



## FY-3D MWHS-II在轨交叉辐射定标

张一凡, 蒋耿明

### Intercalibration of the Microwave Humidity Sounder-II on Fengyun 3D

ZHANG Yifan and JIANG Gengming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.ejors.2025051>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### FY-3D MWRI在轨交叉辐射定标和海表温度反演

Intercalibration of FY-3D MWRI and sea surface temperature retrieval

电波科学学报. 2024, 39(2): 214-224

#### 3D打印技术在机载超宽带共形天线中的应用研究

Application research on the 3D printing technology in airborne ultra-wideband conformal antenna

电波科学学报. 2024, 39(1): 134-141

#### 1D介质型EBG噪声隔离性能的有限元建模分析

Modeling and analysis of the noise isolation performance for the 1D dielectric electromagnetic band-gap structure by finite-element method

电波科学学报. 2023, 38(2): 211-217

#### 云雷达联合微波辐射计的水凝物识别研究

Recognition of water condensate by cloud radar and microwave radiometer

电波科学学报. 2020, 35(6): 924-934

#### 基于多模型神经网络的湿度廓线反演研究

Research on humidity profile inversion based on multi model neural network

电波科学学报. 2024, 39(1): 181-190

#### 蒸发波导模型与微波超视距传播试验对比

Comparison of evaporation duct models and microwave transhorizon propagation experiment

电波科学学报. 2021, 36(1): 150-155, 162



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 张一凡, 蒋耿明. FY-3D MWHS-II 在轨交叉辐射定标[J]. 电波科学学报, xxxx, x(x): x-xx. DOI: 10.12265/j.cjors.2025051

ZHANG Y F, JIANG G M. Intercalibration of the Microwave Humidity Sounder-II on Fengyun 3D[J]. Chinese journal of radio science, xxxx, x(x): x-xx. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2025051

## FY-3D MWHS-II 在轨交叉辐射定标

张一凡 蒋耿明\*

(复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200438)

**摘要** 本文以搭载在美国索米国家极地轨道伙伴 (Suomi National Polar-orbiting Partnership, S-NPP) 卫星上的先进技术微波探空仪 (the advanced technology microwave sounder, ATMS) 作为辐射基准仪器, 用双差异 (double difference, DD) 方法对风云三号 D 星 (Fengyun 3D, FY-3D) 搭载的微波湿度计-II 型 (The Microwave Humidity Sounder-II, MWHS-II) 进行在轨交叉辐射定标。首先, 构建了微波辐射传输模型 (radiative transfer model, RTM); 其次, 收集了 2022 年全年 MWHS-II 与 ATMS 海洋与陆地区域匹配观测数据点; 然后, 模拟了 MWHS-II 与 ATMS 各通道大气顶载荷入瞳处观测亮温, 根据匹配的观测值和模拟值计算了 DD 值和 FY-3D MWHS-II 的理论观测值; 最后, 对 MWHS-II 各通道的校准偏差进行了校正。结果表明, 本文构建的辐射传输模型有效且精确。在 2022 年 6 月, FY-3D MWHS-II 通道 1 及 10~15 的辐射定标偏差分别为  $-1.93 \pm 5.13$ 、 $-3.89 \pm 1.4$ 、 $-2.8 \pm 1$ 、 $-1.03 \pm 0.97$ 、 $-0.42 \pm 1.11$ 、 $1.53 \pm 0.82$  和  $-0.87 \pm 1.31$  K。在整个 2022 年中, MWHS-II 各通道的校准偏差总体保持稳定: 对于 MWHS-II 通道 1 及通道 10~15, 连续两个月之间的最大变化分别为 1.42、0.3、0.31、0.36、0.43、0.37 和 0.39 K, 而全年的最大变化分别为 2.03、0.39、0.37、0.38、0.53、0.6 和 0.63 K。FY-3D MWHS-II 的在轨定标偏差得到了有效修正。

**关键词** FY-3D MWHS-II; S-NPP ATMS; 在轨交叉辐射定标; 微波辐射传输模型 (RTM); 双差异 (DD) 方法

中图分类号 TP75

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(xxxx)00-0001-13

DOI 10.12265/j.cjors.2025051

## Intercalibration of the Microwave Humidity Sounder-II on Fengyun 3D

ZHANG Yifan JIANG Gengming\*

(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Fudan University, Shanghai 200438, China)

**Abstract** This paper presents the evaluation and correction of the on-orbit calibration biases of the Microwave Humidity Sounder II (MWHS-II) aboard Fengyun 3D (FY-3D) against the Suomi National Polar-orbiting Partnership (S-NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) using the double difference method. First, a microwave radiative transfer model (RTM) and a calibration bias correction method are developed. Then, the matching observations in the year of 2022 between the MWHS-II and the ATMS are collected over both sea surfaces and land surfaces. Next, The simulated brightness temperatures for both MWHS-II and ATMS channels were computed. Based on the matched observational and simulated values, the double differences (DD) and the theoretical observations for FY-3D MWHS-II were then calculated. Finally, the calibration biases in the MWHS-II channels are corrected. The results show that the RTM constructed in this work is valid and basically accurate. In June of 2022, the calibration biases in FY-3D MWHS-II channels 1, 10~15 are  $-1.93 \pm 5.13$  K,  $-3.89 \pm 1.40$  K,  $-2.80 \pm 1.00$  K,  $-1.03 \pm 0.97$  K,  $-0.42 \pm 1.11$  K,  $1.53 \pm 0.82$  K, and  $-0.87 \pm 1.31$  K, respectively. In the whole year of 2022, the calibration biases in the MWHS-II channels are generally stable: in the MWHS-II channels 1, 10~15, the maximum variations in two consecutive months are 1.42 K, 0.30 K, 0.31 K, 0.36 K, 0.43 K, 0.37 K, and 0.39 K, respectively, while the maximum

收稿日期: 2025-03-20

资助项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3900401)

通信作者: 蒋耿明 E-mail: jianggm@fudan.edu.cn

variations in the year are 2.03 K, 0.39 K, 0.37 K, 0.38 K, 0.53 K, 0.60 K, and 0.63 K, respectively. The results indicate that the on-orbit calibration biases of FY-3D MWHS-II are corrected against S-NPP ATMS.

**Keywords** FY-3D MWHS-II; S-NPP ATMS; orbit intercalibration; microwave radiative transfer model; double difference

## 0 引言

风云三号 (Fengyun 3, FY-3) 系列卫星是中国第二代极轨气象卫星,它们是在风云一号气象卫星技术基础上开发的,但在功能和技术方面进行了大幅度改进。FY-3D 是风云三号系列中的第四颗卫星,设计寿命为 5 年,搭载了 11 台覆盖可见光、近红外、热红外至微波谱段的高性能遥感仪器<sup>[1]</sup>。其搭载的微波湿度计由中国科学院国家空间科学中心微波遥感技术重点实验室研制。

微波湿度计 -II 型 (The Microwave Humidity Sounder-II, MWHS-II) 是搭载在 FY-3D 上的一个重要大气垂直探测仪器,该微波遥感载荷采用四频段设计,共配置 15 个探测通道。118.75 GHz 频段作为极轨气象平台首次搭载的先进探测频段,设置了 8 个邻近氧气吸收谱线的探测通道,实现了大气温度垂直廓线的毫米波遥感探测功能。在 183.31 GHz 水汽敏感频段,精心设计了 5 个高精度探测通道,可准确反演大气湿度廓线的分层信息。此外,系统还在 89 GHz 和 150 GHz 两个大气透明窗口频段构建了双通道观测体系,重点服务于地表微波辐射特征提取和降水粒子散射信号的识别分析。通道的空间分辨率与探测频段相关,其中通道 1~9 的空间分辨率约为 30 km,通道 10~15 的空间分辨率约为 15 km,等效噪声温差 (灵敏度) 介于 1.0~3.6 K。FY-3D MWHS-II 采用跨轨扫描方式扫描地球表面和大气层,对地扫描张角范围为 $\pm 53.35^\circ$ ,扫描周期为 2 667 ms, FY-3D MWHS-II 的仪器参数详见表 1。FY-3D 卫星 MWHS-II 载荷的全球业务观测数据集,可通过国家气象信息中心数据服务平台 (<http://www.nsmc.org.cn/>) 进行开放获取,该平台作为风云卫星产品官方发布渠道,提供 L1 级辐射亮温数据的标准化下载服务。目前 FY-3D MWHS-II 探测资料已深度融入数值天气预报系统的大气参数同化过程,通过准实时温湿度垂直廓线观测场,有效支撑数值模式初始场的多维特征构建,用于反演大气温湿度廓线、降水率、大气总可降水率等大气参数,提升对台风、暴雨灾害性天气的预警能力。

