

## 基于 BRDF 模型的 FY\_3D MERSI-II 场地定标与验证

衡岩冰<sup>1</sup>, 潘军<sup>1</sup>, 高海亮<sup>2\*</sup>, 王凯司<sup>1</sup>, 豆新格<sup>1</sup><sup>1</sup>吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130012;<sup>2</sup>中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

**摘要** FY\_3D 卫星中分辨率成像仪(MERSI-II型)自发射以来,主要应用在气象观测、环境监测、防灾减灾等方面。FY\_3D 卫星过境时的观测角度会影响定标精度,基于此,提出一种基于双向反射分布函数(BRDF)模型的场地定标方法。2022年7月在敦煌校正场开展星地同步测量实验,并利用2020年7组不同时刻的无人机多角度观测数据基于6种核函数组合方式建立42种BRDF模型。针对不同观测角度下的FY\_3D影像,对构建的BRDF模型进行适用性分析。并计算基于BRDF模型传感器各波段的表观反射率与卫星实测的表观反射率相对偏差。结果显示:敦煌场地BRDF模型校正地表反射率时会受卫星观测角度影响,不同模型校正地表反射率之间的差异,受时间及太阳角度的影响不超过1%,受不同核函数组合方式的影响不超过3%。FY\_3D MERSI-II型2021年B1~B12波段模型计算的与卫星观测的表观反射率平均相对偏差均小于5.22%,2022年B1、B2波段模型计算的与卫星观测的表观反射率平均相对偏差超过8%,其余波段均小于5.74%。

**关键词** 辐射定标; BRDF模型; 表观反射率; 反射率基法; FY\_3D MERSI-II

中图分类号 TP722.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230618

## Calibration and Validation of FY\_3D MERSI-II Based on BRDF model

Heng Yanbing<sup>1</sup>, Pan Jun<sup>1</sup>, Gao Hailiang<sup>2\*</sup>, Wang Kaisi<sup>1</sup>, Dou Xinge<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;<sup>2</sup>The Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** The FY\_3D satellite medium-resolution imager (MERSI-II) has been primarily used for meteorological observation, environmental monitoring, disaster prevention, and mitigation. As the observation angle of FY\_3D satellite transit is expected to affect the calibration accuracy, this study proposes a site calibration method based on bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model. In July 2022, a satellite-ground synchronous measurement experiment was conducted in the Dunhuang calibration field, and 42 BRDF models were established based on six kernel-function combinations which included seven sets of unmanned aerial vehicle multiangle observation data at different moments in 2020. Consequently, the applicability of the constructed BRDF model for the FY\_3D images obtained from different observation angles was analyzed. The relative deviation between the apparent reflectance of each band of the sensor based on the BRDF model and that measured by the satellite was calculated. The results show that the difference between the corrected surface reflectance of different models is not more than 1% affected by the time and sun angle, and not more than 3% affected by the different combinations of the kernel functions of FY\_3D. Furthermore, the average relative deviation of apparent reflectance from satellite observations calculated by the B1-B12 band model of MERSI-II in 2021 was less than 5.22%, whereas that from satellite observations calculated by the B1 and B2 band models in 2022 was more than 8%; the remaining bands were less than 5.74%.

**Key words** radiometric calibration; BRDF model; reflectance-based method; apparent reflectance; FY\_3D MERSI-II

## 1 引言

随着遥感科学的不断发展,关于遥感数据的研究

逐渐从定性分析深入定量分析。由于卫星发射后会受到周围环境和自身特性的影响,传感器的辐射性能会随着使用时间的增加出现不同程度的衰减,因此需要

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-03-07; 录用日期: 2023-03-13; 网络首发日期: 2023-03-23

基金项目: 国家民用空间基础设施陆地观测卫星共性应用支撑平台(CASPLOS-CCSI)、黑土地保护与利用科技创新工程专项资助(XDA28050401)

通信作者: \*gaohl200439@aricas.ac.cn

定期开展卫星传感器辐射定标工作,准确监测传感器在轨期间辐射响应变化,保证遥感数据定量研究的精度<sup>[1-2]</sup>。传统的辐射定标大都基于小角度观测影像,假设地面为朗伯体,在此基础上实现辐射定标。然而,针对气象卫星,获取的影像大部分为大角度观测影像。其中,FY\_3D 卫星经过敦煌校正场的观测角度不固定,最大可达 58°,为提高定标精度,需分析观测角度对定标精度的影响。

20 世纪 80 年代初,开始采用场地定标的方法进行辐射定标工作,包括辐照度基法、辐亮度基法、反射率基法,精度可达 5% 以内。Slater 等<sup>[3]</sup>基于大面积稳定地物对 Landsat4-TM 卫星进行辐射定标,为后续定标工作的发展奠定了基础。2003 年,何红艳等<sup>[4]</sup>利用大气辐射传输模型输入不同的观测角度对 CCD 传感器参数进行分析,验证结果表明传感器入瞳处的能量受观测角度等因素的影响。近年来,张学文等<sup>[5]</sup>采用反射率基法验证了多光谱传感器的辐射定标系数,但未考虑卫星侧摆时的角度影响。邵雯<sup>[6]</sup>针对高分辨率卫星进行多场地辐射定标并对卫星侧摆角进行校正,降低了观测角度带来的误差。随着无人机技术的发展,陶炳成等<sup>[7]</sup>提出无人机平台的地表双向反射分布函数(BRDF)测量装置,并验证了该方法的可靠性。豆新格等<sup>[8]</sup>也基于无人机装置构建 BRDF 模型针对敦煌校正场进行研究。赵春艳等<sup>[9]</sup>提出基于场地 BRDF 模型的绝对辐射定标方法,实现了传感器的长时序定标。尽管不少学者考虑到卫星观测角度的影响引入 BRDF 模型,但没有具体分析不同 BRDF 模型对地表反射率影响的差异,也没有分析构建的 BRDF 模型会受到哪些因素的影响。

