

基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法

杨敏^{1,2}, 刘照言^{1**}, 赵永光^{1†}, 马灵玲^{1***}, 李婉¹, 王宁¹, 李传荣¹, 唐伶俐¹¹中国科学院空天信息创新研究院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;²中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 自动辐射定标是卫星载荷外场定标的最新发展趋势,其核心在于常态化地获得可与卫星观测数据对比的大气顶层(TOA)反射率。本文提出了一种基于包头场 TOA 反射率的卫星载荷在轨辐射定标方法,基于高精度参考卫星对自动辐射定标场的长时间序列观测数据构建 TOA 反射率经验模型,利用该模型对自动辐射定标场其他时间的 TOA 反射率进行校正,以降低其不确定度,提高卫星载荷辐射定标精度。以 Sentinel-2A/2B 卫星作为参考卫星,以包头场沙地靶标 TOA 反射率作为研究对象,对本文提出的方法进行验证和分析。结果表明:建立的包头场沙地 TOA 反射率模型具有较高的模型精度,模型预测值与 Sentinel-2 卫星观测值的平均相对偏差基本在 2% 以内(蓝色波段在 3% 以内);利用该模型能够有效降低包头场 TOA 反射率与 Sentinel-2 卫星实际观测的 TOA 反射率之间的相对偏差,二者之间的不一致性由 5%~6% 降低至 3% 以内,从而验证了本文所提方法的有效性。

关键词 遥感; 在轨辐射定标; 大气顶层反射率; Sentinel-2; 包头场

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1828001

On-Orbit Radiometric Calibration Method for Satellites Based on TOA Reflectance at Baotou Site

Yang Min^{1,2}, Liu Zhaoyan^{1**}, Zhao Yongguang^{1†}, Ma Lingling^{1***}, Li Wan¹, Wang Ning¹,
Li Chuanrong¹, Tang Lingli¹¹Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;²College of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Automatic radiometric calibration is the latest development trend in the field calibration of satellites. Its core is to obtain TOA (top of atmosphere) reflectance that can be compared with satellite observation data on a regular basis. This paper developed an on-orbit radiometric calibration method for satellites based on the TOA reflectance at the Baotou site. Firstly, the empirical model for TOA reflectance was built based on the long-time-series observation data from a high-precision reference satellite over the automatic radiometric calibration field. This model was used to correct the TOA reflectance of the automatic radiometric calibration field at other moments. Consequently, the uncertainty of TOA reflectance was reduced, and the accuracy of radiometric calibration was improved. The proposed method was validated and analyzed with Sentinel-2A/2B as the reference satellite and the TOA reflectance of sand targets at the Baotou site as the research object. The results show that the model built in this paper has high accuracy, and the average relative difference between the predicted values of the model and the observed values of Sentinel-2 is less than 2% (less than 3% in the blue band). With this model, the relative difference between TOA reflectance at the Baotou site and the actual TOA reflectance observed by Sentinel-2 can be greatly reduced and the inconsistency is decreased from 5%–6% to less than 3%. These results validate the

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-03-31; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504800, 2018YFB0504801)、中国科学院国际合作大科学计划培育专项(181811KYSB20160040)、中国科学院先导项目(XDA17040518)、中欧龙计划五期项目(59166)

通信作者: *zhaoyg@aircas.ac.cn; **zyliu@aircas.ac.cn; ***mall@aircas.ac.cn

effectiveness of the proposed method.

Key words remote sensing; on-orbit radiometric calibration; TOA (top of atmosphere) reflectance; Sentinel-2; Baotou site

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 300.6170

1 引言

为保证遥感数据产品的高精度和稳定性,需要通过在轨辐射定标的方式对卫星载荷的辐射响应进行标定,持续监测卫星载荷辐射性能的变化。对于没有搭载星上定标系统的卫星,采用地面定标场大气、地表同步测量数据开展的地基辐射定标,是目前较为主流的在轨辐射定标方法^[1-4],也是国产各系列陆地卫星在轨辐射定标的主要途径。近些年,随着自动化辐射定标概念的出现,地基自动辐射定标技术在国内外蓬勃发展。2014年,CEOS/WGCV启动了全球自主辐射定标网(RadCalNet)计划,旨在通过优选分布于全球的差异化定标场,开展可溯源的地面目标和大气特性自动观测,提供全球统一质量的标准辐射定标产品,即大气顶层(TOA)反射率产品^[5]。包头国家高分辨遥感综合定标场(以下简称“包头场”)与美国 RVP 场、法国 La Crau 场以及纳米比亚 Gobabeb 场一同入选首批示范场,并在 RadCalNet 框架下完成了自动辐射定标技术攻关,目前已实现了 TOA 反射率产品业务化生产。基于 RadCalNet 标准辐射产品的在轨辐射定标可以降低传统人工同步测量所需的人力、物力成本,而且自动化连续观测模式提高了定标频次,同时,标准化、可溯源的产品生产过程保证了 RadCalNet 标准辐射产品的准确性和稳定性。