微波辐射计在轨辐射定标偏差的评估与校正,主要依托场地定标和在轨交叉辐射定标两类技术路径。场地定标是一种不依赖机载系统的定标方法。

这种方法通过地面测量和辐射传输模型计算,估算传感器接收到的光谱辐射亮温<sup>[2]</sup>。在基于辐射亮温的场地定标过程中,使用经过精确校准的辐射计测量测试场地的上行辐射亮温。场地定标技术提供全孔径定标,具有较高的精度 (尽管低于实验室定标方法)。其最大的优势在于,定标是在系统正常运行模式下进行的<sup>[3]</sup>。然而,这种方法通常需要进行实地测量和数据采集,成本较高且劳动密集,限制了高质量仪器性能评估中场地定标的频率。此外,场地定标只能在系统覆盖测试场地时进行。以重访周期为 16 天的卫星为例,每年对单个测试场地的定标次数理论上最多为 22 次,但实际次数常因天气条件限制而减少。在场地定标实施过程中,单次操作涉及显著的经济与人力资源消耗,其系统性误差主要来源于仪器响应非线性特征与操作流程的不可控变量,直接影响量值溯源可靠性。受限于实验条件保障难度与全周期成本约束,有效定标实施频次难以满足长期在轨监测需求<sup>[4]</sup>。

表 1 FY-3D MWHS-II 仪器参数

Tab. 1 Instrument parameters of FY-3D MWHS-II

序号	中心频率/GHz	极化	带宽/MHz	灵敏度/K
1	89	QH	1 500	1.0
2	118.75 $\pm$ 0.08	QV	20	3.6
3	118.75 $\pm$ 0.2	QV	100	2.0
4	118.75 $\pm$ 0.3	QV	165	1.6
5	118.75 $\pm$ 0.8	QV	200	1.6
6	118.75 $\pm$ 1.1	QV	200	1.6
7	118.75 $\pm$ 2.5	QV	200	1.6
8	118.75 $\pm$ 3	QV	1 000	1.0
9	118.75 $\pm$ 5	QV	2 000	1.0
10	150	QH	1 500	1.0
11	183.31 $\pm$ 1	QV	500	1.0
12	183.31 $\pm$ 1.8	QV	700	1.0
13	183.31 $\pm$ 3	QV	1 000	1.0
14	183.31 $\pm$ 4.5	QV	2 000	1.0
15	183.31 $\pm$ 7	QV	2 000	1.0

注: QV 为垂直极化, QH 为水平极化。

交叉辐射定标通过构建基准载荷与待校准载荷的时空同步观测数据链,依托数据同化算法实现辐射基准参数的系统传递。在轨交叉定标是指借助同样在轨、具有高精度定标结果且光谱或频段相近的同类遥感辐射计通道观测结果,通过时空、仪器特性算子和仪器观测算子的匹配,消除仪器之间来自时空、极化、入射角和观测方位角 (viewing azimuth

angle, VAA) 等非辐射定标系统的差异, 从而获取目标载荷通道的参考辐射值。随后, 通过建立参考辐射与目标载荷观测计数值之间的模型关系, 完成目标载荷的在轨辐射定标。由于其兼具经济、高效和易于实施等优势, 在轨交叉定标技术得以广泛应用。交叉定标方法通常包括以下 4 类:

1) 卫星观测数据与地基观测资料交叉对比, 即利用地基观测数据与卫星观测数据进行比对, 以评估卫星传感器的定标精度。

2) 基于地球冷空背景辐射基准数据, 采用统计建模方法对时空匹配双载荷的协同观测资料进行多维度误差特征分析。例如, 该方法成功地应用在 TOPEX 微波辐射计 (TOPEX microwave radiometer, TMR) 的辐射定标任务中<sup>[5]</sup>。

3) 卫星观测资料和辐射传输模型模拟的晴空观测比较。常见的分析方法为单差异 (single difference, SD) 方法。SD 方法通过选取晴空区域获取大气环境参数, 并基于辐射传输模型模拟大气顶层亮温, 进而计算传感器各通道实测亮温与理论值的系统偏差。该方法通过精确匹配传感器中心频率、接收带宽、极化模式及观测几何参数, 显著提升了理论建模的物理一致性。但实际应用中, 受限于环境参数反演误差与辐射传输模型的近似处理, 仍会引入系统性计算偏差。

4) 针对同类微波传感器在相近频段的时空同步观测数据, 实施辐射响应一致性的交叉检验与系统误差关联性评估, 通常使用双差异 (double difference, DD) 方法。相较于 SD 方法, 该方法通过比较两个同类微波传感器在相近频率、同一时间、同一场景的观测值, 消除辐射计参数差异和辐射传输模型误差。DD 方法比 SD 方法更能提高定标精度<sup>[6]</sup>。

尽管 FY-3D MWHS-II 有两点校准系统, 但各个通道仍存在或多或少的辐射定标偏差。HOU 等利用 GPS 无线电掩星数据验证了 FY-3D MWHS-II 的在轨性能与校准精度, 发现通道 2~6 标准偏差较小而通道 11~13 标准偏差相对较大<sup>[7]</sup>。KAN 等利用 GPS 无线电掩星数据、欧洲中尺度天气预报中心再分析数据 (European Centre for Medium-Range Weather Forecast Re-Analysis V5, ERA5) 和先进技术微波探测仪 (the advanced technology microwave sounder, ATMS) 数据结合, 整体验证了 FY-3D MWHS-II 的观测值, 同样发现其温度探测通道总体性能优于湿度探测通道, 其中通道 11 与通道 15 整体偏差较大<sup>[8]</sup>。因此, 针对 FY-3D MWHS-II 观测数据的业务化集成需求, 在数值天气预报系统同化应用及进行大气参数反演等业务之前, 需要对辐射计开展更为详细的

辐射定标评估。

作为全球对地观测系统的重要组成部分, 美国索米国家极地轨道伙伴 (Suomi National Polar-orbiting Partnership, S-NPP) 卫星配置的星载微波遥感载荷 ATMS 已被国际卫星交叉定标系统确立为全球辐射基准源, 其观测数据质量获得世界气象组织框架下的标准化认证, 其技术特性与 FY-3D MWHS-II 具有显著可比性<sup>[9]</sup>。S-NPP 卫星 ATMS 拥有 23~190 GHz 频段共 22 个探测通道, 详细的仪器参数如表 2 所示。ATMS 的 22 个探测通道按频率分为高频和低频组, 分别对应两副天线。前 15 个通道 (24~57 GHz) 用于探测大气温度垂直结构, 16~22 通道 (88~183 GHz) 用于探测大气湿度垂直结构<sup>[10]</sup>。此外, ATMS 星上定标采用线性模式, 内部暖黑体温度可控, 外部冷黑体为宇宙背景空间。Kim 等人对 ATMS 发射前以及在轨性能参数进行了综合评估, 结果表明, ATMS 在仪器热稳定性、辐射灵敏度和精度等方面表现都十分优异<sup>[11]</sup>。场地定标实验表明, ATMS 通道 17~22 的辐射定标精度优于 0.1 K, 辐射灵敏度优于 1 K<sup>[12]</sup>。ATMS 性能指标满足世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 全球气候观测系统 (Global Climate Observing System, GCOS) 要求, 因此, S-NPP ATMS 被广泛用作其他微波湿度计的辐射定标基准。如表 1 和表 2 所示, FY-3D MWHS-II 的通道 1、10 与 S-NPP ATMS 的通道 1、17 中心频率相近, 而 MWHS-II 的通道 11~15 则分别与 ATMS 的通道 18~22 中心频率一一对应。但由于仪器间存在极化配置和频带宽度差异, 且对地观测几何参数存在差异, 包括地球入射角 (Earth incidence angle, EIA) 与 VAA 的显著偏差, 导致地球表面目标的辐射传输路径产生非对称性变化。这种观测几何差异会引起辐射传输路径的显著变化, 尤其是在强吸收通道中更为显著<sup>[13]</sup>。若对 EIA 和 VAA 进行严格匹配, 不同极轨卫星载荷的同步观测呈现显著的高纬度区域集聚特性, 可能引入区域选择性偏差。

通过交叉定标可将参考仪器的在轨定标基准传递至目标仪器<sup>[14-18]</sup>。基于此, 本研究构建 DD 方法, 对 FY-3D MWHS-II 和 S-NPP ATMS 进行在轨交叉辐射定标, 可以消除辐射传输模型误差以及不同极化方式、带宽以及 EIA 和 VAA 等因素产生的系统误差<sup>[18-19]</sup>。

本研究基于 DD 方法, 利用 S-NPP ATMS 对 FY-3D MWHS-II 在轨定标偏差进行了评估与校正。结果表明, 在整个 2022 年中, MWHS-II 各通道的校准偏差总体保持稳定, FY-3D MWHS-II 的在轨定标偏

差得到了有效修正。

表 2 S-NPP ATMS 仪器参数

Tab. 2 Instrument parameters of S-NPP ATMS

序号	中心频率/GHz	极化	带宽/MHz	灵敏度/K
1	23.8	QV	270	0.90
2	31.4	QV	180	0.90
3	50.3	QH	180	1.20
4	51.76	QH	400	0.75
5	52.8	QH	400	0.75
6	53.596	QH	400	0.75
7	55.4	QH	400	0.75
8	54.94	QH	400	0.75
9	55.5	QH	330	0.75
10	57.29( $f_0$ )	QH	330	0.75
11	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.048$	QH	78	1.20
12	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.048$	QH	36	1.20
13	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.022$	QH	16	1.50
14	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.010$	QH	8	2.40
15	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.045$	QH	3	3.60
16	88.2	QV	2 000	0.50
17	165.5	QH	3 000	0.60
18	183.31 $\pm$ 7	QH	2 000	0.80
19	183.31 $\pm$ 4.5	QH	2 000	0.80
20	183.31 $\pm$ 3	QH	1 000	0.80
21	183.31 $\pm$ 1.8	QH	1 000	0.80
22	183.31 $\pm$ 1	QH	500	0.90

