

风云三号卫星微波载荷历史数据再定标

谷松岩^{1,2,3}, 郭杨^{1,2,3}, 谢鑫新⁴, 何杰颖⁵, 窦芳丽^{1,2,3}, 吴琼^{1,2,3},
王振占⁵, 张升伟⁵, 安大伟^{1,2,3}, 武胜利^{1,2,3}, 张鹏^{1,2,3}

1. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 中国气象局, 北京 100081;
2. 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 中国气象局, 北京 100081;
3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;
4. 中山大学 大气科学学院, 珠海 519082;
5. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

摘要: 本文在综述国际上星载微波辐射计历史数据再定标技术基础上, 介绍了风云三号卫星微波载荷特点, 综述业务辐射定标和历史数据再定标共性技术, 阐述风云三号卫星微波载荷通过仪器系统全链路辐射传递仿真构建在轨特殊工况辐射修正模型后, 以国际参考载荷为参考消除代际间辐射差异的历史数据再定标技术路线; 简介了风云三号卫星微波载荷在轨基本业务状态以及历史数据再定标研究成果, 再定标生成的风云三号微波长时序 L1 科学数据集, 经与国际同类载荷交叉比对表明氧气吸收通道长时间序列亮温数据 RMSE 为 0.77 K, 标准差为 0.28 K; 水汽吸收通道再定标后长时间序列数据的 RMSE 最优达到 0.80 K, 标准差为 0.20 K; 窗区通道以 23.8 GHz 的 V 极化通道为例再定标后长时间序列数据的 RMSE 最优达到 1.29 K, 标准差为 0.15 K; 在定标后最大 RMSE 不超过 1.5 K。风云卫星微波载荷与参考载荷之间具有非常好的辐射一致性。风云三号卫星微波载荷历史数据再定标结果为后续建立风云卫星微波载荷基础气候数据集 (FCDR)、和包含关键气候变量的网格化气候数据集 (CDR) 提供了基础性支撑。

关键词: 风云三号气象卫星, 微波大气探测仪, 微波成像仪, 历史数据再定标, 交叉定标

中图分类号: P413/P2

引用格式: 谷松岩, 郭杨, 谢鑫新, 何杰颖, 窦芳丽, 吴琼, 王振占, 张升伟, 安大伟, 武胜利, 张鹏. 2023. 风云三号卫星微波载荷历史数据再定标. 遥感学报, 27(10): 2252-2269

Gu S Y, Gou Y, Xie X X, He J Y, Dou F L, Wu Q, Wang Z Z, Zhang S W, An D W, Wu S L and Zhang P. 2023. Recalibration of the FY-3 microwave payload historical data records. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2252-2269 [DOI: 10.11834/jrs.20221436]

1 引言

地球气候系统在过去 30 年间以 0.17 K/10 a 的变率在变暖 (Solomon 等, 2007)。为深刻理解地球气候系统变暖的事实, 美国科学家利用对地球气候系统敏感的星载微波氧气吸收通道遥感信息, 发展了经验与物理相结合的微波历史数据再定标技术, 处理生成了长时间序列微波氧气吸收通道基础气候数据集 (FCDR), 通过 25 年极轨卫星上装载的微波探测仪 (MSU) 数据分析对流层温度

的微小变化趋势 (Grody 等, 2004), 得到地球大气系统对流层整层在 1987 年—2006 年 10 年温度变率达到 0.08 K (Zou 等, 2009)。这一结果激励了后来美国和欧洲科学家长期致力于星载微波遥感资料的历史数据再定标和气候数据集研究, 根据遥感探测机理分别发展了微波窗区和微波吸收通道基础气候数据集 (FCDR)、气候数据集 (CDR) (Chander 等, 2013; Sapiiano 等, 2013; Berg 等, 2018; Zou 等, 2020), 这些数据集在气候变化研究中发挥了重要作用。微波载荷历史数据再定标

收稿日期: 2021-07-08; 预印本: 2022-03-16

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2018YFB0504902); 项目“国产多系列遥感卫星历史资料再定标技术 (编号: 2018YFB0504900); 国家自然科学基金面上项目 (编号: 41775020); 国家自然科学基金青年基金 (编号: 42005105)

第一作者简介: 谷松岩, 研究方向为星载微波仪器辐射定标及大气参数定量遥感。E-mail: gusy@cma.gov.cn

通信作者简介: 郭杨, 研究方向为星载微波仪器辐射定标及应用。E-mail: guoyang@cma.gov.cn

是构建微波基础气候数据集的核心技术，在微波载荷基础气候数据集发展过程中，逐步形成了以交叉定标技术为基础的再定标方法，提升长时序历史数据辐射的一致性，消除遥感信息代际间的差异等（Sapiano等，2013；Biswas等，2013；Berg等，2018；Zou等，2020）。

风云卫星历经半个世纪的发展取得了令人瞩目的成绩（Yang等，2012；Zhang等，2018，2019），其上装载的微波温度计（MWTS）、微波湿度计（MWSH）和微波成像仪（MWRI）辐射率资料是数值天气预报系统直接同化的重要数据源，在数值天气预报同化应用和气候变化研究具有重要意义，尽管与欧美同类载荷相比风云卫星微波载荷起步较晚，但独具特色的通道设计使其在数值天气预报和气候研究中蕴含了独特的应用潜力和作用（Zou，2021）。

在过去十多年间，风云三号卫星从微波载荷研制到数据辐射定标技术都取得了长足进展，但由于仪器在轨运行寿命期内工况的变化以及辐射定标技术的发展，历史数据辐射定标结果在时间尺度上精度的稳定性不够，在将风云卫星微波资料用于数值预报再分析和气候研究时，亟需对历史数据进行再定标，用最新的辐射定标模型重处理历史数据，以保证数据的稳定性和辐射定标结果精度的一致性。对风云卫星微波载荷历史数据再定标的模型研究不仅能加深对国产卫星微波技术的深刻认识，同时也能加深对星载微波辐射计辐射定标机理的认识。以这些认识为基础，我们可以重构国产卫星微波辐射计辐射定标模型，提升辐射定标结果精度。

国产卫星微波载荷历史数据再定标中以国外参考载荷数据或背景场微波辐射为参考，通过对风云卫星微波载荷在轨工况的多元复合解析，分离载荷偏离稳态事件，进行诊断分析建模，采用载荷半物理仿真技术将载荷器/部件级的物理测试与载荷系统级仿真分析相结合探究辐射偏离机理，重构辐射定标模型，支撑风云三号卫星微波载荷基础气候数据集建设。本文综述风云三号卫星微波载荷历史数据再定标研究进展。

2 微波历史数据再定标技术回顾

星载微波辐射计可分为微波成像仪和微波探测仪。微波成像仪一般通过设置在微波窗区位置

的通道探测地气系统地球物理参量；微波探测仪则利用设置在微波吸收线附近的一组通道来实现大气参数的廓线探测，业务上常用微波氧气和水汽吸收线来实现大气温湿度廓线探测。两类微波载荷历史数据再定标技术也略有不同。

2.1 微波成像仪历史数据再定标

特种微波成像仪（SSM/I）是最早投入定量科学应用的星载微波辐射计，装载在1987年发射升空的DMSP F08卫星上，利用设置在微波窗区位置的通道遥感地气系统地球物理参量（Hollinger等，1990）；美国国防卫星DMSP F08之后的F10、F11、F13、F14，和F15卫星上均装载了SSM/I载荷，改进后的SSMIS集成成像和探测为一体，取代SSM/I装载在DMSP F16、F17、F18，和F19卫星上，从SSM/I到SSMIS，在数据处理过程中，增加了对数据的质量控制；改进了定位技术，精确获取入射角；同时增加了对SSMIS的天线订正。最后在NOAA支持下美国通过交叉定标技术实现辐射校准，完成了30年时间覆盖的基础气候数据集SSMIS（S）FCDR。这一数据集可用于反演降水、大气可降水、云中液态水、海面风速、海冰范围和浓度、积雪和土壤湿度等多种地球系统气候基本变量（ECV）（Sapiano等，2013；Berg等，2016）；美国NASA在全球降水测量计划（GPM）中的交叉定标（XCAL）技术框架下，利用与GPM卫星同期在轨的所有被动微波载荷组成星座体系，基于数值天气预报分析场与微波正演辐射传输模型相结合得到的背景微波辐射，发展了单偏差分析、双偏差分析等多种交叉定标技术，以GMI为参考实现再定标，构建了GPM/L1C FCDR（Berg等，2016），支撑气候及气候变化研究对微波成像仪遥感数据的迫切需求。风云三号气象卫星微波成像仪，在时间上衔接了AMSR-E和AMSR-2两个载荷的遥感数据，在微波FCDR数据集构建中发挥了重要作用。为了科学分析全球变化中国科学家利用与AMSR-E和AMSR-2两个载荷都有时间重叠的FY-3/MWRI数据，通过陆地区域双差分析交叉定标技术将AMSR-E与AMSR-2数据桥接起来，建立了以AMSR-E为参考的微波成像仪长时序亮温数据集（Du，2014）。同样是桥接AMSR-E与AMSR-2数据以保证数据集用于水循环研究时的连续性，以AMSR-2为参考，针对MWRI在轨具体特殊工况

进行修正后, 利用交叉定标技术构建再定标模型, 用 MWR I 数据桥接 AMSR-E 与 AMSR-2 以填补二者的数据空白, 再定标后 MWRI 和 AMSR-E 与 AMSR-2 的亮温偏差均小于 0.3 K (Wu 等, 2020)。上述这些围绕微波窗区通道遥感数据开展的历史数据再定标研究和基础气候数据集工作为风云卫星微波长时序基础数据集建设提供了技术参考。

2.2 微波大气探测仪历史数据再定标

在微波探测仪历史长时序数据应用方面, 最早发展的是用于大气温度结构探测的微波氧气吸收通道资料, 以美国业务卫星上装载的 MSU、SSM/T、AMSU-A 和 ATMS 为代表。在微波氧气吸收通道历史数据再定标算法发展过程中, 围绕长时间序列历史数据辐射定标的稳定性和一致性逐步形成了综合处理技术, 更新定标系统静态参数、消除定标结果的时变性以及与辐射参考的系统偏差等 (Zou 等, 2006, 2009; Zou 和 Wang, 2010, 2011)。2016 年美国 NOAA 发布了 AMSU-A 微波氧气吸收通道基础气候数据集 FCDR, 在对包括 MSU 在内的微波探测仪历史数据再定标中增加了对载荷发射后在轨通道中心频率与地面测试结果之间偏差的诊断分析和建模修正, 提高了微波氧气吸收通道 FCDR 数据在 NWP 模式、气候分析以及气候专题数据集 (TCDR) 等时间序列数据集构建方面的应用精度 (Zou 和 Qian, 2016)。在利用微波氧气吸收通道 FCDR 数据集分析地球系统气候变化时, 分析表明 SNPP/ATMS 和 AQUA/AMSU-A 对应通道探测到的大气温度数据均达到了每 10 a 0.04 K 的稳定性 (Zou 等, 2018); 近年美国 NOAA/STAR 又完成了对 SNPP 和 JPSS 业务存档数据的重处理, 消除科学数据在时间上因处理技术差异产生的不一致, 改进定标精度, 这些研究成果确保了星载微波氧气吸收通道 FCDR 数据在气候和气候变化研究中, 以及数值天气预报再分析中的应用 (Zou 等, 2020)。

大气水汽是时空演变最剧烈的气候变量 (ECV) 之一, 星载微波大气水汽吸收通道 (183 GHz) 探测数据是对流层大气水汽、大气可降水和大冰水路径等气候系统重要参数的主要数据源 (Ferraro 等, 2005), 同时也是同化应用于数值天气预报再分析的重要数据 (Rienecker 等, 2011)。微波水汽吸收通道 (183 GHz) 历史数据再定标和基础气候数据集研究工作因地气系统水汽变量变