目前,包头场已进入自主辐射定标业务化运行阶段,持续不断地为全球用户提供场地反射率、大气参数以及标准 TOA 反射率产品等数据,并已成功实现了 Landsat-8、Sentinel-2 以及高分一号等卫星载荷的在轨辐射定标^[6-8]。受地表均一性、邻近效应、地面测量误差、辐射传输模拟等众多因素的影响,包头场 TOA 反射率产品的不确定度在 5% 左右^[9]。然而,遥感定量化应用对卫星载荷定标精度的要求越来越高^[10-12],尤其是气候变化等全球性问题研究对卫星观测数据的不确定度和稳定性要求甚至在 1% 以下^[13]。因此,有必要针对外场辐射定标中卫星入瞳处 TOA 反射率模拟这一技术问题,重点分析 TOA 反射率生产过程,发展降低标准 TOA 反射率不确定度的方法,提高基于 RadCalNet TOA 反射率的卫星在轨辐射定标精度,这对于提高卫星

载荷在轨辐射定标精度和稳定性具有重要意义。

本文发展了一种基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法。首先基于高精度遥感卫星长时序观测数据构建自动辐射定标场 TOA 反射率经验模型,利用其对待定标卫星过境时刻自动辐射定标场的 TOA 反射率进行校正,降低 TOA 反射率的不确定度,并利用校正后的 TOA 反射率提高卫星载荷在轨辐射定标精度,最后以 RadCalNet 包头场沙地 TOA 反射率为例利用 Sentinel-2A/2B 卫星数据对该方法进行验证。

2 研究区域及数据

2.1 研究区域概况

本文基于包头国家高分辨遥感综合定标场(以下简称“包头场”)的沙地靶标开展研究,包头场位于内蒙古自治区巴彦淖尔市(40.85°N,109.62°E),距离包头市区约 60 km,总占地面积约 300 km²,中心海拔约 1.27 km^[14]。该区域地势平坦开阔,气候干燥少雨且具有良好的通视性。沙地靶标为 300 m×300 m 的均匀沙地,可满足不同空间分辨率的光学遥感载荷进行外场辐射定标和辐射性能测试。此外,包头场沙地靶标区域还配备有目标光谱自动观测系统与大气参数自动观测系统,如图 1 所示。光谱自动观测系统采用全自动观测模式对目标区域进行地表光谱测量,并实时将测量数据传回数据处理中心进行处理。大气参数自动观测系统包括自动跟踪太阳光度计 CIMEL CE318 和自动气象站,采用全天观测模式,可以常态化获取大气和气象参数^[15]。

2.2 数据介绍

1) Sentinel-2 卫星多光谱数据

Sentinel-2 卫星包括 A、B 两颗卫星,这两颗卫星分别于 2015 年 6 月 23 日和 2017 年 3 月 7 日发射,各携带一台光谱成像仪(MSI),高度为 786 km,幅宽达 290 km。Sentinel-2 卫星的重访周期为 10 d,两颗卫星互补,重访周期为 5 d^[16]。Sentinel-2 卫星具有 13 个光谱波段,光谱范围覆盖可见光、近红外以及短波红外谱段,包含三种不同的空间分辨率,分别为 10,20,60 m。本文选择使用 2017—2020 年 Sentinel-2 卫星过境包头场的观

测数据作为参考卫星数据,筛选出无云无雪、成像前 7 天无降水、气溶胶光学厚度 <0.3 、水汽柱含量 $<2 \text{ g/cm}^3$ 的卫星影像共 112 景。目前,包头场提供的 RadCalNet TOA 反射率波谱范围为 400~1000 nm,因此选择使用 Sentinel-2A/2B 的 B1~

B8A 共 9 个波段,这 9 个波段的具体情况见表 1。提取每景影像沙地靶标区域的各波段 TOA 反射率 and 对应过境时刻的大气参数数据,分别见图 2 和图 3,用于包头场沙地 TOA 反射率经验模型的建模与验证。

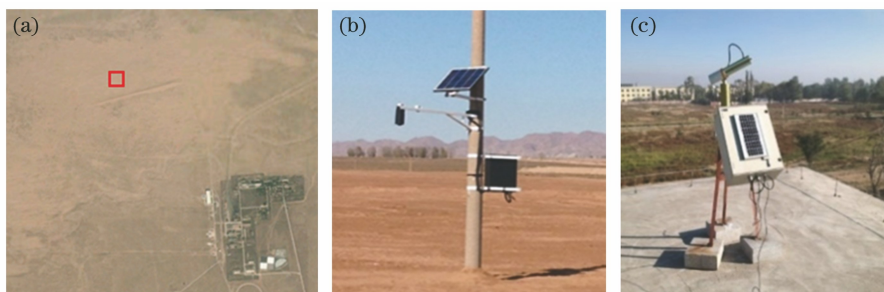


图 1 包头场沙地靶标及自动观测系统。(a) Sentinel-2 沙地靶标影像;(b)自动观测系统;(c) CE318 太阳光度计
Fig. 1 Sand land target of Baotou site and automatic observation system. (a) Sentinel-2 scene of sand land target;