## 1 交叉辐射定标方法

### 1.1 微波辐射传输模型 (RTM)

在大气中, 辐射传输微分方程通常以亮温表示, 其形式为<sup>[20]</sup>

$$\frac{\partial T_B}{\partial s} = -\alpha(s)T_B(s) + \alpha(s)T(s) \quad (1)$$

式中:  $s$  是沿大气传播路径的距离;  $\alpha(s)$  是位置  $s$  处的大气吸收系数;  $T(s)$  是位置  $s$  处的大气温度。亮温的变化由两部分贡献: 到达位置  $s$  的辐射被吸收引起的亮温减少, 以及从位置  $s$  发射的辐射导致的亮温增加。根据这一方程, 可以定量分析大气中辐射传输的基本过程, 同时揭示了辐射的吸收和发射在大气能量平衡中的关键作用<sup>[21]</sup>。为便于分析, 定义地球表面为  $s=0$ , 大气顶部为  $s=S$ 。

在辐射传输过程中, 地球表面与大气顶部的边界条件对亮温的计算至关重要。边界条件规定, 上行辐射亮温由地球表面自身辐射亮温和粗糙表面散射的下行辐射亮温两部分组成, 其表达式为

$$T_{B1}(\mathbf{k}_i, 0) = E(\mathbf{k}_i)T_s + \frac{\sec \theta_i}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta_s d\theta_s \int_0^{2\pi} d\varphi_s T_{B1}(\mathbf{k}_s, 0) [\sigma_{oc}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) + \sigma_{ox}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)] \quad (2)$$

式中: 亮温  $T_B$  参数组中前者指征辐射传输方向特性, 后者则定量表征电磁波在介质中的传播距离。单位

传播向量  $\mathbf{k}_i$  和  $\mathbf{k}_s$  分别表示上行辐射和下行辐射的传播方向, 这两个传播向量可以用极坐标角度表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{k}_i = [\cos \varphi_i \sin \theta_i, \sin \varphi_i \sin \theta_i, \cos \theta_i] \\ \mathbf{k}_s = -[\cos \varphi_s \sin \theta_s, \sin \varphi_s \sin \theta_s, \cos \theta_s] \end{cases} \quad (3)$$

式中: 第一项表示地球表面自身的辐射, 其值为地表温度 (land surface temperature, LST)  $T_s$  与发射率  $E(\mathbf{k}_i)$  的乘积, 第二项为从特定方向  $\mathbf{k}_s$  到达地表的下行辐射亮温  $T_{B1}$  在另一方向  $\mathbf{k}_i$  上的散射积分, 该积分覆盖上半球的全部立体角。粗糙面的散射特性由双站归一化雷达截面 (normalized radar cross section, NRCS)  $\sigma_{oc}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)$  和  $\sigma_{ox}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)$  表征。其中,  $\sigma_{oc}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)$  表征入射与散射电磁波极化态一致时同极化散射截面,  $\sigma_{ox}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)$  则定量描述入射波与散射波极化方向正交条件下的异极化散射项。这些散射截面用于描述从  $\mathbf{k}_s$  方向入射的辐射中有多少功率被散射到指定方向  $\mathbf{k}_i$ 。此外, 双站雷达截面还用于计算地球表面反射率  $R(\mathbf{k}_i)$ , 其通过以下积分公式确定:

$$R(\mathbf{k}_i) = \frac{\sec \theta_i}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta_s d\theta_s \int_0^{2\pi} d\varphi_s [\sigma_{oc}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) + \sigma_{ox}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)] \quad (4)$$

地球表面发射率  $E(\mathbf{k}_i)$  和反射率  $R(\mathbf{k}_i)$  之和为 1, 即发射率计算如下:

$$E(\mathbf{k}_i) = 1 - R(\mathbf{k}_i) \quad (5)$$

大气顶部的边界条件由冷空辐射确定, 其数学形式为:

$$T_{B1}(\mathbf{k}_s, S) = T_c \quad (6)$$

该条件表明, 来自冷空的辐射是各向同性的, 其亮温值为  $T_c=2.7$  K。通过对微分方程 (1) 进行积分, 并结合边界条件 (2) 和 (6), 可以求解出大气顶部的上行辐射亮温, 即地球轨道卫星辐射计观测到的亮温:

$$T_{B1}(\mathbf{k}_i, S) = T_{BU} + \tau [ET_s + T_{B0}] \quad (7)$$

式中:  $T_{BU}$  是大气上行辐射的贡献;  $\tau$  是从地球表面到大气顶部的总透射率;  $T_{B0}$  是式 (2) 中地表散射积分。大气透射率描述了两个点间辐射的衰减程度, 沿传播路径  $\mathbf{k}_i$  或  $\mathbf{k}_s$  在点  $s_1$  和  $s_2$  之间的透射率定义为

$$\tau(s_1, s_2) = e^{-\int_{s_1}^{s_2} \alpha(s) ds} \quad (8)$$

总透射率  $\tau$  定义为

$$\tau = \tau(0, S) \quad (9)$$

上行和下行的辐射分量为

$$\begin{cases} T_{BU} = \int_0^S T(s) \alpha(s) \tau(s, S) ds \\ T_{BD} = \int_0^S T(s) \alpha(s) \tau(0, s) ds \end{cases} \quad (10)$$

天空辐射的散射积分表达式为

$$T_{\text{BD}} = \frac{\sec \theta_i}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta_s d\theta_s \int_0^{2\pi} d\varphi_s (T_{\text{BD}} + \tau T_c) [\sigma_{\text{o,c}}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) + \sigma_{\text{o,x}}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)] \quad (11)$$

因此, 在已知大气层温度场各层空间分布数据  $T_s$  和吸收系数  $\alpha$  以及地表双站散射截面的情况下, 可通过辐射传输方程严格求解亮温  $T_B$ 。实际应用中, 很难对整个大气体积内的  $T_s$  和  $\alpha$  进行完整的三维描述。为简化问题, 通常假设大气在水平方向上均匀分布, 即吸收系数仅为地球表面以上高  $h$  的函数。为将积分变量从  $ds$  转换为  $dh$ , 需考虑地球的球形几何特性:

$$\frac{\partial s}{\partial h} = \frac{1 + \delta}{\sqrt{\cos^2 \theta + \delta(2 + \delta)}} \quad (12)$$

式中:  $\theta$  可以是  $\theta_i$  或  $\theta_s$ ;  $\delta = h/R$ ,  $R$  是地球半径。在对流层中  $\delta \ll 1$ , 当  $\theta < 60^\circ$  时, 可采用以下近似:

$$\frac{\partial s}{\partial h} = \sec \theta \quad (13)$$

在采用这一近似条件并假设大气具有水平方向的均匀性后, 上述方程 (8) 至 (10) 可简化为以下形式:

$$\tau(h_1, h_2, \theta) = e^{-\sec \theta \int_{h_1}^{h_2} \alpha(h) dh} \quad (14)$$

$$\tau = \tau(0, H, \theta_i) \quad (15)$$

$$\begin{cases} T_{\text{BU}} = \sec \theta_i \int_0^H T(h) \alpha(h) \tau(h, H, \theta_i) dh \\ T_{\text{BD}} = \sec \theta_s \int_0^H T(h) \alpha(h) \tau(0, h, \theta_s) dh \end{cases} \quad (16)$$

因此, 只需要  $T(h)$  和  $\alpha(h)$  的垂直剖面信息, 结合已知的物理参数, 便可计算出大气顶亮温。

准垂直极化亮温  $T_{\text{B,QV}}$  与准水平极化亮温  $T_{\text{B,QH}}$  是垂直极化亮温  $T_{\text{B,V}}$ 、水平极化亮温  $T_{\text{B,H}}$  及  $\theta$  的函数, 表达式为

$$\begin{cases} T_{\text{B,QV}} = T_{\text{B,V}} \cos^2 \theta + T_{\text{B,H}} \sin^2 \theta \\ T_{\text{B,QH}} = T_{\text{B,V}} \sin^2 \theta + T_{\text{B,H}} \cos^2 \theta \end{cases} \quad (17)$$

