0254-6124/2023/43(6)-0986-30 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Zhenzhan, WANG Wenyu, TONG Xiaolin, ZHANG Zhou, LIU Jingyi, LU Hao, DING Jia, WU Yanting. Progress in Spaceborne Passive Microwave Remote Sensing Technology and Its Application (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 986–1015. DOI:10.11728/cjss2023.06.yg15

星载被动微波遥感技术及其应用进展

王振占[1] 王文煜[1] 佟晓林[1] 张 洲[1,2]
刘璟怡[1] 陆 浩[1] 丁 甲[1,2] 吴延婷[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘 要 星载被动微波遥感是指利用高灵敏度接收机通过接收场景和目标的自然微波辐射来提取目标信息的一种遥感手段。被动微波遥感又称微波辐射计遥感。人类利用微波辐射计从空间进行对地遥感已有 50 多年的历史。目前，星载微波辐射计已经成为气象和海洋卫星的主载荷，在数值天气预报、海洋环境监测和全球变化研究中发挥着越来越重要的作用。本文分析了国内外星载被动微波遥感技术与应用进展，以及被动微波遥感技术发展趋势及其关键技术问题，针对中国星载被动微波遥感的定量化应用，在数据与数据处理流程，算法标准化、亮温和反演参数的定标/检验标准化等方面提出了一些思考和建议，以期望被动微波遥感数据被越来越广泛地得到应用，最大限度地提升星载地球被动微波遥感技术的应用效能。

关键词 星载被动微波遥感，微波辐射计，发展历史，技术进展，定量应用，标准化

中图分类号 TP722.6

Progress in Spaceborne Passive Microwave Remote Sensing Technology and Its Application

WANG Zhenzhan[1] WANG Wenyu[1] TONG Xiaolin[1] ZHANG Zhou[1,2]
LIU Jingyi[1] LU Hao[1] DING Jia[1,2] WU Yanting[1,2]

1(*Key Laboratory of Microwave Remote Sensing*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*School of Electronic*, *Electrical and Communication Engineering*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

Abstract Spaceborne passive microwave sensor is a kind of remote sensing that uses high-sensitivity receivers to detect natural microwave radiation from scenes and targets. Passive microwave remote sensor also refers to microwave radiometer. Microwave radiometers have been used for remote sensing of the Earth from space for more than fifty years. At present, microwave radiometers have become the main

2023-10-18 收到原稿，2023-10-30 收到修定稿

E-mail：wangzhenzhan@mirslab.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

payload of meteorological and oceanographic satellites, playing an important role in numerical weather prediction, marine environment monitoring and global climate change research. This article analyzes and summarizes the following points. Firstly, passive microwave remote sensing technology and its application development. Secondly, the development trend of passive microwave remote sensing technology and its key technical issues. Thirdly, for the quantitative application of passive microwave remote sensing in China, some thoughts and suggestions are put forward in terms of product and data processing procedures, as well as standardization on algorithm for deriving different level products, calibration/validation of brightness temperature and geophysical parameters. The contents of this article aim at promoting much wider application of passive microwave remote sensing data and maximizing the application efficiency of passive microwave remote sensing technology.

Key words Spaceborne passive microwave remote sensing, Microwave radiometer, Development history, Technology progress, Quantitative application, Standardization

0 引言

微波遥感按照是否发射微波信号一般可以分为两类: 主动微波遥感和被动微波遥感。主动微波遥感又称雷达遥感, 其是通过接收遥感器发射的电磁波信号来实现目标探测的一种手段。主动微波遥感主要包括微波高度计、微波散射计和合成孔径雷达(SAR)三种类型的遥感器[1], 也包括通常使用的降雨雷达。

被动微波遥感又称微波辐射计遥感, 是指直接接收目标的自然微波辐射来提取目标信息的一种遥感手段。被动微波遥感按频谱特性可以分为两类[1]: 探测仪和成像仪。探测仪是指工作在气体分子的微波谐振频率上或者附近的微波辐射计。探测仪通常选择在氧气、水汽吸收带, 用于提取大气参数, 主要是大气温度、湿度廓线的垂直廓线, 因此是气象卫星的主要遥感器; 成像仪一般选择在大气窗区频率(远离大气水汽、氧气等主要气体吸收峰的频率)的微波辐射计, 主要用于遥感具有宽广频谱特性的地物目标, 例如海面的温度、盐度、风场、海冰等。

微波辐射计用于观测目标的微波热辐射信号。这种辐射信号与被测表面或物体的物理温度及介电特性有关, 同时受到大气相互作用的调制。自然表面的微波散射与表面介电特性和粗糙度相关, 通过合理设计遥感器, 就可以获得关于表面粗糙度和介电特性的信息。微波可以穿透云, 也可以在一定程度上透过雨, 而且不依赖于太阳光源, 这样几乎可以全天候、全天时工作。云和雨可以减弱来自表面的辐射, 这个衰减可以提供云和雨的观测信号, 用于获得大气一些关键参数(例如大气水汽和液水含量、云中水滴尺寸分布特征、雨强等)的信息。

微波波段获得的信息与光学或红外波段获得的信息是完全不同的。微波能够比光学更深入地穿透植被和土壤。频率越低, 探测深度越深。因此通过微波遥感获得的特性参数是通过光学和红外遥感器获得信息的补充, 有利于对于表面几何、介电特性、分子共振特性等方面的研究。另外在较长微波波长, 微波辐射计可以透过云层观测地球表面, 特别是在极区, 而这用光学手段几乎是不可能的。这样微波遥感就成为一种与其他遥感方式不同的、而且唯一的探测地球环境的技术手段[1]。

由于微波辐射计没有发射机, 因此其消耗功率较低。微波辐射计与雷达相比, 可以在更广的频率范围使用。由于受限于真实孔径的天线, 微波辐射计出现了一种新体制的成像仪——综合孔径辐射计, 其可以用于对地遥感和射电观测, 已经逐渐得到广泛应用。

星载微波辐射计根据观测方式可以分为两大类[2]: 对地观测与临边观测。图 1 给出了星载微波辐射计接收辐亮度 B 的观测示例[2]。临边观测是指天线从地球大气底部沿着切线方向线上扫描或者从大气顶部扫描到大气底部的观测方式, 其观测目标是大气, 观测背景是宇宙空间(图 1 中最上一条线)。对地观测是指对地球表面和大气的观测, 其观测目标是地球及其大气系统, 观测背景是地球表面的海洋或陆地(图 1 中倾斜实线和虚线)。

通常按照观测方式(扫描方式)可以将微波辐射计分为三类:圆锥扫描辐射计(也称微波成像仪)、交轨扫描微波辐射计(也称微波探测仪)和不扫描辐射计。交轨扫描是指天线在垂直于卫星前进方向扫描,如图 2(a)所示[1]。圆锥扫描是天线以固定入射角(通常在 50°～55°)通过围绕竖直轴旋转来实现连续扫描,如图 2(b)所示[3](AMSR 扫描几何示例)。前两类辐射计是为了实现大范围全球覆盖而使用的观测方式。不扫描辐射计主要是为了特殊需要或者不适合使用扫描观测的卫星平台(转动惯量、空间和功耗等条件限制)而设计的一类微波辐射计,例如为星载雷达高度计提供大气路径延迟校正的校正辐射计是不需要扫描的(例如 HY-2 系列卫星搭载的校正辐射计等)[4],或者是由于某种限制使得卫星不能承受扫描带来的问题,例如载荷天线口径过大,无法适应安装需求等,例如 SMOS[5,6],或者是通过推帚式观测实现宽幅遥感的辐射计,例如 Auaroius 盐度计[7]。