化的复杂性和探测数据的不确定性等而起步较晚, 国际上用于大气水汽探测的代表性微波载荷包括 AMSU-B、SSM/T2、MHS、HSB、ATMS, 以及风云三号的 MWHS 等。美国 NOAA 于 2016 年发布了时间覆盖长达 16 年以 AMSU-B 和 MHS 数据为基础可用于水文学研究的 183 GHz FCDR 数据 (Ferraro 等, 2018)。近年欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT) 在 FIDUCEO (FIDelity and Uncertainty in Climate-data records from Earth Observation) 计划框架下完成了气象卫星上装载的微波湿度计 (183 GHz) 水汽吸收通道历史数据再定标研究, 在生成 FCDR 数据集过程中关注了风云三号微波湿度计的探测数据 (Hans 等, 2019), 2020 年发布了时间覆盖长达 23 年 (1994 年—2017 年) 基于 SSM/T2、AMSU-B 和 MHS 历史数据的对流层上层湿度 (UTH) 气候数据集 (CDR) (Lang 等, 2020), 丰富了星载微波气候数据集。

3 风云三号卫星微波载荷性能及业务星上定标方法

3.1 载荷性能

风云三号卫星是中国第二代极轨业务气象卫星, 装载的被动微波辐射计包括微波成像仪和微波大气探测仪两类。从 2008 年风云三号首发星 (FY-3A) 成功发射以来, 到目前为止风云三号气象卫星已完成 3 个批次 (01/02/03 批) 5 颗卫星 (FY-3A/B/C/D/E) 的发射和业务运行 (Yang 等, 2012; Zhang 等, 2018, 2019)。

风云三号 01 批卫星装载的微波辐射计中微波湿度与当时美国业务运行的 ATOVS 中的 AMSU-B 相当, 除了在 183 GHz 水汽吸收线附近设置了 3 个通道外, 在 150 GHz 微波窗区频段设置有双极化探测通道, 成为当时国际上在轨业务运行独具特色的探测载荷, 其探测资料成功同化应用到 ECMWF、英国气象局和我国自主研发的数值天气预报模式中 (陆其峰, 2011; Zou 等, 2011)。

风云三号 02 批业务批次的两颗卫星风云三号 C/D 星分别于 2013 年和 2017 年发射后, 因其独具特色的通道设置, 而受到欧美同行的广泛关注。其中微波温/湿度计在常规氧气和水汽吸收频点上的通道设置与美国当代业务卫星 SNPP 上装载的大气探测载荷 ATMS 探测通道一致, 同时风云卫星增加了 118 GHz 氧气吸收线一组探测通道的设计 (郭

杨 等, 2014, 2015, 2020; Guan 等, 2011; Zou 等, 2012, 2014; Hou 等, 2019; Zou, 2021)。未来风云三号 03 批规划有 4 颗卫星, 其中上下午和晨昏三颗卫星上均设计装载探测通道与 02 批保持一致的微波大气探测载荷, 同时在微波温度计上增加了低频 23 GHz 和 31 GHz 两个窗区通道以及吸收峰的两个通道, 星载微波大气垂直探测系统性能进一步提高。

风云三号 01/02 批 4 颗卫星上装载的微波成像仪采用相同的频点设置和扫描成像体制, 以独具特色的天线口面定标方式实现对地圆锥扫描的同时, 在一个扫描周期内获取冷热源定标信息, 实现在轨定标, 辐射定标过程中对热源的辐射处理是定标技术的关键 (Yang 等, 2011, 2012)。后续风云三号 03 批微波成像仪将通过增加大气氧气和水汽吸收通道提升降水探测能力, 频点将覆盖 10 GHz 到 183 GHz 的多频段, 定标及灵敏度等关键性能指标将进一步提升, 同时为适应馈源增加的压力改用与 GMI 等国外同类载荷相同的馈源口面定标方式实现对地观测成像及定标参数获取, 这种观测体制下冷源的辐射处理成为定标技术的关键。

表 1—表 3 是风云三号 3 个批次 (01、02、03) 8 颗卫星 (A–H) 微波载荷配置及通道设置情况; 图 1 是在轨业务运行的风云三号 A/B/C/D 卫星微波载荷灵敏度指标情况; 可以看到从 A 星到 D 星风云三号微波载荷性能指标不断提升。

表 1 风云三号卫星微波成像仪配置及通道设置
Table 1 Load configuration and channel setting of FY-3 satellites microwave imager

FY-3A/B/C/D/MWRI	FY-3F/H/MWRI-II	FY-3G/MWRI-RM
10.65 GHz(H/V)	10.65 GHz(H/V)	10.65 GHz(H/V)
18.7 GHz(H/V)	18.7 GHz(H/V)	18.7 GHz(H/V)
23.8 GHz(H/V)	23.8 GHz(H/V)	23.8 GHz(H/V)
36.5 GHz(H/V)	36.5 GHz(H/V)	36.5 GHz(H/V)
—	50.3 GHz(V)	50.3 GHz(V)
—	52.61 GHz(V)	52.61 GHz(V)
—	53.24 GHz(V)	53.24 GHz(V)
—	53.75 GHz(V)	53.75 GHz(V)
89 GHz(H/V)	89 GHz(H/V)	89 GHz(H/V)
—	118.7503±3.2 GHz(V)	118.7503±3.2 GHz(V)
—	118.7503±2.1 GHz(V)	118.7503±2.1 GHz(V)
—	118.7503±1.4 GHz(V)	118.7503±1.4 GHz(V)
—	118.7503±1.2 GHz(V)	118.7503±1.2 GHz(V)
—	165.5 GHz(H/V)	165.5 GHz(H/V)
—	—	183±1 GHz(V)
—	—	183±3 GHz(V)
—	—	183±7 GHz(V)

表 2 风云三号卫星微波温度计载荷配置及通道设置
Table 2 Load configuration and channel setting of FY-3 satellites microwave temperature sounder

FY-3A/B/MWTS	FY-3C/D/MWTS-II	FY-3E/F/H/MWTS-III
—	—	23.8(QV)
—	—	31.4(QV)
50.30(QH)	50.3(QH)	50.3(QH)
—	51.76(QH)	51.76(QH)
—	52.8(QH)	52.8(QH)
—	—	53.246±0.08(QH)
53.596±0.115(QH)	53.596(QH)	53.596±0.115(QH)
—	—	53.948±0.081(QH)
54.94(QH)	54.40(QH)	54.40(QH)
—	54.94(QH)	54.94(QH)
—	55.50(QH)	55.50(QH)
57.290(QH)	57.290344(fo)(QH)	57.290344(fo)(QH)
—	Fo±0.217(QH)	fo±0.217(QH)
—	fo±0.3222±0.048(QH)	fo±0.3222±0.048(QH)
—	fo±0.3222±0.022(QH)	fo±0.3222±0.022(QH)
—	fo±0.3222±0.010(QH)	fo±0.3222±0.010(QH)
—	fo±0.3222±0.0045(QH)	fo±0.3222±0.0045(QH)

表 3 风云三号卫星微波湿度计载荷配置及通道设置
Table 3 Load configuration and channel setting of FY-3 satellites microwave humidity sounder

FY-3A/B/MWHS	FY-3C/D/E/F/H/MWHS-II
—	89.0(QV)
—	118.75±0.08(QH)
—	118.75±0.2(QH)
—	118.75±0.3(QH)
—	118.75±0.8(QH)
—	118.75±1.1(QH)
—	118.75±2.5(QH)
—	118.75±3.0(QH)
—	118.75±5.0(QH)
150.0(QV)	150.0
150.0(QH)	—
183.31±1	183.31±1(QH)
183.31±1.8	183.31±1.8(QH)
183.31±3	183.31±3(QH)
183.31±4.5	183.31±4.5(QH)
183.31±7	183.31±7(QH)

3.2 在轨业务星上定标技术

风云三号微波载荷辐射定标主要由发射前定标、在轨业务星上定标和历史数据再定标等 3 个技

术环节组成(图2)。在轨业务星上定标是风云三号微波载荷业务辐射定标的一个重要技术环节,主要是将发射前地面真空定标试验得到的微波辐

射计辐射响应模型和静态参数结合在轨实测的动态定标基础数据,将辐射观测计数值转换为地气系统目标微波辐射量(图3)(谷松岩等,2021)。

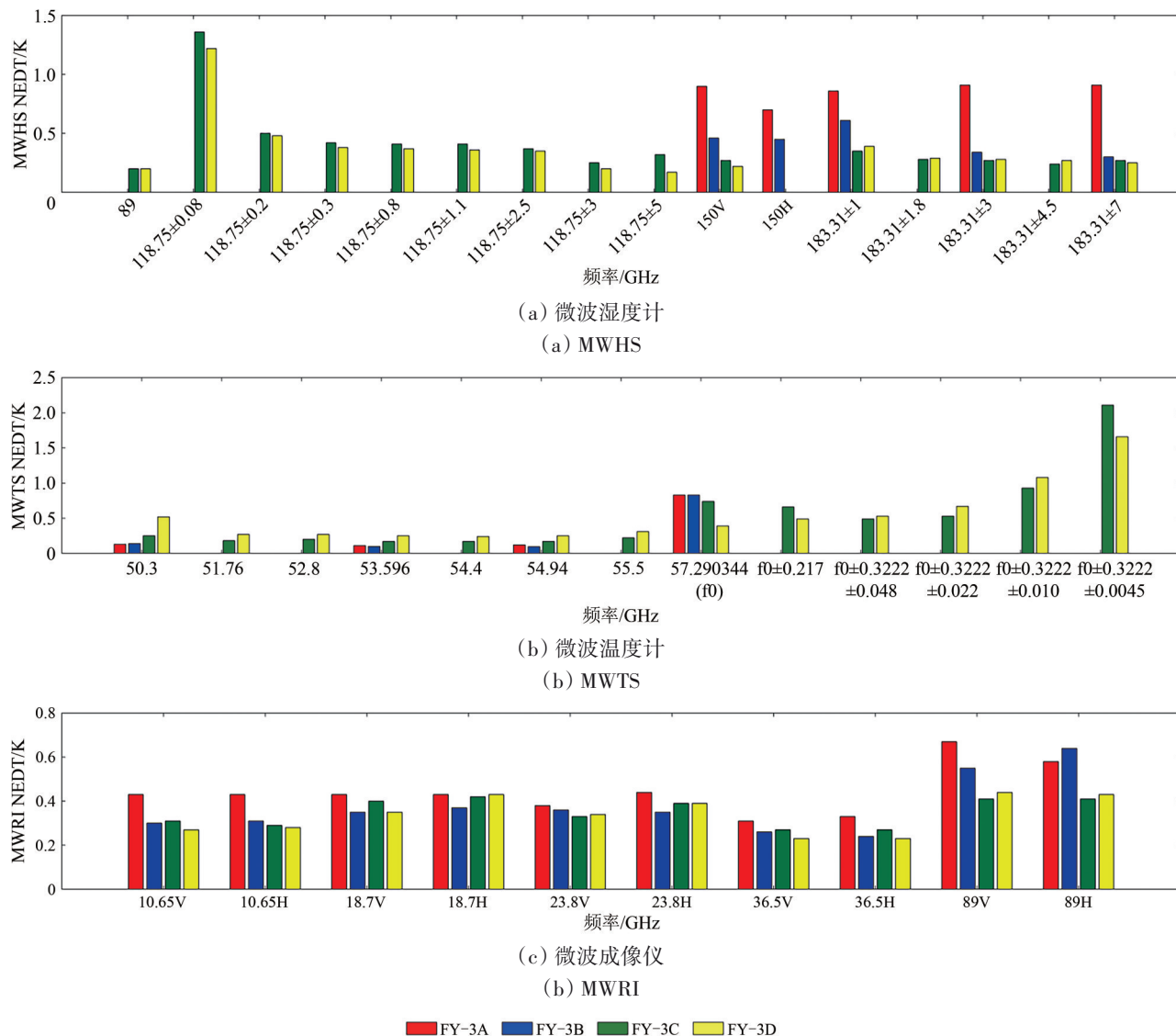


图1 风云三号微波载荷灵敏度

Fig. 1 Sensitivity of FY-3 microwave payloads

风云三号气象卫星三台微波辐射计在轨星上定标均采用全光路定标系统,以星上黑体和冷空为参考完成两点周期定标。其中微波大气探测载荷(温度计/湿度计)以切轨扫描方式在一个扫描周期内以完全相同的方式分别获取冷空、热源和对地观测数据,同时依靠埋嵌在黑体内部的铂电阻测量热源温度,获取在轨动态辐射定标基础数据。风云三号微波大气探测载荷在轨星上定标模型包括传统的非线性辐射定标模型、线性定标加非线性修正模型和高阶非线性校准定标模型等。其中风云三号A星微波湿度计采用的线性定标加

