

基于 Dome C 的 SNPP 和 NOAA-20 VIIRS DNB 在轨辐射定标精度及稳定性评估

李津津^{1,2}, 邱实^{1*}, 张宇¹, 高彩霞¹, 钱永刚¹, 刘耀开¹

(1. 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: 基于夜间大气层顶反射率方向性分布特性, 提出了一个基于精确模拟夜间辐射传输过程的低照度遥感载荷在轨辐射定标性能评估新方法。即以南极雪地 Dome C 为研究区, 以 MT2009 (Miller-Turner 2009) 大气层顶月球辐照度模型和大气层顶双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 模型模拟的夜间星上辐亮度值为基准, 分析相同几何条件下, 可见光近红外成像辐射计夜间光波段 (Visible Infrared Imaging Radiometer Suit Day/Night Band, VIIRS DNB) 观测辐亮度与基准值之间的一致性, 发现在 2018-2020 年两者差值保持在 $4.97 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 左右, 比 VIIRS DNB 最小探测阈值 $3 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 约低一个数量级, 故从可接受的仪器灵敏度误差范围内, 可判定 VIIRS DNB 载荷在美国极轨合作卫星 (Suomi National Polar-orbiting Partnership, SNPP) 和美国国家海洋和大气管理局 (NOAA-20) 上在轨辐射定标性能均非常优良。另外, 基于距离校正后的 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 辐亮度开展了 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标稳定性分析, 发现相同月相角下两载荷辐亮度一致性在 6% 以内。

关键词: 在轨定标评估; 可见光近红外成像辐射计夜间光波段; 美国极轨合作卫星; 美国国家海洋和大气管理局-20; Dome C; 双向反射率分布函数

中图分类号: TP732 文献标识码: A

Performance assessments of VIIRS DNB on-orbit radiometric calibration accuracy and stability on SNPP and NOAA-20

LI Jin-Jin^{1,2}, QIU Shi^{1*}, ZHANG Yu¹, GAO Cai-Xia¹, QIAN Yong-Gang¹, LIU Yao-Kai¹

(1. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the characteristic of anisotropic reflectance of nighttime TOA (top-of-atmosphere), a new method was proposed to evaluate the accuracy of on-orbit radiometric calibration of nighttime sensors using a relative accurate simulation of the nighttime radiative transfer. Specially, the Antarctic Dome C site was selected as the study area, and the nighttime on-orbit radiance was simulated by the MT2009 (Miller-Turner 2009) TOA lunar irradiance model and TOA BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) model. After the analysis of the consistency of VIIRS DNB (Visible Infrared Imaging Radiometer Suit Day/Night Band) observed and simulated radiance under the same geometry, it was found that their differences were about $4.97 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ one order of magnitude below the minimum detection threshold of VIIRS DNB ($3 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) during 2018-2020. So there is good performance of on-orbit radiometric calibration of VIIRS DNB on SNPP and NOAA-20 based on the error range of acceptable instrument sensitivity. Besides, an evaluation of on-orbit radiometric calibration stability of VIIRS DNB was conducted based on the dis-

收稿日期: 2021-02-07, 修回日期: 2021-09-03

Received date: 2021-02-07, Revised date: 2021-09-03

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目 (2018YFB0504600), 国家自然科学基金 (61801457), 中国科学院国际合作 (181811KYSB20160040), 中科院前沿科学重点研发项目 (QYZDB-SSW-JSC051)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0504600), National Natural Science Foundation of China (61801457), the Bureau of International Co-operation Chinese Academy of Sciences (181811KYSB20160040), and Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (QYZDB-SSW-JSC051).

作者简介 (Biography): 李津津 (1995-), 女, 河北河间人, 硕士学位, 主要研究领域为低照度遥感辐射定标 E-mail: lijijin18@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: qiushi@aircas.ac.cn

tance-corrected radiance of SNPP VIIRS DNB and NOAA-20 VIIRS DNB. And it was found that when under the same lunar phase angle, the VIIRS DNB radiance kept a good consistency within 6% between SNPP and NOAA-20.

Key words: on-orbit calibration assessment, Visible Infrared Imaging Radiometer Suit Day/Night Band (VIIRS DNB), Suomi National Polar-orbiting Partnership (SNPP), National Oceanic and Atmospheric Administration 20 (NOAA-20), Dome C, bidirectional reflectance distribution function

PACS:07.07. Df, 90.30. Sq, 94.10. Rk, 95.75. Rs, 95.75. Wx

引言

低照度遥感是利用遥感手段对夜晚及晨昏时段(即低照度环境下)地面上的微弱光进行探测,可捕获无云黑夜条件下月光、城镇灯光、渔船灯光和火点等不同强度的可见光辐射信息^[1],弥补了传统红外遥感在夜间的局限性,具有很强的军事国防意义,也有很高的社会经济价值。例如:可广泛应用于国民生产总值估计^[2]、人口波动^[3]、城市化监测^[4]、光污染调查^[5]、碳排放估算^[6]等领域。

目前,应用最广的具备夜间成像能力的遥感卫星有搭载可见光成像线性扫描业务系统(Operational Linescan System, OLS)的美国国防气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP),搭载可见光近红外成像辐射计(Visible Infrared Imaging Radiometer Suit, VIIRS)夜间光波段(Day/Night Band, DNB)的两颗卫星——美国极轨合作卫星(Suomi National Polar-orbiting Partnership, SNPP)和美国国家海洋和大气管理局-20(National Oceanic and Atmospheric Administration 20, NOAA-20)。与OLS相比,VIIRS DNB的空间分辨率、辐射分辨率更高,动态探测范围更宽,并且是首颗具备星上定标的低照度遥感载荷。DNB实现了在白天、夜间和晨昏之间的大动态范围监测,突破性地使用具有不同增益等级的低照度辐射载荷对全天,尤其是夜间进行成像监测,监测范围可以达到半月的亮度,甚至可以监测夜间海上的渔船。

由于载荷在轨运行期间,空间大气环境及自身元器件老化等原因^[7-10]会引起载荷成像系统性能退化及信息传递不准确等现象,以及大动态范围辐射导致的多增益探测器饱和与转换问题,使得低照度遥感辐射产品的精度偏低。通过准确可靠的在轨定标,是保障获取高精度、高可靠的夜间图像和微光遥感产品的重要手段。所以,对VIIRS DNB在轨定标的性能评估是低照度遥感载荷在轨定标领域必不可少的重要环节。相较于传统光学遥感载荷在轨定标性能评估的场地验证和交叉验证,VIIRS DNB载荷场地验证在夜间同步观测难以找到均一、

大面源的可以进行精准光谱特性定义的场地稳定光源,同时杂散光影响较大;在轨交叉验证由于具备夜间成像能力的卫星有限,SNPP及NOAA-20 VIIRS DNB夜间灵敏度高精度高,目前尚没有更精确数据质量更好的卫星传感器能够作为其参考载荷。因此,其不具备传统光学载荷利用星地同步观测数据对比分析以及利用多颗卫星观测值间交叉比较的条件。目前低照度遥感在轨定标性能验证、评价还是个待突破的领域。