上述方程中, 大气吸收系数  $\alpha$  是计算大气透过率、上行亮温和下行亮温的关键参数。该系数由三个分量组成: 液态云水吸收  $\alpha_L$ 、水汽吸收  $\alpha_w$  和氧气吸收  $\alpha_o$  [22]。针对水汽吸收通道, 文献 [23] 研究表明, 将水汽吸收系数乘以修正因子 0.52, 模拟结果与观测数据的一致性显著提升。因此, 大气吸收系数可改写为

$$\alpha(h) = \alpha_L(h) + 0.52\alpha_w(h) + \alpha_o(h) \quad (18)$$

式中: 大气吸收系数基于 ERA5 数据, 采用 Liebe 等人于 1993 年开发的毫米波传播模型 MPM93 计算 [24]。

海表发射率 (sea surface emissivity, SSE) 是辐射

传输方程的另一核心参数。目前已提出的 SSE 模型中, Meissner 和 Wentz 提出的半经验模型 (简称 M&W 模型) 在卫星遥感中展现出较高精度 [25]。该模型适用于大风速 ( $\leq 40$  m/s) 和大入射角 ( $\leq 65^\circ$ ) 条件, 但其工作频率范围仅覆盖 6~90 GHz。对于更高频段, 如 183 GHz 水汽吸收通道, 需结合其他模型或实验数据进行扩展验证。为评估 M&WSSE 模型在 90~190 GHz 频率范围内的建模误差, 以 ATMS 观测数据重采样到 ERA5 的  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  网格空间, 收集重采样后的 ATMS 观测数据与 ERA5 数据之间的观测匹配点, 要求绝对观测时间差小于 30 min 且总云量 (total cloud cover, TCC) 小于 0.1。然后, 利用 MPM93 模型计算辐射传输方程中的大气参数, 通过直接反演式 (1), 获取 ATMS 通道 17 的 SSE。计算模型误差 (即模拟值减去反演值) 并绘制了误差直方图, 如图 1 所示。分析结果显示, 模型误差主要分布在  $-0.4 \sim 0.3$ , 呈现出近似正态分布的特征, 其偏差为  $-0.01 \pm 0.08$ , 这一偏差在 ATMS 通道 17 的亮温中仅产生了约 0.05 K 的误差。由于强烈的大气吸收作用, 大气氧气吸收通道 (118.75 GHz) 和水蒸气吸收通道 (183.31 GHz), SSE 模型误差对亮温的影响会进一步减弱。基于以上分析, 可以得出结论: M&W 模型在 90~190 GHz 频率范围内仍具有很高的精度, 能够满足本文相关研究的需求。

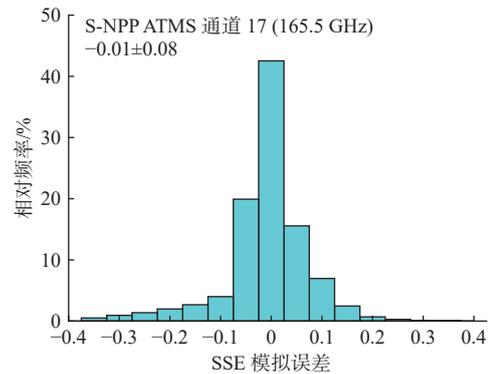


图 1 ATMS 通道 17 M&W 模型误差分布直方图

Fig. 1 Histogram of the sea surface emissivity modelling errors of the M&W's model in the ATMS channel 17 (centered at 165.5 GHz)

相较于海表, 陆地表面的复杂性更高。现有地表发射率 (land surface emissivity, LSE) 模型大多适用于频率低于 90 GHz 的微波波段或仅针对特定地表类型, 且部分模型复杂度较高, 难以在全球卫星遥感中广泛应用 [26-31]。其中, Hewison 模型仅需 4 个参数即可计算 20~200 GHz 频段内任意 EIA 及极化方式下的 LSE [32]。尽管该模型的模拟误差最高可达 5%,

但其对 DD 的平均影响小于 0.11 K<sup>[21]</sup>。

## 1.2 DD 定标方程

当两颗卫星在相近时间观测同一区域时, 已知目标传感器 FY-3D MWHS-II 观测亮温  $T_{B,MWHS,obs}$  和参考传感器 S-NPP ATMS 观测亮温  $T_{B,ATMS,obs}$ , 通过输入该区域的地表或海表参数、大气参数以及两传感器的仪器参数 (入射角、中心频率、带宽等) 到辐射传输模型, 可分别计算得到两卫星各通道的模拟亮温  $T_{B,MWHS,sim}$  与  $T_{B,ATMS,sim}$ 。待定标载荷 FY-3D MWHS-II 与基准传感器 ATMS 的 DD 值可以经过二者的 SD 运算获得<sup>[6]</sup>:

$$DD = SD_{MWHS} - SD_{ATMS} = (T_{B,MWHS,obs} - T_{B,MWHS,sim}) - (T_{B,ATMS,obs} - T_{B,ATMS,sim}) \quad (19)$$

DD 值即为 FY-3D MWHS-II 相对于 S-NPP ATMS 的辐射定标偏差, 该参数亦可等效表征为观测亮温差异 (observed temperature difference, OTD) 和模拟亮温差异 (simulated temperature difference, STD) 的差值。具体计算公式如下:

$$DD = OTD - STD = (T_{B,MWHS,obs} - T_{B,ATMS,obs}) - (T_{B,MWHS,sim} - T_{B,ATMS,sim}) \quad (20)$$

在统计显著的大样本条件下, DD 参数的平均值可表征待定标卫星与参考卫星间的系统定标偏差。目标传感器的理论观测参考值  $T_{B,MWHS,theoretical}$  与参考传感器实际观测值之间的差异主要源于仪器参数 (中心频率、带宽和入射角) 的差异, 这个误差可以通过模拟值之差来表示:

$$T_{B,MWHS,theoretical} - T_{B,ATMS,obs} = T_{B,MWHS,sim} - T_{B,ATMS,sim} \quad (21)$$

因此, 结合式 (20) 与式 (21), 将 FY-3D MWHS-II 的实际观测亮温减去相应的 DD 值, 可以得到其理论观测参考值, 即<sup>[10]</sup>:

$$T_{B,MWHS,theoretical} = T_{B,MWHS,obs} - DD \quad (22)$$

根据观测理论, 假设 FY-3D MWHS-II 理论观测值是实际观测值的线性函数:

$$T_{B,MWHS,theoretical} = A \times T_{B,MWHS,obs} + B \quad (23)$$

式中:  $A$  和  $B$  分别为交叉辐射定标的斜率和截距线性定标系数, 可以通过对大量充足的匹配样本亮温值进行线性回归确定。当系数  $A$ 、 $B$  被精确拟合求解后, 便可完成 FY-3D MWHS-II 的在轨交叉辐射定标。

## 2 数据源与处理

为评估并校正 FY-3D MWHS-II 相对于 S-NPP ATMS 的在轨定标偏差, 本研究采用 2022 年的以下数据: FY-3D MWHS-II Level 1(L1) 数据、S-NPP

ATMS L1B 数据、ERA5 数据, 以及中分辨率成像光谱仪植被指数 V6 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer Vegetation Indices V6, MOD13C1 V6) 数据。MWHS-II L1 数据下载自风云卫星数据中心 (<https://satellite.nsmc.org.cn>), ATMS L1B 数据则来自美国国家海洋和大气管理局综合大数据管理系统 (<https://www.aev.class.noaa.gov>)。MWHS-II 和 ATMS 数据均包含大气层顶亮温、地理定位信息 (经度、纬度)、观测时间、EIA 等参数。ERA5 数据提供逐小时、逐日及逐月的大气、陆地和海洋气候变量再分析结果 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>)。本研究使用两种空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的逐小时 ERA5 数据: 单层数据和 37 层垂直数据。单层数据包括海表温度 (sea surface temperature, SST)、LST、10 m 风速分量 (U/V) 及 TCC; 37 层数据涵盖位势高度、大气温度和相对湿度。MOD13C1 V6 数据 (<https://search.earthdata.nasa.gov>) 提供归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI), 其定义为近红外与红光波段反射率之差与两者之和的比值。MOD13C1 V6 植被指数产品的原始数据具有 16 天的时间分辨率和  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  的空间分辨率, 存储格式为 HDF4。本研究采用平均值重采样方法, 将原始数据从  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  分辨率降尺度至  $1^\circ \times 1^\circ$  规则网格空间。具体实现过程为: 首先读取 HDF4 格式的原始数据并提取目标变量, 然后按照  $1^\circ \times 1^\circ$  网格对原始数据进行分组, 最后计算每个网格内所有有效像元的算术平均值作为输出值。从 MOD13C1 数据中提取 NDVI, 用于经验性识别裸地和稀疏植被区域<sup>[33]</sup>。

DD 方法的数据输入要求包括 S-NPP ATMS 与 FY-3D MWHS-II 在时空匹配同步条件下的辐射观测亮温数据以及模拟亮温数据, 为了满足微波辐射传输模型 (radiative transfer model, RTM) 的应用条件以及获取足够数量的匹配点, 交叉定标通常将数据重采样至低分辨率的空间以最小化定位误差以及噪声影响, 否则在相近观测时相下难以实现严格的地理坐标匹配。此外, 由于卫星传感器观测特性的差异, 严格意义上的相同观测视场并不存在。在空间匹配过程中, 我们设定两个约束条件: 匹配数据必须位于同一  $1^\circ \times 1^\circ$  格网单元内以及观测天顶角差异控制在  $5^\circ$  以内。详细的数据处理步骤如下: 首先将 S-NPP ATMS 与 FY-3D MWHS-II 数据 (各通道观测亮温数据、EIA 以及 VAA) 和 ERA5 参数信息统一重采样至  $1^\circ \times 1^\circ$  经纬度网格分辨率的标准匹配空间<sup>[34]</sup>。重采样后需保证 ATMS 与 MWHS-II 的观测亮温在时空维度的一致性, 但是通常为提升有效匹配样本数