星载被动微波遥感的发展已经有 50 多年的历史。1968 年苏联发射的 Cosmos-243 号卫星安装了 4 通道微波辐射计(3.5, 8.8, 22.2 和 37 GHz);美国 1972 年发射的 Nimbus-5 卫星,安装了 6 通道电扫描微波辐射计 NEMS (19.35, 22.2, 31.4, 53.6, 54.9, 58.8 GHz);1975 年发射的 Nimbus-6 卫星上搭载扫描微波谱仪(SCAMS)和电子扫描微波辐射计(EMSR)[1]。1978 年是海洋遥感领域的重要年份,在这一年同时开启了海洋卫星和气象卫星的被动微波遥感的应用。首先,海洋遥感由实验阶段转入业务应用阶段,其主要标志是在该年美国 NASA 发射了 2 颗具有

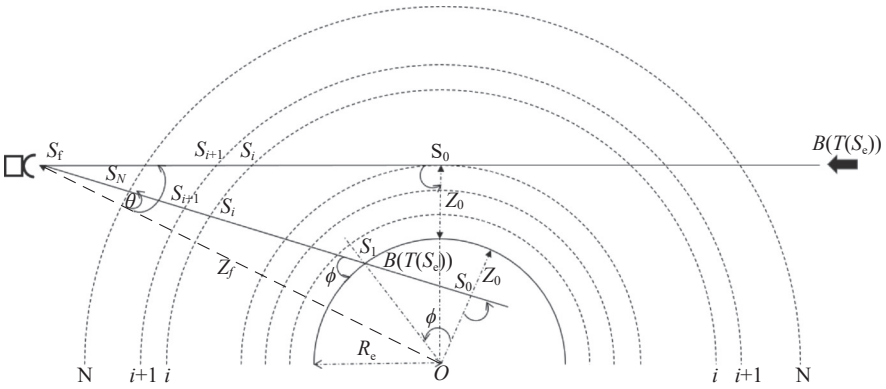


图 1 空间微波辐射计两种不同的观测几何示例

Fig. 1 Two different observation geometries for spaceborne microwave radiometers

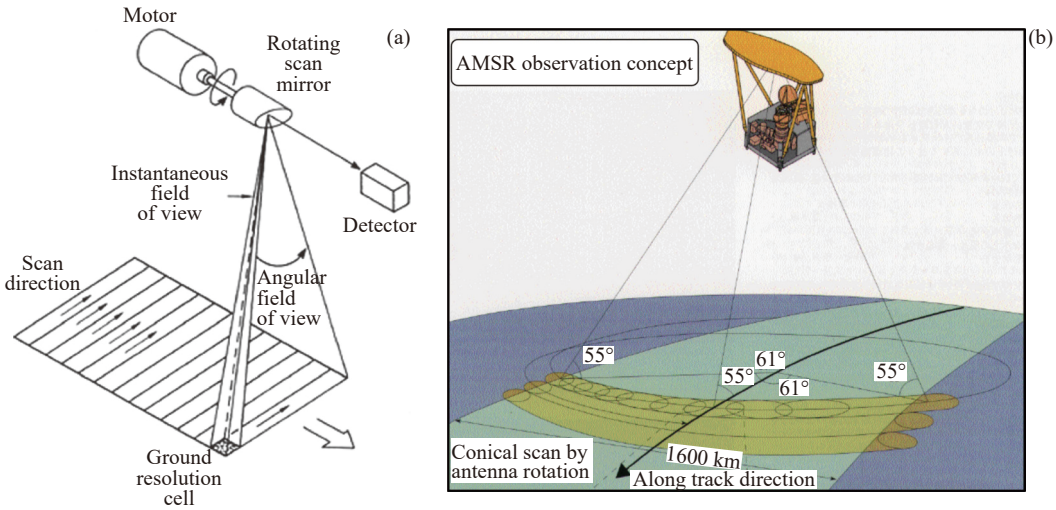


图 2 星载微波辐射计的扫描模式。(a)交轨扫描,(b)圆锥扫描

Fig. 2 Scanning modes of spaceborne microwave radiometer. (a) Cross-scanning, (b) conical scanning of AMSR

划时代意义的遥感卫星[8]。一个是雨云 7 号(Nimbus-7),上面搭载了 8 个被动式遥感器,覆盖了从微波、红外、可见光到紫外波段;另外一个是海洋卫星(SEASAT)。SEASAT 的发射是微波海洋遥感发展的里程碑,其第一次把微波辐射计、微波散射计、雷达高度计和合成孔径雷达结合在一起,全方位反演海洋的地球物理参数。两颗卫星上均携带了扫描式多通道微波辐射计(SMMR),其工作频率为 6.63, 10.69, 18.0, 21.0, 37.0 GHz。这种多通道、双极化的体制扩大了微波辐射计的应用范围,适合于大气、海洋和陆地遥感,可以用来测量大气水汽、液态水、海水温度和海冰类型等参数[9]。其次,1978 年美国发射了 TIROS-N 极轨气象卫星搭载的微波探测仪(MSU),包含 50.3, 53.7, 55.09, 57.6 GHz 四个频段的氧气吸收频段,用于大气温度探测,开启了微波探测仪大气遥感的正式进程[10]。随后在大气温度探测的基础上,增加了大气湿度廓线探测,进入了 AMSU 阶段,其包括先进的大气温度微波探测仪 AMSU-A[11–14],以及大气湿度探测仪 AMSU-B[15] 和微波湿度计 MHS[16],从而大气温度和湿度廓线真正成为数值天气预报的重要数据来源之一。

中国微波辐射计的研究起步较晚,但近年来发展比较迅速。2002 年 12 月 30 日,中国科学院国家空间科学中心研制的多模态微波遥感器(M^3 RS)随神舟四号飞船成功发射,这是中国第一台进入太空的微波遥感器,包括高度计、散射计和辐射计三个模态,其中辐射计为 5 频段、双极化的微波辐射计[17],开启了中国卫星微波遥感的先河,为后续海洋卫星、风云卫星微波辐射计技术的发展打下了基础。此后,中国分别于 2008 年和 2010 年成功发射第二代极轨气象卫星风云三号 01 批的 A 星和 B 星,其上有三个微波有效载荷:微波湿度计、微波温度计和微波成像仪[18],实现了 FY-3 上下午双星同时在轨运行的格局。2011 年成功发射第一颗海洋动力环境探测卫星——海洋二号 A 星(HY-2A),载有两台微波辐射计,其中一台微波成像仪的工作频率是 6.6, 10.7, 18.7, 23.8 和 37 GHz,主要用于海面温度和海冰的探测,另一台为大气校正微波辐射计,频率 18.7, 23.8 和 37 GHz,主要用于雷达高度计大气路径延迟校正[19]。HY-2B 卫星于 2018 年 10 月 25 日成功发射,该星将与后续发射的海洋二号 C 星(HY-2C, 2020 年 9 月发射)和海洋二号 D 星(HY-2D, 2021 年 5 月发射)组成中国首个海洋动力环境卫星星座[20,21]。根据 MWO 的被动微波载荷的相关信息[22],可以看出,1973−2023 年这 50 年,已经发射或者列入计划即将发射的、用于对地观测的星载被动微波遥感器有 70 多种,分别搭载在大约 140 余颗卫星上。中国的卫星主要来自风云三号卫星和海洋二号卫星,其中风云卫星被动微波载荷有 8 种[18],海洋卫星被动微波载荷的种类有 2 种[20]。

