

基于场地高光谱 BRDF 模型的 Suomi-NPP VIIRS 长时序定标

赵春艳^{1,2**}, 韦玮¹, 张艳娜¹, 张孟^{1,2}, 李新¹, 郑小兵^{1*}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 为提升光学卫星遥感器的定标频次, 提出一种基于场地高光谱 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 模型的高频次绝对辐射定标方法, 实现了 Suomi-NPP (Suomi-National Polar-Orbiting Partnership Spacecraft) VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 的长时序高频次绝对辐射定标。介绍了基于场地高光谱 BRDF 模型的绝对辐射定标原理, 于 2018 年 4 月和 8 月利用场地高光谱 BRDF 手动测量系统分别对敦煌场的方向特性进行测量试验, 并基于半经验核驱动反演敦煌场的地表高光谱 BRDF 模型参数。基于 BRDF 模型计算 2018 年全年 VIIRS M1~M11 波段的表观反射率, 并与卫星观测表观反射率进行比对。结果表明: Suomi-NPP VIIRS 传感器 2018 年全年的有效定标频次为 51 次, 其中 M1~M7 波段模型计算的表观反射率与卫星观测的相对偏差均小于 3.23%。基于场地 BRDF 模型的高频次绝对辐射定标方法可有效地提高卫星载荷的定标频次, 及时跟踪载荷的辐射特性变化。

关键词 辐射定标; 长时序; BRDF 模型; Suomi-NPP VIIRS; 表观反射率

中图分类号 TP722.4; TP722.1; TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0828001

Long Time Series Radiometric Calibration of Suomi-NPP VIIRS Based on Surface Hyperspectral BRDF Model

Zhao Chunyan^{1,2**}, Wei Wei¹, Zhang Yanna¹, Zhang Meng^{1,2}, Li Xin¹, Zheng Xiaobing^{1*}

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract In order to improve the calibration frequency of optical satellite remote sensors, a high-frequency absolute radiometric calibration method based on the surface hyperspectral bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model is proposed, and the long time series absolute radiometric calibration of Suomi-national polar-orbiting partnership spacecraft (Suomi-NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) is realized. The principle of the absolute radiometric calibration method based on the surface hyperspectral BRDF model is introduced. In April 2018 and August 2018, the surface directional reflectance of the Dunhuang test site was measured by the hyperspectral BRDF manual measurement system, and the hyperspectral BRDF model parameters of the Dunhuang site were inversed based on the semi-empirical kernel-driven model. Based on the BRDF models, the apparent reflectance of VIIRS M1-M11 bands in the whole year of 2018 was calculated, and compared with the satellite-observed ones. The results show that the effective calibration number of Suomi-NPP VIIRS is 51 in 2018, the relative deviation of model-calculated apparent reflectance and satellite-observed ones of the M1-M7 bands is less than 3.23%. The proposed method can effectively improve the calibration frequency of satellite and track the change of radiometric characteristics of the load in time.

Key words radiometric calibration; long time series; BRDF model; Suomi-NPP VIIRS; apparent reflectance

OCIS codes 150.1488; 290.1483; 280.4788; 010.0280

收稿日期: 2019-03-11; **修回日期:** 2019-03-28; **录用日期:** 2019-04-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504800, 2018YFB0504802)、民用航天技术预研项目(D040401)、中国科学院联合基金(6141A01011602)

* **E-mail:** xzbheng@aiofm.ac.cn; ** **E-mail:** zcy1991@mail.ustc.edu.cn

1 引 言

卫星遥感器的定标与检验是遥感定量化应用的基础。对于没有星上定标器的卫星传感器,在轨外场定标成为检测和校正卫星传感器运行过程中响应特性衰变的重要方法^[1]。传统的在轨外场定标试验的地面同步测量数据需同时满足过顶时刻、天气状况等基础条件才能被有效使用,定标次数受大气和过境时间的限制;且场地同步测量通常为垂直观测,对于大视场多角度卫星遥感器的定标通常会受到场地方向特性的影响;同时随着载荷数量的增加,对单个载荷进行传统在轨定标试验已经很难满足定标任务的需求。发展基于模型的高频次定标是满足多卫星、多参数定标的客观需求^[2]。