基于此,本文在夜间大气层顶(top-of-atmosphere, TOA)反射率方向性分布特性分析的基础上,提出了一个基于精确模拟夜间辐射传输过程的低照度遥感载荷在轨辐射定标性能评估新方法。即以南极雪地 Dome C 站点为研究区,结合 TOA 月球辐照度模型及夜间 TOA 双向反射率分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型,实现了 VIIRS DNB 卫星过境时夜间星上辐亮度的精确模拟,并以此模拟结果为参考,成功开展了 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标性能评估;并进一步基于距离校正后的卫星观测辐亮度随月相角(Lunar Phase Angle, LPA)分布的一致性完成了 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标稳定性分析。文章的结构安排如下:第一部分研究区与数据介绍,包括研究区及极光现象、VIIRS DNB 载荷及数据、VIIRS DNB 卫星数据筛选方法和 Dome C 地表实测多角度反射率数据;第二部分研究方法,包括 TOA BRDF 模型、TOA 月球辐照度模型、以及载荷性能及稳定性评估方法;第三部分为结果与分析;最后第四部分总结全文。

1 研究区与数据

1.1 研究区

南极 Dome C (75.1°S, 123.35°E) 站点是位于海拔 3.2 km 处的一大片南极永久雪地,如图 1 为 Dome C 站点在南半球的位置。该站点^[11]①温度极低(夜间最低温度可达到-84℃)且稳定,适合长

期使用;②地处南极,无人造光源影响;③75%的时间天空晴朗无云;④空间上均匀平坦(坡度小于1/1 000);⑤水汽含量(湿度低于0.0005)、气溶胶含量、风速低,故大气确定性高;⑥无云时的反射率高(大于75%);⑦相比低纬度地区,此站点卫星过境更频繁,定标机会更多。因此,大量传感器包括 AVHRR^[12-14]、SPOT 4^[15]、OMI^[16]、MODIS^[16-18]、MISR^[16]、SNPP VIIRS^[19]等的定标验证工作都选择在此进行,并取得了预期结果。并且该站点特殊的极夜极昼现象和较大的 BRDF 影响^[20]为本研究提供了极大的便利。

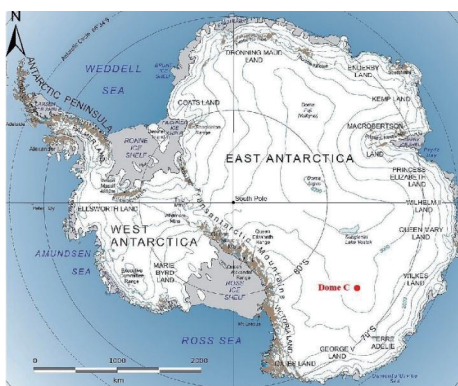


图1 Dome C 站点在南半球位置图

Fig. 1 The location of Dome C in the south hemisphere

1.2 VIIRS DNB

SNPP 和 NOAA-20 卫星运行在 824 km 左右的太阳同步轨道上,作为搭载在这两颗卫星上的核心载荷,VIIRS 是一个旁向扫描宽度为 3 044 km 左右、重访周期为 12 h 的扫描辐射计,其波长范围为 0.41~12.50 μm ,拥有 22 个成像和辐射波段^[21]。其中 DNB 为光谱覆盖 500~900 nm 的全色波段,空间分辨率 750 m,拥有 3×10^{-9} ~ $0.02 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 约 7 个数量级的宽动态范围^[22],能够探测到从夜间弦月到白天阳光照射下的地表能量。VIIRS DNB 是一个三增益的电荷耦合器件,包括低增益(Low Gain Stage, LGS),中增益(Medium Gain Stage, MGS),以及由高增益 A(High Gain Stage A, HGA)和高增益 B(High Gain Stage B, HGB)组成的高增益(High Gain Stage, HGS)。三个增益分别用于观测白天、地球晨昏交界线附近的黄昏或黎明、以及夜间地表场景。

VIIRS DNB 是在轨辐射定标的第一颗低照度遥感载荷,其宽动态探测范围、极高的敏感性、依赖扫描角度的视场角和对杂散光极其敏感的特性导致 DNB 载荷定标困难^[23, 24]。构成 DNB 三个增益的探

测器都需要单独定标^[25],DNB 三个增益定标的不确定性分别为 LGS 5%~10%,MGS 10%~30%,HGS 30%~100%^[26]。

本文使用的卫星数据为过境 Dome C 站点的 2018-2020 年 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 数据,其下载自 NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System 网站,包括 VIIRS DNB 传感器数据集 SDR(Sensor Data Records)SVDNB 和 VIIRS DNB SDR GDNBO。前者 SVDNB 产品包括辐亮度及质量标志等信息,后者 GDNBO 产品包括与辐亮度对应的经纬度、月相角、月球天顶角、月球方位角、太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角、卫星方位角等地理定位信息。

1.3 卫星数据筛选

对 2018-2020 年 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 数据的具体筛选标准如下:

①以 Dome C 为中心 10 km 为半径的区域为研究区。以研究区 VIIRS DNB 卫星影像数据的空间均匀性为依据筛选无云数据,即剔除像素平均反射率的标准差小于 5% 的数据^[20, 27]。

②月相角大于 5° 且小于 70° 以降低月球章动效应^[17]的影响,并保证充足月光和 VIIRS DNB 载荷信噪比。

③月球天顶角(Lunar Zenith Angle, LZA)小于 75° 以保证充足的月光环境。

④太阳天顶角大于 118.4° 筛选出 VIIRS DNB HGS 数据,以保证研究区不受杂散光影响^[28]。

1.4 地表实测反射率数据

Dome C 地表多角度实测反射率数据来自 Hudson 等文章^[29]。其实验在 2003-2004 年和 2004-2005 年南半球夏季,也就是南极极昼时段,32 m 的高塔上进行。Hudson 等使用光纤视场角为 15° 的光谱分析仪(Analytical Spectral Devices)实测观测天顶角(Viewing Zenith Angle, VZA) 7.5° ~ 82.5° 、步长 15° ,太阳天顶角(Solar Zenith Angle, SZA) 51.57° ~ 87° 下,光谱范围 350~2 400 nm、步长 25 nm 的辐亮度。

2 研究方法

2.1 BRDF 模型

Warren 等^[30]基于其在南极站点 22 m 塔顶获得的,600、660 和 900 nm 波长处,太阳天顶角 67° ~ 89.3° 的雪表多角度反射率实测数据,分析了反射率随太阳高度角、波长、雪脊方位角、雪脊反射率模型、前后向散射峰及接近星下点观测的变化,提出