(b) automatic observing system; (c) CE318 sun photometer

表 1 所选用的 Sentinel-2 传感器(S2A & S2B)的光谱波段

Table 1 Chosen spectral bands of Sentinel-2 sensor (S2A & S2B)

Channel No.	S2A		S2B		Spatial resolution /m
	Central wavelength λ /nm	Bandwidth /nm	Central wavelength λ /nm	Bandwidth /nm	
B1	443.9	27	442.3	45	60
B2	496.6	98	492.1	98	10
B3	560.0	45	559.0	46	10
B4	664.5	38	665.0	39	10
B5	703.9	19	703.8	20	20
B6	740.2	18	739.1	18	20
B7	782.5	28	779.7	28	20
B8	835.1	145	833.0	133	10
B8A	864.8	33	864.0	32	20

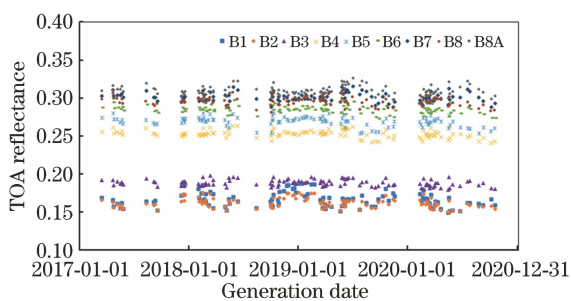


图 2 2017—2020 年沙地靶标的 Sentinel-2 TOA 反射率观测数据

Fig. 2 TOA reflectance observed by Sentinel-2 over sand target from 2017 to 2020

2) 包头场沙地靶标标准 TOA 反射率及大气参数数据

包头场作为 RadCalNet 场地之一,可以提供符合 RadCalNet 计划标准规范的 30 min 间隔的场地

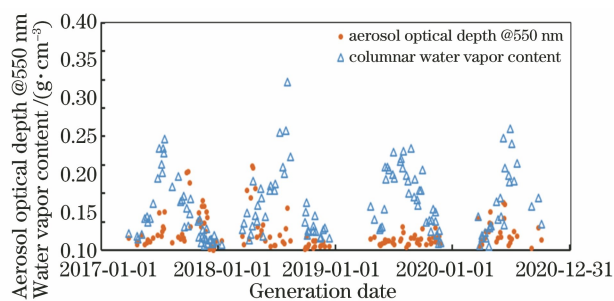


图 3 Sentinel-2 过境包头场时刻的大气参数数据

Fig. 3 Atmospheric parameters at the time of Sentinel-2 satellite overpass Baotou site

反射率、大气参数以及标准 TOA 反射率等数据。其中:大气参数数据包含气溶胶光学厚度及水汽柱含量,卫星过境包头场时刻的气溶胶光学厚度和水汽柱含量数据是由包头场大气参数自动观测系统记录的测量数据计算得到的;RadCalNet 包头场的标

准 TOA 反射率是基于反射率法模拟计算得出的, TOA 反射率的不确定性估计为 5% 左右。

3 方 法

本文基于高精度辐射参考卫星对自动辐射定标场的长时间序列观测数据,以及同步观测的大气、太阳辐射等影响因素的分析,构建自动辐射定标场 TOA 反射率经验模型,利用该模型对自动辐射定标场提供的 TOA 反射率进行校正,降低 TOA 反射率的不确定度。同时,基于校正后的 TOA 反射率对待定标卫星载荷进行辐射定标,以提高基于 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标精度。本文方法流程如图 4 所示,其中包括定标场 TOA 反射率经验模型构建、TOA 反射率校正以及自动辐射定标处理等三个关键步骤。

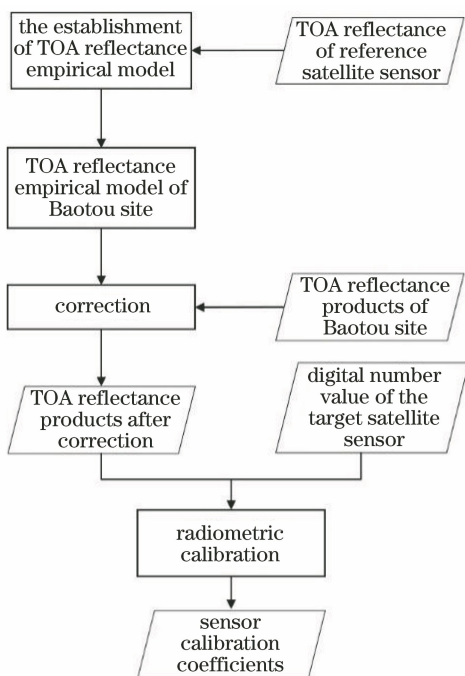


图 4 基于包头场 TOA 反射率的在轨辐射定标方法流程图
Fig. 4 Flow chart of the satellite on-orbit radiometric calibration method based on TOA reflectance product over Baotou site