本文以敦煌校正场作为实验区,在传统的反射率基法<sup>[10-12]</sup>的基础上引入 BRDF 模型,分析不同 BRDF 模型校正地表反射率时的差异,及太阳角度、时间、不同核函数组合方式对 BRDF 模型校正地表反射率的影响,并计算了 FY\_3D 气象卫星观测的表观反射率与模型计算的表观反射率的相对偏差。

## 2 MERSI-II 型载荷介绍

新一代的极轨气象卫星风云三号 D 星是中国低轨道下午观测的主业务卫星,采用太阳同步轨道卫星,轨道平面和太阳始终保持相对固定。距地高度为 836 km,轨道回归周期为 5 天。中分辨率光谱成像仪(MERSI-II 型)是 FY\_3D 卫星主要载荷之一,传感器共 25 个波段,覆盖光谱范围 0.47~12  $\mu\text{m}$ ,包括 6 个 250 m 中长波红外波段,19 个 1000 m 的中分辨率波段<sup>[13]</sup>。其中:1~7 波段主要用于云边界、陆地以及特征遥感;8~15 波段主要用于海洋水色、浮游生物和生物地球化学遥感;16、17、18、22 和 23 波段用于大气水汽遥感;19 波段是卷云波段;20、21、24 和 25 波段用于陆

地、水和云的温度遥感<sup>[14]</sup>。本研究主要对 FY\_3D 卫星 MERSI-II 型传感器可见光近红外波段进行定标,图 1 为 MERSI-II 相对光谱响应函数。

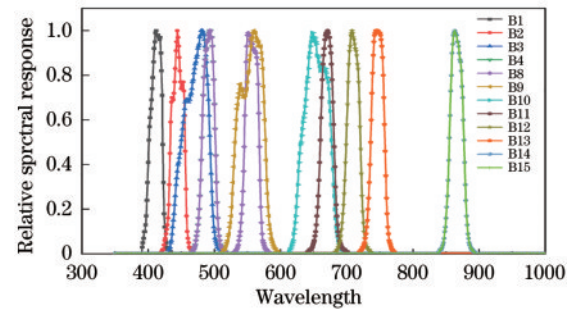


图 1 FY\_3D MERSI-II 各波段相对光谱响应函数(B1~B4、B8~B15)

Fig. 1 Relative spectral response function of each band of FY\_3D MERSI-II(B1~B4, B8~B15)

## 3 方法原理及数据

### 3.1 定标原理

FY\_3D 卫星轨道平面和太阳之间位置相对固定,是近极地太阳同步轨道卫星,但不同日期经过敦煌校正场时的观测角度存在差异。为消除观测角度带来的影响,采用场地 BRDF 模型并结合反射率基法的基本原理,选择敦煌校正场作为实验区,在 FY\_3D 卫星过境时,同步测量地表反射率、水汽含量、大气气溶胶光学厚度、臭氧等参数。利用 BRDF 模型将地面垂直测量的地表反射率模拟成卫星过境时刻观测方向的地表反射率数据<sup>[5,8]</sup>。并结合 FY\_3D 卫星的光谱响应函数使用 MODTRAN 辐射模型<sup>[15]</sup>计算出卫星传感器各波段的表观辐亮度,并与遥感影像像元亮度(DN)值比较获得在轨定标系数,如图 2 所示。具体流程如下:

1) 在敦煌场地选取实验样区测量地表反射率、水汽含量、大气气溶胶光学厚度、臭氧等参数,并利用 7 组不同时刻下的无人机多角度数据基于 6 种核函数组合方式建立 42 种 BRDF 模型;

2) 获取 FY\_3D 卫星不同角度下的遥感影像,并计算出卫星的观测几何参数及 FY\_3D 卫星各波段的 DN 值;

3) 利用 42 种 BRDF 模型依次校正地表反射率,分析 BRDF 模型受时间和太阳角度的影响及不同核函数组合方式构建的模型之间的差异;

4) 将校正后的地表反射率、卫星观测几何参数、水汽含量、大气气溶胶光学厚度、臭氧等参数输入 MODTRAN 辐射传输模型,得到模型计算的表观反射率;