据不完全统计,这 50 年期间已经或者即将发射的星载圆锥扫描辐射计有 30 种,交轨扫描的辐射计 25 种,不扫描辐射计 18 种。本文在分析三类被动微波遥感技术整体发展的基础上,分别归纳各类微波辐射计的发展脉络和应用方向,通过比较国内外相应辐射计的关键技术参数,突出不同类型微波辐射计技术特点与应用需求,提出了空间微波辐射计应用的关键问题和发展趋势。

1 星载微波辐射计遥感技术的主要进展

1.1 交轨扫描微波辐射计

交轨扫描微波辐射计主要用于气象卫星上进行大气温度和湿度廓线的探测。为了更好地同步获取大气温湿度廓线,一般需要辅助探测表面背景参数。这类辐射计通常使用较小口径的天线,在垂直于卫星前进方面进行交轨扫描,因此相对于圆锥扫描辐射计通常体积较小,容易安装在卫星对地面,实现对地球表面和大气观测及定标。定标在每个扫描周期内进行,通过观测定标黑体和冷空实现全路径定标。这种定标方式是交轨扫描的优势,因为定标是全路径定标,包含了接收机和天线的一体化定标,劣势在于交轨扫描的入射角随着扫描位置在改变,不同扫描角的地面像元大小是变化的,因此空间分辨率在天底点两侧逐渐变差。另外为了减小转动惯量,通常接收机及天线馈源是不随反射面同时旋转的,造成接收到的辐亮度的极化是混合的,随着扫描角的变化而变化[23,24]。但是对于位于吸收峰附近的探测通道来讲,正交极化亮温差很小,因此这对于探测通道的影响很小,对于窗区通道影响较大。

业务化微波探测仪对地遥感开始于 1978 年美国极轨气象卫星(TIROS-N)上载的微波探测仪

(MSU[10]),并在随后 NOAA-14 以前的 9 颗卫星上都搭载了该设备,获得了大量的观测数据(见表 1)。在 1987 年美国发射的国防气象卫星(DMSP)搭载了特种微波大气垂直探测仪(SSM/T),工作频率为 50～60 GHz,使得气象卫星微波遥感仪器有了长足的进步,并在军事气象保障、天气预报、强对流监测和洪涝灾害监测等方面发挥了很大的作用[25]。从 1998 年开始的 NOAA-15 卫星上,用 20 个通道的先进微波探测仪(AMSU,包含 15 通道的 AMSU-A 和 5 通道的 AMSU-B)取代了 MSU,并在 NOAA-16～19 上连续应用,一直工作到 NOAA-20 才开始新一代微波大气探测仪 AMTS[23]。目前,NOAA-18 和 19 的 AMSU 仍然在轨工作。此外,2000 年发射的 EOS-PM 卫星(Aqua)除了装有 AMSR-E, AMSU 外,还搭载一个为巴西研制的大气探测器(MHS),工作频率类似 AMSU-B[26]。JPSS 是美国新一代极轨业务环境卫星系统, 2011 年发射第一颗星 SNPP,其是在国家极轨业务环境卫星系统(NPOESS)的基础上改建的[23]。JPSS 卫星计划的执行时间为 2011－2038 年,还包括另外 4 颗卫星系列: NOAA20, JPSS-2, JPSS-3, JPSS-4。这 5 颗卫星上都携带一台先进大气微波探测仪(ATMS),共有 22 个通道,频率范围从 23.8 到 183 GHz,合并原 AMSU-A, B 两个载荷为一体,并增加了 2 个通道,几乎涵盖了现在所有现在星上运行的大气探测通道,用来实现近全天候的大气温度、湿度廓线测量,还可以测量降水,进一步提升了业务天气预报和气候应用的水平[22,27]。

欧空局 ESA 于 2006 年发射的 Metop 系列卫星是 Envisat 的后继卫星。Metop 系列全称是业务气象卫星,包括三颗卫星: Metop-A, Metop-B 和 Metop-C,分别于 2006, 2012 和 2018 年发射。这个系列卫星上都搭载了两个微波载荷: 一个载荷是延续载荷 AMSU-A,另外一个是微波湿度计(MHS),包括 89, 157, 183±1, 183±3 和 190.31 GHz 五个通道[28]。

表 1 美国、欧洲和中国的典型大气微波探测仪的比较

Table 1 Comparison of typical atmospheric microwave sounders in the United States, Europe and China

名称/国家或地区	通道数量	中心频率/GHz	观测范围(刈幅)/km
微波探测仪(MSU)美国	4	50.30, 53.74, 54.96, 57.95	2350
特种微波温度计(SSM/T)美国	7	50.50, 53.20, 54.35, 54.90, 58.40, 58.825, 59.40	1500
特种微波湿度计(SSM/T-2)美国	5	91.655 ± 1.250, 150.0 ± 1.250, 183.31 ± 7.0, 183.31 ± 3.0, 183.31 ± 1.0	1500
先进微波探测仪-A(AMSU-A)美国	15	23.800, 31.400, 50.300, 52.800, 53.596 ± 0.115, 54.400, 54.940, 55.500, f_0 = 57.290344, f_0 ± 0.217, f_0 ± 0.3222 ± 0.048, f_0 ± 0.3222 ± 0.022, f_0 ± 0.3222 ± 0.010, f_0 ± 0.3222 ± 0.0045, 89.000	2250
先进微波探测仪-B(AMSU-B)美国	5	89.0, 150, 183.31 ± 1.00, 183.31 ± 3.00, 190.31 ± 7.00	2250
微波湿度计(MHS)欧洲	5	89, 157, 183.31±3, 183.31±1, 190.311	2180
微波温度计-1(MWTS-1)中国	4	50.30, 53.596 ± 0.115, 54.94, 57.290	2200
微波湿度计-1(MWHS-1)中国	5	150 QV, 150 QH, 183.31 ± 7.0, 183.31 ± 3.0, 183.31 ± 1.0	2700
先进微波探测仪(ATMS)美国	22	23.800, 31.400, 50.300, 51.760, 52.800, 53.596 ± 0.115, 54.400, 54.940, 55.500, f_0 = 57.290344, f_0 ± 0.217, f_0 ± 0.3222 ± 0.048, f_0 ± 0.3222 ± 0.022, f_0 ± 0.3222 ± 0.010, f_0 ± 0.3222 ± 0.0045, 88.2, 165.5, 183.31 ± 7.0, 183.31 ± 4.5, 183.31 ± 3.0, 183.31 ± 1.8, 183.31 ± 1.0	2200
微波温度计-2(MWTS-2)中国	13	与ATMS的50～58 GHz的通道相同	2250
微波湿度计-2(MWHS-2)中国	15	89, 118.75±5.0, 118.75±3.0, 118.75±2.5, 118.75±1.1, 118.75±0.8, 118.75±0.3, 118.75±0.2, 118.75±0.08, 150/ 166 (C, D 星 150 GHz, E 星以后 166 GHz), 183±7, 183±4.5, 183±3, 183±1.8, 183±1	2700
微波温度计-3(MWTS-3)中国	17	与 AMTS 的 23.8, 31.4 和 50～58 GHz 通道相同, 此外增加了 53.246 ± 0.08 和 53.948 ± 0.081 通道	2700
微波探测仪(MWS)欧洲	24	17个MWTS-3通道, 7个MWHS-2通道(除了118 GHz的8个通道)和229.0通道	2300