非线性修正模型与美国SNPP/ATMS在轨定标模型一致(谷松岩等,2013)。风云三号B/C/D星微波湿度计采用了与AMSU一致的非线性辐射定标模型(Mo, 2002; 王振占等, 2013; 郭杨等, 2015)。而风云三号A/B/D星微波温度计则沿用了与AMSU-A一致的定标模型,但C星微波温度计根据载荷在轨工况特点,利用高阶非线性定标模型有效抑制了系统定标的不确定性(安大伟, 2016)。

风云三号微波成像仪以圆锥扫描方式完成周期性观测,两个直径为1300 mm和890 mm的准光学反射镜将来自冷空和热源微波辐射反射到主

天线，再经主天线反射进入馈源，来自地气系统的微波辐射直接经主天线反射进入馈源。天线口面定标系统确保了风云三号微波成像仪的在轨定标精度（Yang等，2011；刘高峰等，2014；董克

松等，2020）。这种观测体制不同于欧美同类载荷（例如GMI等），其中热源的辐射处理是微波成像仪在轨星上定标的关键技术（Xie等，2019）。

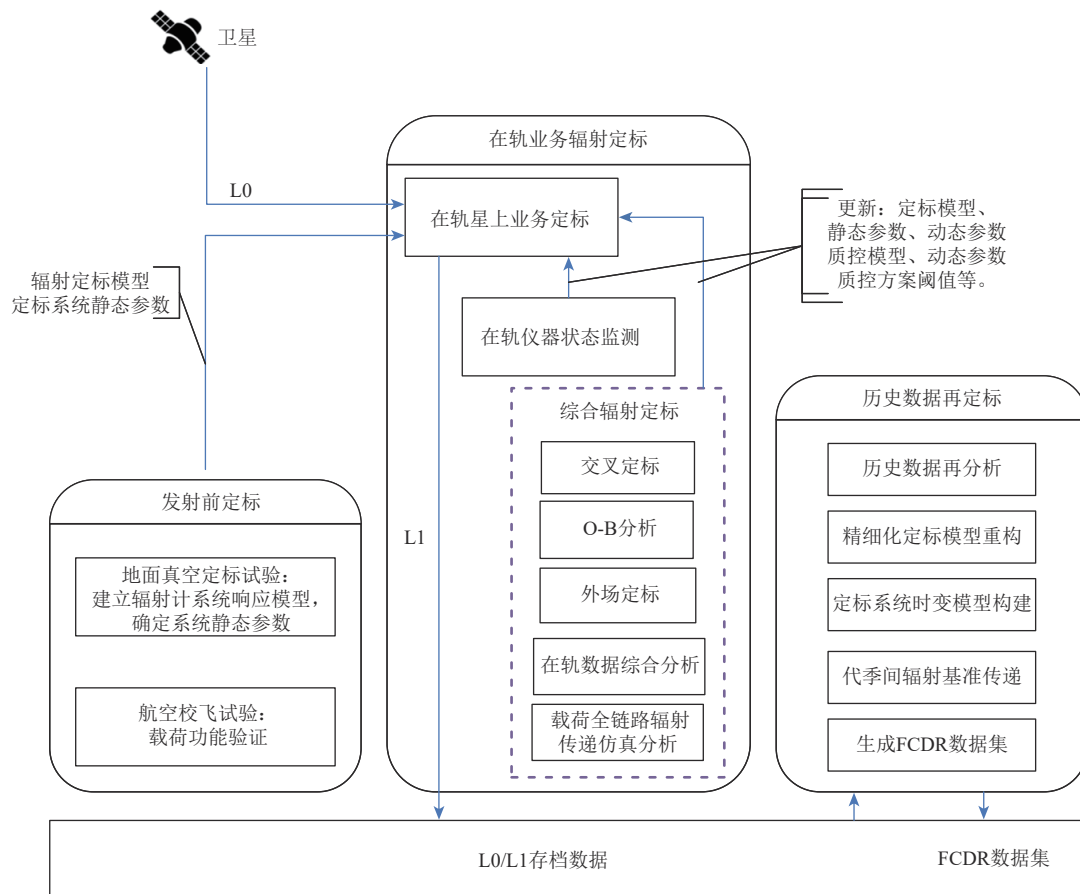


图2 风云三号微波载荷辐射定标

Fig. 2 Calibration technology of FY-3 Microwave loads

过去十年间风云三号卫星微波载荷业务存档数据稳定，得到广泛应用，其中ECMWF的IFS系统对FY-3A/B/MWHS进行评价，认为其性能与METOP上装载的MHS性能相当（Chen等，2015）；FY-3A/MWTS在轨中心频点修正后定标结果偏差标准差优于0.6 K（陆其峰，2011）；用NWP预报场资料评价FY-3A/MWTS通道3/4的O-B亮温偏差小于0.6 K，与AMSU-A相当（Wang等，2012）；利用GPS/RO资料对风云三号微波温度计进行在轨绝对定标后，亮温偏差稳定在0.25 K（王祥等，2017）；与前序载荷相比FY-3D卫星上装载的微波载荷性能得到了极大提升，微波温度计的辐射定标得到很大改进，全球范围内与ATMS对应氧气吸收通道（50—60 GHz）相比平均偏差为 0.36 ± 0.28 K（ 1σ ），而微波成像仪升降轨偏差降低到0.2 K

（Carminati等，2021）；以AMSR-2为参考，定标修正后MWRI和AMSR-E与AMSR-2的亮温偏差均小于0.3 K（Wu等，2020）。

在应用中，同化FY-3B/MWHS后24 h预报准确率可提高0.3%，同化FY-3C/MWHS-II资料后24小时预报准确率可以提高0.6%，联合使用两个载荷数据时24 h预报准确率提高1%（Carminati等，2018）；在ECMWF业务系统中同化应用风云三号系列MWHS、MWHS-II、和MWRI微波资料后，两天全球尺度大部分预报变量改进有显著正效果，预报技巧提升2%（Bormann等，2021）。这些应用评价为风云三号微波载荷历史数据再定标以及未来风云三号卫星微波资料在气候研究和数值预报再分析中的应用奠定了基础。

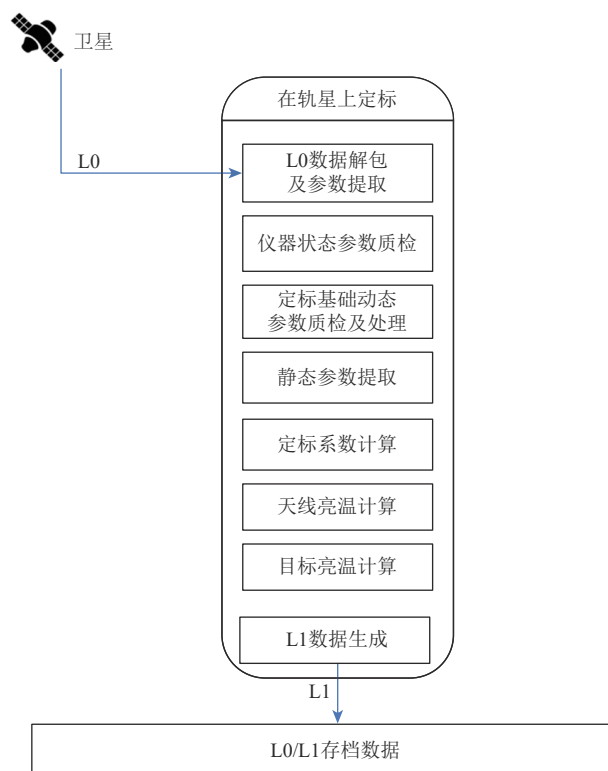


图3 风云三号微波载荷星上定标技术

Fig. 3 Onboard calibration technology of FY-3 microwave payloads

4 风云三号微波载荷历史数据再定标

4.1 历史数据概况

风云三号卫星上共装载了微波湿度计、微波温度计和微波成像仪3类14台套被动微波辐射计,到目前为止历史数据存档量已积累达到13年,历史数据时间覆盖情况见图4。其中微波温度计在2015年—2017年因载荷在轨停止工作;微波成像仪在2009年到2010年间因天线转动对卫星平台产生扰动而停转。微波湿度计A星已圆满完成业务使命退出业务服务,B/C/D三颗星微波湿度计目前均在轨业务运行获取全球数据,B星微波湿度计历史资料单星时间跨度已超过10年,与A/C/D星微波湿度计均有时间重叠。

风云三号卫星微波载荷在轨运行期间受空间环境等多种因素影响仪器工况会发生变化,同时地面系统辐射定标算法也不断更新,图5示出风云三号卫星微波载荷在轨寿命期内载荷工况和预处理业务软件主要变化情况。

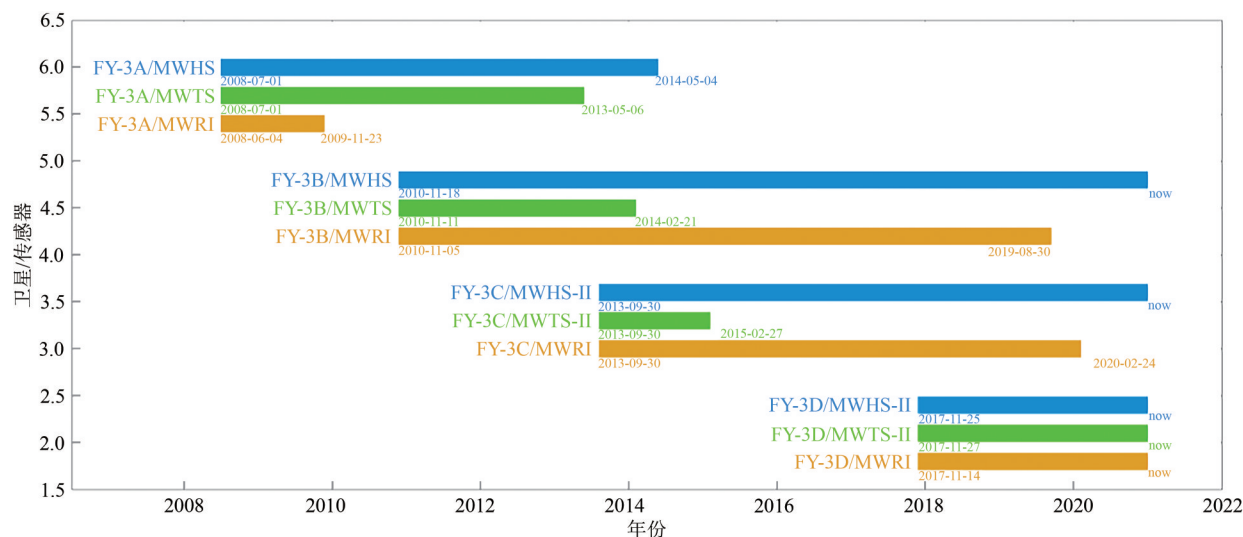


图4 风云三号微波载荷历史数据时间覆盖性

Fig. 4 Time coverage of historical data of FY-3 microwave payloads

其中FY-3A/B星微波湿度计(图5(a))在轨建立业务模式后,于2011年3月在业务软件系统中增加了月球进入冷空观域污染定标动态参数的订正处理模型;FY-3B微波湿度计于2016年11月将星上存贮做了切备份处理。FY-3C/MWHS为配合卫星能源状态调整,在轨寿命期内进行了多次开关机操作,相应也进行了多次机械偏差注数调