国内外已有多家组织与单位等对不同的传感器进行了高频次绝对辐射定标与长时序性能监测。Angal 等^[3]、Chander 等^[4]、Wu 等^[5]、Xiong 等^[6]利用沙漠、冰川等稳定目标对 Terra/Aqua MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer)、Landsat7 ETM+ (Enhanced thematic mapper plus)、Suomi-NPP (Suomi-national polar-orbiting partnership spacecraft) VIIRS (Visible infrared imaging radiometer suite) 等传感器的在轨辐射特性进行了长时序监测分析,得到了关于传感器的稳定性数据,但其未给出关于传感器的绝对定标结果。Uprety 等^[7]利用利比亚 1、苏丹 1 和 Demo-C 等稳定目标对 VIIRS 太阳反射波段完成了超过 2 年的稳定性监测,并通过与 MODIS、OLI (Operational land imager) 的相互校准分别估计了 VIIRS 不同波段的绝对辐射偏差,但其仅对天顶方向的数据进行了对比,未考虑到卫星观测方向场地 BRDF (Bidirectional reflectance distribution function) 对定标结果的影响。国家卫星气象中心孙凌等^[8]和王玲等^[9]以及中科院安徽光学精密机械研究所 Wei 等^[10]和邱刚刚等^[11]利用多个稳定目标场地分别对 FY-3A MERSI、FY-3C MERSI、GF-1 WVF 做了长时序定标,得到了较好的定标结果,他们都考虑到 BRDF 中卫星观测角度对定标的影响,但其采用的 BRDF 数据均为波段设置固定的 MODIS BRDF 数据产品,由于不同传感器的波段设置通常会存在一定程度的差异,故不能很好地适用于不同光谱特性的传感器在轨辐射定标。

本文介绍了基于场地高光谱 BRDF 模型的高频次绝对辐射定标方法的原理,结合场地高光谱

BRDF 模型、卫星传感器过境时刻的几何观测角度计算不同方向的地表连续光谱反射率,替代卫星过顶的地表同步实测数据,利用 2018 年全年过境敦煌辐射校正场的 Suomi-NPP VIIRS 传感器的 51 次有效定标的卫星影像数据,并与卫星观测的表观反射率进行对比,分析了基于场地高光谱 BRDF 模型的长时序定标方法的精度,实验验证了该标定法可对任意时刻过境定标场地的任意载荷完成长时序高频次在轨辐射定标。

2 传感器介绍

美国新一代的对地观测卫星 Suomi-NPP 是联合极地卫星系统 (JPSS) 的一部分,为美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供必要的天气观测数据。Suomi-NPP 采用降轨方式运行,1 d (24 h) 绕地运行约 14 圈,可以观察地球表面两次,卫星的重复周期为 16 d,扫描幅宽为 3000 km^[12]。VIIRS 传感器共 22 个波段,覆盖光谱范围为 0.3 ~ 14 μm ,其中 16 个 750 m 的中分辨率的波段、5 个 375 m 分辨率的影像波段、一个 750 m 分辨率的低照条件下的可见光晨昏 (Day night band) 波段。本文针对 Suomi-NPP VIIRS 传感器中分辨率波段 M1~M11 进行长时序定标,其中 M6、M9 由于存在吸收等问题,不予考虑,图 1 所示为 NPP VIIRS 相对光谱响应函数。

3 方 法

3.1 定标原理

基于场地 BRDF 模型的定标方法采用反射率基法^[13]的基本原理,选用均匀稳定的场地作为试验场地,用场地 BRDF 模型直接计算过境时刻卫星观测方向的地表方向反射率,替代地表同步测量的反射率数据。结合卫星相对光谱响应函数、过境时刻的大气参数与几何参数,使用大气辐射传输模型计算卫星传感器各光谱波段的表观反射率。与影像目标区域 (ROIs) 的平均计数 (DN) 相比,获得传感器的在轨辐射定标系数。该方法的技术流程如图 2 所示。

根据经纬度提取卫星影像中目标区域的所有像元的计数 (DNs) 并进行数据均匀性筛选,如果目标区域内所有像元计数值的标准差 (Std, R_{Std}) 与平均值 (Mean, R_{Mean}) 的比值小于 1%,即符合条件。同时根据经纬度在影像提供的元数据或数据集中提取卫星过境时刻的几何角度数据。

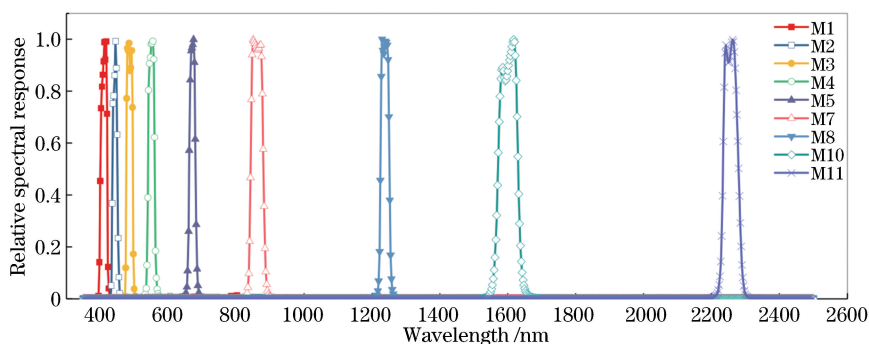


图 1 Suomi-NPP VIIRS 各波段 (M1~M5, M7~M8, M10~M11 波段) 相对光谱响应函数

Fig. 1 Relative spectral response function of Suomi-NPP VIIRS at different wavelength bands (M1-M5, M7-M8, M10-M11)