中国风云三号 01 批包括 FY-3A 和 3B 星。FY-3A 星于 2008 年成功发射,其上装载微波温度计-1 和微波湿度计-1。风云三号 02 批包括 FY-3C 和 3D 星,星载大气探测系统进一步发展升级为由二代微波温度计(MWTS-2)、二代微波湿度计(MWHS-2)。风云三号 03 批包括 4 颗卫星,微波温度计升级为(MWTS-3)。微波湿度计的 150 GHz 更改为 166 GHz,其他通道没有改变,因此代号仍为 MWHS-2,但是由于系统全部采用低噪声技术,其灵敏度已经大幅度提升[18]。表 1 比较了美国、欧洲和中国几台典型大气微波探测仪的技术参数。图 3 给出了 FY-3 卫星效果和微波湿度计 MWHS-2。

欧洲下一代极轨气象卫星系列为 Metop-SG,包括 A 系列和 B 系列[28]。其中 Metop-SG-A 卫星系列有三颗,分别是 Metop-SG-A1, Metop-SG-A2 和 Metop-SG-A3, Metop-SG-B 系列有三颗微波遥感卫星,分别是 Metop-SG-B1, Metop-SG-B2 和 Metop-SG-B3[22,29]。在 Metop-SG-A 系列卫星上,都包括一台微波探测仪(MWS)(见表 1)。MWS 包括 24 个通道,频率从 23～229 GHz,覆盖 50～60 GHz 的氧气吸收峰和 183 GHz 的水汽吸收峰[22,30]。

除上述极轨气象卫星的进展外,静止轨道由于其优秀的重复观测能力,被动微波遥感技术的应用也越来越受到重视。由于静止轨道气象卫星轨道比较高,要获得一定的空间分辨率,必须采用较高频段或者较大口径天线来实现。中国在 2016 年底发射的 FY-4 A 星上搭载了一台辐射计覆盖到太赫兹频段(183, 425 GHz),实现静止轨道被动微波载荷首次试验验证。2018 年静止轨道大气微波探测仪(GIMS)完成测试验收,为静止轨道大气微波探测奠定坚实技术基础[31]。图 4 给出的是 GIMS 地面样机及其亮温成像效果。GIMS 工作于 50～56 GHz 和 183 GHz,用于静止轨道大气温度和湿度垂直分布探测。GIMS 采用 70 个天线单元的组成的稀疏圆环天线阵列,圆环匀速自旋实现空间频率域采样[29],最长基线超过 3.5 m,以实现优于 50 km 的空间分辨率。目前中国正在进行静止轨道微波遥感卫星的型号研制,预计两到三年内首颗星将完成发射,到那时中国将实现静止轨道业务化被动微波载荷零的突破。

1.2 圆锥扫描辐射计

1.2.1 气象卫星微波成像仪

微波成像仪在气象卫星和海洋卫星上的技术特点不同。气象卫星成像仪的最低频率通常在 K 波段,后来逐渐降低到 X 波段。而海洋卫星的微波成像仪通常最低频率为 C 波段,用来实现海面温度等参数的高精度观测。下面分别对两类成像仪进行分析。

气象卫星的微波成像仪的真正发展开始于 1987 年美国发射的国防气象卫星(DMSP-F08)特种微波成像仪(SSMI),用来遥感地球表面和大气参数。SSMI 采用偏置抛物面加多馈源一体化圆锥扫描、冷空和外部黑体定标的技术体制[32],这是世界上第一台采用这种扫描方式的星载微波辐射计(见表 2)。此后 12 年期间(1987－1999 年)陆续发射 6 颗(F10～F15 卫星)载有这个载荷的卫星。从 2003 年开始的 DMSP-F16～F19 卫星上,成功运行了新一代综合微波成像探测仪(SSMIS),增加了大气温度和湿度综合探测能力[33],这是世界上首台集微波成像和探测于一体的圆锥扫描微波辐射计。

1997 年 11 月日本同美国合作在热带降雨卫星(TRMM)上搭载了微波成像仪(TMI),该成像仪是一台先进的全功率微波辐射计,用于测量热带和亚热带的降水和能量交换[34]。TMI 是在 SSMI 基础上发展

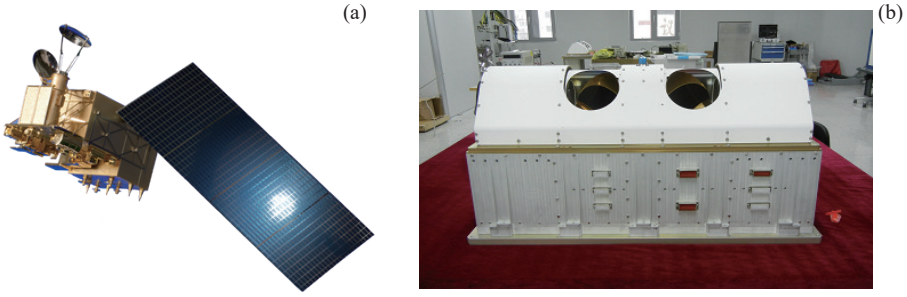


图 3 FY-3C 卫星效果(a)与微波湿度计 MWHS-2(b)

Fig. 3 FY-3C satellite (a) and MWHS-2 (b)