整;2015年3月对业务系统中辐射定标静态参数中的天线订正矩阵进行了调整;2015年9月重新注数了系统自动增益(AGC)参数。

FY-3A星微波温度计(图5(b))在轨建立业务模式后,2008年12月接收机温度出现过异常,重启后恢复正常;2009年12月热定标源温控电路切备份;2011年6月载荷重注了零位脉冲;业务

软件系统中2011年1月更新了天线矩阵。FY-3B星微波温度计2011年11月57 GHz本振电流下降, 通道定量应用受限。FY-3C星微波温度计2014年5月因转动机构异常, 载荷由变速扫描模式切入匀

速扫描模式。FY-3D星微波温度计2018年1月受空间环境影响多路开关引起系统非线性跳变, 经地面复现建模, 软件修复。

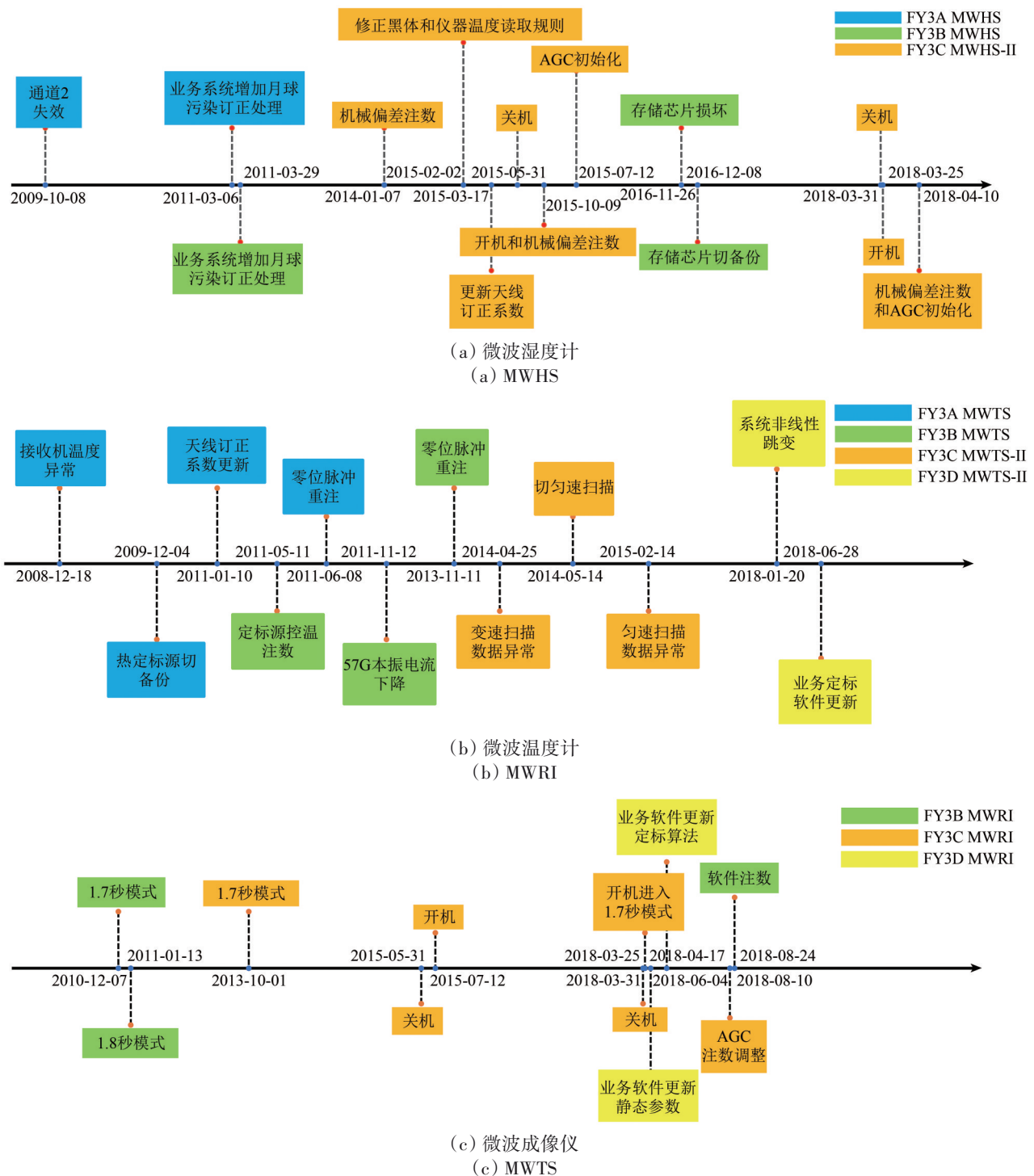


图5 风云三号微波载荷在轨主要工况变化情况

Fig. 5 Main operating conditions of FY-3 microwave payloads in orbit

FY-3A星微波成像仪开机后因对平台姿态产生干扰而关机; FY-3B星微波成像仪(图5(c))

在轨测试后建立了扫描周期为1.8 s的业务模式。FY-3C星微波成像仪在轨测试后建立了扫描周期

为1.7 s的业务模态, 2018年8月对AGC进行了注数调整。FY-3D星微波成像仪在轨建立了业务模态后, 2018年4月对业务辐射定标软件中定标地静态参数进行了更新, 2018年6月更新了定标业务算法。

此外从已发表文献中可以看到, 通过地球稳定的冷目标参考点分析表明风云三号B星微波成像仪L1数据在2011年2月到7月间冷点亮温波动范围达到1.8 K (乔木等, 2012); C星各通道升降轨观测与背景辐射的偏差不一致, 最大可达到2 K (Xie等, 2019; 张森等, 2019); 长期观测数据研究还发现微波成像仪在轨开关机会导致仪器状态发生改变, 致使L1亮温数据出现跳变 (Xie等, 2021a)。风云三号微波温度计在轨运行期间, 受多路开关等器件影响在轨定标结果出现跳变; 天线方向图特性导致辐射在切轨方向上出现非对称分布, 窄带吸收通道存在明显的条带噪声 (金旭等, 2019)。而被动温控的微波湿度计在轨期间在平台热力平衡条件约束下, 仪器工作温度发生变化时, 从与参考载荷ATMS的交叉比对结果来看, 定标结果也发生了跳变 (图6); 天馈系统的耦合作用还导致辐射相对于星下点出现非对称性 (Guo等, 2020)。这些仪器在轨工况的变化导致历史数据的异常改变, 只能通过风云卫星微波载荷历史数据再定标, 攻克技术难点, 来改善历史数据质量。

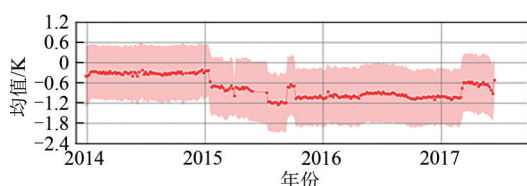


图6 FY-3C/MWHS与ATMS对应通道(183.31±1 GHz)交叉比对结果的时间变化

Fig. 6 Time series of cross comparison results between FY-3C/MWHS and ATMS corresponding channel (183.31 ± 1 GHz)

4.2 再定标共性技术综述

风云三号气象卫星装载的3台微波辐射计, 涵盖了微波窗区、氧气/水汽吸收通道, 对风云三号微波载荷长时间序列历史数据再定标研究能加深对国产卫星星载微波载荷辐射特性的理解和认识, 提高综合辐射定标精度, 为后续生成中国微波气候数据集 (CDR) 提供风云数据方案。

欧美微波载荷研制技术水平明显优于中国, 载荷在轨性能相对稳定, 历史数据具有较好的稳定性和一致性, 在对微波历史资料再定标建立微波基础气候基础数据集 (FCDR) 过程中, 辐射参考的交叉传递是构建长时间序列辐射资料的核心技术 (Zou等, 2006), 而中国受微波载荷研制技术和工艺水平制约, 在轨辐射定标处理中, 对载荷在轨性能认识逐步加深, 因此在微波历史数据再定标和微波气候数据集的风云解决方案中, 星载微波辐射计的系统辐射响应和性能演化模型研究, 以及辐射参考研究等至关重要, 这些决定了我们国产卫星微波载荷基础气候数据集的品质。

为此风云三号微波载荷历史数据再定标共性技术中通过载荷系统全链路辐射传递仿真建模, 解析仪器在轨特殊工况下的辐射特性, 精确反演地气系统同目标亮温; 同时发展微波大气载荷长序列遥感数据辐射参考共性模型、代际间辐射传递共性模型和再定标结果仿真验证模型, 实现风云卫星长时间序列历史数据再定标。

风云卫星微波载荷历史数据再定标由载荷在轨特殊工况精细化再定标模型、时变模型和辐射传递模型组成。再定标过程包括历史数据再分析和历史数据重处理两个技术环节。通过对长时间序列历史数据的再分析, 把握载荷在轨特殊工况状态, 综合评价微波载荷业务星上定标结果, 才能有的放矢地开展针对性建模分析, 构建精细化再定标模型。将历史数据再分析得到的精细化再定标模型用于单载荷寿命期历史数据重处理, 使历史数据辐射定标精度达到一致并最优; 然后基于微波辐射参考将多颗星资料归一化到统一的辐射标准, 生成长时序基础数据集, 支撑建立基础气候数据集 (谢鑫新等, 2019, 2021; 李娇阳等, 2019)。

风云三号卫星微波载荷历史数据再分析过程中发现很多时候历史数据会偏离稳态, 多参数关联分析会发现这些偏离往往与载荷在轨的特殊工况有关。例如对热镜自发射以及热镜反射的外源辐射估计不足导致风云三号微波成像仪在轨升降轨辐射偏差交大, 利用在轨观测数据结合地面真空定标数据再分析分别构建热反射镜发射率模型和辐射效率模型, 同时发展双参数系统非线性响应模型, 再定标处理后, 升降轨偏差从2 K左右降低至0.5 K以下, 同时消除了因增益脉动等特殊工

况带来的亮温跳变 (Xie 等, 2019, 2021a), 再定标使微波成像仪历史数据的长期稳定性大幅提高, 改进了风云三号微波成像仪历史数据质量。

对微波温度计历史数据的再分析让我们重新认识了过去十年间数据的异常情况与在轨载荷工况间的密切关联, 开展了诸如多路开关的非线性跳变、天线方向图的影响、载荷噪声特性与数据条纹噪声的关联、月球对冷空的污染、共用器件造成载荷通道间辐射耦合、发射前真空定标模型重构以及在轨定标模型优化等共性研究, 重构精细化辐射定标模型提升历史数据品质 (陈文新 等, 2013; You 等, 2012; 安大伟 等, 2016; 金旭 等, 2019)。