5) 计算 FY\_3D 卫星实测的表观反射率和模型计算的表观反射率的相对偏差,并进行对比分析。

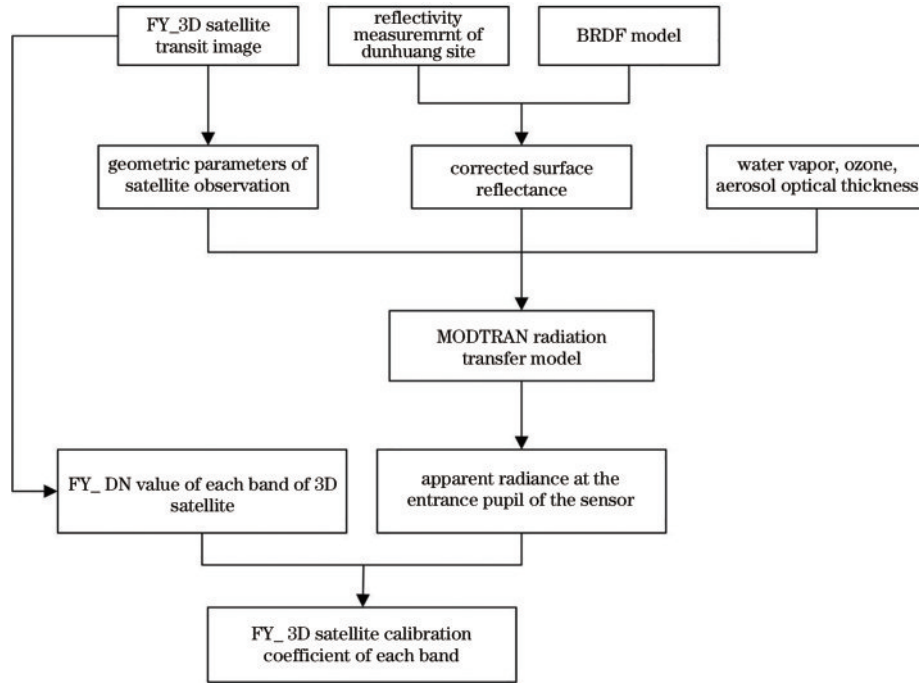


图 2 基于 BRDF 模型的 FY\_3D 卫星辐射定标流程图

Fig. 2 Flowchart of FY\_3D satellite radiation calibration based on BRDF model

### 3.2 BRDF 模型构建及原理

以多旋翼无人机作为设备平台,搭载便携地物光谱仪,进行地表目标在不同角度上的光谱反射率测量。BRDF 机载装置中使用 RS8800 多功能地物光谱仪器采集 350~250 nm 的地表光谱数据<sup>[7]</sup>。

采用线性的核驱动模型<sup>[12]</sup>,该模型<sup>[16-17]</sup>可以拟合地表的二向反射特征:

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

式中: $\theta_i$ 为卫星过境时刻的太阳天顶角; $\theta_v$ 卫星观测天顶角; $\varphi$ 为相对方位角; $R$ 为地表方向反射率; $K_{vol}$ 为体散射核; $K_{geo}$ 为几何光学核; $f_{iso}$ 、 $f_{geo}$ 、 $f_{vol}$ 是根据体散射核、几何光学核、多角度观测数据拟合出的核系数。同时,体散射核包括 RossThin、RossThick<sup>[18-19]</sup>,体散射核描述水平均匀植被的各向异性散射。几何光学核包括 LiSparse、LiDense、LiTransit<sup>[20-21]</sup>,几何光学核描述观测方向上地物三维结构及其相互投射阴影等作用产生的几何光学散射。将两种核函数采用不同的组合方式构建出 6 种 BRDF 校正模型,并根据 BRDF 模型校正得到卫星过境时观测方向的地表反射率。

$$\rho_{rectify} = \frac{\rho(\theta_i, \theta_v, \varphi)}{\rho(\theta_i, 0, 0)} \rho_{vertical}, \quad (2)$$

式中: $\rho_{rectify}$ 为经核驱动模型计算后的地表方向反射率; $\rho(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 为 BRDF 模型模拟的卫星过境时刻观测角度的反射率; $\rho(\theta_i, 0, 0)$ 为 BRDF 模型模拟的垂直测量的反射率; $\rho_{vertical}$ 为地面实验实测的地表反射率。

由式(2)可得到基于核驱动模型校正后的地表反

射率,然后根据卫星的光谱响应函数对经核驱动模型校正后的地表反射率进行卷积得到传感器各波段的地表反射率:

$$\rho_s = \frac{\int \rho_{rectify}(\lambda) R_{B_i}(\lambda) d\lambda}{\int R_{B_i}(\lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

### 3.3 定标数据

#### 3.3.1 地面定标实验

地物光谱反射率同步测量一般在卫星过境前后半小时进行,利用 SR8800 多功能地物光谱仪在选择的实验样区进行光谱测量工作。在敦煌场地选择不同的样区,在样区内选择一定数量的测点,在每个测量点分别对白板进行 1 次测量、对地物进行 4 次测量,白板和地物的测量间隔不超过 5 min。并使用 GPS 记录测点的经纬度及高程,对研究区精准定位,在进行核驱动模型之前需要对采集到的初始光谱反射率进行处理,删除实验操作过程中的作废点,并对每一个测点周围随机采集到的光谱数据求取均值。

为分析 BRDF 模型在 FY\_3D 卫星不同观测角度下具有何种差异,需将上述初步处理后得到的地表反射率代入式(3)中,得到传感器各波段的地表反射率。

#### 3.3.2 卫星数据

MERSI-II 型传感器是 FY\_3D 卫星搭载的核心传感器之一,整合了原有风云三号卫星两台成像仪器(MERSI-1 和 VIRR)的功能。本研究以 MERSI-II 型传感器可见光和近红外通道为基准,研究不同观测角度下的 BRDF 模型的适用性。其中, FY3D\_MERSI\_1000M 定位产品从风云卫星数据服务网站下载获取,

根据下载的影像信息可以计算出卫星经过敦煌校正场的观测几何参数和各个波段的灰度值,并将其作为后续定标系数验证的基础。

根据 2021 年 9 月、2022 年 7 月开展的场地定标实验,获取实验期间的 MERSI-II 型传感器的遥感影像,根据影像信息提取到卫星过境期间的大气参数和观测几何参数。具体内容如表 1、表 2 所示。其中,Time 表示卫星过境时间,SZA 为太阳天顶角,SAA 为太阳方位角,VZA 为观测天顶角,VAA 为观测方位角,AOD 为 550 nm 的气溶胶光学厚度。

表 1 2021 年 FY\_3D 卫星过境时的观测几何参数和大气参数  
Table 1 Observed geometric parameters and atmospheric parameters for the FY\_3D satellite transit in 2021

Date	09-19	09-20	09-25	09-26
Time	15:15	14:55	15:15	14:20
SZA / (°)	44.84	43.21	45.68	44.33
SAA / (°)	216.64	210.29	211.46	205.10
VZA / (°)	33.20	5.33	13.25	17.12
VAA / (°)	262.41	260.13	260.24	76.18
AOD(550 nm)	0.138	0.133	0.253	0.119
Water vapor / (g·cm <sup>2</sup> )	0.651	1.267	1.064	0.405