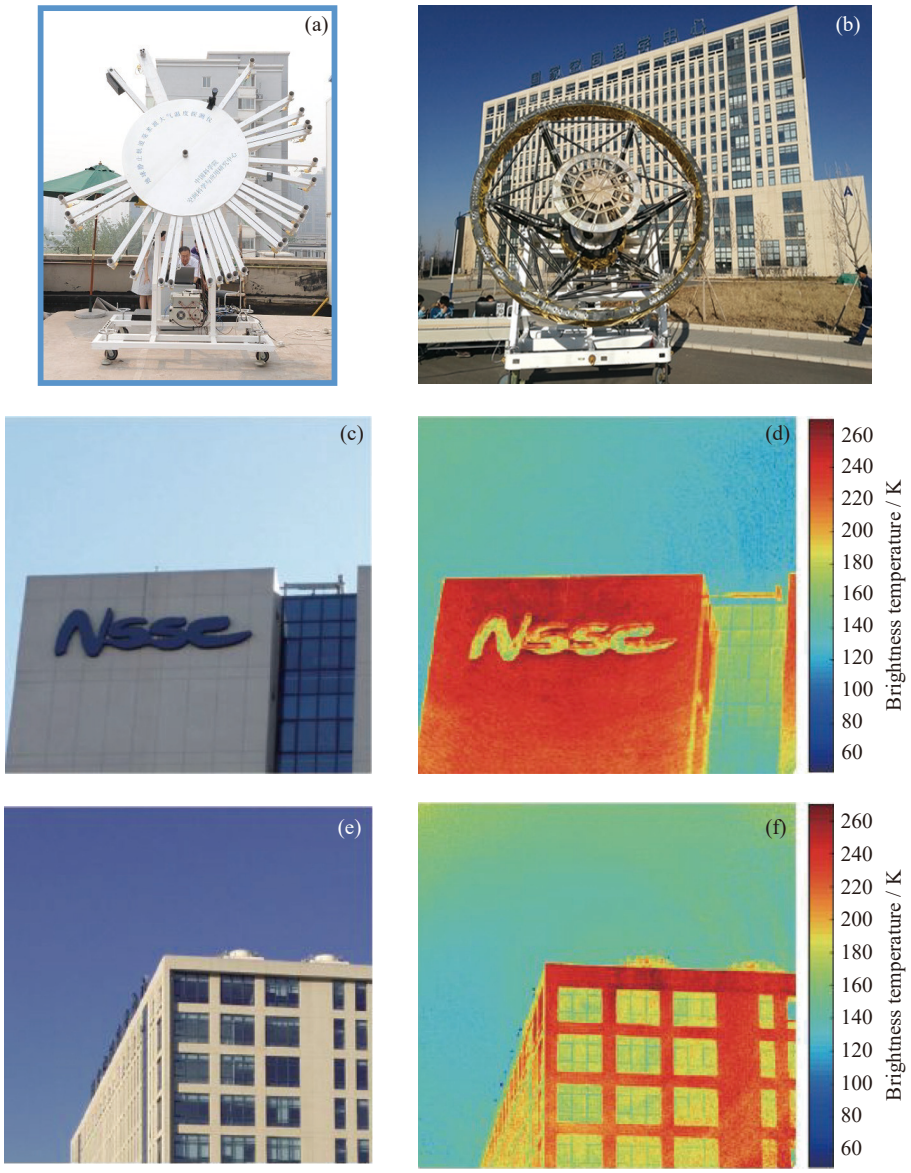


图 4 静止轨道大气微波探测仪地面样机。（a）第一代样机，（b）第二代样机，（c）（e）光学照片，（d）（f）对应的微波成像亮温

Fig. 4 Ground prototype of the geostationary atmospheric microwave sounder. (a) First-generation prototype, (b) second-generation prototype, (c)(e) optics images, (d)(f) corresponding microwave brightness temperature

起来的更先进的微波辐射计，有 9 个通道，覆盖 10.7～85.5 GHz 五个频段，其提供的雨率数据被广泛应用。基于 TRMM 卫星在降水探测方面所取得的巨大成功，美国和日本联合提出的新一代全球卫星降水观测计划（GPM）[34,35]，能够提供全球范围内的降水（包括雨雪）数据，其观测范围可延伸至南北极圈。GPM 计划由 GPM 主卫星和搭载微波辐射计的多颗星座卫星组成。GPM 主卫星是 GPM 计划最核心的部分，已于 2014 年 2 月发射，其上搭载了一个多波段微波成像仪（GMI），这个仪器除了包含 TMI 的频率外，还包含四个位于 166 和 183 GHz 毫米波频段附近的通道，通道数达到 13 个，性能有了巨大的改进，提升了降水的观测能力[36]。图 5(a)为 GMI 的整体结构图。这代表了自 SSMI 以来星载微波成像仪的通用外形结构。一个大的抛物面反射面和一组馈源组成天线接收系统。不同馈源对应相应频段的接收机。不同极化方式通过正交模耦合器（OMT）进行分离进入接收机。在馈源口面有定标参考源：定标黑体（热

表 2 美国 SSMI, SSMIS, TMI, GMI 与中国 FY-3 的 MWRI 系列微波成像仪比较

Table 2 Comparison of American SSMI, SSMIS, TMI, and GMI with China's FY-3 MWRI series microwave imagers

载荷	卫星平台	轨道	频率/GHz, 极化	天线口径, 刈幅宽度, 入射角	有效运行时间(年)
SSMI	DMSP-F08 DMSP-F10 DMSP-F11 DMSP-F12 DMSP-F13 DMSP-F14 DMSP-F15	极轨, 850 km 太阳同步轨道,	19.35 V, H 22.235 V 37.0 V, H 85.5 V, H	61 cm×66 cm, 1400 km, 53.1°	1987－2006 1990－1997 1991－2000 1994－2008 1995－2015 1997－2020 1999－2020
SSMIS	DMSP-F16 DMSP-F17 DMSP-F18 DMSP-F19	极轨, 850 km 太阳同步轨道	19.35～183.31 GHz	61 cm×66 cm, 1400 km, 53.1°	2003－2023 2006－2025 2009－2025 2014－2016
TMI美国	TRMM	近赤道轨道, 350 km, 1997－2001 年, 半赤道轨道, 402 km, 2001 年	10.65 V, H 19.35 V, H 21.3 V 37.0 V, H 85.5 V, H	61 cm×66 cm, 760 km, 53°	1997－2015
GMI美国	GPM	近赤道 407 km 轨道, 65°倾角	10.65 V, H 18.7 V, H 23.8 V 36.5 V, H 89.0 V, H 165.5 V, H 183.31+/–3 V 183.31+/–7 V	120 cm, 850 km, 53°	2014－2027
MWRI-1	FY-3A FY-3B FY-3C FY-3D	极轨, 831 km 太阳同步轨道, 98.75°倾角	5 频率 10 通道: 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89 GHz, 全部 VH 极化	90 cm, 1400 km, 53.2°	2008－2015 2010－2021 2013－2023 2017－2024
MWRI-2	FY-3F FY-3H	极轨, 831 km 太阳同步轨道	13 频率 22 通道: 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 50.3, 52.61, 53.24, 53.75, 89 118.7503±3.2, 118.7503±2.1, 118.7503±1.4, 118.7503±1.2。 118 为 V 极化, 其他为 VH 极化	180 cm 1400 km 53°/50°	2023－2032 2024－2029
MWRI-RM	FY-3G	407 km 圆轨道, 50°倾角	17 频率 26 通道: 在 MWRI-2 基础上, 增加四个 V 极化通道: 165.5±0.75, 183.31±2.0 , 183.31±3.4, 183.31±7.0 GHz	120 cm 800 km 53.1°	2023－2032
MWI	Metop-SG-A1 Metop-SG-A2 Metop-SG-A3	83 5 km 太阳同步轨道	18频率26通道: 18.7～183 GHz	75 cm 1700 km 53.1°	2025－2032 2032－3039 2039－2046

