Fig. 5 Comparison of TOA reflectance between this work and MERSI L1

5 结论

本文采用国际通用的 6 个北非沙漠目标,以定标精度较高的 SeaWiFS 作为参考传感器,借助 MODTRAN 辐射传输模型和 ERA-Interim 再分析资料吸收气体数据,对 FY-3C MERSI 数据进行了交叉定标研究,结果表明:SeaWiFS 是具有完备的星上定标系统的传感器,数据质量较高,本文构建的天顶反射模型可以准确地表达伪不变目

标的天顶反射率,波段预测误差基本都在 3% 之内。考虑观测几何条件和吸收气体含量的参数化光谱匹配因子可以有效地预测 MERSI 的天顶反射率,误差在 5% 之内。对比本文交叉定标得到的天顶反射率和通过官方公布的 L1 业务化定标系数计算得到的天顶反射率,L1 业务化定标系数更新前后天顶反射率出现跳变,不符合伪不变目标天顶信号 ρ^{TOA} 长期稳定且有规律的特点,说明场地定标频次低,不能有效地检测仪器辐射性能的变化,交叉定标结果的时间序列十分稳定且无

明显趋势,与伪不变目标的天顶辐射信号长期稳定且规律性变化的特点相一致。

针对 MERSI 交叉定标研究需要考虑和解决的轨道漂移、观测几何条件和光谱响应差异带来的不确定性问题,本文通过不同的模块进行了分析和解决,将观测角度作为参数进行 SBAF 构建,首次采用比 MODIS 数据定标精度更高的 SeaWiFS 数据进行 MERSI 定标研究,能够对卫星辐射性能进行有效的在轨监测和订正,为 MERSI 交叉定标研究提出了新思路。

参考文献:

- [1] 孙凌,郭茂华,徐娜,等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7):1869-1877.
SUN L, GUO M H, XU N, *et al.*. On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on dunhuang site calibration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1869-1877. (in Chinese)
- [2] XIONG X X, SUN J Q, BARNES W, *et al.*. Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS reflective solar bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45 (4):879-889.
- [3] CAO C Y, XIONG J, BLONSKI S, *et al.*. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(20):11664-11678.
- [4] 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.
WANG L, HU X Q, CHEN L. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (7):1911-1920. (in Chinese)
- [5] 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):892-906.
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):892-906. (in Chinese)
- [6] 王玲,胡秀清,郑照军,等. 联合南北极冰雪目标的 FY-3A/MERSI 辐射定标跟踪监测 [J]. 光学学报, 2018, 38(2):171-181.
WANG L, HU X Q, ZHENG Z J, *et al.*. Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles [J]. *Acta Optical Sinica*, 2018, 38 (2):171-181. (in Chinese)
- [7] 支丹丹. 风云三号卫星中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射再定标及其应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
ZHI D D. *Radiometric Recalibration for the Reflective Solar Bands of FengYun-3B Satellite Medium Resolution Spectral Imager And Its Application* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [8] ZHI D D, WEI W, ZHANG Y N, *et al.*. FengYun-3B satellite medium resolution spectral imager visible onboard calibrator radiometric output degradation analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6):3240-3251.
- [9] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1819-1827. (in Chinese)
- [10] LI C, XUE Y, LIU Q H, *et al.*. Post calibration of channels 1 and 2 of long-term AVHRR data record based on SeaWiFS data and pseudo-invariant targets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 150:104-119.
- [11] HOOKER S B, MCCLAIN C R. The calibration and validation of SeaWiFS data [J]. *Progress in Oceanography*, 2000, 45 (3/4):427-465.
- [12] EPLEE R E, MEISTER G, PATT F S, *et al.*

- On-orbit calibration of SeaWiFS [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(36):8702-8730.
- [13] HELDER D, THOME K J, MISHRA N, *et al.*. Absolute radiometric calibration of landsat using a pseudo invariant calibration site [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51 (3):1360-1369.
- [14] BOUVET M. Radiometric comparison of multispectral imagers over a pseudo-invariant calibration site using a reference radiometric model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140:141-154.
- [15] SCHAAF C B, GAO F, STRAHLER A H, *et al.*. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2):135-148.
- [16] WANNER W, LI X W, 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.
- [17] CHANDER G, MISHRA N, HELDER D L, *et al.*. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for cross-calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3):1267-1281.
- [18] TEILLET P M, FEDOSEJEVS G, THOME K J, *et al.*. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 393-409.
- [19] ACHARYA P K, ADLER-GOLDEN S M, ANDERSON G P, *et al.*. *Modtran Version 3.7/4.0 User's Manual* [M]. 1998.

作者简介:



何兴伟(1986—),女,河北保定人,博士,高级工程师,2009年于西安科技大学获得学士学位,2013年、2016年于中国科学院大学分别获得硕士、博士学位,主要从事传感器定标和气溶胶光学特性方面的研究。E-mail: hexingwei@cma.gov.cn

通讯作者:



冯小虎(1970—),男,北京人,研究员,1992年于东北大学获得学士学位,主要从卫星地面应用系统工作的研究。E-mail: fengxiaohu@cma.gov.cn