微波湿度计是风云三号 3 台微波载荷中历史数

据最完整的载荷, 其辐射率资料已直接同化进入 ECMWF、英国气象局和中国气象局的业务预报系统。在对其历史资料再分析的基础上重构发射前真空定标模型、更新历史数据定标静态参数, 并依据 ISO 星载微波辐射计辐射参考 (Geographic information-Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data-Part 4: Space-borne Microwave Radiometers, ISO 19159-4: 2020), 在稳态约束条件下通过月球历史数据的分析建模得到系统宽动态辐射响应, 发展了再定标物理模型, 改进历史数据稳定性。

图 7 概括了风云三号微波载荷历史数据再定标中主要的模型工作, 3 台微波载荷在各自辐射参考和再定标框架下完成历史数据再定标。

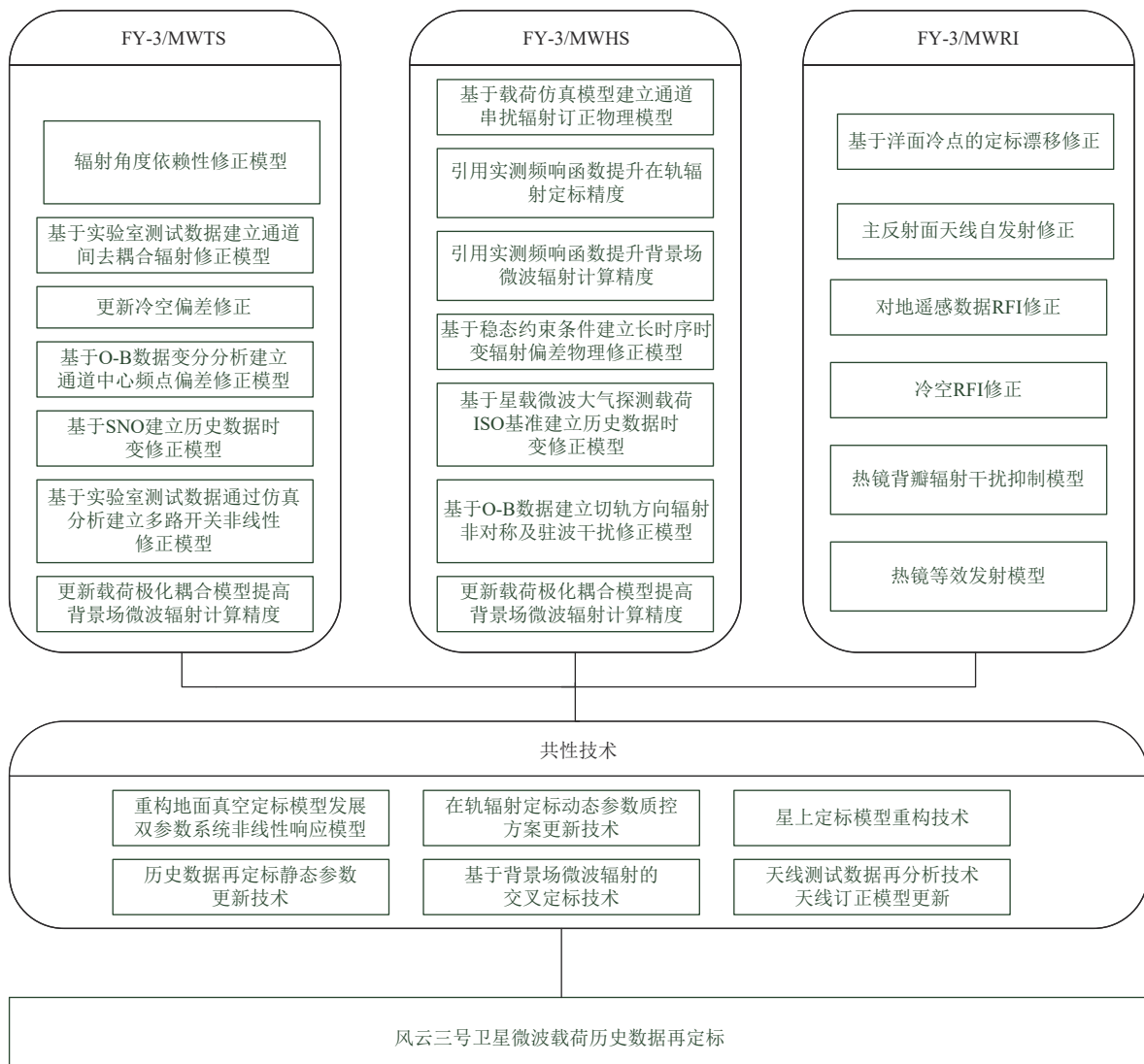


图 7 风云三号微波载荷历史数据再定标主要模型

Fig. 7 Main models of historical data re-calibration of FY-3 microwave loads

4.3 辐射参考及传递技术概况

辐射参考是风云三号卫星微波载荷历史数据再定标的基础，历史数据再分析表明，风云三号02批B星微波湿度计、C星微波成像仪和D星微波温度计在轨业务定标结果稳定（He 和 Chen，2019；Lawrence 等，2018；Bormann 等，2021），数据可用作风云三号历史数据再定标的风云参考，基于风云参考处理历史数据，可以得到辐射一致的风云三号微波载荷长时间序列历史数据。风云卫星载荷历史数据通过交叉定标可以将国际公认的高精度观测资料作为长时间历史数据参考，溯源传递。溯源过程中基于国家辐射参考数据，从多维度出发建立科学评价甄别规则，遴选可用于历史数据再定标的目标场，解决国产卫星微波载荷缺乏长时间历史辐射参考难题。辐射参考数据包括目前国际公认的高精度微波载荷历史数据（GMI /ATMS）和背景场微波辐射（背景场+微波辐射传输模型）等。目前国际公认最优的背景场资料包括ECMWF发布的数值预报再分析资料ERA5数据（Hersbach 等，2018）、WMO最新倡导建立的高空气候观测站数据（GRUAN）（Newman 等，2020）和GPS/RO数据（Hou 等，2019）等，这些

背景场辐射资料也被欧美同行用于建立微波历史数据再定标模型以及基础气候数据集的检验验证。ATMS历史数据再定标中，利用背景场微波辐射资料检验ATMS氧气吸收通道，结果表明其辐射不确定度小于0.14 K，用于大气湿度廓线探测的水汽吸收通道的辐射不确定性在1.5—2.5 K（Carminati 等，2021）；美国NOAA/STAR最近完成的SNPP和JPSS业务存档数据重处理中ATMS资料重处理后与AQUA/AMSU-A通道7对应通道间辐射偏差的长期变化趋势为0.003 K/a，达到了气候趋势研究对卫星探测数据0.004 K/a的稳定性要求（Zou 等，2020），因此ATMS是星载微波大气探测载荷最佳的在轨辐射参考，可以为风云三号微波大气探测载荷（MWTS/MWHS）历史数据再定标提供辐射参考。研究表明GMI在轨绝对定标精度在1- σ 约束条件下静稳洋面可以达到0.25 K，辐射定标结果长期稳定（Newell 等，2015；Draper 等，2016），这也为风云三号微波成像仪（MWRI）历史数据再定标提供了辐射参考。此外通用的微波基础气候数据SSMIS（S）FCDR和AMSUFCDR等，也为风云三号微波载荷历史数据在定标提供了辐射参考，表4汇集了各类辐射参考。

表4 风云三号微波载荷历史数据再定标辐射参考

Table 4 Radiometric reference for re-calibration of FY-3 microwave payloads historical data records

用途	微波窗区通道	微波吸收通道
辐射传递	参考载荷(GPM/GMI)	参考载荷(ATMS, AMSU-A, MHS)
		背景场微波辐射(ERA5+MWRTM ¹)
检验验证	基础气候数据集(SSMIS FCDR)	基础气候数据集(AMSU FCDR)
		背景场微波辐射(GRUAN, GNSS/RO+ MWRTM)

注：¹微波辐射传输模型。

历史数据再定标中微波辐射参考主要通过交叉定标技术实现传递（Colton 和 Poe，1999；Sapiano 等，2013；Chander 等，2013；Biswas 等，2013；Draper 等，2015）。美国NASA降水测量计划（GPM）中专门设立了XCAL交叉定标技术组，提出了较为完整的星载微波辐射辐射校准传递技术架构，在XCAL框架下实现了GPM时代所有在轨运行星载微波辐射计的辐射校准和传递，并发展了基于地气系统背景微波辐射的双偏差交叉传递技术（Berg，2016）。风云三号气象卫星自首发星FY-3A发射升空以来，各载荷均开展了交叉定标工作，大气探测载荷微波温/湿度计分别与美国和

欧洲业务卫星上装载的同类载荷进行了交叉比对（谷松岩 等，2013；郭杨 等，2014）；同时还利用交叉定标技术完成了冷空辐射偏差修正（谷松岩 等，2015），辐射的扫描角偏差订正等（官莉和陆文婧，2016）等。利用晴空大气辐射传输模拟技术可以建立FY-3/MWRI与AMSR-E之间不同观测角度的辐射关系，实现两个辐射计资料的融合应用（陈昊和金亚秋，2012）。此外在利用FY-3/MWRI桥接AMSR-E和ANSR-2数据时，还通过陆地区域双差交叉定标技术建立了以AMSR-E为参考的微波成像仪长时序亮温数据集（Du 等，2014）；并且通过FY-3B/MWRI与GCOM-W1/AMSR-2之

间的交叉定标，校准了FY-3B/MWRI升降轨亮温偏差，实现了两个微波辐射计数据的衔接（唐晓彤等，2020）。风云卫星历史数据再定标中，还基于微波波段条件稳定目标，通过外定标技术进行辐射参考的单点传递，保证历史数据的稳定性和一致性。

表4汇集了风云三号微波载荷历史数据再定标

辐射参考。在风云卫星微波载荷历史数据再定标研究中辐射参考传递采用基于微波辐射传输模型的稳定目标双偏差交叉传递技术（Zeng和Jiang，2020）。通过交叉传递使不同载荷的辐射参考得到统一，支撑风云微波资料FCDR数据集。图8为风云卫星微波载荷基于微波辐射传输模型的稳定目标双偏差交叉传递技术流程。