注 开始时间大于 2023 年表示计划发射时间及其对应寿命的结束时间; 开始时间小于 2023 年而结束时间大于 2023 年表示该载荷目前在轨工作[22]。

源)和冷空。定标黑体直接对准馈源, 冷空通过一个小的抛物面天线反射进入馈源。天线和接收机整体旋转。定标参考源固定在静止底板上保持不动。每旋转一周定标一次。GMI 定标黑体进行特殊的热处理, 减少了空间杂闪辐射对于热源表面的影响并减小了表面温度梯度[36], 提升了定标源的稳定性和准确度。

中国风云三号 A 装载的第一代微波成像仪(MWRI-1)实现了圆锥扫描微波辐射计的首次在轨运行。该载荷在风云三号 01 批(3A 和 3B)和 02 批(3C 和 3D)上持续运行, 在 03 批的 FY-3F 和 FY-3H 卫星上, 微波成像仪升级为第二代微波成像仪(MWRI-2), 增加了大气温度探测能力[18,36], 具体指标见表 2。图 5 给出 MWRI-2 及其与 GMI 的对比。

另外, 于 2023 年发射的中国首颗降雨卫星 FY-3G 星搭载了微波成像仪(MWRI-RM), 在 MWRI-2 的参数配置基础上, 增加了 166 和 183.31 GHz 附近的四个通道, 用来同步获取大气的湿度信息。第二代

微波成像仪天线口径达到 180 cm[22], 空间分辨率大大提升, 通道探测范围甚至超过 GMI 和 SSMIS。表 2 给出了大气探测卫星典型微波成像仪的比较。

可见气象卫星微波成像仪的显著特点是具有地球表面和大气同时遥感能力, 包括海面风、大气水汽含量、云中液态水含量、积雪、植被指数等。随着技术的发展和应用需求的深入, 气象卫星微波成像仪探测频率不断降低, 最低探测频率从 19.35 GHz 降低到 10.65 GHz, 俄罗斯卫星微波成像探测仪的频率还计划增加 6.9 GHz, 提升了海面温度的探测能力, 实现海洋和大气遥感的一体化监测。

在未来 Metop-SG-B 系列卫星上, 计划搭载两种新型微波辐射计载荷: 微波成像仪(MWI)和冰云成像仪(ICI)。其中 MWI 是一台圆锥扫描微波辐射计[37,38], 包括 18 个频率, 26 个通道, 频率范围是 18.7～183 GHz, 主要用于测量降水和温湿度廓线, 还可以测量海面风速、海冰和冰云总量, 表 2 给出 MWI 与同类圆锥扫描大气成像探测仪的比较。ICI 是一台新型的圆锥扫描辐射计, 安装在卫星底部, 频率范围从 183 到 664 GHz, 用于测量大气的冰云参数和大气湿度[39,40]。ICI 的主要参数见表 3。

1.2.2 海洋卫星微波成像仪

海洋卫星区别于气象卫星微波成像仪主要在于是否有低频通道, 主要体现在是否具有 C 波段测量海面温度的通道, 通常使用中心频率为 6.6, 6.8 或者 6.9 GHz 的双极化辐射计。另外海洋微波成像仪的天

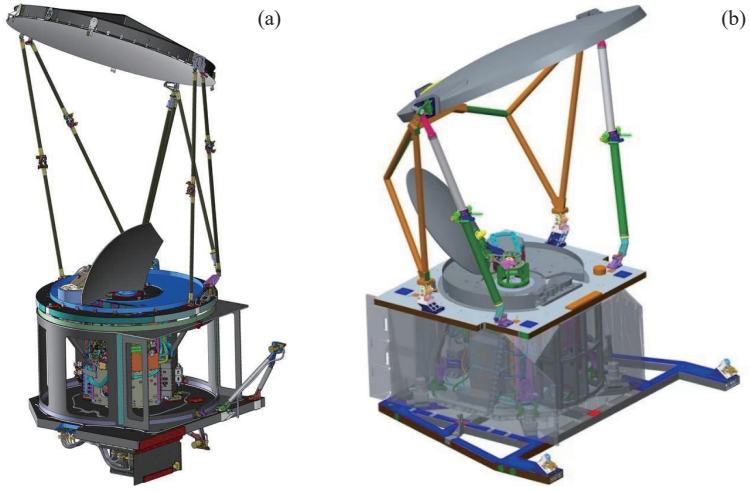


图 5 气象卫星微波成像仪比较。(a) GMI, (b) MWRI-2

Fig. 5 Comparison of meteorological satellite microwave imagers. (a) GMI, (b) MWRI-2

表 3 ICI 的主要技术指标

Table 3 ICI's main specifications

中心频率/GHz	带宽/MHz	灵敏度/K	定标偏差/K	极化方式	瞬时视场/km
183.31±7.0	2×2000	0.8	1.0	V	16
183.31±3.4	2×1500	0.8	1.0	V	16
183.31±2.0	2×1500	0.8	1.0	V	16
243.2±2.5	2×3000	0.7	1.5	V, H	16
325.15±9.5	2×3000	1.2	1.5	V	16
325.15±3.5	2×2400	1.3	1.5	V	16
325.15±1.5	2×1600	1.5	1.5	V	16
448±7.2	2×3000	14	1.5	V	16
448±3.0	2×2000	1.6	1.5	V	16
448±1.4	2×1200	2.0	1.5	V	16
664±4.2	2×5000	1.6	1.5	V, H	16

线尺寸通常较大, 空间分辨率较高。这种类型的辐射计主要有俄罗斯、日本和中国的微波成像仪。美国在 SMMR 以后除了 WindSat 全极化微波辐射计的试验卫星以外, 一直没有独立发射具有 C 波段的海洋微波成像仪, 未来的计划见 2.2 节。

俄罗斯在 1999 年发射的海洋卫星 Okean-O-1, 载有三台微波辐射计, 分别是扫描辐射计 Delta-2D、被动微波辐射计 R225 和 R600。Delta-2 D 采用圆锥扫描方式, 包括 6.9, 13, 22.3, 37.5 GHz 四个频率 8 个双极化通道, 用于观测海面温度、海冰、土壤湿度、可降水, 同时配合 13.3 GHz 双极化的 R225 观测海面风速和海冰, 5 GHz 双极化的 R600 观测海面温度[22]。