了一个基于相对太阳方位角三阶傅里叶级数的雪表各向异性反射率模型(本文简称此模型为 Warren 模型):

$$R(\mu_0, \mu_r, \phi) = c_1 + c_2 \cos(\pi - \phi) + c_3 \cos[2(\pi - \phi)] \quad (1)$$

$$c_1 = a_0 + a_1(1 - \mu_r) \quad (2)$$

$$c_2 = a_2(1 - \mu_r) \quad (3)$$

$$c_3 = a_3(1 - \mu_r) \quad (4)$$

$$a_j = b_{0j} + b_{1j}\mu_0 + b_{2j}\mu_0^2 \quad (5)$$

$$\mu_0 = \cos\theta \quad (6)$$

$$\mu_r = \cos\varphi \quad (7)$$

其中为 θ 入射天顶角, φ 为观测天顶角, ϕ 为相对方位角。此模型的应用首先要基于多角度反射率实测数据和最小二乘法确定 12 个模型系数, 然后即可求解出任意入射、观测角度下的反射率。

2.2 TOA 月球辐照度模型

MT2009 (Miller-Turner 2009) 月球辐照度模型是由美国大气合作研究所(CIRA)的 Steven D. Miller 和美国科学应用国际公司(SAIC)的 Robert E. Turner 于 2009 年提出的一种半经验月球高光谱模型, 模型名称由两位研发者的姓名和年份组合而成。该模型是为了 VIIRS DNB 定标和夜间多光谱定量化应用而提出的, 是基于太阳观测光谱辐照度数据、月球光谱反照率数据、月相角以及太阳/地球/月球三者之间的空间几何随时间的变化关系而建立起来的^[31]。MT2009 模型能够输出确定年(2010–2030)月日及协调世界时下, $0^\circ \sim 180^\circ$ 月相角下, $0.2 \sim 2.8 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 1 nm 光谱分辨率的辐照度光谱。图 2 为 2019 年 05 月 14 时 30 分左右, 五个不同月相角下 MT2009 输出的 TOA 月球光谱辐照度结果图。

2.3 性能及稳定性评估方法

数据处理流程图如图 3 所示, 其包括 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标性能评估和稳定性评估两部分。

第一部分 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标性能评估, 核心思路是利用 MT2009 月球辐照度模型和 Dome C 夜间 TOA BRDF 模型模拟卫星过境时星上辐亮度, 将此模型模拟的星上辐亮度值视为参考标准, 然后将 2018–2020 年 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 卫星过境时观测辐亮度分别与相同过境时间、相同几何条件下的模拟辐亮度比较分析。在之前的工作^[32]中, 在多个角度(月球天顶

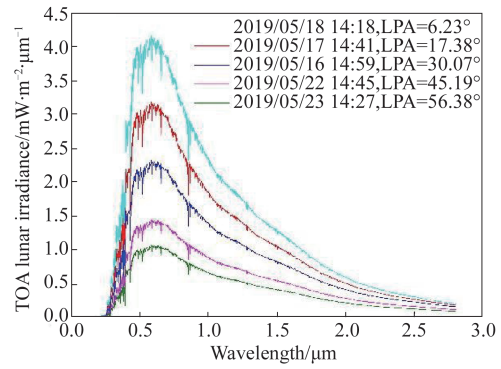


图 2 2019 年五个不同月相角下 MT2009 输出 TOA 月球光谱辐照度结果图

Fig. 2 TOA lunar spectral irradiance from MT2009 under five different LPAs in 2019

角、观测天顶角和相对方位角)对 Dome C 夜间 TOA 反射率影响的系统性分析基础上, 基于 Dome C 多角度反射率实测数据, 开展了罗斯厚层-李氏稀疏互易 (RossThick-LiSparse Reciprocal, RossLi) BRDF 模型、Warren 模型和 Hudson 模型在 Dome C 夜间 TOA 的适用性分析, 并发现三种模型中, Warren 模型具有最高的相关系数和最低的均方根误差。因此, 本研究采用 Warren 模型作为夜间辐射传输过程中的 TOA BRDF 模型。具体为基于 Dome C 多角度反射率实测数据最小二乘法确定 Warren 模型系数, 然后将从 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 卫星数据中提取的载荷过境时的空间几何角度, 包括 LZA, VZA, RAA (relative lunar azimuth angle), 输入 Warren 模型得到 TOA 反射率; 另外根据 VIIRS DNB 载荷过境时间和 MT2009 月球辐照度模型计算下行月球辐亮度(式 9–10), 进而得到星上辐亮度模拟值(式 8), 具体计算式如下:

$$L_{\text{DNB_simulated}} = R \times L_{\text{MT2009}} \quad (8)$$

其中 $L_{\text{DNB_simulated}}$ 是星上辐亮度模拟值, L_{MT2009} 是 TOA 下行月球辐亮度, 由式(9)计算:

$$L_{\text{MT2009}} = E_m \times \cos\theta / \pi \quad (9)$$

其中, θ 为月球天顶角, E_m 是 MT2009 模型输出的 TOA 下行月球辐照度其计算式为:

$$E_m = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I_{\text{MT}}(\lambda) \text{SRF}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \text{SRF}(\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

其中, λ 代表波长, $\text{SRF}(\lambda)$ 代表载荷 VIIRS DNB 的光谱响应函数 (Spectral Response Function), $I_{\text{MT}}(\lambda)$ 是在输入具体时间后 MT2009 模型输出的 TOA 下行月球光谱辐照度。

第二部分为 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标稳定性评估。两颗卫星每次过境 Dome C 的时间不同,导致过境时地球-太阳-月球之间的几何关系不同,故首先需要借助地月平均距离、日月平均距离、地月距离、日月距离以及月球天顶角(式 11),对 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 载荷观测辐亮度进行距离校正,将随时间变化的地球-太阳-月球三个天体之间的几何关系校正到一个“标准距离”上,最大程度的降低传感器自身之外的影响,以更精确地进行后续载荷的稳定性分析。随后,以月相角为参考,分析 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 载荷距离校正后辐亮度随月相角分布的一致性,并结合两卫星上载荷特性差异、极光等相关潜在影响因子,开展 VIIRS DNB HGS 在轨定标稳定性评估。此部分使用的距离校正公式为:

$$L_{DC} = L_{DNB_observed} \times \left(\frac{d_{ME} \times d_{MS}}{\bar{d}_{ME} \times \bar{d}_{MS}} \right)^2 \times \frac{1}{\cos\theta}, \quad (11)$$

其中 $L_{DNB_observed}$ 为 VIIRS DNB 观测辐亮度, L_{DC} 为距离校正后辐亮度, d_{ME} 、 d_{MS} 、 \bar{d}_{ME} 、 \bar{d}_{MS} 分别为月地距离、日月距离、月地平均距离和日月平均距离。

3 结果与分析

基于角度阈值 ($5^\circ < LPA < 70^\circ$, $LZA < 75^\circ$, $SZA > 118.4^\circ$) 对 2018—2020 年 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 数据筛选结果中 LPA 随 DOY (day of year) 分布如图 4 所示,并发现三年中每年数据都包括四个月球周期,每个月球周期对应的具体 DOY 范围及日期如表 1 所示。

3.1 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标性能评估

下图 5 为 SNPP VIIRS DNB 在 2018—2020 年每个月球周期卫星观测辐亮度与星上模拟辐亮度(参考标准)随 LPA 的分布情况,图 6 为 NOAA-20 VIIRS DNB 在 2018—2020 年每个月球周期卫星观测辐亮度与星上模拟辐亮度随 LPA 的分布情况。图中还包括模拟星上辐亮度的二阶多项式拟合曲线、拟合方程、拟合的相