### 3.3.3 BRDF 模型数据

为分析不同核驱动模型的适用性,基于 6 种核函数组合方法,利用 2020 年 9 月实测的 7 组不同太阳天顶角下的多角度观测数据构建了 42 种 BRDF 模型。基于 FY\_3D 卫星在不同观测角度分别计算 BRDF 模

表 3 2022-07-19 不同 BRDF 模型地表反射率改变量(T0~T6 表示不同时刻的无人机多角度观测数据)

Table 3 Change of surface reflectance of different BRDF models on 2022-07-19 (T0-T6 represents multi-angle observation data of UAV at different times)

	Relative deviation / %							
SZA / (°)	44.61	40.53	45.03	58.21	64.64	49.28	44.94	
Observation data	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Average
thick_sparse	0.28	0.32	0.32	0.33	0.24	0.24	0.24	0.28
thick_dense	0.31	0.35	0.42	0.40	0.25	0.24	0.26	0.32
thick_transit	0.25	0.29	0.24	0.24	0.24	0.22	0.21	0.24
thin_sparse	0.31	0.37	0.32	0.39	0.34	0.31	0.29	0.33
thin_dense	0.56	0.68	0.77	0.82	0.65	0.64	0.67	0.69
thin_transit	0.24	0.68	0.22	0.24	0.24	0.23	0.21	0.30
Average	0.32	0.45	0.38	0.40	0.33	0.31	0.31	

从表 3 可以看出,当卫星观测角度为 7.34° 时,不同 BRDF 模型之间  $D$  值的差异不超过 1%,且 BRDF 模型对地表反射率的改变量在 0.21%~0.82% 之间,均值为 0.35%。从表 4 可以看出,当卫星观测角度为 19.40° 时,BRDF 模型对地表反射率的改变量在 0.10%~1.96% 之间,均值为 1.17%。从表 5 可以看出,当卫星观测角度为 43.78° 时,BRDF 模型对地表反射率的改变量在 0.36%~3.76% 之间,均值为 2%。从表 6 可以看出,当卫星观测角度为 58° 时,BRDF 模型对地表反射率的改变量在 0.83%~5.20% 之间,均

表 2 2022 年 FY\_3D 卫星过境时的观测几何参数和大气参数  
Table 2 Observed geometric parameters and atmospheric parameters for the FY\_3D satellite transit in 2022

Date	07-09	07-19	07-21	07-24
Time	15:15	15:05	14:30	15:25
SZA / (°)	22.37	25.58	21.57	27.47
SAA / (°)	222.34	227.03	207.59	228.95
VZA / (°)	17.12	7.28	43.78	19.40
VAA / (°)	76.19	260.55	72.94	260.97
AOD(550 nm)	0.006	0.270	0.007	0.153
Water vapor / (g·cm <sup>2</sup> )	1.030	1.055	1.071	0.862

型校正前后的地表反射率,并利用式(4)分析 BRDF 模型对地表反射率的影响。

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\rho_{(a,i)} - \rho_{(b,i)}|, \quad (4)$$

式中: $\rho_{(a,i)}$ 表示经 BRDF 模型校正前传感器第  $i$  波段的地表反射率; $\rho_{(b,i)}$ 表示校正后传感器第  $i$  波段的地表反射率; $n$ 为传感器总波段数; $D$ 为经 BRDF 模型校正后的传感器各波段地表反射率平均改变量。 $D$ 值越小说明 BRDF 模型对地表反射率的影响越小。

为分析卫星观测角度对 BRDF 模型精度的影响,选取 FY\_3D 卫星 2022 年 7 月 19 日(卫星观测角度为 7.34°)、7 月 24 日(卫星观测角度为 19.40°)、7 月 21 日(卫星观测角度为 43.78°)、7 月 22 日(卫星观测角度为 58°)数据,利用式(4)计算出传感器各波段平均改变量,结果如表 3~6 所示。

表 3 2022-07-19 不同 BRDF 模型地表反射率改变量(T0~T6 表示不同时刻的无人机多角度观测数据)

Table 3 Change of surface reflectance of different BRDF models on 2022-07-19 (T0-T6 represents multi-angle observation data of UAV at different times)

	Relative deviation / %							
SZA / (°)	44.61	40.53	45.03	58.21	64.64	49.28	44.94	
Observation data	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Average
thick_sparse	0.28	0.32	0.32	0.33	0.24	0.24	0.24	0.28
thick_dense	0.31	0.35	0.42	0.40	0.25	0.24	0.26	0.32
thick_transit	0.25	0.29	0.24	0.24	0.24	0.22	0.21	0.24
thin_sparse	0.31	0.37	0.32	0.39	0.34	0.31	0.29	0.33
thin_dense	0.56	0.68	0.77	0.82	0.65	0.64	0.67	0.69
thin_transit	0.24	0.68	0.22	0.24	0.24	0.23	0.21	0.30
Average	0.32	0.45	0.38	0.40	0.33	0.31	0.31	

值为 2.68%。可以看出,随着卫星观测角度增加,BRDF 模型对地表反射率的改变量增大。

为分析不同核函数组合方式对  $D$  值的影响,将同一种核函数在不同时刻、不同太阳角度下的结果取均值,以此忽略时间和角度带来的差异。结果表明:不同 BRDF 模型校正地表反射率之间的差异,受核函数组合方式影响不超过 3%。当卫星观测角度为 19.40° 时,thin\_dense 模型对地表反射率的改变量为 0.35%,其余组合方式在 0.97%~1.56% 之间。当卫星观测角度为 58° 时,thin\_dense 模型对地表反射率的改变量