日本研制的高级微波扫描辐射计-E (AMSR-E) 搭载 NASA 的 EOS-Aqua 卫星于 2002 年 5 月 4 日发射成功, 是 ADEOS-II 的后续卫星, 在轨工作长达 9 年。微波辐射计 AMSR-E 大大提高了空间分辨率, 89 GHz 频率的星下点分辨率可达 3.0 km, 而且加大了扫描宽度(1450 km), 这是目前为止最为成功的微波成像仪之一, 其数据广泛用于大气海洋和陆表应用研究, 其数据包括雨率、水汽和液水总量、海面温度、风速、冰、雪和土壤湿度等参数[41]。在 2002 年 12 月发射先进地球观测卫星(ADEOS-II)装有高级微波扫描辐射计(AMSR, 2003 年 10 月失败), 该辐射计可以提供 6.9～89 GHz 范围内的 8 个频段亮温数据, 可以直接测量海面温度、风、水汽含量、降雨率和温度廓线等参数[3], 但遗憾的是 AMSR 在轨仅工作 100 天就停止了。 2012 年 5 月 18 日发射了 GCOM-W1 卫星, 其搭载的微波扫描辐射计(AMSR2), 如图 6(a)所示, 可对地表和大气进行多波段、多极化方式的观测[42]。作为比较, 图 6(b)给出用于海洋风场遥感的第一颗星载全极化微波辐射计(WindSat)的照片。关于 WindSat 的介绍将在 2.2 节全极化遥感技术的发展中介绍。

AMSR2 有效刈幅宽度大于 1600 km, 天线口径从 AMSR-E 的 1.6 m 提升到 2 m, 空间分辨率比 AMSR-E 有所提高。该辐射计到目前仍然正常运行。表 4 给出 3 台 AMSR 辐射计的主要技术参数的比较。

中国第一颗海洋微波遥感卫星是 2011 年 8 月发射的海洋动力环境卫星(HY-2A)。该星配置了两台被动微波载荷: 扫描微波辐射计(RM)、校正辐射计(ACMR)。其中 RM 采用圆锥扫描方式, 频率和通道配置见表 4。载荷的天线口径为 1.2 m, 因此其空间分辨率与表 4 中的其他载荷差异较大。但 HY-2A 卫星填补了中国实时获取海洋动力环境要素的空白[43]。2018 年 10 月, HY-2B 卫星成功发射, 其被动微波载荷与 HY-2A 相同, 但性能更加稳定。RM 计划在于 2024 年发射的 HY-2E 卫星上继续装载, 其他卫星上没有安装计划。表 4 中最后一行为中国的海洋卫星微波成像仪 RM 的主要技术参数, 可见其与 AMSR, AMSRE, ASMR2 还存在一定差距, 尤其体现在天线口径尺寸带来的空间分辨率的不足。另外其通道设置上缺乏对云和降雨较为敏感的高分辨率 89 GHz 的通道, 23.8 GHz 还沿用了 SMMR 和 SSMI 等以前成

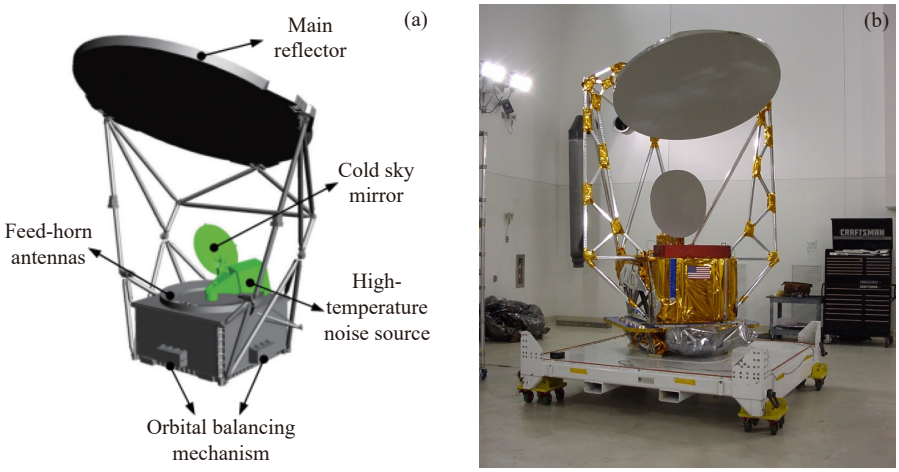


图 6 国外海洋卫星微波成像仪比较。(a) AMSR2, (b) WindSat

Fig. 6 Comparison of oversea ocean microwave imager. (a) AMSR2, (b) WindSat

表 4 日本 AMSR, AMSR-E, ASMR2 与中国海洋卫星微波成像仪 RM 比较

Table 4 Comparison between Japan's AMSR, AMSR-E, ASMR2 and China's oceanic satellite microwave imager RM

载荷	卫星平台	天线尺寸/m	有效运行时间(年/月)	频率/GHz, 极化	降交点时间(LT)
AMSR	ADEOS-II	2.0	2003/04－2003/10	6.93 VH, 10.65 VH, 18.7 VH, 23.8 VH, 36.5 VH, 50.3 V, 52.8 V, 89.0 VH	22:30
AMSR-E	Aqua	1.6	2002/05－2011/10	6.93 VH, 10.65 VH, 18.7 VH, 23.8 VH, 36.5 VH, 89.0 VH	13:30
ASMR2	GCOM-W1	2.0	2012/05至今	6.93 VH, 7.3 VH, 10.65 VH, 18.7 VH, 23.8 VH, 36.5 VH, 89.0 VH	01:30
RM	HY-2A, 2B	1.2	2011至今	6.6 VH, 10.7 VH, 18.7 VH, 23.8 V, 37 VH	06:00

像仪的设置, 只有一个 V 极化通道, 从原理上来讲, 其带来由于交叉极化校正误差引起的探测能力不高。

1.3 不扫描微波辐射计

不扫描辐射计一般包括天底点观测微波辐射计、推帚式微波辐射计和综合孔径辐射计。这类辐射计有的是不需要扫描, 例如 HY-2 校正辐射计载荷, 有的是由于某种限制使得卫星不能承受扫描带来的问题, 如卫星转动惯量的要求非常高, 例如重力卫星、宽幅成像高度计卫星的校正辐射计, 还有的是由于载荷天线口径过大, 无法适应安装需求等例如 SMOS, Aquarius。中国的海洋盐度卫星包含两台微波辐射计: 一台一维综合孔径辐射计 MICAP[44] 和一台 L 波段二维综合孔径辐射计。

大气校正辐射计是一类天底指向的微波辐射计, 目的是给同程观测的星下点卫星高度计提供大气湿对流层的路径延迟校正。这类辐射计典型的有: 中国的 HY-2 卫星系列校正辐射计 ACMR[4](见图 7)[4], 美国 T/P 卫星上的 TMR[45], 欧洲 ERS-2 卫星和 Envisat 卫星的校正辐射计 MWR, Jason-1 卫星的 JMR[46], Jason-2 和 3 的 AMR[47], 哨兵 3 号(Sentinel-3A～3D)系列卫星的校正辐射计 MWR[48]。校正辐射计通常包括 2 个或者 3 个频段, 三个频段一般包括 Ku(一般是 18.7 GHz), K(一般是 23.8 GHz)和 Ka(一般是 34～37 GHz)三个波段, 极化方式是水平或者垂直极化。这三个频段对大气水汽和液态水较为敏感, 对海面风也很敏感, 因此通过三个频段的亮温可以对水汽和液水引起的路径延迟进行校正, 并很好地消除风的影响。采用二频段的校正辐射计通常采用后两个波段, 风影响的消除需要借助其他的数据源。校正辐射计对于大气湿路径延迟校正的精度通常在 1 cm 量级, 这样就很好地保障了雷达高度计海面高测量精度在几个厘米的水平以内。