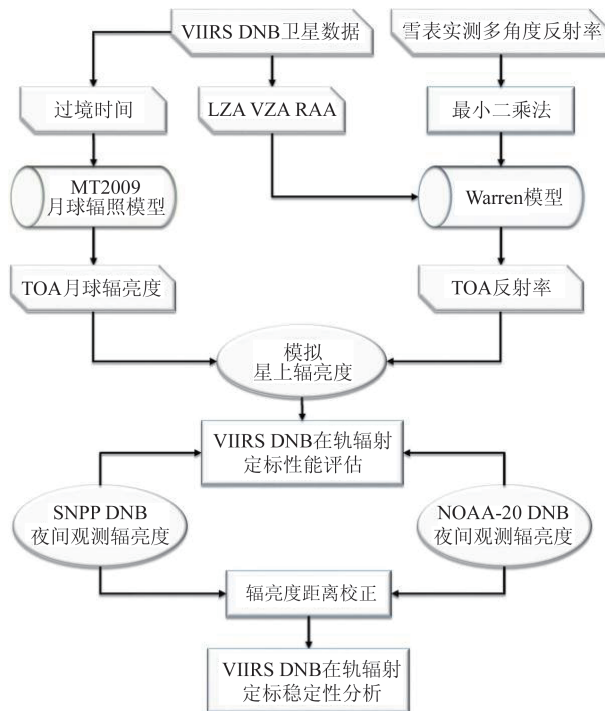


图 3 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标性能评估和稳定性分析流程图

Fig. 3 The flow chart of the evaluation of performance and consistency of on-orbit radiometric calibration of VIIRS DNB on SNPP and NOAA-20

关系数(R^2)和残差。可以发现(1)所有月球周期中,卫星观测辐亮度与模型模拟辐亮度均保持良好的一致性;(2)模型模拟辐亮度随 LPA 的分布满足二阶多项式,且相关系数较高(0.756 63~0.962 54)、残差较低(0.099 41~1.296 79)。

为进一步定量评估卫星观测辐亮度与模型模拟结果差异,图 7 为 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 载荷观测辐亮度分别与其星上模拟辐亮度差值的绝对值($abs(SNPP-MT2009)$, $abs(NOAA 20-MT2009)$)随时间和 LPA 的分布图。从图中可以得出结论:第一,两卫星过境时 LPA 几乎完全一致,这是因为两卫星过境 Dome C 时间差仅约 50 min。第二,辐亮度差值存在随着 LPA 减小而增大的趋

表 1 2018—2020 年数据中每个月球周期对应的具体 DOY 范围及日期

Table 1 The range of specific DOY and date in every lunar cycle during 2018—2020

年份	第一个月球周期		第二个月球周期		第三个月球周期		第四个月球周期	
	DOY	日期	DOY	日期	DOY	日期	DOY	日期
2018年	118~125	0428~0505	146~155	0526~0604	173~184	0622~0703	202~212	0721~0731
2019年	136~144	0516~0524	163~173	0612~0622	192~203	0711~0722	221~228	0809~0816
2020年	126~133	0505~0512	154~162	0602~0610	182~192	0630~0710	211~220	0729~0807

日期中“0428”代表04月28日,其他类似表达同理。

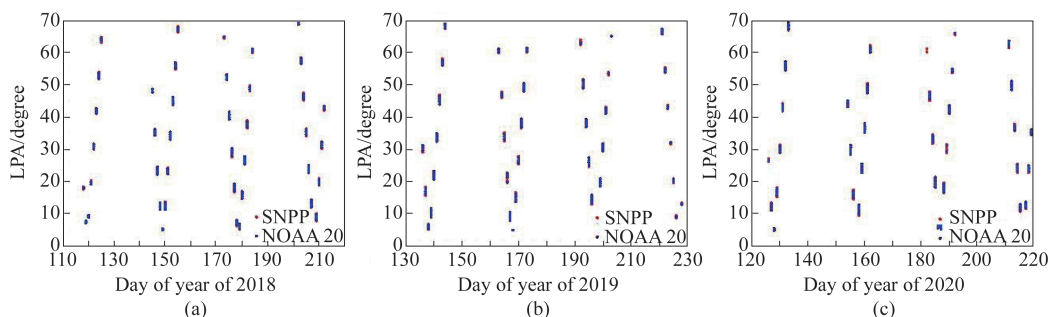


图4 数据的LPA随DOY分布图(a)2018年,(b)2019年,(c)2020年

Fig. 4 The distribution of LPA with DOY for the data from 2018 to 2020(a)2018,(b)2019,(c)2020年