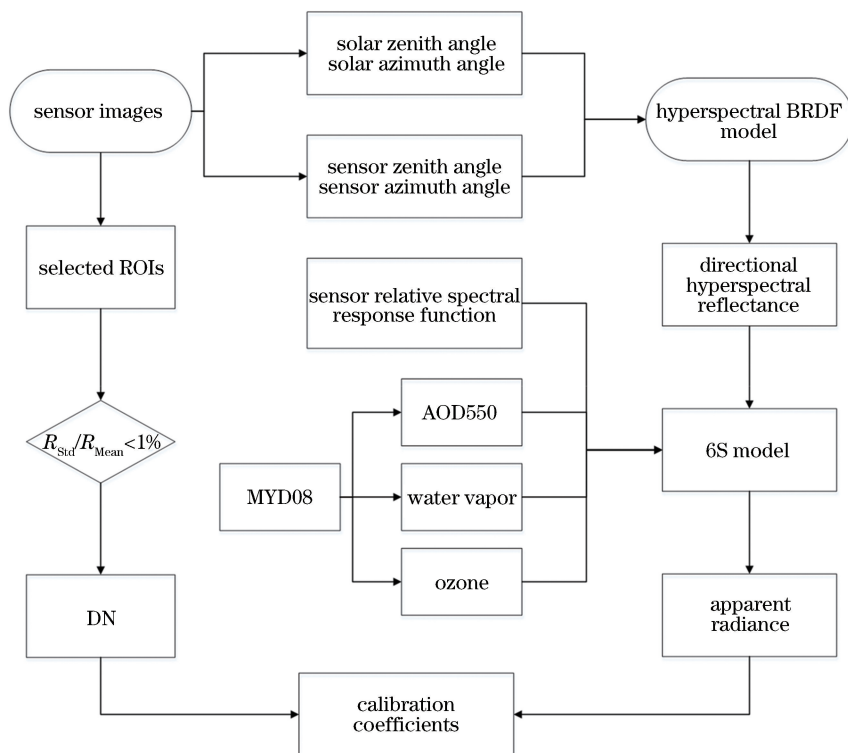


图 2 基于场地 BRDF 模型的绝对辐射定标方法流程图

Fig. 2 Flow chart of absolute radiometric calibration method based on surface hyperspectral BRDF model

利用 BRDF 手动测量装置对敦煌辐射校正场进行地表方向特性测量, 建立敦煌场的地表高光谱 BRDF 模型, 将卫星影像目标区域对应像元的几何角度数据 (包括太阳天顶角 θ_i 、观测天顶角 θ_v 和相对方位角 φ) 输入场地地表 BRDF 模型, 计算得到高光谱方向反射率, 替代场地地表实测反射率数据。本文采用的是半经验核驱动 RossThick-LiSparseR 模型^[14]:

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

式中: R 为地表方向反射率; λ 为波长, θ_s 为卫星过

境时刻的太阳天顶角, θ_v 为卫星观测天顶角 (VZA), φ 为相对方位角; K_{vol} 为体散射核, K_{geo} 为几何散射核; f_{iso} 、 f_{vol} 、 f_{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。

使用 6S 模型^[15] 进行大气辐射传输过程, 大气条件采用 1962 美国标准大气, 大气参数采用 MODIS 全球每日大气数据产品 MYD08_D3^[16], 其数据产品包含气溶胶光学厚度 (AOD)、臭氧含量、大气水汽含量等相关参数。敦煌辐射校正场大气气溶胶类型接近于沙漠型。场地上空大气参数的质量将影响单次定标的精度, 为保证单次定标结果的可靠性, 若气溶胶光学厚度数据大于 0.3, 则需要进行

数据的剔除。

本文使用的影像数据为经过辐射校准和地理定位的 SNPP VIIRS L1 级数据产品 NPP_VMAES_L1^[17]。将本文所述方法计算的卫星遥感各光谱波段的表观反射率与卫星实际观测的表观反射率进行对比分析,来实现基于场地 BRDF 模型的 S-NPP VIIRS 遥感太阳反射波段(RSBs)定标精度的评估。

3.2 场地 BRDF 试验及模型建立

中科院安徽光学精密机械研究所联合中国气象局国家卫星气象中心于 2018 年 4 月和 8 月利用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的 BRDF 手动测量装置对敦煌辐射校正场[图 3(a)]进行了地表方向特性测量试验。BRDF 手动测量装置^[18]中采用 ASD 野外光谱仪(ASD FieldSpec3 Spectra