量, 需要选用较大的时间匹配窗口范围 (经典值为 30~60 min), 因此选用 0:00、2:00、4:00、6:00、8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00 和 22:00UTC 时刻的 ERA5 数据, 此外, S-NPP ATMS 与 FY-3D MWHS-II 匹配点时间差绝对值不超过 60 min, 同时需满足两个载荷观测与同时间节点 ERA5 数据的时近性约束, 确保其时间偏差处于 ERA5 数据时间分辨率容限范围内, 用于后续对匹配数据进行条件筛选。

微波辐射在云介质中具有选择性穿透特性, 然而 ATMS 与 MWHS-II 高频通道的电磁波传输易受云层液态水含量阈值效应影响, 当云层厚度超过临界光学厚度时, RTM 将因云水相态的非线性散射作用引入系统偏差, 导致模拟亮温计算值与实际观测值之间呈现显著的相关性偏差。可以应用 ERA5 中总云覆盖率数据作为是否有云的判定标准。如果使用  $TCC=0$  去判别晴空, 会丢失绝大部分匹配点, 因此选用  $TCC<0.1$  作为重云筛选条件, 既可以筛去较厚的云层, 又可以保留足够的匹配格网点。此外, 微波辐射计在存在浮冰的邻近海域或毗邻陆架及岛礁地貌的观测场景中, 其观测数据的空间一致性将显著削弱, 导致测量精度产生系统性衰减<sup>[35]</sup>。为了避免上述情况出现, 本研究应用海陆掩码对陆域及岛屿邻近海域的网格区域实施空间过滤筛除, 使观测

区域距离陆地的距离不少于 100 km。海洋浮冰的判别主要依据 ERA5 数据中 SST 产品, 通过筛选  $SST<273.15$  K 的网格点, 实现浮冰区域的滤除。详细的筛选与匹配条件如下: 1) 卫星观测亮温和 ERA5 数据在网格空间位于  $65^{\circ}\text{S}\sim 65^{\circ}\text{N}$ , 且距离海陆边界不少于 100 km; 2)  $SST>273.15$  K; 3) 晴空判别条件为  $TCC<0.1$ , 以筛除降水区域和厚云; 4) 微波辐射计之间观测时间差绝对值严格约束在 60 min 阈值内, 同时需优先满足与 ERA5 再分析场的时间临近最优匹配 (0:00、2:00、4:00、6:00、8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00 和 22:00) UTC; 5) 陆地区域选用高植被覆盖区域,  $NDVI>0.4$ 。

时空匹配与格网点筛选属于数据的预处理部分, DD 方法的总体数据处理流程如图 2 所示。首先, 进行数据空间标准化处理, 将 S-NPP ATMS、FY-3D MWHS-II 以及 ERA5 数据集重采样至  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  经纬度网格系统, 再根据相应的条件控制筛选获取有效匹配样本。其次, 基于辐射传输理论, 结合 ERA5 大气状态参数, 分别计算 SSE、LSE 以及大气透过率, 进而模拟出 ATMS 与 MWHS-II 在大气顶的亮温。最后, 依据 DD 方法分别求解 OTD 与 STD, 得到 DD 值, 并利用 DD 值对 MWHS-II 观测亮温实施定标校正, 最终采用最小二乘法进行线性拟合计算, 获得各通道的定标系数。

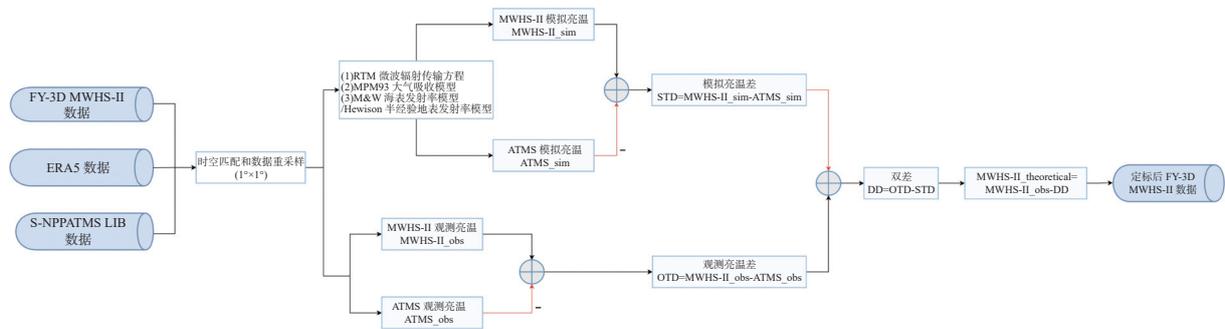


图 2 DD 方法的总体数据处理流程

Fig. 2 Flowchart of the intercalibration of FY-3D MWHS-II channels against S-NPP ATMS

### 3 结果与分析

根据第 2 节中的匹配条件, 2022 年共收集到海洋区域的 306 014 条匹配观测数据和陆地区域的 194 091 条匹配观测数据。图 3 展示了匹配观测数据的空间分布情况。在海洋区域, 匹配观测数据基本均匀分布于太平洋、印度洋和大西洋, 覆盖范围广, 具有良好的空间代表性; 而在陆地区域, 匹配观测数据集中分布在南美洲、中非、欧洲、俄罗斯、中国东北地区、阿拉斯加、加拿大和美国东部的 8 个区域。这种分布特征反映了探测器对主要陆地区域的有效覆

盖能力。图 4 展示了匹配观测数据的月分布情况, 匹配数据的数量随月份变化, 从约 3 800 条到约 45 000 条不等。总体来看, 全年每个月的匹配数据总数均超过 20 000 条, 最大值达到约 60 000 条, 充分表明匹配观测数据在时间和空间上的良好代表性, 为 FY-3D MWHS-II 在轨辐射定标偏差校正提供了可靠的数据支持。

以 2022 年 6 月的数据为例, 共分别收集到海洋区域和陆地区域 30 763 条和 27 652 条的匹配观测数据, 分布特点与全年数据一致, 具有良好的全球时空代表性。将匹配点所对应的背景环境参数以及 S-

NPP ATMS 与 FY-3D MWHS-II 的仪器参数信息输入到 RTM, 可获得两个微波辐射计对应通道的模拟亮温。图 5 展示了 S-NPP ATMS 各通道在 6 月份的亮温观测值与模拟值 (O-B) 之间的差异分布。结果显示, (O-B) 的值范围为  $-8.0 \sim 10.0$  K, 呈高斯分布特性。在海洋区域, ATMS 通道 16~22 的 (O-B) 均值分别为  $-1.16 \pm 3.73$ 、 $-0.83 \pm 2.32$ 、 $-0.71 \pm 2.59$ 、 $-0.86 \pm 1.68$ 、 $-0.33 \pm 2.25$ 、 $0.24 \pm 2.78$  和  $0.29 \pm 3.16$  K; 在陆地区域, 这些通道的 (O-B) 均值分别为  $0.31 \pm 5.99$ 、 $-1.4 \pm 2.41$ 、 $-3.68 \pm 1.42$ 、 $-2.23 \pm 2$ 、 $-1.01 \pm 2.61$ 、 $-0.22 \pm 2.92$  和  $-0.14 \pm 2.92$  K。陆地区域的 (O-B) 差异主要由强烈的大气变化以及较高的地表不确定性引起。这些结果表明, 本工作提出的 RTM 模型能够有效模拟亮温值, 与 S-NPP ATMS 的观测亮温数据高度一致, 为后续定标及深入分析提供了高精度的模型支持。

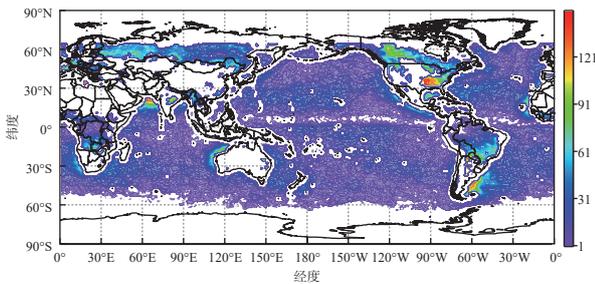


图 3 2022 年全年匹配观测点的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the matching observations in 2022

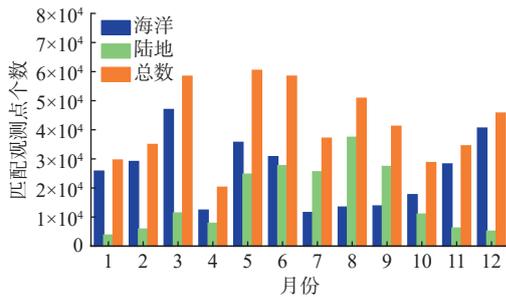
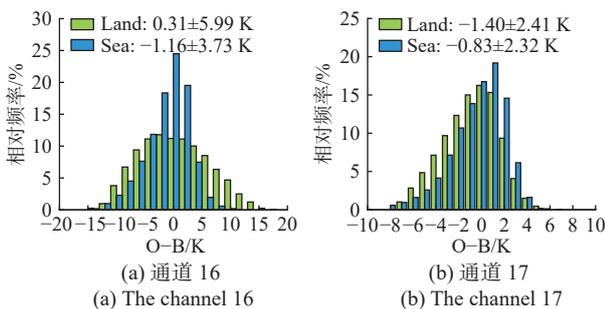