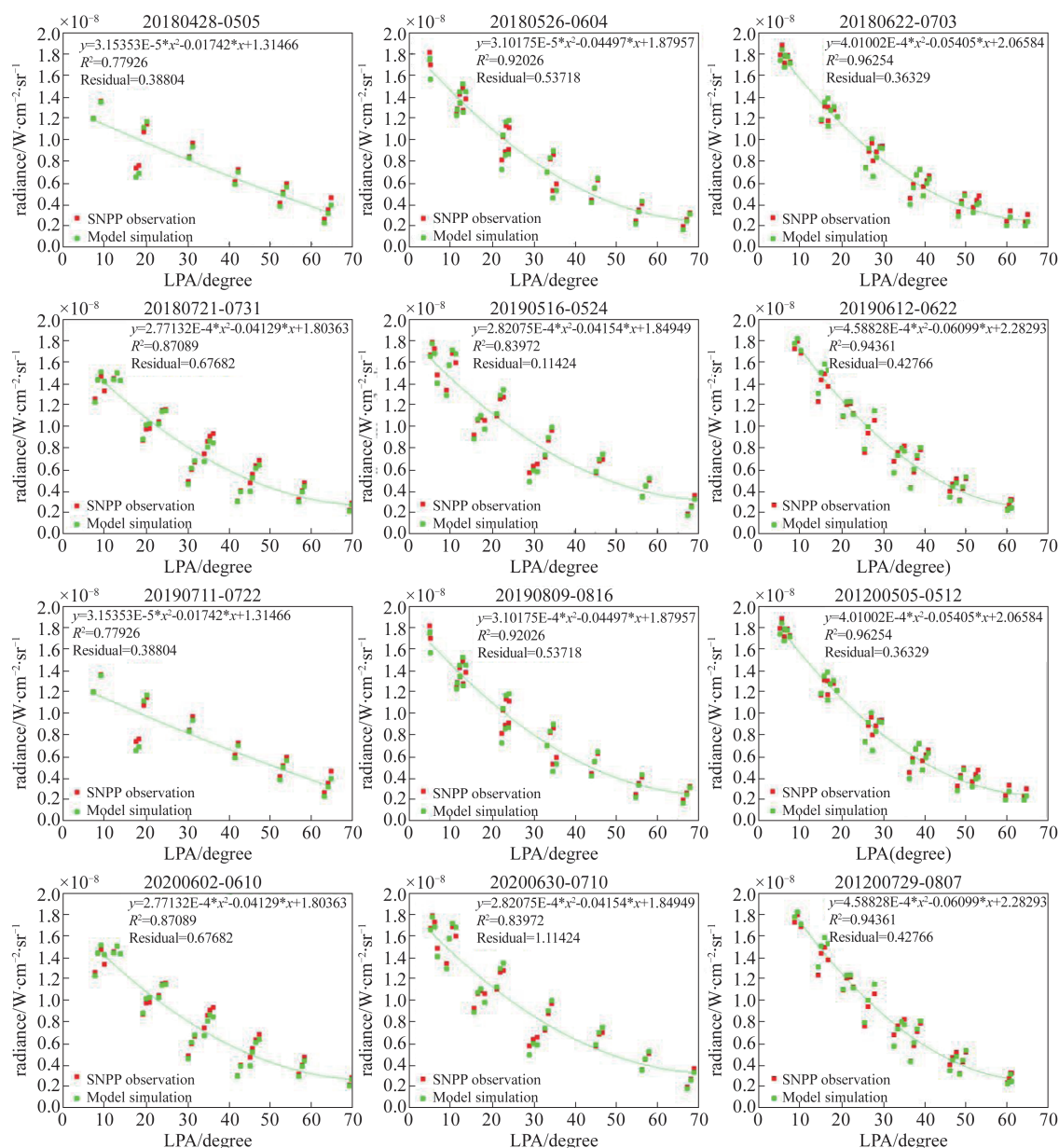


图5 SNPP VIIRS DNB在2018-2020年每个月球周期卫星观测辐亮度与星上模拟辐亮度随LPA分布图,星上模拟辐亮度与LPA间的二阶多项式拟合曲线,曲线方程,以及拟合结果的相关系数和残差

Fig. 5 The simulated and observed radiance of SNPP VIIRS DNB versus LPA, second order polynomial fitting curve between the simulated radiance and LPA, fitting equation, correlation coefficient, and residual during each lunar cycle of 2018-2020

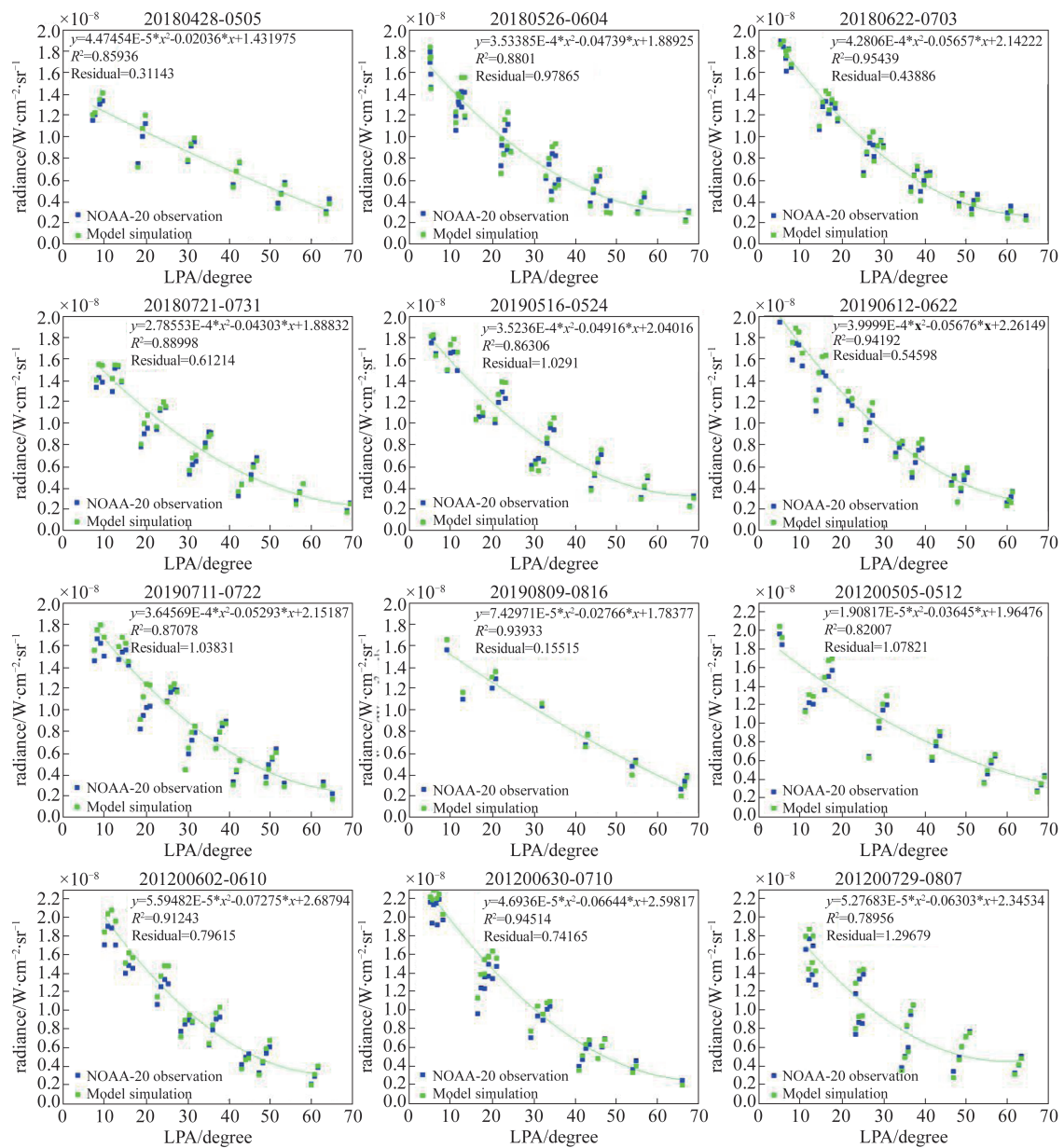


图6 NOAA-20 VIIRS DNB在2018-2020年每个月球周期卫星观测辐亮度与星上模拟辐亮度随LPA分布图,星上模拟辐亮度与LPA间的二阶多项式拟合曲线,曲线方程,以及拟合结果的相关系数和残差

Fig. 6 The simulated and observed radiance of NOAA-20 VIIRS DNB versus LPA, second order polynomial fitting curve between the simulated radiance and LPA, fitting equation, correlation coefficient, and residual during each lunar cycle of 2018-2020

势。第三,整体上,SNPP对应的差值的绝对值更加接近零,即SNPP VIIRS DNB载荷观测辐亮度与模型模拟结果更为接近。第四,两颗卫星的观测辐亮度与其分别对应的模型模拟结果的差值大小均保持在 $4.97 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$ 左右,比VIIRS DNB最小探测阈值 $3 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$ 约低一个数量级,故从可接受的仪器灵敏度误差范围内,可以判定VIIRS DNB载荷在两颗卫星上在轨定标性能均非常优良。另外,在此基础上计算SNPP VIIRS DNB和NO-