3.1 基于参考卫星观测数据的定标场 TOA 反射率经验模型的构建

遥感载荷入瞳处接收的 TOA 反射率受地物自身反射特性、太阳辐射、大气、观测几何等因素影响而复杂地变化。对于通过场地特性分析筛选出的定标场来说,其所具有的稳定地表和大气特性使得 TOA 反射率随时间呈现稳定的变化规律。图 5 展示了包头场沙地靶标的 Landsat-8 TOA 反射率数

据(2017—2020 年),可以看出,该数据具有稳定的、明显的随季节变化的规律。因此,本文考虑利用具有高辐射定标精度的卫星作为参考卫星,并结合参考卫星 TOA 反射率以及自动辐射定标场地表、大气、太阳辐射等连续测量数据,构建参考卫星对自动辐射定标场观测的 TOA 反射率经验模型。模型的基本形式为

$$\rho^{\text{TOA}} = f(X_1, X_2, X_3, \dots) \quad (1)$$

式中: ρ^{TOA} 为定标场的参考卫星 TOA 反射率; X_1, X_2, X_3, \dots 为 TOA 反射率经验模型中的参数,后文将对模型参数的确定进行详细说明。利用该模型可以模拟出自动辐射定标场在不同参数条件下的参考卫星 TOA 反射率。

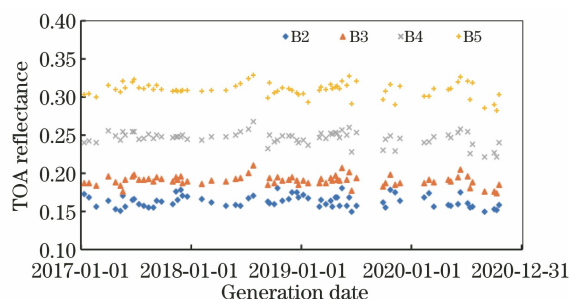


图 5 2017—2020 年沙地靶标的 Landsat-8 TOA 反射率观测数据

Fig. 5 TOA reflectance observed by Landsat-8 over Baotou site sand target from 2017 to 2020

3.2 基于 TOA 反射率经验模型的 TOA 反射率校正

目前,可供选择的辐射参考卫星搭载的是多光谱载荷,因而建立的 TOA 反射率经验模型模拟的是波段反射率,在光谱上是不连续的,而 RadCalNet 提供的 TOA 反射率是光谱连续的;因此,采取以下步骤进行校正:1)利用参考卫星光谱响应函数对待定标卫星过境时刻对应的 RadCalNet TOA 反射率进行卷积,计算得到各波段对应的等效 TOA 反射率;2)将自动辐射定标场的参考卫星 TOA 反射率经验模型模拟该过境时刻条件下的参考卫星各波段的 TOA 反射率作为参考值;3)对于各波段,计算 RadCalNet 等效 TOA 反射率与对应的 TOA 反射率参考值的比值,获得 TOA 反射率的波段校正系数,再对波段校正系数进行光谱插值计算,得到 RadCalNet TOA 反射率的光谱校正系数,并将其应用于自动辐射定标场 RadCalNet TOA 反射率的计算,实现对自动辐射定标场 TOA 反射率的校正,达到降低自动辐射定标场 TOA 反射率不确定度的目的。

3.3 卫星载荷自动辐射定标

用校正后的自动辐射定标场 TOA 反射率对待定标卫星载荷进行辐射定标,分为两步:1)将校正后的 RadCalNet TOA 反射率与待定标卫星载荷各波段光谱响应函数进行卷积,计算待定标卫星各波段的等效 TOA 反射率;2)利用计算得到的待定标卫星各波段的等效 TOA 反射率与待定标载荷记录的 DN(digital number)值进行比对,计算得到待定标卫星的辐射定标系数,从而提高基于 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标精度。

4 结果与分析

本文以 RadCalNet 自动辐射定标场之一的包头场沙地靶标作为研究区域,选择辐射定标精度高、时间分辨高的 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B(以下简称“Sentinel-2A/2B”)作为参考卫星,实现并验证本文所提方法。