图 4 2022 年全年匹配观测点的月度分布

Fig. 4 Monthly distribution of the matching observations in 2022



(a) 通道 16  
(a) The channel 16

(b) 通道 17  
(b) The channel 17

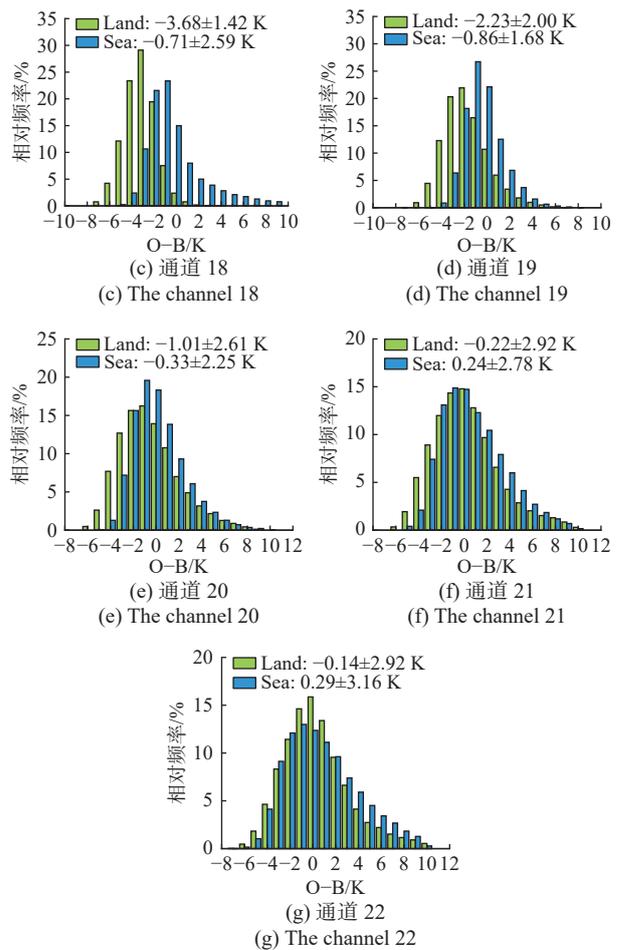
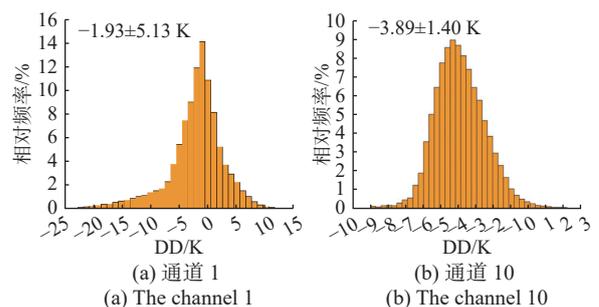


图 5 2022 年 6 月 S-NPP ATMS 在不同通道中的观测值与模拟值差异 (O-B)

Fig. 5 The differences between observations and simulations (O-B) in June of 2022 in the channel of S-NPP ATMS

图 6 展示了 MWHS-II 通道 1 和通道 10~15 的 DD 定标偏差直方图。从结果可以看出, 这些直方图服从正态分布。与 ATMS 通道相比, MWHS-II 通道 1 和通道 10~15 的定标偏差 (均值±标准差) 分别为  $-1.93 \pm 5.13$ 、 $-3.89 \pm 1.4$ 、 $-2.8 \pm 1$ 、 $-1.03 \pm 0.96$ 、 $-0.42 \pm 1.11$ 、 $1.53 \pm 0.82$  和  $-0.87 \pm 1.31$  K。总体来看, 除了 MWHS-II 通道 14 外, 其余通道的观测值相较于 ATMS 测量值均存在低估的现象, 这与文献 [9] 的研究结果一致。



(a) 通道 1  
(a) The channel 1

(b) 通道 10  
(b) The channel 10

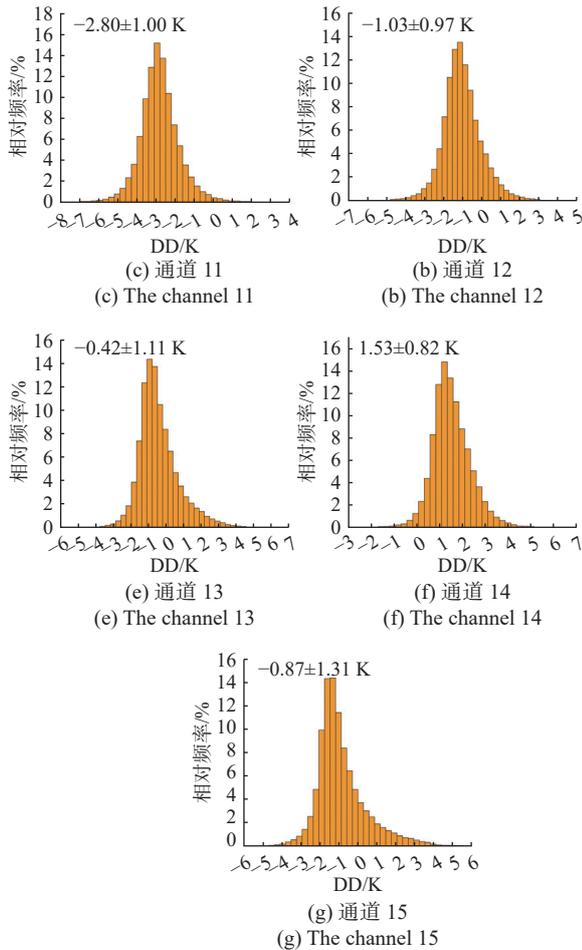


图 6 FY-3D MWHS-II 仪器中不同通道的 DD 定标偏差  
 Fig. 6 The double differences and the calibration biases in of FY-3D MWHS-II instrument

以 MWHS-II 的通道 10 和 13 为例, 图 7 展示了 DD 方法随经度和纬度的变化情况。可以看出, 匹配样本在经度和纬度方向上分布明显的上升或下降趋势。这表明, DD 值对经度和纬度的依赖性较弱。图 8 展示了 MWHS-II 通道 1 和通道 10~15 在海洋和陆地地区的理论观测值与实际观测值的散点分布以及线性回归结果。对于每个通道, 海洋和陆地的匹配样本均分布在同一条回归线附近。其中, MWHS-II 通道 1(89 GHz, QH) 和通道 10(150 GHz, QH) 在陆地地区的亮温值略高于海洋区域。这是因为通道 1 和 10 为窗区通道, 而陆地表面的辐射通常高于海洋表面辐射。然而, 在 MWHS-II 通道 11~15 中, 海洋和陆地的亮温值差异不明显, 这是因为这 5 个通道为强水汽吸收通道, 其辐射主要来源于大气层。理论观测值与实际观测值之间具有较强的线性相关性, 其决定系数  $R^2$  均大于 0.955, 拟合的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.8 ~ 1.5 K。为方便起见, 将 2022 年 6 月的定标系数结果列于表 3 中。

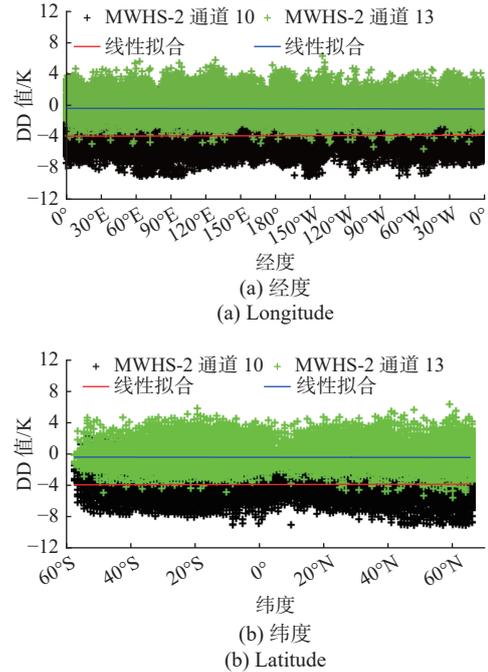
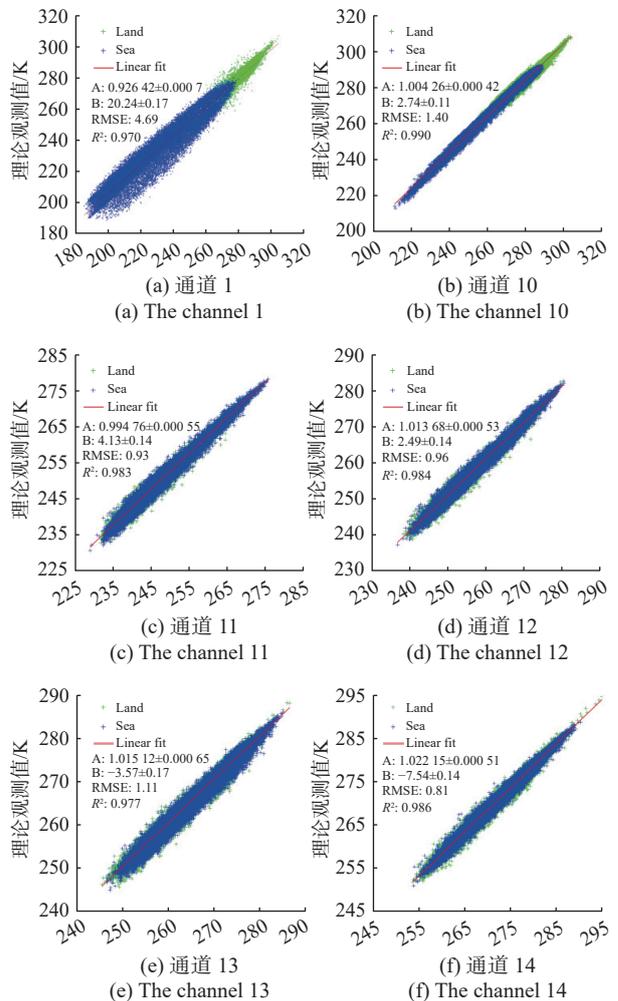