Radiometer, ASD FR)对目标地表进行光谱数据采集,观测波段为 350~2500 nm。图 3(b)所示为 BRDF 手动测量架,包括一个天顶弧架、两个方位圆架、一个枪头和若干滑块,天顶弧、方位圆和枪头通过滑块连接转动,方位圆、天顶弧上有刻度线与示值,最小定位刻度为 1°。2018 年 4 月和 8 月的两次试验共完成 19 轮次有效测量,其太阳天顶角覆盖范围分别为 26.67°~50.08°和 24.05°~51.81°,方位角测量范围为 0~360°,天顶角测量范围为 -75°~75°,1 个轮次共完成 66 个测量点,其角度设置如图 3(c)所示。在每一轮次 BRDF 测量试验的开始前和结束后,需要对标准板各进行 2 次垂直方向的数据测量。ASD 光谱仪采用计数值测量模式,可根据测量的地表数据和标准板数据计算地表方向反射比。



图 3 地表方向特性测量试验。(a)敦煌辐射校正场;(b)BRDF 手动测量装置;(c)测量角度设置

Fig. 3 Surface directional reflectance measurement test. (a) Dunhuang test site; (b) BRDF measurement system; (c) angles setting of measurement

由于 BRDF 测量试验过程中存在天气、人为等影响,在建立敦煌场 BRDF 模型之前,可根据实测方向反射率数据的三维曲面分布图进行数据的评估与筛选,选取正常的数据用于场地高光谱 BRDF 模型的建立。图 4 为 2018 年 8 月测量的部分方向反射率数据的三维曲面分布图,其中, λ 为选取的波长点值, θ 为太阳天顶角, x 、 y 轴为卫星观测天顶角, z 轴为方向反射比数据(BRF)。

本文利用核驱动模型(RossThick-LiSparseR 模型)分别对 2018 年 4 月和 8 月测量的方向反射比数据进行拟合,通过采用最小二乘法拟合得到 350~2500 nm 范围内,间隔为 1 nm 的最优的高光谱 BRDF 模型的各项核系数^[18],图 5 为 2018 年 4 月与 2018 年 8 月数据拟合的 BRDF 模型的三个模型参数(f_{iso} , f_{vol} , f_{geo})的对比结果。

图 5 中,对方向反射率的计算值影响最大的参数为 f_{iso} ,通过分析比较两组测量数据拟合的 BRDF

模型参数,可以看到,两组 BRDF 模型的 f_{iso} 的曲线形状一致,但其幅值存在差异,除异常波长点外,2018 年 8 月与 2018 年 4 月模型的 f_{iso} 参数的绝对偏差最大达到了 -0.057,说明敦煌场的 BRDF 特性随时间季节变化较大。

为验证 BRDF 模型对原始数据的拟合优度,将模型参数代入(1)式,计算不同角度的方向反射率。选取相同的角度信息,将模型计算得到的方向反射率与试验测量的方向反射率进行线性回归,求出修正决定系数。图 6 为 2018 年 4 月和 8 月拟合的高光谱 BRDF 模型根据几何角度计算的方向反射率与实际测量值的线性回归图,其修正决定系数分别为 0.98712 和 0.99254,表明本文所提出的模型具有良好的拟合优度,能较好地拟合每天的观测数据。

4 定标结果比对与分析

由于敦煌辐射校正场的方向特性在不同季节存

在差异^[18],故根据遥感器过境时间选择 2018 年 4 月或 8 月的 BRDF 模型对 Suomi-NPP VIIRS 遥感器中分辨率太阳反射波段 M1~M11 进行长时序定