表 4 2022-07-24 不同 BRDF 模型地表反射率改变量 (T0~T6 表示不同时刻的无人机多角度观测数据)

Table 4 Change of surface reflectance of different BRDF models on 2022-07-24 (T0~T6 represents multi-angle observation data of UAV at different times)

		Relative deviation /%							
SZA / (°)	44.61	40.53	45.03	58.21	64.64	49.28	44.94		
Observation data	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Average	
thick_sparse	1.29	1.07	0.98	1.02	1.55	1.60	1.96	1.35	
thick_dense	1.16	1.04	1.46	0.92	1.55	1.59	1.46	1.31	
thick_transit	1.58	1.21	1.32	1.37	1.95	1.77	1.75	1.56	
thin_sparse	1.04	0.85	0.96	0.79	0.94	1.07	1.13	0.97	
thin_dense	0.37	0.10	0.13	0.26	0.21	0.24	1.15	0.35	
thin_transit	1.60	1.17	1.46	1.33	1.62	1.60	1.75	1.50	
Average	1.17	0.91	1.05	0.95	1.31	1.31	1.53		

表 5 2022-07-21 不同 BRDF 模型地表反射率改变量 (T0~T6 表示不同时刻的无人机多角度观测数据)

Table 5 Change of surface reflectance of different BRDF models on 2022-07-21 (T0~T6 represents multi-angle observation data of UAV at different times)

		Relative deviation /%							
SZA / (°)	44.61	40.53	45.03	58.21	64.64	49.28	44.94		
Observation data	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Average	
thick_sparse	1.24	1.65	2.05	1.76	2.19	1.92	2.16	1.85	
thick_dense	1.96	1.00	0.55	0.67	1.64	2.05	1.46	1.33	
thick_transit	2.88	2.08	3.26	2.77	3.19	2.59	3.05	2.83	
thin_sparse	2.36	1.87	2.33	1.79	1.90	2.17	1.98	2.06	
thin_dense	0.69	0.44	0.98	1.30	0.43	0.36	0.58	0.68	
thin_transit	3.73	2.71	3.58	3.12	3.53	2.42	3.76	3.26	
Average	2.14	1.63	2.12	1.90	2.15	1.92	2.17		

表 6 2022-07-22 不同 BRDF 模型地表反射率改变量 (T0~T6 表示不同时刻的无人机多角度观测数据)

Table 6 Change of surface reflectance of different BRDF models on 2022-07-22 (T0~T6 represents multi-angle observation data of UAV at different times)

		Relative deviation /%							
SZA / (°)	44.61	40.53	45.03	58.21	64.64	49.28	44.94		
Observation data	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Average	
thick_sparse	2.03	1.73	3.17	2.04	2.11	1.46	2.13	2.10	
thick_dense	1.85	2.44	2.21	1.98	3.03	2.01	2.59	2.30	
thick_transit	3.50	2.41	4.66	3.57	3.56	2.58	3.59	3.41	
thin_sparse	3.25	2.54	3.29	2.45	2.44	2.81	3.26	2.86	
thin_dense	0.84	1.07	1.81	1.45	0.83	1.13	1.43	1.22	
thin_transit	5.20	3.76	4.66	3.53	4.35	4.29	3.58	4.20	
Average	2.78	2.33	3.30	2.50	2.72	2.38	2.76		

为 1.22%，其余组合方式在 2.10%~4.20% 之间。可以看出，thin\_dense 组合方式校正地表反射率意义不大。同理，将同一时刻、同一太阳角度下不同核函数组合方式的结果取均值，忽略不同核函数组合方式带来的差异。结果表明：敦煌场地不同模型校正地表反射率之间的差异受时间及太阳角度的影响不超过 1%，该场地具有良好的朗伯性。

## 4 实验与结果

### 4.1 FY\_3D 定标结果对比与分析

为提高卫星定标精度，引入 BRDF 模型校正地表反射率，在敦煌场地模型间的差异受时间、太阳角度的影响不超过 1%，受核函数组合方式的影响不超过

3%，由上文知 thin\_dense 组合方式校正地表反射率意义不大，故从剩余 5 种核函数组合方式中任选一种 BRDF 模型即可。

选用 thick\_dense 模型校正地表反射率，并将校正后的地表反射率、大气参数、卫星观测几何等输入 MODTRAN 辐射传输模型中，得到 FY\_3D 卫星各波段的表现反射率，并与卫星影像获得的表现反射率进行比较，获得两者的相对差异，比较结果如图 3、4 所示。

根据图 3、4 结果具体分析 2021 年、2022 年卫星观测表现反射率与模型计算表现反射率的相对偏差，具体如表 7、8 所示。2021 年 9 月卫星表现反射率与模型计算的相对偏差范围在 0.23%~7.9% 之间，且各波