图 7 FY-3D MWHS-II 仪器通道 10 和 13 的 DD 值随经度和纬度的变化

Fig. 7 The double differences in the FY-3D MWHS-II channels 10 (150.0 GHz, QH) and the channel 13 (183.31±3.0 GHz, QV) varying with longitude, and latitude



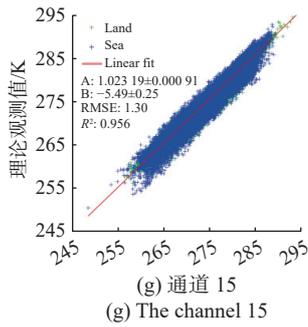


图 8 FY-3D MWHS-II 理论与实际观测值的关系

Fig. 8 Scatter plots of the theoretical observation versus the actual observations and the linear fits

表 3 2022 年 6 月 FY-3D MWHS-II 通道交叉定标结果

Tab. 3 The intercalibration results of FY-3D MWHS-II channels in June

通道	A	B	R <sup>2</sup>	RMSE
1	0.926 4±0.000 7	20.24±0.17	0.970	4.69
10	1.004 3±0.000 4	2.74±0.11	0.990	1.40
11	0.995 1±0.000 5	4.03±0.13	0.983	1.00
12	1.013 7±0.000 5	-2.49±0.14	0.984	0.96
13	1.015 1±0.000 7	-3.57±0.17	0.977	1.11
14	1.022 2±0.000 5	-7.54±0.14	0.986	0.81
15	1.023 2±0.000 9	-5.49±0.25	0.956	1.30

利用在轨辐射定标系数(斜率和截距),根据公式(24)对 MWHS-II 数据进行了定标。图 9 展示了定标后 MWHS-II 通道 1 和通道 10~15 的观测值与理论值之间差异的直方图。定标后,这些差异仍然符合正态分布,但直方图的中心值已经移动至零。这表明,通过 DD 方法,成功将 S-NPP ATMS 的定标系数有效地传递给了 FY-3D MWHS-II, MWHS-II 通道 1 和通道 10~15 的在轨辐射定标偏差已被成功消除。此外,标准差几乎没有变化,这说明定标偏差对观测值的依赖性较弱。

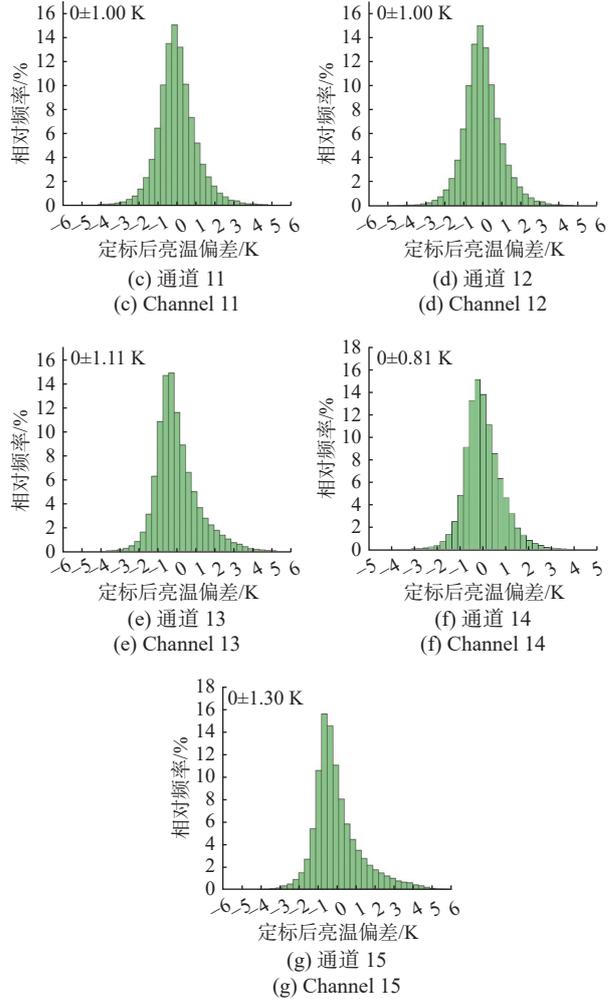
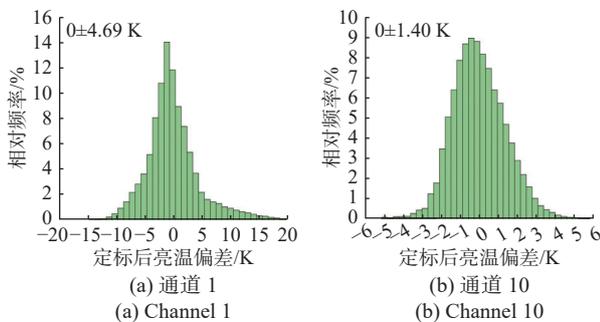


图 9 FY-3D MWHS-II 仪器中不同通道定标后观测值与理论值差异

Fig. 9 Histograms of the differences between calibrated observations and theoretical observations in the FY-3D MWHS-II

图 10 展示了 2022 年全年 MWHS-II 各通道定标偏差(即双差值的均值和标准差)随月份的变化情况。在 MWHS-II 通道 1 和通道 10~15 中,连续两个月的最大偏差变化分别为 1.42、0.3、0.31、0.36、0.43、0.37 和 0.39 K,而全年最大偏差变化则分别达到 2.03、0.39、0.37、0.38、0.53、0.6 和 0.63 K。其中,通道 10~15 的标准差为 0.6~2.5 K,而通道 1 的标准差较大(4.84~9.06 K)。所有通道的标准差在 2022 年 5 月达到最小值,这可能与该时段受云层污染的观测数据较少有关。

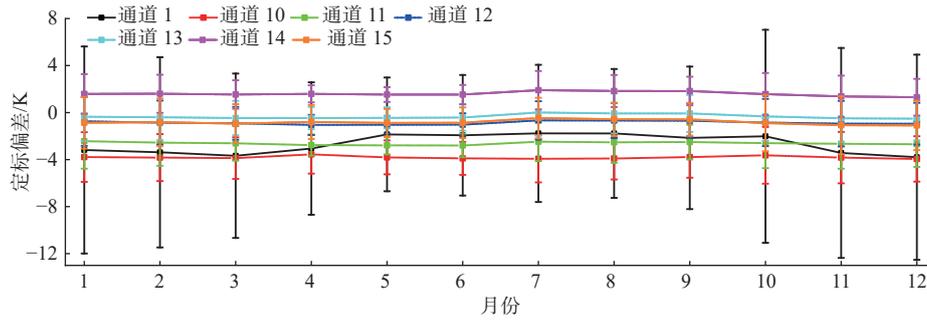


图 10 2022 年 FY-3D MWHS-II 通道 1 和通道 10~15 的辐射定标偏差

Fig. 10 The calibration biases (mean and standard deviation of the double differences) of FY-3D MWHS-II instrument varying with month of 2022