AA-20 VIIRS DNB载荷观测辐亮度分别与其星上模拟辐亮度的比值(SNPP/MT2009, NOAA-20/MT2009),结果统计后发现:在2018-2020年中,比值的平均值为1.0064,标准差为0.0821,表明载荷夜间过境Dome C时,DNB观测辐亮度比模型模拟值高约0.64%,不确定性为 $\pm 8.21\%$ 。

3.2 VIIRS DNB载荷在轨辐射定标稳定性评估

2018-2020年每个月球周期中,距离校正后的SNPP VIIRS DNB和NOAA-20 VIIRS DNB辐亮度随

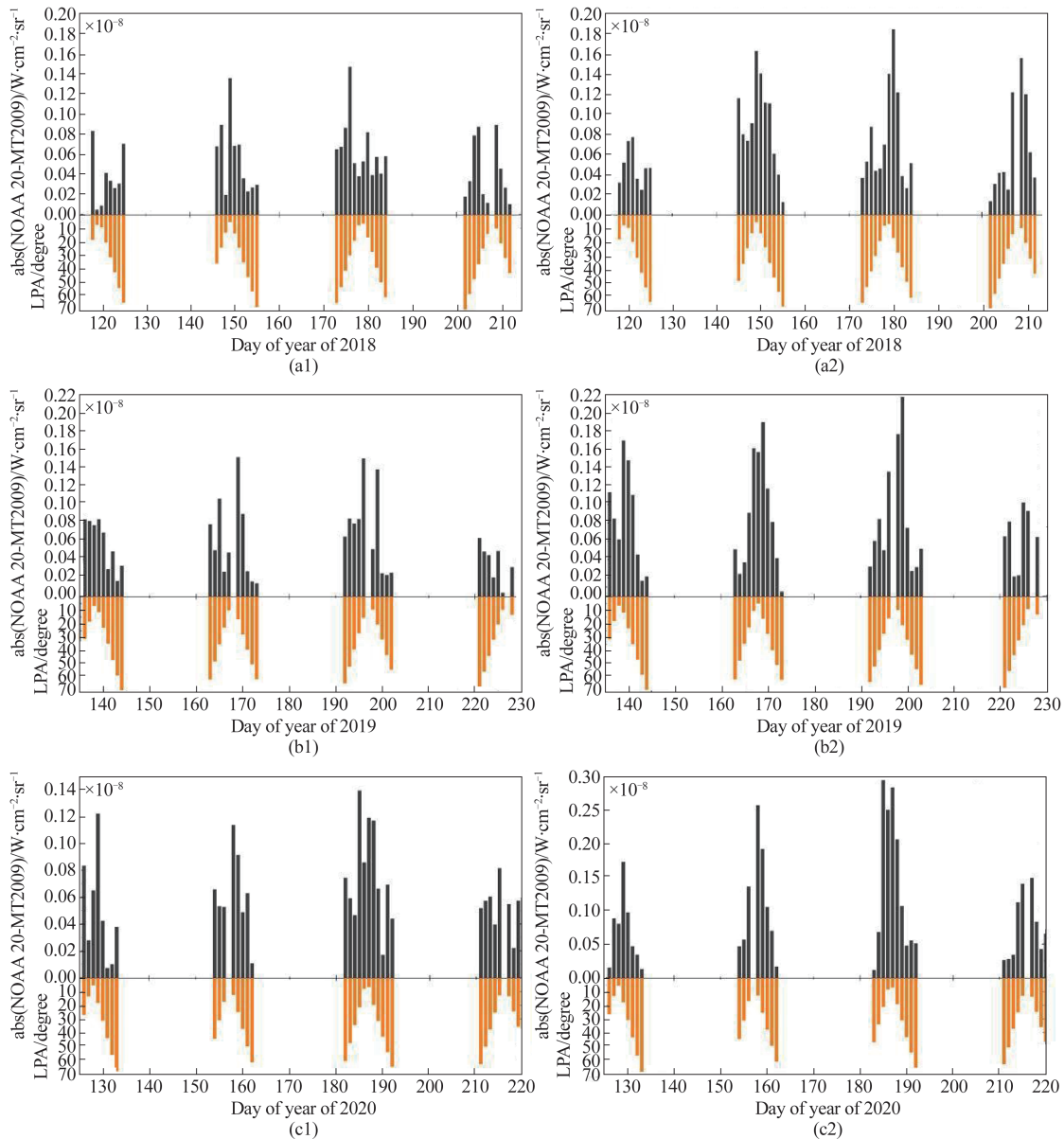


图7 (a1)、(b1)、(c1)图中上半部分分别为2018年、2019年、2020年SNPP VIIRS DNB载荷观测辐亮度与星上模拟辐亮度差值的绝对值随时间的分布,下半部分分别为2018年、2019年、2020年SNPP VIIRS DNB载荷过境时LPA随时间的分布;(a2)、(b2)、(c2)图中上半部分分别为2018年、2019年、2020年NOAA-20 VIIRS DNB载荷观测辐亮度与星上模拟辐亮度差值的绝对值随时间的分布,下半部分分别为2018年、2019年、2020年NOAA-20 VIIRS DNB载荷过境时LPA随时间的分布;

Fig. 7 The absolute value of the difference between the simulated and observed radiance of SNPP VIIRS DNB versus DOY in 2018, 2019, 2020 are in the top half of a1, b1 and c1; the LPA of SNPP VIIRS DNB versus DOY in 2018, 2019, 2020 are in the bottom half of a1, b1 and c1; the absolute value of the difference between the simulated and observed radiance of NOAA-20 VIIRS DNB versus DOY in 2018, 2019, 2020 are in the top half of a2, b2 and c2; the LPA of NOAA-20 VIIRS DNB versus DOY in 2018, 2019, 2020 are in the bottom half of a2, b2 and c2.

LPA变化、以及二次曲线拟合结果,包括方程、相关系数(R^2)和残差,如图8所示。由于两颗卫星过境时间不同,所以不存在完全相同的LPA对应的两载荷观测值。从图中可以发现,SNPP VIIRS DNB和NOAA-20 VIIRS DNB距离校正后的辐亮度随LPA分布高度一致;每个月球周期二阶多项

式拟合结果的相关系数高(0.961 93~0.997 14)、残差低(0.036 52~0.985 27);同一月球周期下拟合得到的SNPP VIIRS DNB和NOAA-20 VIIRS DNB二阶多项式系数之间存在微小差异。