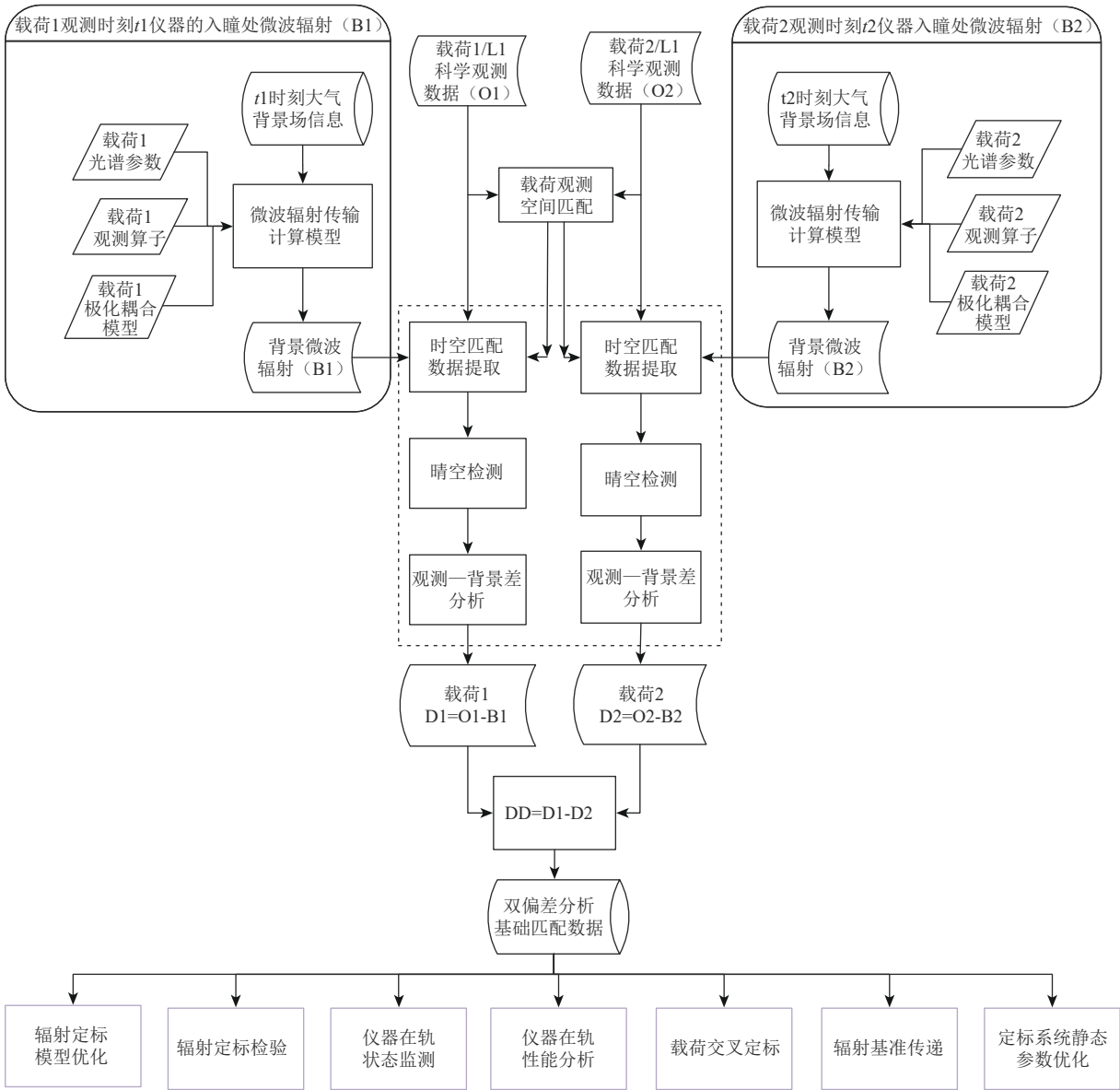


图8 基于稳定目标的双差交叉定标技术流程

Fig. 8 Technical flow of double difference cross-calibration for stable targets

4.4 再定标进展介绍

风云三号3台微波辐射计历史数据基于辐射参考和再定标模型完成历史数据重处理，目前已生成时间跨度10年的长时序L1科学数据集。从再定

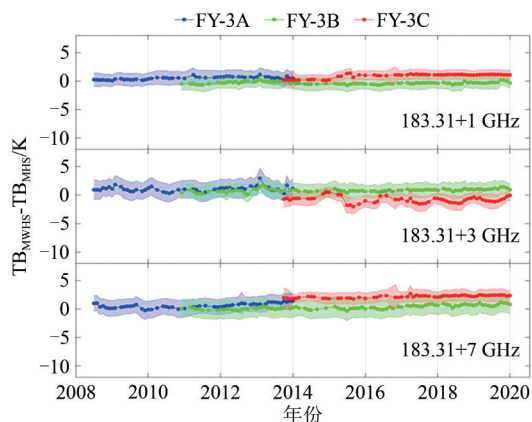
标结果与参考载荷匹配数据交叉比对结果来看（图9），10年间载荷在轨特殊工况对定标结果的影响基本得到修正。图9（a）是微波湿度计FY-3A/B/C 3颗星中心频点位于183.31 GHz的3个水汽吸

收通道再定标后与参考载荷 (METOP/MHS) 交叉比对结果的时间序列, 从图 9 (a) 中可见再定标后 3 颗星代际之间辐射取得了很好的一致性, 再定标后长时间序列数据的 RMSE 最优达到 0.80 K, 标准差为 0.20 K; 图 9 (b) 是微波温度计 FY-3A/B/C/D 4 颗卫星上装载的 4 台微波温度计仪器中心频点为 50.3 GHz 通道再定标后与参考载荷交叉比对结果的时间序列, 其中 FY-3A/B 的参考载荷为 METOP/AMSU-A, FY-3C/D 的参考载荷为 SNPP/ATMS, 从图中可见再定标后 4 颗星代际间辐射达到了很好的一致性, 再定标后长时间序列亮温数据均方根误差 RMSE 为 0.77 K, 标准差为 0.28 K; 图 9 (c) 是微波成像仪 FY-3B/C/D 3 颗星中心频点位于 23.8 GHz

的 V 极化通道再定标后与参考载荷 (GPM/GMI) 交叉比对结果的时间序列, 从图 9 中可见再定标后 3 颗星代际之间辐射一致, 再定标后长时间序列数据的 RMSE 最优达到 1.29 K, 标准差为 0.15 K (图 10)。均方根误差 RMSE 和标准差计算如式 (1) 和 (2)。再定标处理生成的风云三号微波载荷长时序 L1 科学数据集为后续生成风云三号微波载荷基础气候数据集 FCDR 奠定了基础。

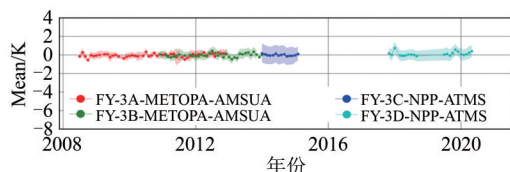
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\text{MWFY}_i - \text{REF}_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE}_{\text{std}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{RMSE}_i - \overline{\text{RMSE}})^2}{n-1}} \quad (2)$$



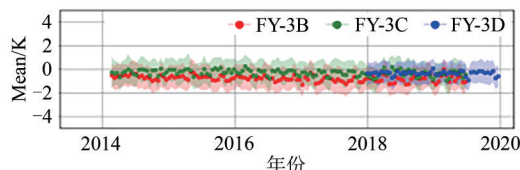
(a) 微波湿度计 (183 GHz 通道)

(a) MWHS (183 GHz)



(b) 微波温度计 (50.3 GHz)

(b) MWTS (50.3 GHz)

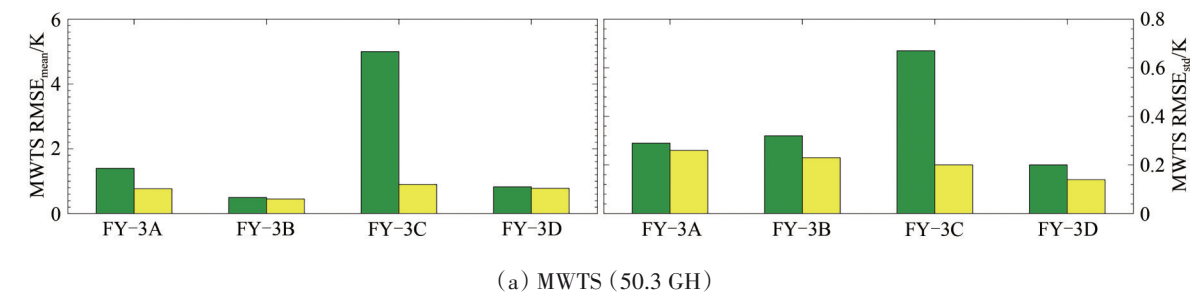


(c) 微波成像仪 (23.8 V GHz)

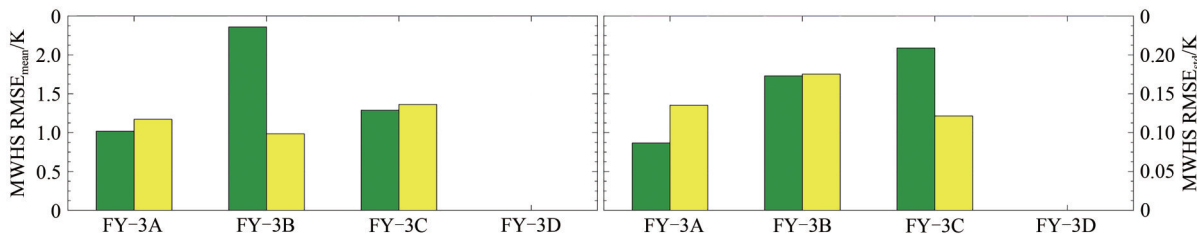
(c) MWRI (23.8 V GHz)

图 9 再定标结果与参考载荷交叉比对时间序列

Fig. 9 Cross alignment time series of recalibration results and reference loads



(a) MWTS (50.3 GHz)



(b) MWHS (1183.31±1 GHz)

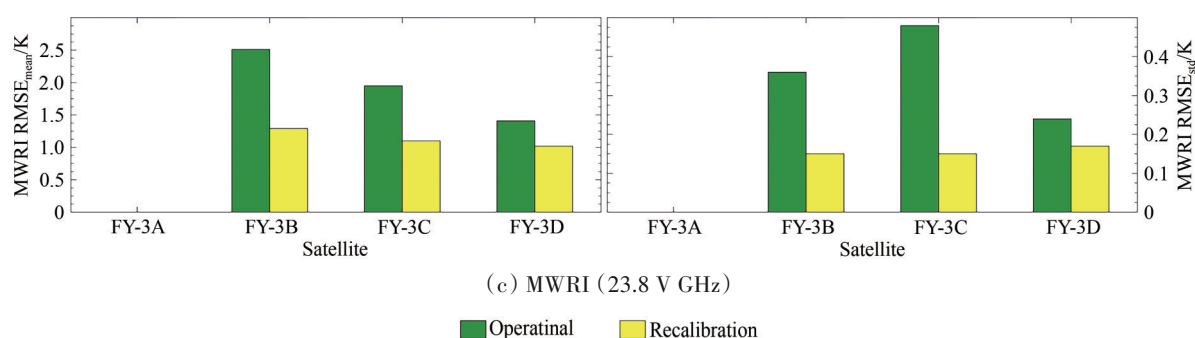


图 10 FY-3 微波载荷再定标 L1 科学数据结果分析

Fig. 10 Analysis of the results of science data of FY-3 microwave load recalibration L1

5 结 论

风云三号气象卫星微波载荷历史数据时间跨度超过 10 年的历史数据经再定标处理,修正了在轨寿命期内载荷特殊工况造成的辐射定标偏差,消除了多星代际间的辐射差异,生成了风云三号微波长时序 L1 科学数据集,经与国际同类载荷交叉比对表明二者之间具有非常好的辐射一致性,经与国际同类载荷交叉比对表明氧气吸收通道长时间序列亮温数据 RMSE 为 0.77 K,标准差为 0.28 K;水汽吸收通道再定标后长时间序列数据的 RMSE 最优达到 0.80 K,标准差为 0.20 K;窗区通道以 23.8 GHz 的 V 极化通道为例再定标后长时间序列数据的 RMSE 最优达到 1.29 K,标准差为 0.15 K;在定标后最大 RMSE 不超过 1.5 K。

通过风云三号微波载荷历史数据再定标加深了我们对国产卫星微波载荷技术状态的认识,提升了风云三号星载被动微波辐射计在轨辐射定标精度,同时也为未来发展风云卫星微波载荷辐射定标新技术提供了技术支撑。

后续将围绕风云三号微波载荷基础气候数据集建设进一步开展卫星轨道漂移的建模修正、大气热力结构日变化修正建模、科学数据的时空匹配投影等,最终将生成中国风云卫星微波载荷基础气候数据集 FCDR。风云三号卫星微波载荷历史数据再定标及其气候基础数据集不仅将支撑风云卫星微波资料的气候应用,也将支撑中国数值天气预报再分析,并且还将广泛应用于环境生态及灾害的遥感监测等。