标,部分定标结果的卫星过境时刻大气参数和几何参数如表 1 所示,SAZA 为太阳天顶角,SAVA 为太阳方位角,VAA 为卫星方位角。

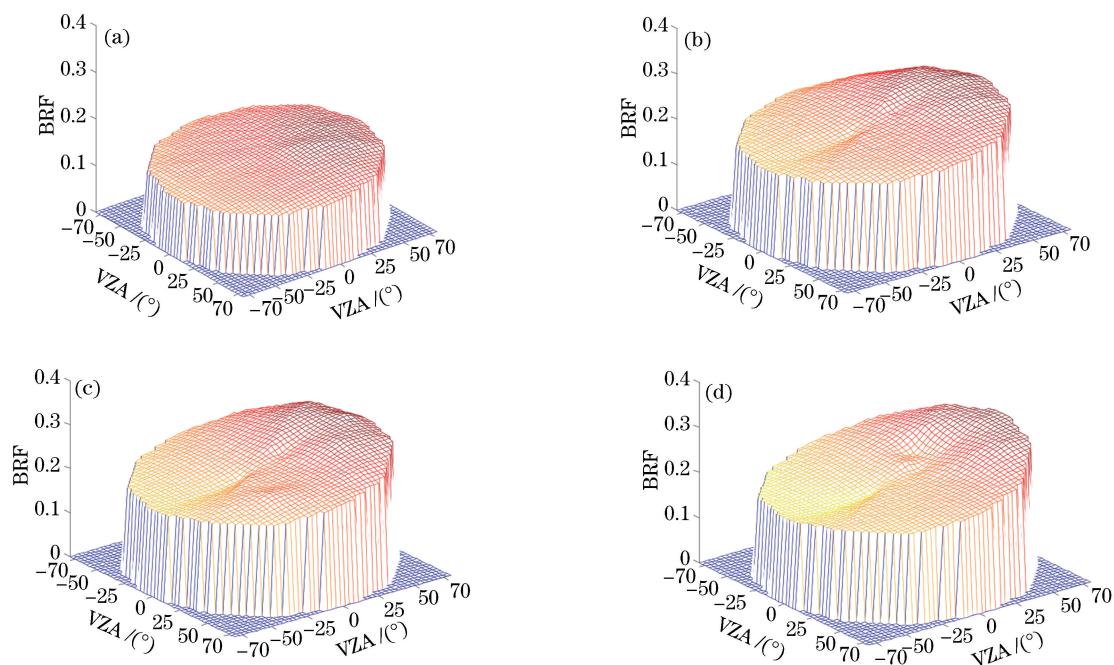


图 4 不同天顶角时敦煌场地方向反射率比分布图($\lambda=554\text{ nm}$)。(a) $\theta=26.1106^\circ$;(b) $\theta=37.3451^\circ$;
(c) $\theta=43.1967^\circ$;(d) $\theta=51.8104^\circ$

Fig. 4 Bidirectional reflectance factor distribution of Dunhuang test site at different zenith angles ($\lambda=554\text{ nm}$).
(a) $\theta=26.1106^\circ$; (b) $\theta=37.3451^\circ$; (c) $\theta=43.1967^\circ$; (d) $\theta=51.8104^\circ$

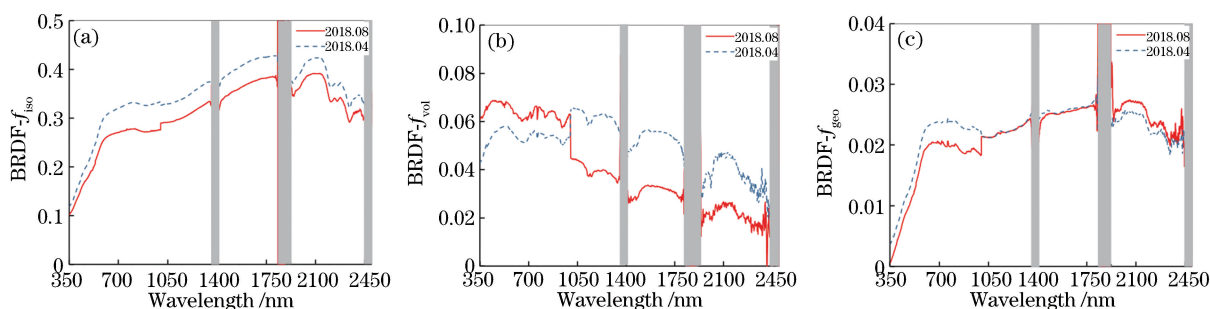


图 5 2018 年 4 月、8 月 BRDF 模型对比。(a) f_{iso} ;(b) f_{vol} ;(c) f_{geo}

Fig. 5 Comparison of BRDF models in April 2018 and August 2018. (a) f_{iso} ; (b) f_{vol} ; (c) f_{geo}