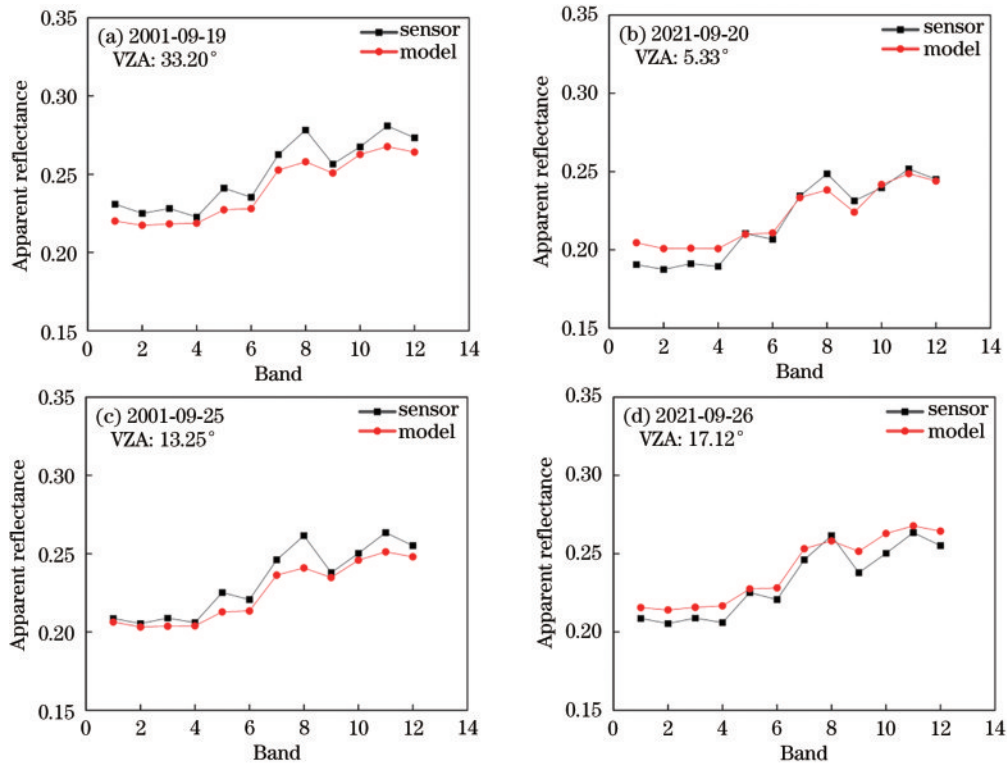


图3 2021年FY\_3D卫星不同观测天顶角下卫星观测表观反射率与模型计算的表观反射率比较结果。(a) 2021-09-19, VZA: 33.20°; (b) 2021-09-20, VZA: 5.33°; (c) 2021-09-25, VZA: 13.25°; (d) 2021-09-26, VZA: 33.20°  
 Fig. 3 Comparison results of apparent reflectivity between satellite observation and model calculation under different zenith angle of FY\_3D satellites in 2021. (a) 2021-09-19, VZA: 33.20°; (b) 2021-09-20, VZA: 5.33°; (c) 2021-09-25, VZA: 13.25°; (d) 2021-09-26, VZA: 33.20°

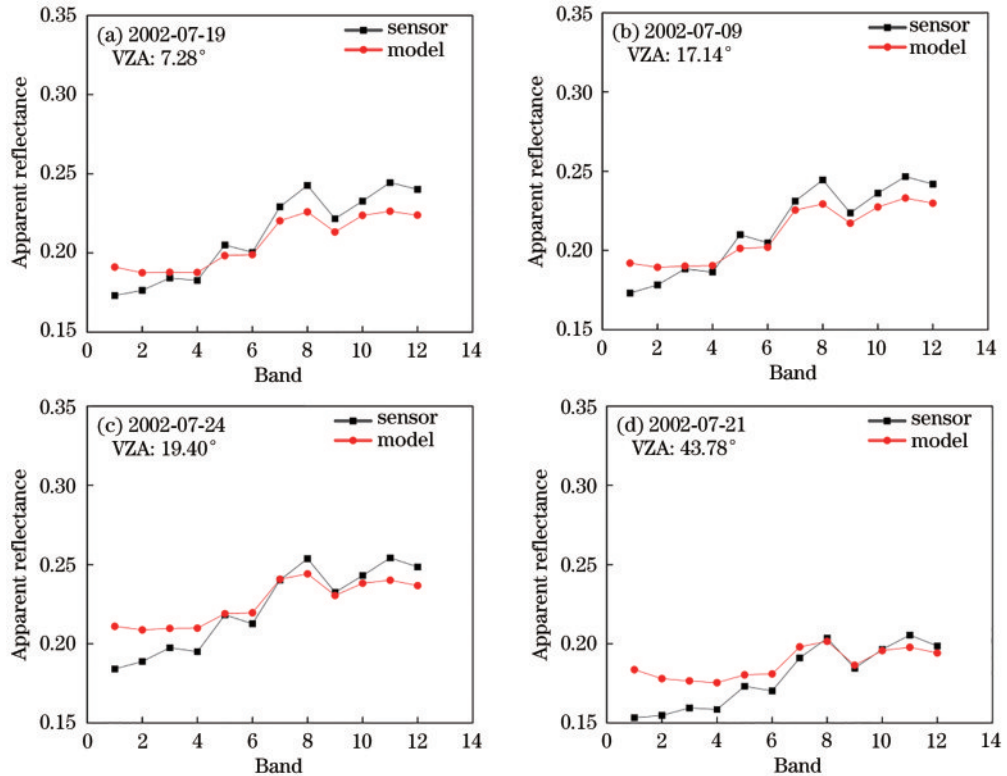


图4 2022年FY\_3D卫星不同观测天顶角下卫星观测表观反射率与模型计算的表观反射率比较结果。(a) 2022-07-19, VZA: 7.28°; (b) 2022-07-09, VZA: 17.14°; (c) 2022-07-24, VZA: 19.40°; (d) 2022-07-21, VZA: 43.78°  
 Fig. 4 Comparison results of apparent reflectivity between satellite observation and model calculation under different zenith angle of FY\_3D satellites in 2022. (a) 2022-07-19, VZA: 7.28°; (b) 2022-07-09, VZA: 17.14°; (c) 2022-07-24, VZA: 19.40°; (d) 2022-07-21, VZA: 43.78°

段相对偏差均值不超过 5.22%。2022 年 7 月 B1、B2 波段卫星表观反射率与模型计算的平均相对偏差超过 8%，其他波段平均相对偏差不超过 5.74%，其中，B2 波段后两个日期相对偏差较大，最大为 12.97%，B1 波段 4 天的相对偏差数据都比较大，最大为 16.46%。根