交叉辐射定标偏差的月均值和月标准差分析结果表明, 尽管 MWHS-II 各通道存在定标偏差, 但其在轨定标性能整体保持稳定。

#### 4 结论和讨论

本研究选用 ATMS 作为辐射基准, 采用 DD 方法对 FY-3D MWHS-II 进行在轨交叉辐射定标。具体流程包含四个阶段: 首先, 整合海洋和陆地表面发射率模型、大气吸收模型以及定标方程, 构建了海洋和陆地 RTM。其次, 将 FY-3D MWHS-II 观测数据、S-NPP ATMS 观测数据和第五代欧洲中尺度天气预报中心再分析数据重采样至  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的全球规则格网空间, 收集近晴空条件下时空匹配的亮温。之后, 利用 RTM 分别模拟 FY-3D MWHS-II 和 S-NPP ATMS 各匹配通道大气顶亮温, 根据匹配的模拟值和观测值计算 DD 值以及 FY-3D MWHS-II 的理论观测值。最后, 通过对匹配的亮温进行线性拟合, 确定交叉辐射定标系数。结果表明, 本文建立的 RTM 有效且具有较高的准确性。2022 年 6 月, FY-3D MWHS-II 通道 1、通道 10~15 的定标偏差分别为:  $-1.93 \pm 5.13$ 、 $-3.89 \pm 1.4$ 、 $-2.8 \pm 1$ 、 $-1.03 \pm 0.97$ 、 $-0.42 \pm 1.11$ 、 $1.53 \pm 0.82$  和  $-0.87 \pm 1.31$  K。2022 年全年, MWHS-II 各通道的定标偏差总体保持稳定: 各通道连续两个月的最大变化分别为 1.42、0.3、0.31、0.36、0.43、0.37、0.39 K, 年内最大变化分别为 2.03、0.39、0.37、0.38、0.53、0.6、0.63 K。研究结果表明: 本研究构建的辐射传输模型精度可靠, 模拟结果有效; MWHS-II 各通道的定标偏差趋势与文献 [9] 结论具有一致性, 且经过校正后偏差显著降低。2022 年全年数据表明, 尽管 MWHS-II 各通道存在定标偏差, 但其在轨定标性能整体保持稳定。

未来研究将针对 FY-3D MWHS-II 开展长期在轨定标偏差的监测与校准工作。

#### 参考文献

- [1] YANG Z, ZHANG P, GU S, et al. Capability of Fengyun-3D satellite in Earth system observation[J]. *Journal of meteorological research*, 2020, 33: 1113-1130.
- [2] QUEK G, JAKUBIEC J A. Calibration and validation of climate-based daylighting models based on one-time field measurements: Office buildings in the tropics[J]. *Leukos*, 2021, 17(1): 75-90.
- [3] THORNE K, MARKHARN B, BARKER P S, et al. Radiometric calibration of landsat[J]. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 1997, 63(7): 853-858.
- [4] BRUEGGE C J, CHRIEN N L, ANDO R R, et al. Early validation of the Multi-angle Imaging Spectro Radiometer (MISR) radiometric scale[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2002, 40(7): 1477-1492.
- [5] RUF C S. Detection of calibration drifts in spaceborne microwave radiometers using a vicarious cold reference[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2000, 38(1): 44-52.
- [6] 李子翀, 蒋耿明. FY-3D MWRI 在轨交叉辐射定标和海表温度反演[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(2): 214-224.  
LI Z C, JIANG G M. Intercalibration of FY-3D MWRI and sea surface temperature retrieval[J]. *Chinese journal of radio science*, 2024, 39(2): 214-224. (in Chinese)
- [7] HOU X, HAN Y, HU X, et al. Verification of Fengyun-3D MWTS and MWHS calibration accuracy using GPS radio occultation data[J]. *Journal of meteorological research*, 2019, 33(4): 695-704.
- [8] KAN W, HAN Y, WENG F, et al. Multisource assessments of the FengYun-3D microwave humidity sounder (MWHS) on-orbit performance[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2020, 58(10): 7258-7268.
- [9] CARMINATI F, ATKINSON N, CANDY B, et al. Insights into the microwave instruments onboard the Fengyun 3D satellite: Data quality and assimilation in the Met Office NWP system[J]. *Advances in atmospheric sciences*,

- 2021, 38: 1379-1396.
- [ 10 ] ZHANG Z, DONG X, LIU L, et al. Retrieval of barometric pressure from satellite passive microwave observations over the oceans[J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 2018, 123(6): 4360-4372.
- [ 11 ] KIM E, LYU C-H J, ANDERSON K, et al. S-NPP ATMS instrument prelaunch and on-orbit performance evaluation[J]. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 2014, 119: 5653-5670.
- [ 12 ] FUENTES J, AMATO J, HERNQUIST M, et al. Comparison of instrument calibration performance for the SNPP ATMS and JPSS1 ATMS[C]// *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, Spain, 2018: 1036-1039.
- [ 13 ] WENG F, ZOU X, WANG X, et al. Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for numerical weather prediction and tropical cyclone applications[J]. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 2012, 117(D19). DOI: [10.1029/2012JD018144](https://doi.org/10.1029/2012JD018144).
- [ 14 ] ASEM A, DESCHAMPS P Y, HO D. Calibration of METEOSAT infrared radiometer using split window channels of NOAA AVHRR[J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 1987, 4(4): 553-562.
- [ 15 ] JIANG G M, YAN H, MA L L. Intercalibration of SVISSR/FY-2C infrared channels against MODIS/Terra and AIRS/Aqua channels[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2009, 47(5): 1548-1558.
- [ 16 ] WANG L, GOLDBERG M, WU X, et al. Consistency assessment of atmospheric infrared sounder and infrared atmospheric sounding interferometer radiances: double differences versus simultaneous nadir overpasses[J]. *Journal of geophysical research*, 2011, 116(11): D11111.
- [ 17 ] KROODSMA R A, MCKAGUE D S, RUF C S. Inter-calibration of microwave radiometers using the vicarious cold calibration double difference method[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2012, 5(3): 1006-1013.
- [ 18 ] ZENG Z Q, JIANG G M. Intercalibration of FY-3C MWRI against GMI using the ocean microwave radiative transfer model[J]. *IEEE access*, 2020, 8: 63320-63335.
- [ 19 ] BISWAS S K, FARRAR S, GOPALAN K, et al. Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the global precipitation measurement mission[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2013, 51(3): 1465-1477.
- [ 20 ] WENTZ F J. A model function for ocean microwave brightness temperatures[J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 1983, 88(C3): 1892-1908.
- [ 21 ] SU X H, JIANG G M. Intercalibration of FY-3D MWTS against S-NPP ATMS based on microwave radiative transfer model[J]. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2021, 14: 8427-8435.
- [ 22 ] WATERS J R. Absorption and emission by atmospheric gases[M]// MEEKS M L. *Methods of experimental physics*. Orlando: Academic, 1976.
- [ 23 ] WENTZ F, MEISSNER T. Algorithm theoretical basis document (ATBD) version 2: AMSR ocean algorithm[R]. *Remote sensing systems technical report A*, 2000, 121599: 59.
- [ 24 ] LIEBE H J, HUFFORD G A, COTTON M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz[C]// *Proceedings of the AGARD Conference*, 1993.
- [ 25 ] MEISSNER T, WENTZ F J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2012, 50(8): 3004-3026.
- [ 26 ] 袁苇, 李宗谦, 刘宁, 等. 基于双谱模型的被动微波遥感土壤湿度反演[J]. *电波科学学报*, 2004, 19(1): 1-6.
- YUAN W, LI Z Q, LIU N, et al. Passive microwave remote sensing for soil moisture retrieval based on bi-spectrum scattering model[J]. *Chinese journal of radio science*, 2004, 19(1): 1-6. (in Chinese)
- [ 27 ] ST. GERMAIN K, POE G, GAISER P. Modeling of polarimetric microwave signal due to ocean surface wind vector[C]// *Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seattle, WA, 1998, 5: 2304-2306.
- [ 28 ] JOHNSON J. An efficient two-scale model for the computation of thermal emission and atmospheric reflection from the sea surface[J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2006, 44(3): 560-568.
- [ 29 ] WENG F, YAN B, GRODY N C. A microwave land emissivity model[J]. *Journal of geophysical research*, 2001, 106(17): 20115-20123.
- [ 30 ] KERR Y H, NJOKU E G A. A semiempirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1990, 28(3): 384-393.
- [ 31 ] FUNG A K, LI Z, CHEN K S. Back scattering from a randomly rough dielectric surface[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1992, 30(2): 195-200.
- [ 32 ] HEWISON T J. Airborne measurements of forest and agri-

cultural land surface emissivity at millimetre wavelengths[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2001, 39(2): 393-400.

- [ 33 ] 齐家国, 王翠珍, Yoshio Inoue, 等. 光与雷达遥感协作及其农业应用[J]. *电波科学学报*, 2004, 19(4): 399-404.

QI J G, WANG C Z Synergy of optical and radar remote sensing in agricultural applications[J]. *Chinese journal of radio science*, 2004, 19(4): 399-404. (in Chinese)

- [ 34 ] ZHANG W L, JIANG G M. Intercalibration of FY-3C MWRI over forest warm-scenes based on microwave radiative transfer model[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2022, 60: 5301011.

- [ 35 ] GENTEMANN C L, WENTZ F J, BREWER M. Passive microwave remote sensing of the ocean: an overview[M]// *Oceanography from space*. Netherlands : Springer, 2010.

## 作者简介



张一凡 (2000—), 男, 安徽人, 复旦大学信息科学与工程学院硕士研究生, 研究方向为卫星传感器在轨辐射定标和大气水汽反演。E-mail: [22210720061@fudan.edu.cn](mailto:22210720061@fudan.edu.cn)



蒋耿明 (1975—), 男, 湖南人, 复旦大学信息科学与工程学院副教授, 博士生导师, 研究方向为定量遥感和卫星传感器在轨辐射定标。E-mail: [jianggm@fudan.edu.cn](mailto:jianggm@fudan.edu.cn)