4.1 基于 Sentinel-2A/2B 观测数据的包头场沙地靶标 TOA 反射率经验模型的构建与验证

对长时间系列 Sentinel-2A/2B 卫星数据进行分析后发现,对于包头场沙地靶标, Sentinel-2A/2B 观测的 TOA 反射率随时序呈现出明显且稳定的变化规律,且与太阳天顶角的年际变化规律类似,说明 TOA 反射率随时间的变化与角度具有较强的相关性。为了构建不确定度低且稳定性高的包头场沙地靶标 TOA 反射率经验模型,首先对 Sentinel-2A/2B 各波段 TOA 反射率与太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角、相对方位角、气溶胶光学厚度、水汽含量进行相关性分析,筛选出相关性较强的影响因素,其中,TOA 反射率与太阳天顶角以及太阳和卫星之间的相对方位角具有最高的相关性。故以太阳天顶角余弦值、相对方位角作为自变量,以 Sentinel-2A/2B TOA 反射率数据作为因变量,建立多元回归模型,模型形式为

$$\rho_i^{\text{TOA}} = a_i \cdot \cos \theta_s + b_i \cdot \text{abs}(R_{\text{AA}}) + c_i, \quad (2)$$

式中: ρ_i^{TOA} 为 Sentinel-2 卫星第 i 波段的 TOA 反射

率; θ_s 为太阳天顶角; R_{AA} 为太阳与载荷的相对方位角; a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 波段经验模型的系数。

在经验模型构建中,将 112 景 Sentinel-2A/2B 卫星数据分为建模数据集和验证数据集,其中以没有对应 RadCalNet TOA 反射率的 88 景数据构成建模数据集,以 24 景有同步观测的 RadCalNet TOA 反射率的 Sentinel-2A/2B 数据构成验证数据集,并用于本节模型的验证以及 4.3 节辐射定标结果的验证。利用建模数据集对 400~1000 nm 光谱范围内 Sentinel-2A/2B 的 B1~B8A 波段分别建立了 TOA 反射率经验模型,模型的拟合系数见表 2。

表 2 各波段经验模型的拟合系数

Table 2 Fitting coefficient of empirical model of each band

Channel No.	Coefficient		
	a	b	c
B1	-0.0394	-1.34×10^{-4}	0.2060
B2	-0.0225	-9.33×10^{-5}	0.1860
B3	0.0027	-6.77×10^{-5}	0.1919
B4	0.0050	-4.63×10^{-5}	0.2527
B5	-0.0070	-3.52×10^{-5}	0.2767
B6	0.0038	-5.52×10^{-5}	0.2859
B7	0.0147	-6.54×10^{-5}	0.2956
B8	-0.0006	-3.97×10^{-5}	0.2989
B8A	0.0182	-6.71×10^{-5}	0.3025

利用验证数据集对该模型进行验证,对模型模拟的 TOA 反射率与卫星观测的 TOA 反射率进行对比(见图 6),并计算二者的相对偏差。统计所有验证数据对应相对偏差的均值及标准差(STD),结果见图 7 和表 3。可以看出:除波段 7 外,其余波段的平均相对偏差均小于 1%,没有明显的模型系统偏差,而相对偏差的标准差均在 3%以内,证明所建立的 TOA 反射率经验模型在观测条件良好的状态下(观测前 7 天无降水,当天无云雪覆盖,气溶胶光学厚度 < 0.3 ,水汽柱含量 $< 2 \text{ g/cm}^3$)具有较高的准确性,符合包头场沙地靶标 TOA 反射率变化的规律。

表 3 模型模拟 TOA 反射率值与 Sentinel-2 观测 TOA 反射率相对偏差的统计表

Table 3 Relative error statistic between model simulated TOA reflectance and Sentinel-2 observed TOA reflectance

Channel No.	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A
Average relative error / %	0.81	0.76	-0.06	-0.31	0.17	0.42	-1.17	0.54	0.06
STD of relative error / %	2.95	2.62	1.46	1.44	1.88	1.43	1.55	1.59	1.38

4.2 基于经验模型的包头场沙地靶标 TOA 反射率校正

利用建立的包头场沙地靶标 TOA 反射率经验

模型,对包头场沙地靶标的 RadCalNet TOA 反射率进行校正。具体步骤如下:

1) 利用 Sentinel-2A/2B 各波段的光谱响应函

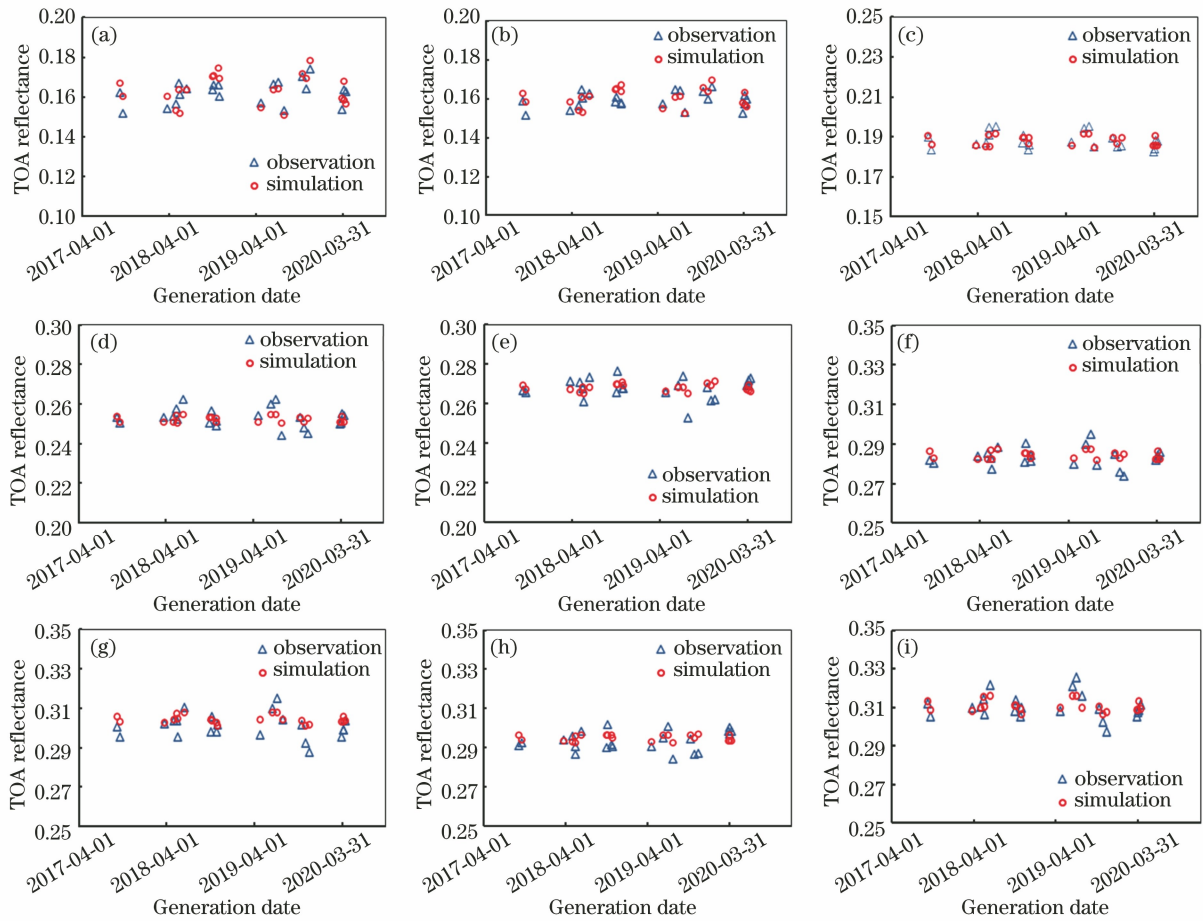


图 6 模型模拟 TOA 反射率与 Sentinel-2 观测 TOA 反射率的对比。(a)~(i)波段 B1~波段 B8A

Fig. 6 Model simulated TOA reflectance and Sentinel-2 observed TOA reflectance.

(a)–(i) Band 1–band 8A, respectively

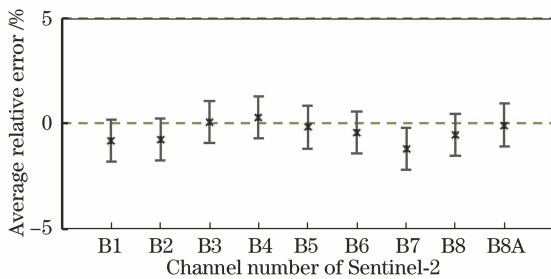


图 7 模型模拟 TOA 反射率值与 Sentinel-2 观测 TOA 反射率的相对偏差

Fig. 7 Relative error between model simulated TOA reflectance and Sentinel-2 observed TOA reflectance

数(如图 8 所示)与待定标卫星过境时刻匹配的包头场沙地靶标 RadCalNet TOA 反射率进行卷积,计算 Sentinel-2A/2B 卫星各波段的等效 TOA 反射率,计算公式为

$$\rho_{\text{TOA}}(i) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \rho_{\text{TOA}}(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中: $\rho_{\text{TOA}}(i)$ 表示 Sentinel-2 卫星第 i 波段的等效

TOA 反射率; $\rho_{\text{TOA}}(\lambda)$ 表示 RadCalNet TOA 反射率; $f_i(\lambda)$ 是 Sentinel-2 卫星第 i 波段的光谱响应函数; λ_{\min} 是第 i 波段的光谱响应的最小波长; λ_{\max} 是第 i 波段的光谱响应的最大波长。

2) 在所构建的 TOA 反射率经验模型中输入待定标卫星观测时的太阳天顶角以及太阳和卫星之间的相对方位角,计算各波段模拟的 TOA 反射率。其中太阳天顶角和太阳方位角是利用沙地靶标所在经纬度、高程信息,并结合卫星的观测日期与成像时间计算得到的。