参考文献 (References)

An D W, Gu S Y, Yang Z D and Chen W X. 2016. On-orbit radiometric

calibration for nonlinear of FY-3C MWTS. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 35(3): 317-321 (安大伟, 谷松岩, 杨忠东, 陈文新. 2016. FY-3C 微波温度计在轨辐射非线性定标新方法. *红外与毫米波学报*, 35(3): 317-321) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2016.03.011]

Berg W, Bilanow S, Chen R Y, Datta S, Draper D, Ebrahimi H, Farrar S, Jones W L, Kroodsma R, McKague D, Payne V, Wang J, Wilhelm T and Yang J X. 2016. Intercalibration of the GPM microwave radiometer constellation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(12): 2639-2654 [DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0100.1]

Berg W, Kroodsma R, Kummerow C D and McKague D S. 2018. Fundamental climate data records of microwave brightness temperatures. *Remote Sensing*, 10(8): 1306 [DOI: 10.3390/rs10081306]

Biswas S K, Farrar S, Gopalan K, Santos-Garcia A, Jones W L and Bilanow S. 2013. Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the global precipitation measurement mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1465-1477 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2217148]

Bormann N, Duncan D, English S, Healy S, Lonitz K, Chen K Y, Lawrence H and Lu Q F. 2021. Growing operational use of FY-3 data in the ECMWF system. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(8): 1285-1298 [DOI: 10.1007/s00376-020-0207-3]

Carminati F, Atkinson N, Candy B and Lu Q F. 2021. Insights into the microwave instruments onboard the Fengyun 3D satellite: Data quality and assimilation in the Met Office NWP system. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(8): 1379-1396 [DOI: 10.1007/s00376-020-0010-1]

Carminati F, Candy B, Bell W and Atkinson N. 2018. Assessment and assimilation of FY-3 humidity sounders and imager in the UK met office global model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35(8): 942-954 [DOI: 10.1007/s00376-018-7266-8]

Chander G, Hewison T J, Fox N, Wu X Q, Xiong X X and Blackwell W J. 2013. Overview of intercalibration of satellite instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1056-1080 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2228654]

Chen H and Jin Y Q. 2012. In-orbit intercalibration of FY-3B/MWRI and applications for monitoring drought and flooding. *Journal of*

- Remote Sensing, 16(5): 1024-1034 (陈昊, 金亚秋. 2012. FY-3B MWRI在轨辐射校准及其对旱涝灾害监测应用. 遥感学报, 16(5): 1024-1034) [DOI: 10.11834/jrs.20121299]
- Chen W X, Chi J D, Li Y M and Li H. 2013. Microwave temperature sounding (MWTS) for FY-3 meteorology satellite. Strategic Study of CAE, 15(7): 88-91 (陈文新, 迟吉东, 李延明, 李浩. 2013. 风云三号气象卫星微波温度计(MWTS). 中国工程科学, 15(7): 88-91) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.07.013]
- Colton M C and Poe G A. 1999. Intersensor Calibration of DMSP SSM/I's: F-8 to F-14, 1987 - 1997. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(1): 418-439 [DOI: 10.1109/36.739079]
- Dong K S, Xie X X, Li X and Liu W L. 2020. Nonlinear characteristics of FY-3D microwave radiation imager and an optimal calculation method. Journal of Remote Sensing, 24(3): 226-232 (董克松, 谢鑫新, 李雪, 刘伟亮. 2020. FY-3D微波成像仪非线性特征及计算方法优化. 遥感学报, 24(3): 226-232) [DOI: 10.11834/jrs.20208274]
- Draper D, Newell D and Wentz F. 2016. Global precipitation measurement microwave imager (GMI) on-orbit calibration//2016 14th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. Espoo: IEEE: 166-169 [DOI: 10.1109/MICRORAD.2016.7530527]
- Draper D W, Newell D A, Wentz F J, Krimchansky S and Skofronick-Jackson G M. 2015. The global precipitation measurement (GPM) microwave imager (GMI): instrument overview and early on-orbit performance. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(7): 3452-3462 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2403303]
- Du J Y, Kimball J S, Shi J C, Jones L A, Wu S L, Sun R J and Yang H. 2014. Inter-calibration of satellite passive microwave land observations from AMSR-E and AMSR2 using overlapping FY3B-MWRI sensor measurements. Remote Sensing, 6(9): 8594-8616 [DOI: 10.3390/rs6098594]
- Ferraro R, Meng H and NOAA CDR Program. 2018. NOAA climate data records (CDR) of AMSU-A/B and MHS hydrological properties, Version 1. Asheville: NOAA National Centers for Environmental Information [DOI: 10.7289/V5V69GM6]
- Ferraro R R, Weng F Z, Grody N C, Zhao L M, Meng H, Kongoli C, Pellegrino P, Qiu S and Dean C. 2005. NOAA operational hydrological products derived from the advanced microwave sounding unit. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(5): 1036-1049 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.843249]
- Grody N C, Vinnikov K Y, Goldberg M D, Sullivan J T and Tarpley J D. 2004. Calibration of multisatellite observations for climatic studies: microwave sounding unit (MSU). Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D24): D24104 [DOI: 10.1029/2004JD005079]
- Gu S Y, Guo Y, Dou F L, Wu Q and Lu N M. 2021. Radiometric calibration technology of microwave atmospheric sounders of FY-3 satellites. Remote Sensing Technology and Application, 36(1): 141-154 (谷松岩, 郭杨, 窦芳丽, 吴琼, 卢乃锰. 2021. 风云三号微波大气探测载荷辐射定标. 遥感技术与应用, 36(1): 141-154) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0141]
- Gu S Y, Wang Z Z, Li J, Zhang S W and Zhang L. 2013. FY-3A/MWHS data calibration and validation analysis. Strategic Study of CAE, 15(7): 92-100 (谷松岩, 王振占, 李靖, 张升伟, 张丽. 2013. FY-3A/MWHS在轨辐射定标及结果分析. 中国工程科学, 15(7): 92-100) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.07.014]
- Guan L and Lu W J. 2016. Scan correction scheme of FY-3A microwave atmospheric humidity sounder radiance for data assimilation. Transactions of Atmospheric Sciences, 39(3): 400-408 (官莉, 陆文婧. 2016. 风云三号卫星微波湿度计的扫描角偏差订正. 大气科学学报, 39(3): 400-408) [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130408002]
- Guan L, Zou X, Weng F and Li G. 2011. Assessments of FY-3A microwave humidity sounder measurements using NOAA-18 microwave humidity sounder. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D10): D10106 [DOI: 10.1029/2010JD015412]
- Guo Y, He J Y, Gu S Y and Lu N M. 2020. Calibration and validation of Feng Yun-3-D microwave humidity sounder II. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 17(11): 1846-1850 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2957403]
- Guo Y, Lu N M, Gu S Y, He J Y and Wang Z Z. 2014. Radiometric characteristics of FY-3C microwave humidity and temperature sounder. Journal of Applied Meteorological Science, 25(4): 436-444 (郭杨, 卢乃锰, 谷松岩, 何杰颖, 王振占. 2014. FY-3C微波湿温探测仪辐射测量特性. 应用气象学报, 25(4): 436-444)
- Guo Y, Lu N M, Qi C L, GU S Y and Xu J M. 2015. Calibration and validation of microwave humidity and temperature sounder on-board FY-3C satellite. Chinese Journal of Geophysics, 58(1): 20-31 (郭杨, 卢乃锰, 漆成莉, 谷松岩, 许健民. 2015. 风云三号C星微波湿温探测仪的定标和验证. 地球物理学报, 58(1): 20-31) [DOI: 10.6038/cjg20150103]
- Hans I, Burgdorf M, Buehler S A, Prange M, Lang T and John V O. 2019. An uncertainty quantified fundamental climate data record for microwave humidity sounders. Remote Sensing, 11(5): 548 [DOI: 10.3390/rs11050548]
- He J Y and Chen H N. 2019. Atmospheric retrievals and assessment for microwave observations from Chinese FY-3C satellite during hurricane Matthew. Remote Sensing, 11(8): 896 [DOI: 10.3390/rs11080896]
- Hersbach H, de Rosnay P, Bell B, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Alonso-Balmaseda M, Balsamo G, Bechtold P, Berrisford P, Bidlot J R, de Boissésion E, Bonavita M, Browne P, Buizza R, Dahlgren P, Dee D, Dragani R, Diamantakis M, Flemming J, Forbes R, Geer A J, Haiden T, Holm E, Haimberger L, Hogan R, Horanyi A, Janiskova M, Laloyaux P, Lopez P, Munoz-Sabater J, Peubey C, Radu R, Richardson D, Thépaut J N, Vitart F, Yang X, Zsoter E and Zuo H. 2018. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. ERA Report Se-