利用图8中拟合得到的二阶多项式,计算不同LPA下NOAA-20 VIIRS DNB与SNPP VIIRS DNB载

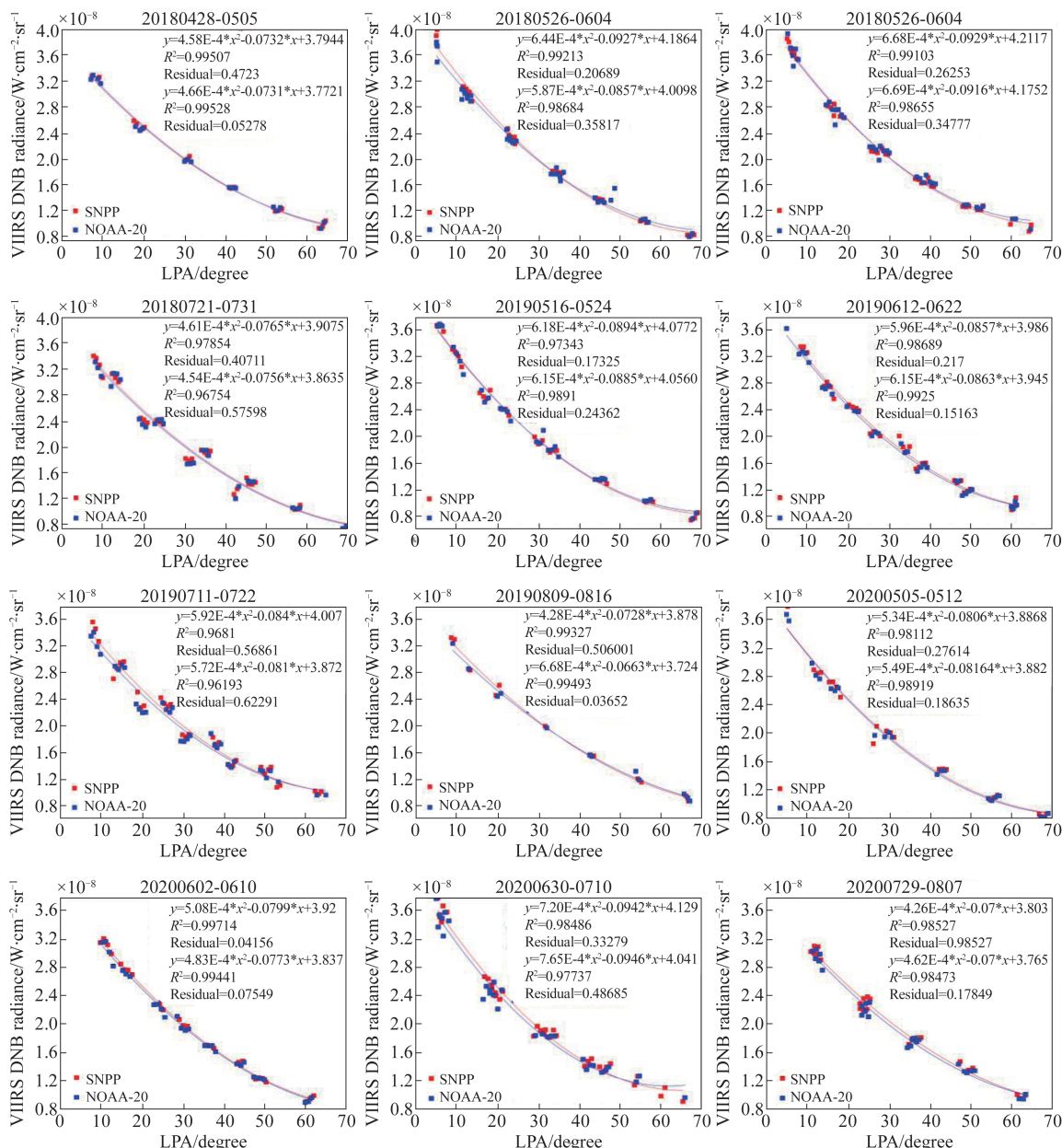


图8 2018-2020年每个月球周期中,距离校正后的SNPP VIIRS DNB和NOAA-20 VIIRS DNB 辐亮度随LPA变化图
 Fig. 8 The distance corrected radiance of VIIRS DNB on SNPP and NOAA-20 versus LPA during each lunar cycle of 2018-2020

荷距离校正后辐亮度的比值,结果如图9所示。两者的比值可以定量反映两载荷观测辐亮度之间的一致性,比值为1.00代表两者完全一致,偏离1.00的程度越大代表两者的相对差异越大。由结果可知:(1)每年每个月球周期中辐亮度比值结果不完全一致,2018年和2019年辐亮度比值在整体上变化趋势相同,LPA较小时SNPP辐亮度更高,随着LPA增大NOAA-20辐亮度逐渐超过SNPP。具体为2018年前三个月球周期,比值分别从0.99、0.96、0.99左右增大到1.03、1.05、1.06左右,最后一个周期最为稳定,一直保持在0.99左右。在2019年5月

16日~5月24日和7月11日~7月22日,比值均随着LPA的增大而平稳增大,分别从0.995、0.965左右增大到1.035、1.005左右;6月12日~6月22日和8月9日~8月16日,比值虽然中间略有波动,但整体上升趋势仍与同年中其他月份相似;(2)NOAA-20 VIIRS DNB与SNPP VIIRS DNB的比值在LPA小于35度左右时小于1,即此时SNPP观测辐亮度更高;在LPA高于60°时大于1,此时NOAA-20观测辐亮度更高;(3)整体上,在月相角5°到70°的范围内,两载荷辐亮度的一致性保持在6%以内(0.94~1.06),所以,2018-2020年VIIRS DNB在过境 Dome C 的极

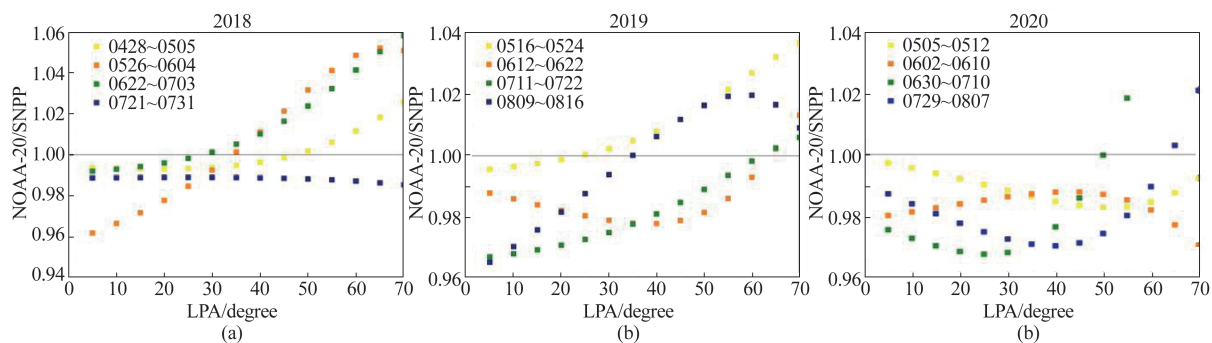


图9 2018年(a)、2019年(b)及2020年(c)每个月球周期,NOAA-20与SNPP VIIRS DNB 载荷模拟辐亮度比值随LPA分布图
Fig. 9 The ratio of the calculated radiance between NOAA-20 and SNPP VIIRS DNB versus LPA during each lunar cycle of 2018 (a), 2019(b) and 2020(c)