据表 7、表 8 表观反射率与卫星观测表观反射率相对偏差均值可以看出，B5~B10 波段在不同年份的相对偏差比较稳定上下浮动不超过 1%，B1、B2 波段有明显增加，其中，B1 波段较上年增加 8.19%，B2 波段较上年增加 4.77%，其余波段相对偏差增量不超过 3%。

表 7 2021 年 9 月模型计算表观反射率与卫星观测表观反射率相对偏差

Table 7 Relative deviation of the apparent reflectance from satellite observation calculated by the model in September 2021

Date	Relative deviation / %											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
	(412 nm)	(443 nm)	(470 nm)	(490 nm)	(550 nm)	(555 nm)	(650 nm)	(670 nm)	(709 nm)	(746 nm)	(865 nm)	(866 nm)
2021-09-19	4.67	3.40	4.31	1.79	5.76	3.13	3.77	7.31	2.23	1.82	4.69	3.34
2021-09-20	6.85	6.64	4.88	5.66	0.23	1.95	0.45	4.35	3.23	0.84	1.22	0.48
2021-09-25	1.08	1.07	2.48	1.01	5.49	3.30	3.98	7.90	1.31	1.77	4.66	2.81
2021-09-26	3.22	4.07	3.21	4.07	1.03	3.30	2.81	1.31	5.40	4.79	1.62	3.49
Average	3.96	3.80	3.72	3.13	3.13	2.92	2.75	5.22	3.04	2.31	3.05	2.53

表 8 2022 年 7 月模型计算表观反射率与卫星观测表观反射率相对偏差

Table 8 Relative deviation of the apparent reflectance from satellite observation calculated by the model in July 2022

Date	Relative deviation / %											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
	(412 nm)	(443 nm)	(470 nm)	(490 nm)	(550 nm)	(555 nm)	(650 nm)	(670 nm)	(709 nm)	(746 nm)	(865 nm)	(866 nm)
2022-07-19	9.51	5.87	3.11	3.61	3.74	2.46	4.21	7.22	4.80	3.99	7.19	7.94
2022-07-09	9.87	5.88	0.88	2.13	4.31	1.40	2.50	6.63	2.98	3.84	5.81	5.26
2022-07-24	12.76	9.56	5.80	7.09	0.79	3.14	0.53	3.90	0.89	2.04	5.87	4.97
2022-07-21	16.46	12.97	9.58	9.54	4.13	5.82	4.16	3.27	3.27	3.27	4.09	3.40
Average	12.15	8.57	4.85	5.59	3.24	3.21	2.85	5.26	2.99	3.28	5.74	5.39

## 5 不确定度来源分析

### 5.1 大气影响引起的不确定度

将校正后的表观反射率输入 MODTRAN 辐射传输模型的过程中，大气参数是引起不确定度的主要来源，大气参数主要包括气溶胶光学厚度、水汽含量<sup>[22]</sup>。通过输入不同数值的大气参数估计其不确定度，结果表明，FY\_3D 卫星传感器在 B1~B4 波段气溶胶引起的不确定度较大，最大可达 5.43%，其余波段不超过 3.05%，水汽含量引起的不确定度在各波段均不超过 0.08%。

### 5.2 卫星观测角度引起的不确定度

由于地面同步实验获取地表反射率采用的是垂直测量的方式，故引入 BRDF 模型校正地表反射率。但在不同卫星观测角度下，BRDF 模型对地表反射率的影响也不同。分析结果表明：随着卫星观测角度增加，构建的 42 种 BRDF 模型对地表反射率的改变量均值有 1% 左右的增加，而校正后的地表反射率是获得表观反射率相对偏差的核心因素之一，故卫星观测角度引起的不确定度在 1% 左右。

### 5.3 BRDF 模型影响的不确定度

为降低卫星观测角度对实验结果的影响，构建了 42 种 BRDF 模型校正地表反射率。分析结果表明，不同的 BRDF 模型校正地表反射率之间的差异，受时间及太阳角度的影响不超过 1%，受不同组合方式的影响不超过 3%，不同 BRDF 模型之间校正地表反射率改变量均值最大不超过 2.68%。

### 5.4 地面反射率测量的不确定度

地表反射率测量的不确定度主要是在实验过程中由光谱仪和参考板引起的测量仪器误差、及场地均匀性引起的误差等。其中，测量仪器及引起的偏差为 0.1%，利用相对方差的方法计算场地均匀性引起的误差为 0.9%<sup>[23]</sup>。

### 5.5 其他因素不确定度

在敦煌场地，观测角度和 BRDF 模型引起的不确定度不是影响实验结果的主要因素，此外还需要考虑辐射传输模型固有的 2% 的不确定度。假定上述不确定度之间相互独立，利用式(5)计算出的总的确定度  $\alpha$  为 7.6%。

$$\alpha = \sqrt{(\alpha_1)^2 + (\alpha_2)^2 + \dots + (\alpha_n)^2} \quad (5)$$

## 6 结 论

以 2022 年敦煌实测地表反射率根据不同的核函数组合方式以及多角度观测数据构建 BRDF 模型,并对构建的 42 种模型进行适用性分析。并将 thick\_dense 模型校正后的地表反射率、大气参数、卫星观测几何等输入 MODTRAN 辐射传输模型中,得到 FY\_3D 卫星各波段的表观反射率,并与卫星影像获得的表观反射率进行比较,获得两者的相对差异。