- ries 27 [DOI: 10.21957/tkic6g3wm]
- Hollinger J P, Peirce J L and Poe G A. 1990. SSM/I instrument evaluation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28 (5): 781-790 [DOI: 10.1109/36.58964]
- Hou X Y, Han Y, Hu X Q and Weng F Z. 2019. Verification of *Fengyun-3D* MWTS and MWHS calibration accuracy using GPS radio occultation data. *Journal of Meteorological Research*, 33(4): 695-704 [DOI: 10.1007/s13351-019-8208-9]
- Jin X, Chi J D, Hu T Y, Chen W X, Gu S Y and An D W. 2019. Research on stripe noise suppression of microwave temperature sounder on FY-3D satellite. *Infrared*, 40(12): 28-37 (金旭, 迟吉东, 胡泰洋, 陈文新, 谷松岩, 安大伟. 2019. 风云三号D星微波温度计条带噪声抑制研究. *红外*, 40(12): 28-37) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.12.005]
- Lang T, Buehler S A, Burgdorf M, Hans I and John V O. 2020. A new climate data record of upper-tropospheric humidity from microwave observations. *Scientific Data*, 7(1): 218 [DOI: 10.1038/s41597-020-0560-1]
- Lawrence H, Bormann N, Geer A J, Lu Q F and English S J. 2018. Evaluation and assimilation of the Microwave Sounder MWHS-2 onboard FY-3C in the ECMWF numerical weather prediction system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56 (6): 3333-3349 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2798292]
- Li J Y, Wang Z Z, Gu S Y and Zhang S W. 2019. Common Re-calibration technology for spaceborne microwave atmospheric humidity sounder. *Remote Sensing Technology and Application*, 34(6): 1212-1220 (李娇阳, 王振占, 谷松岩, 张升伟. 2019. 星载微波大气湿度探测仪再定标共性技术分析. *遥感技术与应用*, 34(6): 1212-1220) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1212]
- Liu G F, Wu S L, Chen W Y, Pan L and He J K. 2014. Calibration system and achievement of microwave radiation imager of FY-3 satellite. *Journal of Microwaves*, 30(S1): 576-579 (刘高峰, 武胜利, 陈卫英, 潘莉, 何嘉恺. 2014. FY-3 卫星微波成像仪定标系统及实现. *微波学报*, 30(S1): 576-579) [DOI: 10.14183/j.cnki.1005-6122.2014.s1.164]
- Lu Q F. 2011. Initial evaluation and assimilation of FY-3A atmospheric sounding data in the ECMWF System. *Science China Earth Sciences*, 54(10): 1453-1457 (陆其峰. 2011. 风云三号A星大气探测资料数据在欧洲中期天气预报中心的初步评价与同化研究. *中国科学: 地球科学*, 41(7): 890-894) [DOI: 10.1360/zd-2011-41-7-890]
- Mo T. 2002. Calibration of the advanced microwave sounding unit-A radiometers for NOAA-N and NOAA-N. NOAA Technical Report NESDIS 106
- Newell D, Draper D, Remund Q, Figgins D, Krimchansky S, Wentz F and Meissner T. 2015. GPM microwave imager (GMI) on-orbit performance and calibration results//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan: IEEE: 5158-5161 [DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326995]
- Newman S, Carminati F, Lawrence H, Bormann N, Salonen K and Bell W. 2020. Assessment of new satellite missions within the framework of numerical weather prediction. *Remote Sensing*, 12 (10): 1580 [DOI: 10.3390/rs12101580]
- Qiao M, Yang H, He J K and Lv L Q. 2012. On-orbit performance stability analysis of microwave radiometer imager onboard FY-3 Satellite. *Journal of Remote Sensing*, 16(6): 1246-1261 (乔木, 杨虎, 何嘉恺, 吕利清. 2012. 风云三号卫星微波成像仪在轨性能稳定性分析. *遥感学报*, 16(6): 1246-1261) [DOI: 10.11834/jrs.20121318]
- Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, Todling R, Bacmeister J, Liu E, Bosilovich M G, Schubert S D, Takacs L, Kim G K, Bloom S, Chen J Y, Collins D, Conaty A, da Silva A, Gu W, Joiner J, Koster R D, Lucchesi R, Molod A, Owens T, Pawson S, Pegion P, Redder C R, Reichle R, Robertson F R, Ruddick A G, Sienkiewicz M and Woollen J. 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24 (14): 3624-3648 [DOI: 10.1175/JCLI-D11-00015.1]
- Sapiano M R P, Berg W K, McKague D S and Kummerow C D. 2013. Toward an intercalibrated fundamental climate data record of the SSM/I sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1492-1503 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2206601]
- Solomon S, Qin D, Manning M, Marquis M, Averyt K, Tignor M M B and Miller Jr H L. 2007. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press
- Tang X T, Chen H H, Guan L and Li L L. 2020. Intercalibration of FY-3B/MWRI and GCOM-W1/AMSR-2 brightness temperature over the Arctic. *Journal of Remote Sensing*, 24(8): 1032-1044 (唐晓彤, 陈海花, 管磊, 李乐乐. 2020. FY-3B/MWRI 与 GCOM-W1/AMSR-2 亮温数据在北极地区的交叉定标. *遥感学报*, 24(8): 1032-1044) [DOI: 10.11834/jrs.20208436]
- Wang X, Ren Y F and Wu B. 2017. Absolute calibration of MWTS sounding channels using GPS RO data. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 40(1): 81-89 (王祥, 任义方, 吴彬. 2017. 用GPS资料对风云三号微波温度计资料进行绝对校准. *大气科学学报*, 40(1): 81-89) [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150312001]
- Wang Z Z, Zhang S W, Li J, Li Y and Wu Q. 2013. Thermal/vacuum calibration of microwave humidity sounder on FY-3B satellite. *Strategic Study of CAE*, 15(10): 33-46, 53 (王振占, 张升伟, 李靖, 李芸, 吴琼. 2013. FY-3B 卫星微波湿度计热真空定标方法和结果分析. *中国工程科学*, 15(10): 33-46, 53) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.10.005]
- Weng F, Zou X, Wang X, Yang S and Goldberg M D. 2012. Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for numerical weather prediction and tropical cyclone applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D19): D19112 [DOI: 10.1029/2012JD018144]
- Wu B H, Wang Y, Zou C Z, Li R, Liu S, Liu G S and Fu Y F. 2020. A fundamental climate data record derived from AMSR-E, MWRI,

- and AMSR2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(8): 5450-5461 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2966055]
- Xie X X, Dong K S, Yu W M, Meng W T and Gu S Y. 2021a. In-orbit calibration of FengYun-3C microwave radiation imager: nonlinearity correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(9): 7618-7626 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3034302]
- Xie X X, Meng W T, He J K, Yu W M and Li X. 2021b. In-orbit calibration uncertainty of the microwave radiation imager on board *FengYun-3C*. *Journal of Meteorological Research*, 35(6): 943-951 [DOI: 10.1007/s13351-021-0220-1]
- Xie X X, Wu S L, Xu H X, Yu W M, He J K and Gu S Y. 2019. Ascending-descending bias correction of microwave radiation imager on board FengYun-3C. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6): 3126-3134 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2881094]
- Yang H, Weng F Z, Lv L Q, Lu N M, Liu G F, Bai M, Qian Q Y, He J K and Xu H X. 2011. The FengYun-3 microwave radiation imager on-orbit verification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(11): 4552-4560 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2148200]
- Yang H, Zou X L, Li X Q and You R. 2012a. Environmental data records from FengYun-3B microwave radiation imager. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4986-4993 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2197003]
- Yang J, Zhang P, Lu N M, Yang Z D, Shi J M and Dong C H. 2012b. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond. *International Journal of Digital Earth*, 5(3): 251-265 [DOI: 10.1080/17538947.2012.658666]
- You R, Gu S Y, Guo Y, Wu X B, Yang H and Chen W X. 2012. Long-term calibration and accuracy assessment of the fengyun-3 microwave temperature sounder radiance measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4854-4859 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2200257]
- Zeng Z Q and Jiang G M. 2020. Intercalibration of FY-3C MWRI against GMI using the ocean microwave radiative transfer mode. *IEEE Access*, 8: 63320-63335 [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984090]
- Zhang M, Lu Q F, Gu S Y, Hu X Q and Wu S L. 2019. Analysis and correction of the difference between the ascending and descending orbits of the FY-3C microwave imager. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 841-849 (张森, 陆其峰, 谷松岩, 胡秀清, 武胜利. 2019. 风云三号C星微波成像仪升降轨偏差问题分析及订正. *遥感学报*, 23(5): 841-849) [DOI: 10.11834/jrs.20198235]
- Zhang P, Chen L, Xian D and Xu Z. 2018. Recent progress of Fengyun meteorology satellites. *Chinese Journal of Space Science*, 38(5): 788-796 [DOI: 10.11728/cjss2018.05.788]
- Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, Gu S Y, Yang L, Min M, Chen L, Xu N, Sun L, Bai W G, Ma G and Xian D. 2019. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(9): 1027-1045 [DOI: 10.1007/s00376-019-8215-x]
- Zou C Z, Gao M and Goldberg M D. 2009. Error structure and atmospheric temperature trends in observations from the microwave sounding unit. *Journal of Climate*, 22(7): 1661-1681 [DOI: 10.1175/2008JCLI2233.1]
- Zou C Z, Goldberg M D, Cheng Z H, Grody N C, Sullivan J T, Cao C Y and Tarpley D. 2006. Recalibration of microwave sounding unit for climate studies using simultaneous nadir overpasses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D19): D19114 [DOI: 10.1029/2005JD006798]
- Zou C Z, Goldberg M D and Hao X J. 2018. New generation of U.S. satellite microwave sounder achieves high radiometric stability performance for reliable climate change detection. *Science Advances*, 4(10): eaau0049 [DOI: 10.1126/sciadv.aau0049]
- Zou C Z and Qian H F. 2016. Stratospheric temperature climate data record from merged SSU and AMSU-A observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(9): 1967-1984 [DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0018.1]
- Zou C Z and Wang W H. 2010. Stability of the MSU-derived atmospheric temperature trend. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(11): 1960-1971 [DOI: 10.1175/2009JTECHA1333.1]
- Zou C Z and Wang W H. 2011. Intersatellite calibration of AMSU-A observations for weather and climate applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D23): D23113 [DOI: 10.1029/2011JD016205]
- Zou C Z, Zhou L H, Lin L, Sun N H, Chen Y, Flynn L E, Zhang B, Cao C Y, Iturbide-Sanchez F, Beck T, Yan B H, Kalluri S, Bai Y, Blonski S, Choi T, Divakarla M, Gu Y L, Hao X J, Li W, Liang D, Niu J G, Shao X, Strow L, Tobin D C, Tremblay D, Upreti S, Wang W H, Xu H, Yang H and Goldberg M D. 2020. The reprocessed Suomi NPP satellite observations. *Remote Sensing*, 12(18): 2891 [DOI: 10.3390/rs12182891]
- Zou X L, Chen X and Weng F Z. 2014. Polarization signature from the FengYun-3 microwave humidity sounder. *Frontiers of Earth Science*, 8(4): 625-633 [DOI: 10.1007/s11707-014-0479-y]
- Zou X L, Ma Y and Qin Z K. 2012. FengYun-3B Microwave Humidity Sounder (MWHS) data noise characterization and filtering using principle component analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4892-4902 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2202122]
- Zou X, Wang X, Weng F and Li G. 2011. Assessments of Chinese FengYun Microwave Temperature Sounder (MWTS) measurements for weather and climate applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(10): 1206-1227 [DOI: 10.1175/JTECH-D-11-00023.1]
- Zou X L. 2021. Studies of FY-3 observations over the past 10 years: a review. *Remote Sensing*, 13(4): 673 [DOI: 10.3390/rs13040673]

Recalibration of the FY-3 microwave payload historical data records

GU Songyan^{1,2,3}, GOU Yang^{1,2,3}, XIE Xinxin⁴, HE Jieying⁵, DOU Fangli^{1,2,3}, WU Qiong^{1,2,3},
WANG Zhenzhan⁵, ZHANG Shengwei⁵, AN Dawei^{1,2,3}, WU Shengli^{1,2,3}, ZHANG Peng^{1,2,3}

1. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
3. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;
4. Institute of Atmospheric Science, Zhong Shan University, Zhuhai 519082, China;
5. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: This study focuses on the latest recalibration results of the historical data of domestic satellite microwave payload, which is a national key research and development plan, to apply the long-time passive microwave historical data from Chinese satellites to the study of climate and climate change. Chinese Feng Yun 3 series satellites (FY-3) have accumulated historical microwave remote sensing data of microwave radiometer imager (MWRI), microwave temperature sounder (MTWS), and microwave humidity sounder (MWHs) for more than 13 years from May 27, 2008. We have also completed the launch and operation of four satellites in two batches. During this period, the microwave payload data of FY-3 satellite played an active role in disaster prevention and mitigation and numerical weather forecast assimilation.

Based on the review of the international satellite borne microwave radiometer historical data recalibration technology, the characteristics of the microwave load of FY-3 satellite is introduced, the common technologies of operational radiation calibration and historical data recalibration are summarized, and the microwave load of the FY-3 satellite that passes through the entire link radiation transfer simulation of the instrument system is expounded. After constructing the radiation correction model under special conditions in orbit, the technical route of rescaling historical data to eliminate the radiation difference between generations based on the international reference load, the basic operational status of the FY-3 microwave payload in orbit, and the research results of historical data recalibration are introduced.

The long-time sequence L1 scientific dataset of FY-3 microwave generated by recalibration is cross compared with similar international loads. Results show that the RMSE of long-time series brightness temperature data of oxygen absorption channel is 0.77 k, and the standard deviation is 0.28 k. After rescaling the water vapor absorption channel, the optimal RMSE of the long-time series data is 0.80 k, and the standard deviation is 0.20 k. In the window channel, considering the 23.8 ghz V polarization channel as an example, the RMSE of the long-time series data after re calibration is the best up to 1.29 k, and the standard deviation is 0.15k. After calibration, the maximum RMSE shall not exceed 1.5 k. Conclusion The microwave load of the FY-3 satellite has very good radiation consistency with the reference load. The recalibration results of the historical data of the FY-3 satellite microwave load provide basic support for the subsequent establishment of the FY-3 satellite microwave load basic climate data set (FCDR), Climate Data Set (CDR), and climate variable data set (ECV).

Key words: FY-3 meteorological satellite, microwave atmosphere detector, Microwave Imager, historical data re calibration, cross calibration

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504902, 2018YFB0504900); National Natural Science Foundation of China (No. 41775020, 42005105)