夜时段一直保持着非常好的稳定性。

4 结论

结合夜间 TOA 反射率方向性分布特性,提出了基于精确模拟夜间辐射传输过程的低照度遥感载荷在轨辐射定标性能评估新方法,开展了 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标性能评估工作,发现 2018–2020 年间 VIIRS DNB 载荷观测辐亮度与模型模拟辐亮度在 0.64% 以内(标准差 $\pm 8.21\%$),保持着非常高的一致性,两者之间差值保持在 $4.97 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 左右,比 VIIRS DNB 最小探测阈值 $3 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 约低一个数量级,处于可接受的仪器灵敏度误差范围内。另一方面,开展了 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标稳定性分析,发现在 VIIRS DNB 载荷极夜过境 Dome C 时,相同月相角下,SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 观测辐亮度一直保持着非常好的一致性(6% 以内),造成两者之间差异的原因大部分可能来自 Dome C 的夜间杂散光,如极光、辉光等,也可能来自两载荷 SNPP VIIRS DNB 和 NOAA-20 VIIRS DNB 之间的性能差异,如光谱响应函数差异等。

本研究旨在提高 VIIRS DNB 载荷在轨辐射定标性能评估的精度,并对影响载荷在轨定标的因子定量化。该工作是监测低照度遥感载荷在轨定标稳定性,提高载荷在轨定标精度,保障低照度遥感产品广泛应用不可或缺的关键技术。

References

[1] LI De-Ren, LI Xi. Applications of night-time light remote sensing in evaluating of socioeconomic development [J]. *Journal of Macro-quality Research*. (李德仁, 李熙. 夜光遥感技术在评估经济社会发展中的应用——兼论其对“一带一路”建设质量的保障. *宏观质量研究*), 2015, 3(4): 1–8.

[2] Doll C N, Muller J, Morley J G. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery [J]. *Ecological Economics*, 2006, 57: 75–92.

[3] Bennett M M, Smith L C. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 176–197.

[4] Pandey B, Joshi P K, Seto K C. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 49–61.

[5] Bauer S E, Wagner S E, Burch J, et al. A case-referent study: light at night and breast cancer risk in Georgia [J]. *International Journal of Health Geographics*, 2013, 12(23): 1–10.

[6] Roman M O, Stokes E C. Holidays in lights: Tracking cultural patterns in demand for energy services [J]. *Earths Future*, 2015, 3(6): 182–205.

[7] Xiong X J, Esposito J A, Sun J Q, et al. Degradation of MODIS optics and its reflective solar bands calibration [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4540: 62–70.

[8] Staylor W F. Degradation rates of the AVHRR visible channel for the NOAA 6, 7, and 9 spacecraft [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7: 411–23.

[9] Rao C R N, Chen J. Calibration of the visible and near-infrared channels of the advanced very high resolution radiometer (AVHRR) after launch [J]. *SPIE*, 1938: 56–66.

[10] Smith D L, Read P D, Mutlow C T. The calibration of the visible/near infrared channels of the along-track-scanning-radiometer-2 (ATSR-2) [J]. 1997, 3221: 53–62.

[11] Cao C, Uprety S, Xiong J, et al. Establishing the Antarctic Dome C community reference standard site towards consistent measurements from Earth observation satellites [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2014, 36(5): 498–513.

[12] Doherty S J, Warren S G. The Antarctic and Greenland snow surfaces as calibration targets for the visible channel of the advanced very high resolution radiometer [J]. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 1998, 2267–9.

[13] Masonis S J, Warren S G. Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional reflectance of Antarctic and Greenland snow [J]. *International Journal of*

- Remote Sensing*, 2001, **22**(8): 1495–520.
- [14] Loeb N G. In-flight calibration of NOAA AVHRR visible and near-IR bands over Greenland and Antarctica [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **18** (3): 477–90.
- [15] Six D, Fily M, Alvain S, *et al.* Surface characterisation of the Dome Concordia area (Antarctica) as a potential satellite calibration site, using Spot 4/Vegetation instrument [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89** (1): 83–94.
- [16] Jaross G, Warner J. Use of Antarctica for validating reflected solar radiation measured by satellite sensors [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(D16): 1–13.
- [17] Wu A. Using Dome C for moderate resolution imaging spectroradiometer calibration stability and consistency [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, **3** (1): 1–12.
- [18] Wenny B N, Xiong X. Using a cold earth surface target to characterize long-term stability of the MODIS thermal emissive bands [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, **5**(2): 162–165.
- [19] Qiu S, Shao X, Cao C, *et al.* Feasibility demonstration for calibrating Suomi-National Polar-Orbiting Partnership Visible Infrared Imaging Radiometer Suite day/night band using Dome C and Greenland under moon light [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, **10** (1): 016024 1–13.
- [20] Uprety S, Cao C. Suomi NPP VIIRS reflective solar band on-orbit radiometric stability and accuracy assessment using desert and Antarctica Dome C sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **166**(106–15).
- [21] Baker N, Kilcoyne H. Joint polar satellite system (JPSS) VIIRS radiometric calibration algorithm theoretical basis document (ATBD) [J/OL] *May 15*, 2013.
- [22] Liao L B, Weiss S, Mills S, *et al.* Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118** (22): 12705–12718.
- [23] Lee S, Chiang K, Xiong X, *et al.* The S-NPP VIIRS day-night band on-orbit calibration/characterization and current state of SDR products [J]. *Remote Sensing*, 2014, **6** (12): 12427–46.
- [24] Mills S, Weiss S, Liang C. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction [M]. *Earth Observing Systems XVIII*. 2013, 78.
- [25] Shihyan L, McIntire J, Oudrari H, *et al.* A new method for Suomi-NPP VIIRS day - night band on-orbit radiometric calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(1): 324–34.
- [26] Uprety S, Cao C, Gu Y, *et al.* Calibration improvements in S-NPP VIIRS DNB sensor data record using version 2 reprocessing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(12): 9602–11.
- [27] Uprety S, Cao C. Radiometric and spectral characterization and comparison of the Antarctic Dome C and Sonoran Desert sites for the calibration and validation of visible and near-infrared radiometers [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, **6**(1): 1–15.
- [28] Qiu S, Shao X, Cao C Y, *et al.* Assessment of straylight correction performance for the VIIRS Day/Night Band using Dome-C and Greenland under lunar illumination [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, **38**(21): 5880–98.
- [29] Hudson S R, Warren S G, Brandt R E, *et al.* Spectral bidirectional reflectance of Antarctic snow: Measurements and parameterization [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(D18): 1–19.
- [30] Warren S G, Brandt R E, O'RAWE HINTON P. Effect of surface roughness on bidirectional reflectance of Antarctic snow [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1998, **103**(E11): 25789–807.
- [31] Miller S D, Turner R E. A dynamic lunar spectral irradiance dataset for NPOESSVIIRS DayNight Band nighttime environmental [J]. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 2009, **47**(7): 2316–29.
- [32] Li J, Qiu S, Zhang Y, *et al.* Assessment of BRDF impact on VIIRS DNB from observed top-of-atmosphere reflectance over Dome C in nighttime [J], *Remote Sensing*, 2021, **13**(2):301.