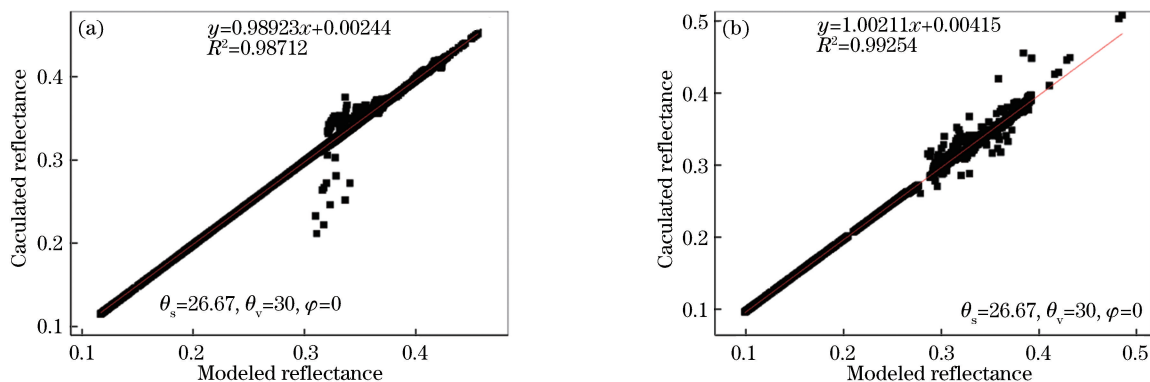


图 6 BRDF 模型拟合优度。(a) 2018 年 4 月;(b) 2018 年 8 月

Fig. 6 Goodness-of-fit for BRDF model. (a) April 2018; (b) August 2018

表 1 卫星过境时大气参数与观测几何参数

Table 1 Atmospheric and geometric parameters during sensor time

Date	Universal time	AOD550	Water vapor	Ozone	SAZ / (°)	SAA / (°)	VZA / (°)	VAA / (°)
2018-01-23	6:36	0.06	0.51	0.30	60.37	-168.66	2.93	84.51
2018-03-23	6:48	0.08	0.64	0.32	40.18	-164.25	13.26	76.60
2018-07-11	7:06	0.09	2.01	0.32	24.66	-131.12	41.01	-96.83
2018-09-27	7:42	0.06	0.32	0.30	51.57	-135.73	67.95	-90.95
2018-10-05	6:54	0.06	0.45	0.31	48.89	-151.56	25.95	-98.94
2018-12-17	7:24	0.07	0.34	0.30	68.33	-153.26	57.60	-93.54

将观测几何参数代入(1)式计算卫星观测方向的高光谱方向反射率,将模型计算的高光谱方向反射率、Suomi-NPP VIIRS 相对光谱响应函数、过境时刻

大气参数输入 6S 大气辐射传输模型,计算 Suomi-NPP VIIRS 各光谱波段的表观反射率,与实际观测的表观反射率进行比较,部分比较结果如图 7 所示。

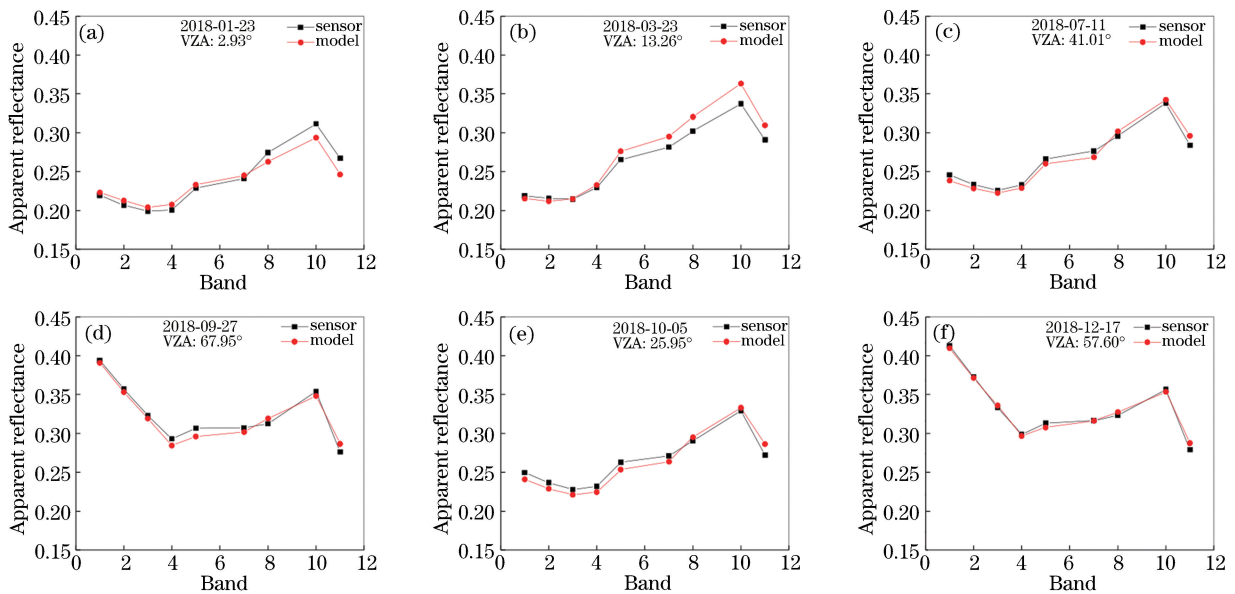


图 7 不同观测天顶角下卫星观测表观反射率与模型计算表观反射率的对比结果。(a) 2018-01-23, VZA: 2.93°; (b) 2018-03-23, VZA: 13.26°; (c) 2018-07-11, VZA: 41.01°; (d) 2018-09-27, VZA: 67.95°; (e) 2018-10-05, VZA: 25.95°; (f) 2018-12-17, VZA: 57.60°

Fig. 7 Comparison of sensor-observed and model-calculated apparent reflectances at different VZAs. (a) 2018-01-23, VZA: 2.93°; (b) 2018-03-23, VZA: 13.26°; (c) 2018-07-11, VZA: 41.01°; (d) 2018-09-27, VZA: 67.95°; (e) 2018-10-05, VZA: 25.95°; (f) 2018-12-17, VZA: 57.60°