研究结果表明:在敦煌场地,构建的 42 种 BRDF 模型之间的相对差异较小,不同核函数组合方式对地表反射率的影响不超过 3%,不同时刻、不同太阳角度对地表反射率的影响不超过 1%。且 FY\_3D MERSI-II 型 2021 年 B1~B12 波段模型计算的与卫星观测的表观反射率平均相对偏差均小于 5.22%,2022 年 B1、B2 波段模型计算的与卫星观测的表观反射率平均相对偏差超过 8%,其余波段均小于 5.74%。两年的研究结果表明 FY\_3D 卫星 MERSI-II 型传感器 B5~B10 波段在不同年份的相对偏差比较稳定,上下浮动不超过 1%。B1、B2 波段有明显衰减。此外,本研究只采用了场地定标的方法监测 FY\_3D 卫星传感器性能变化,后续将定期开展辐射定标工作,采用更多的方法对 FY\_3D 卫星 B1、B2 波段是否衰减及衰减程度进行分析验证。

### 参 考 文 献

- [1] 王凯司. 基于风云三号卫星的吉林一号光谱星交叉定标方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
Wang K S. Study on cross calibration method of Jilin-1 spectral satellite based on FY-3 satellite[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [2] Li X Y, Gu X F, Min X J. Radiometric cross-calibration of the CBERS-02 CCD camera with the TERRA MODIS[J]. Science in China(Series E: Technological Sciences), 2005(S2): 44-60.
- [3] Slater P N, Biggar S F, Holm R G, et al. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 22(1): 11-37.
- [4] 何红艳, 乌崇德, 王小勇. 侧摆对卫星及 CCD 相机系统参数的影响和分析[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(4): 14-18.  
He H Y, Wu C D, Wang X Y. Study of influence of swinging on the systemic parameters of the satellite and CCD camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 24(4): 14-18.
- [5] 张学文, 傅俏燕, 韩启金, 等. 资源三号多光谱传感器场地辐射定标与验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2476-2480.  
Zhang X W, Fu Q Y, Han Q J, et al. The field radiometric calibration and validation of ZY-3 multispectral sensor[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2476-2480.
- [6] 邵雯. 高分辨率辐射定标方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.  
Shao W. Research on high resolution radiation calibration method[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020.
- [7] 陶炳成, 胡秀清, 杨磊库, 等. 无人机平台的沙漠场地 BRDF 特征观测方法及建模[J]. 遥感学报, 2021, 25(9): 1964-1977.  
Tao B C, Hu X Q, Yang L K, et al. BRDF feature observation method and modeling of desert site based on UAV platform[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(9): 1964-1977.
- [8] 豆新格, 潘军, 高海亮, 等. 敦煌辐射校正场双向反射分布函数模型构建及应用分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1628004.  
Dou X G, Pan J, Gao H L, et al. Construction and application analysis of bidirectional reflectance distribution function model of Dunhuang radiation correction site[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1628004.
- [9] 赵春艳, 韦玮, 张艳娜, 等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的 Suomi-NPP VIIRS 长时序定标[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0828001.  
Zhao C Y, Wei W, Zhang Y N, et al. Long time series radiometric calibration of Suomi-NPP VIIRS based on surface hyperspectral BRDF model[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0828001.
- [10] 顾行发, 田国良, 余涛. 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: 199-200.  
Gu X F, Tian G L, Yu T. Principle and method of radiation calibration for space optical remote sensor[M]. Beijing: Science Press, 2013: 199-200.
- [11] 包诗薇, 陈洪耀, 张黎明, 等. 光学遥感器复杂环境下在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0628001.  
Bao S W, Chen H Y, Zhang L M, et al. On-orbit radiometric calibration method of optical remote sensor in complex environment[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0628001.
- [12] 李路, 倪卓娅, 漆成莉, 等. 风云四号 B 星干涉式红外探测仪发射前辐射定标[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0630001.  
Li L, Ni Z Y, Qi C L, et al. Pre-launch radiometric calibration of geostationary interferometric infrared sounder on FengYun-4B satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0630001.
- [13] 张允祥, 李新, 张孟, 等. 基于青海湖辐射校正场的 FY3D/MERSI-II 卫星遥感器热红外波段在轨辐射定标[J]. 光子学报, 2020, 49(5): 0528002.  
Zhang Y X, Li X, Zhang M, et al. On-orbit radiometric calibration for thermal infrared band of FY3D/MERSI-II satellite remote sensor based on Qinghai Lake radiation calibration test-site[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(5): 0528002.
- [14] 程元良, 吴骅, 李召良, 等. FY-3D MERSI-II 地表温度遥感反演与验证[J]. 遥感学报, 2021, 25(8): 1792-1807.  
Cheng Y L, Wu H, Li Z L, et al. Retrieval and validation of the land surface temperature from FY-3D



- MERSI- II [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(8): 1792-1807.
- [15] Anderson G P, Berk A, Acharya P K, et al. MODTRAN4 version 2: radiative transfer modeling[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4381: 455-459.
- [16] 李小文, 高峰, 刘强, 等. 新几何光学核的验证以及用核驱动模型反演地表反照率(之二)[J]. 遥感学报, 2000, 4(S1): 8-15.
- Li X W, Gao F, Liu Q, et al. Validation of a new GO kernel and inversion of land surface albedo by Kernel-Driven model (2)[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4 (S1): 8-15.
- [17] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Zhao Y S. Principles and methods of remote sensing application analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [18] 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.
- [19] 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.
- 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.
- [20] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 977-998.
- [21] Wanner W, Li X, 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.
- [22] Wan Z M, Zhang Y L, Li Z L, et al. Preliminary estimate of calibration of the moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared data using Lake Titicaca[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80 (3): 497-515.
- [23] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 超光谱成像仪在轨辐射定标及不确定性分析[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2826-2833.
- Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. Radiometric calibration for HJ-1A hyper-spectrum imager and uncertainty analysis [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2826-2833.