3) 计算 Sentinel-2A/2B 各波段对应的模型模拟的 TOA 反射率与 RadCalNet 的等效 TOA 反射率的比值,获得各波段对应的校正系数。将这些波段的校正系数按波段中心波长在 400~1000 nm 范围内以 10 nm 为间隔作插值处理,得到包头场沙地靶标 RadCalNet TOA 反射率的校正系数。本文使用 24 景有同步观测 RadCalNet TOA 反射率的 Sentinel-2A/2B 数据的匹配数据进行验证,分别计

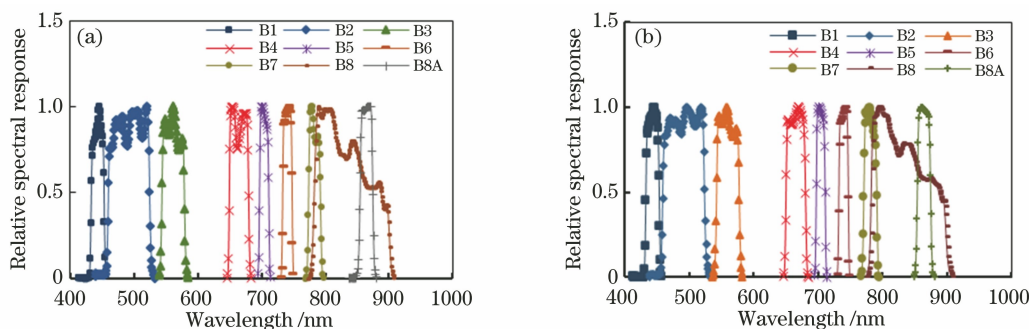


图 8 Sentinel-2 光谱响应函数。(a) Sentinel-2A; (b) Sentinel-2B

Fig. 8 Spectral response function of Sentinel-2. (a) Sentinel-2A; (b) Sentinel-2B

算出这 24 景卫星数据对应的校正系数,图 9 展示了其中 8 个日期对应的 TOA 反射率光谱校正系数。利用这些校正系数,可以计算得到校正后的包头场沙地靶标的 TOA 反射率。

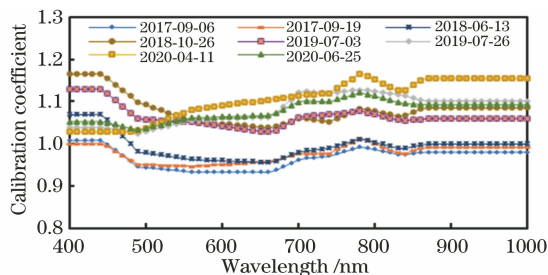


图 9 TOA 反射率光谱校正系数 (8 d)

Fig. 9 TOA reflectance spectral correction coefficient (8 d)

4.3 卫星载荷定标结果验证

应用校正后的包头场沙地靶标 TOA 反射率对待定标卫星载荷进行辐射定标,可以提高卫星载荷辐射定标精度。为了验证本文方法的有效性,需要对校正后的包头场沙地靶标 TOA 反射率进行验证。

表 4 TOA 反射率产品校正前后与 Sentinel-2 卫星观测 TOA 反射率相对偏差的统计表

Table 4 Relative error statistic between TOA reflectance products (with and without correction) and Sentinel-2 TOA reflectance

Channel No.		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A
Average relative error / %	without	4.80	0.78	1.96	2.78	4.66	4.34	6.13	4.00	5.68
	with	-0.55	-1.45	-0.06	-0.06	-0.04	-0.56	-0.84	-1.82	0.07
STD of relative error / %	without	5.02	5.57	5.69	5.74	5.68	5.89	5.86	5.91	5.88
	with	2.99	2.54	1.51	1.46	1.80	1.43	1.52	1.17	1.35

由图 10 可知,模型校正后的 RadCalNet 包头场沙地靶标 TOA 反射率相对于校正前更接近于 Sentinel-2A/2B 观测数据。校正前,相对偏差均值最小的是波段 2(为 0.78%),最大的是波段 7(为 6.13%);而校正后,相对偏差均值均得到大幅下降,且 9 个波段的相对偏差均值都小于 2%。这表明,校正后的 TOA 反射率的稳定性有了明显提高。此

证。本文计算了验证数据集中 24 景 Sentinel-2A/2B 数据对应的校正后的 RadCalNet TOA 反射率,并将其与 Sentinel-2A/2B 卫星观测的 TOA 反射率数据进行了对比分析,还计算了二者的相对偏差,并统计了这些相对偏差的均值与标准差,结果如图 10 和表 4 所示。

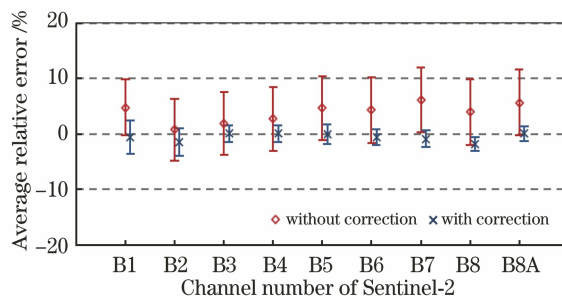


图 10 TOA 反射率产品校正前后与 Sentinel-2 TOA 反射率的相对偏差

Fig. 10 Relative error between TOA reflectance products (with and without correction) and Sentinel-2 TOA reflectance