为定量比较验证方法结果的可靠性,计算卫星观测表观反射率与模型计算表观反射率的相对偏差(Relative deviation),如表 2 所示, M1~M7 波段的卫星观测表观反射率与模型计算值的相对偏差小于 3%; M8、M10 波段的前两个日期的数据偏差较大,最大偏差为 -6.17%; M11 波段相对偏差普遍都比较大,最大偏差为 -6.93%。

为进一步评估基于场地 BRDF 模型的 Suomi-NPP VIIRS 的长时序定标的定标精度与定标频次,对 2018 年全年的长时序定标结果进行分析和处理,

如图 8 所示,共完成 51 次有效定标,卫星观测天顶角范围为 2.92°~68.03°。除受天气影响较大的 5~7 月外,每月可完成至少 3 次的有效定标; M1~M11 波段的模型计算的表观反射率与卫星观测的表观反射率的相对偏差的绝对值的范围为 0.12%~7.48%。由于 Suomi-NPP VIIRS 卫星传感器近红外波段的自身响应较差,且 BRDF 测量系统的光谱仪测量数据在近红外波段波动较大,故 M8~M11 波段的相对偏差也较大。

进一步计算各波段的时间序列定标结果的平均

值和标准偏差,如表 3 所示,可见波段 M1~M7 的相对偏差绝对值小于 3.23%,其时序定标结果的标准偏差小于 1.08%;近红外 M8~M11 波段的相对偏差的最大值分别为 5.04%,6.53%,7.49%,其时

序定标的结果的标准偏差分别为 1.47%,2.00%,1.76%。这表明本文所述方法计算的表现反射率与卫星观测的表现反射率具有较好的一致性,可完成对光学卫星遥感器的高频次长时序在轨辐射定标。

表 2 卫星观测表现反射率与模型计算表现反射率的相对偏差

Table 2 Relative deviation of sensor-observed and model-calculated apparent reflectances

Date	Relative deviation / %								
	M1 (411 nm)	M2 (444 nm)	M3 (486 nm)	M4 (551 nm)	M5 (672 nm)	M7 (862 nm)	M8 (1238 nm)	M10 (1602 nm)	M11 (2257 nm)
2018-01-23	1.63	2.77	2.48	2.52	1.75	1.76	-4.26	-5.74	-6.93
2018-03-23	1.79	1.68	-0.16	-1.41	-2.92	-2.64	-4.75	-6.17	-4.88
2018-07-11	1.09	1.30	1.56	1.77	2.35	3.05	-2.00	-1.29	-4.07
2018-09-27	0.82	1.08	1.17	3.05	2.61	1.80	-2.11	1.65	-3.68
2018-10-05	1.58	1.52	2.01	1.42	2.76	2.78	-1.66	-1.18	-4.96
2018-12-17	0.78	0.44	-0.81	0.67	1.80	0.04	-1.26	0.90	-2.91
Mean / %	1.28	1.47	1.37	1.81	2.37	2.01	2.67	2.82	4.57
Std / %	0.44	0.77	0.84	0.85	0.49	1.10	1.46	2.44	1.39

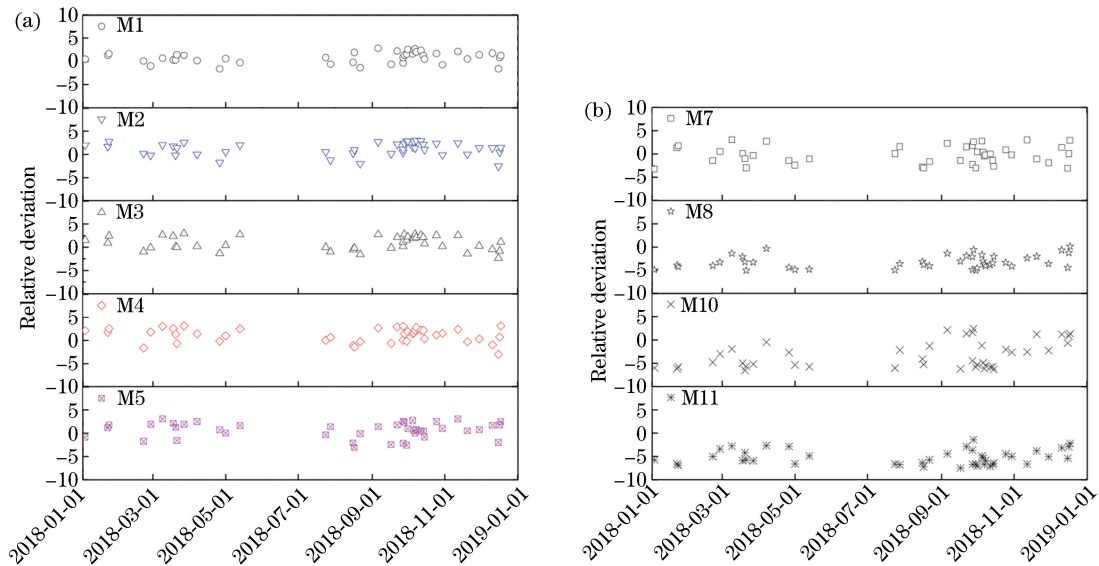


图 8 不同波段下 Suomi-NPP VIIRS 长时序定标结果。(a) M1~M5 波段;(b) M7,M8,M10,M11 波段

Fig. 8 Suomi-NPP VIIRS long time series calibration results at different wavelength bands.

(a) M1-M5 bands; (b) M7, M8, M10, M11 bands

表 3 Suomi-NPP VIIRS 长时序定标结果的平均值与标准偏差

Table 3 Mean and standard deviation of the Suomi-NPP VIIRS long time series calibration results

Band	M1	M2	M3	M4	M5	M7	M8	M10	M11
	(411 nm)	(444 nm)	(486 nm)	(551 nm)	(672 nm)	(862 nm)	(1238 nm)	(1602 nm)	(2257 nm)
Mean / %	1.26	1.56	1.46	1.62	1.63	1.68	3.11	3.78	5.12
Std / %	0.76	0.96	0.99	0.98	0.91	1.08	1.47	2.00	1.76

5 结 论

以光学遥感卫星传感器 Suomi-NPP VIIRS 为研究对象,针对观测角度跨度较大、时间分辨率较高的光学卫星传感器,提出了一种基于场地 BRDF 模型的高频次绝对辐射定标方法,摆脱了对星-地同步测量试验、天气、观测几何信息等条件的依赖,可对满足天气条件的任意角度任意时刻的任意卫星传感器进行实时在轨辐射定标。利用 BRDF 手动测量系统对不同季节的敦煌辐射校正场进行场地方向特性的测量,并建立不同季节的场地地表高光谱 BRDF 模型;利用两个不同季节的 BRDF 模型对 Suomi-NPP VIIRS 传感器进行了 2018 年全年的长时序定标,完成 51 次有效定标,卫星观测天顶角范围为 $2.92^{\circ}\sim 68.03^{\circ}$,不同波段的模型计算的表观反射率与卫星观测的表观反射率的相对偏差的绝对值的范围为 $0.12\%\sim 7.48\%$,其中,可见波段 M1~M7 的相对偏差的绝对值小于 3.23% ,结果表明,本文所述方法摆脱了对星地同步观测数据的依赖,不受天气、观测时间、观测角度、光谱函数匹配差异等条件的限制,为实现光学卫星传感器的长时序高频次在轨辐射定标以及长期辐射特性监测提供了借鉴。

参 考 文 献

- [1] Liang S L. Quantitative remote sensing of land surfaces [M]. Fan W J, Transl. Beijing: Science Press, 2009: 130-141.
梁顺林. 定量遥感[M]. 范闻捷, 译. 北京: 科学出版社, 2009: 130-141.
- [2] Zheng X B. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(1): 2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 2-8.
- [3] Angal A, Xiong X X, Choi T, *et al.* Using the Sonoran and Libyan Desert test sites to monitor the temporal stability of reflective solar bands for Landsat 7 enhanced thematic mapper plus and Terra moderate resolution imaging spectroradiometer sensors [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2010, 4(1): 043525.
- [4] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [5] Wu A S, Xiong X X, Cao C Y, *et al.* Assessment of SNPP VIIRS VIS/NIR radiometric calibration stability using aqua MODIS and invariant surface targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(5): 2918-2924.
- [6] Xiong X X, Angal A, Butler J, *et al.* Global space-based inter-calibration system reflective solar calibration reference: from Aqua MODIS to S-NPP VIIRS [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9881: 98811D.
- [7] Upreti S, Cao C Y. 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: 106-115.
- [8] 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.
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.
- [9] Wang L, Hu X Q, Chen L. 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.
- [10] Wei W, Song S, Sun Y G, *et al.* Development and application of automated vicarious calibration system [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(10): 100101.
- [11] Qiu G G, Li X, Wei W, *et al.* Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0701001.
邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0701001.
- [12] 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.
- [13] Gu X F, Tian G L, Yu T, *et al.* Radiometric calibration theory and method of space optical sensors [M]. Beijing: Science Press, 2013.
顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学传感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

- [14] Roujean J L, Leroy M, Deschamps 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.
- [15] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [16] Platnick S. MODIS atmosphere L3 daily product [OL]. [2019-02-11]. http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD08_D3.061.
- [17] The NPP_VIAES_L1, collection 5000 [DB/OL]. [2019-02-11]. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/NPP_VDNES_L1.
- [18] Yu T Q, Wei W, Zhang Y N, *et al.* Analysis of the BRDF characteristics of Dunhuang Radiometric Calibration Site in the spring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0612004.
余谭其, 韦玮, 张艳娜, 等. 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 0612004.