外,相对偏差的标准差也由校正前的 5%~6%降低到 3%以内,说明 TOA 反射率的不确定度降低了。实验结果表明,本文所提高精度自动辐射定标场 TOA 反射率获取方法能够降低 RadCalNet TOA 反射率与 Sentinel-2 卫星观测 TOA 反射率之间的差异,减小 RadCalNet TOA 反射率的不确定度,提高 RadCalNet TOA 反射率的稳定性,验证了本文

提出的基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法的有效性。

5 结 论

针对外场辐射定标中卫星入瞳处 TOA 反射率精准模拟这一技术问题,本文结合参考卫星观测数据和定标场 TOA 反射率模拟数据,提出了一种高精度自动辐射定标场 TOA 反射率获取方法(旨在降低自主辐射定标 TOA 反射率的不确定度),并实现了基于包头场 TOA 反射率的卫星载荷在轨辐射定标,在保证高频次定标的情况下提高了基于包头场 TOA 反射率的卫星载荷在轨定标精度。为验证本文方法的正确性和应用效果,利用 Sentinel-2A/2B 卫星观测数据和包头场沙地靶标的 TOA 反射率,构建了包头场 TOA 反射率经验模型,并完成了对包头场 TOA 反射率数据的校正以及对卫星在轨辐射定标效果的评价。实验结果表明,本文提出的方法能有效降低当前包头场沙地靶标 TOA 反射率的不确定度,进而提高基于 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标精度。在此基础上,本文方法可在保持自动化、高频次定标等优势的情况下,进一步降低待定标卫星载荷的在轨辐射定标不确定度,对未来不同类型卫星载荷业务化定标、卫星观测数据质量和一致性提升具有重要的推动作用。

参 考 文 献

- [1] Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors[J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(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, 25(4): 117-128.
- [2] Han Q J, Zhang X W, Qiao Z Y, et al. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 127-133.
韩启金, 张学文, 乔志远, 等. 高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 127-133.
- [3] Liu L, Fu Q Y, Pan Z Q, et al. Site calibration of CBERS-04 WFI using reflectance-based method[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(1): 89-96.
刘李, 傅俏燕, 潘志强, 等. CBERS-04 卫星宽视场成像仪在轨场地辐射定标[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(1): 89-96.
- [4] Czaplá-Myers J, McCorkel J, Anderson N, et al. The ground-based absolute radiometric calibration of Landsat 8 OLI[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 600-626.
- [5] Bouvet M, Thome K, Berthelot B, et al. RadCalNet: a radiometric calibration network for earth observing imagers operating in the visible to shortwave infrared spectral range [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2401.
- [6] Gao C X, Liu Y K, Liu J R, et al. Determination of the key comparison reference value from multiple field calibration of sentinel-2B/MSI over the Baotou site[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2404.
- [7] Pang B, Ma L L, Liu Y K, 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, 马灵玲, 刘耀开, 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.
- [8] Ma Z H, Ma L L, Liu Y K, et al. A method for hyperspectral reflectance reconstruction from automatic observation with multispectral radiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728004.
马志宏, 马灵玲, 刘耀开, 等. 通道式辐射计自动观测数据的反射率光谱拓展方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0728004.
- [9] Ma L L, Zhao Y G, 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.
- [10] Zhang T, Liu L, Gao T C, et al. Optical depth inversion technique under joint cloud measurement system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 192802.
张婷, 刘磊, 高太长, 等. 联合测云体制下的光学厚度反演技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 192802.
- [11] Ma G L, Ding J L, Zhang Z P. Soil organic matter content estimation based on soil covariate and VIS-NIR spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 192801.
马国林, 丁建丽, 张子鹏. 基于土壤协变量与 VIS-NIR 光谱估算土壤有机质含量的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 192801.
- [12] Fu Q, Guo C, Luo W L. Land use change detection based on GF-1 satellite remote sensing images[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(16): 162802.

- 付青, 郭晨, 罗文浪. 基于高分一号卫星遥感影像的土地利用变化检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 162802.
- [13] Datla R U, Rice J P, Lykke K R, et al. Best practice guidelines for pre-launch characterization and calibration of instruments for passive optical remote sensing [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards & Technology, 2011, 116(2): 621-646.
- [14] Li C R, Ma L L, Gao C X, et al. Permanent target for optical payload performance and data quality assessment: spectral characterization and a case study for calibration [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083498.
- [15] Zhao Y G, Ma L L, Li C R, 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.
- [16] Gascon F, Bouzinac C, Thépaut O, et al. Copernicus sentinel-2A calibration and products validation status [J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 584.