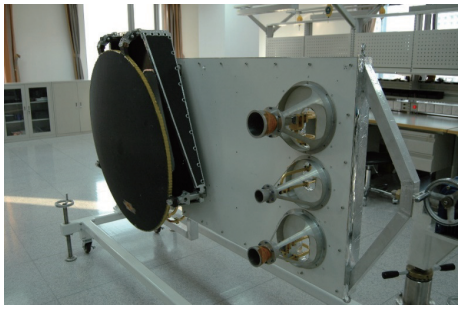


图 7 HY-2 校正辐射计的实验室折叠状态(左侧是折叠的反射面天线, 右侧是三个定标天线)

Fig. 7 Folded state of the HY-2 calibration radiometer (the left side is the folded reflector antenna, and the right side is the three calibration antennas)

综合孔径微波辐射计的代表是 2009 年欧空局发射的 SMOS 海洋盐度和土壤湿度卫星。该卫星是为了验证综合孔径技术, 特别是二维综合孔径技术而发射的专题卫星。通过采用二维综合孔径技术可以实现多入射角的海面辐射观测, 进而用于海面盐度的反演[49]。

由于不扫描辐射计观测的范围取决于波束宽度和入射角, 因此难以实现宽刈幅的观测, 这样在一些特殊的观测, 需要采用多波束并排观测, 这类观测方式称为推帚式观测。代表性的辐射计是 NASA 发射的 SAC-D 卫星盐度辐射计 Aquarius, 其采用不同入射角的 3 个波束推帚式观测, 实现 390 km 的观测刈幅[7]。在这个卫星上的另外一台微波辐射计 MWR, 也是采用推帚式观测方式, MWR 是 2 个频段 3 个通道的辐射计(23.8 V, 36.5 VH), 利用 8 个平行波束实

现 380 km 刈幅的观测, 用来同步获得海面水汽含量、雨率、风速、海冰等参数信息。

2 星载微波辐射计技术发展趋势

2.1 功能综合化与一体化

空间微波辐射计的发展正朝着频率更多、功能更加全面的方向发展。前面提到的下一代欧洲气象卫星、美国的 ATMS 以及中国的风云五号卫星, 都在对星载微波辐射计的发展进行规划和论证。首先能够确定的是, 未来空间微波辐射计技术发展首先是综合化、集成像和探测于一体的技术体制。下面以俄罗斯的微波成像探测仪的发展为例, 介绍综合发展的考虑。

俄罗斯在被动微波遥感技术发展上独树一帜。俄罗斯于 1974 年在其气象卫星 Meteor-P1 上运行的被动微波辐射计(SHF)是目前已知最早的星载圆锥扫描辐射计[22], 比 SMMR 早 4 年发射, 随后在 1976, 1977, 1981 年的 Meteor-P2, P3 和 P6 三颗卫星均载有此种辐射计进行地球表面的遥感观测, 刈幅宽度 900 km[22]。俄罗斯的第三代气象卫星在第二代气象卫星的基础上, 载荷数量进一步提升, 其包含 11 颗卫星, 其中第一颗为试验星 Meteor-3 M, 8 颗 Meteor-M 和 2 颗 Meteor-MP, 其中 Meteor-3 M 于 2001 发射, 其上搭载一台 20 个频率 26 个通道的微波成像仪(MTVZA), 频率范围从 18.7 到 183.31 GHz, 用于获取地表亮温图像、温湿度廓线和降水[22]。在随后 2009 年开始的业务星 Meteor-M 上, 搭载了改进型微波成像仪(MTVZA-GY), 增加了海面温度和风速遥感的 10.6 GHz 双极化通道, 而计划 2025 年发射的增强型微波成像仪(MTVZA-GY-MP)进一步把频率扩展到 6.9 GHz, 以实现海面温度的同步观测[22]。表 5 给出俄罗斯 3 台微波成像探测仪的比较。从时间上看, 俄罗斯的 MTVZA 是一台比 SSMIS(见表 2 和表 5)更早的、集成像和探测于一体的圆锥扫描辐射计。表 5 中最后一列括号中为 SSMIS 不同于前三个载荷的极化方式。可以看出, 这些成像仪探测最高频率都包括 183.31 GHz 的水汽吸收通道, 而且两台载荷的天线口径也近似相同(俄罗斯的都为 61 cm×66 cm, 而美国的 65 cm)。表 5 中的瞬时视场和像元对应的是俄罗斯成像仪的口径, SSMIS 的瞬时视场和像元与表中所列参数有所不同, 主要是入射角和轨道高度不同导致的, 具体数值这里省略。比较表 1 和表 2 可以看出, 在空间分辨率上, 气象卫星的微波成像仪或者微波成像探测仪总体偏低, 分辨率差。而中国微波成像仪的空间分辨率逐步提升, 未来的天线口径是目前的 2 倍, 183.31 GHz 的 IFOV 可以达到 4 km×7 km, 这可能导致地面覆盖率的下降。因此空间分辨率和地面覆盖率这两个参数需要权衡折中考虑, 以满足不同的应用需求, 这个问题在下面还将进一步讨论。

从国内外发展历程以及未来规划可以看出, 气象卫星微波成像仪融合了表面成像和大气探测技术, 减小不同载荷或者卫星之间时空匹配引起的误差和不确定性, 提升数值天气预报等应用对多个地球物理参数同步获取的能力。

2.2 全极化遥感能力

传统的微波辐射计只使用微波辐射的两个正交极化, 即水平极化和垂直极化。随着微波遥感技术的发展, 特别是海面风场遥感需求的发展, 全部四个斯托克斯(Stokes)极化参数的测量成为被动微波遥感的一个新的发展方向。美国 2003 年发射的 WindSat 卫星是一种新型的海洋遥感卫星——全极化微波辐射计试验星。WindSat 是由美国海军研究实验室(NRL)开发的全球第一个试验性质的星载全极化微波成像仪, 如图 6(b)所示, 该卫星成功在轨运行到 2020 年[50], 主要目的是验证星载全极化微波辐射计的可靠性, 建立相应的海面风速、风向反演算法, 为将来全极化微波辐射计的业务化运行提供依据。工作高度为 830 km 的太阳同步轨道, 有效刈幅为 1025 km, 包含 6.8, 10.7, 18.7, 23.8 和 37 GHz 5 个频率, 共计 22 个通道, 采用 11 个分立的双极化喇叭馈源进行接收。其中 10.7, 18.7 和 37 GHz 三个频率分别使用 3 个馈源接收 6 个全极化通道(垂直极化 V, 水平极化 H, +45°线极化, –45°线极化, 左圆极化 LC 和右圆极化 RC), 通过极化组合实现海面辐射亮温四个 Stokes 参量测量, 从而提取海面的风矢量信息。6.8 和 23.8 GHz 是传统的两个正交通道辐射计, 各采用一个馈源喇叭接收, 并通过正交模耦合器(OMT)进行 V 和 H 极化分离, 获取水平和垂直极化亮温, 其中 23.8 GHz 通道用来进行大气水汽校正, 6.8 GHz 通道主要用于提供海表面温度的信息。表 6 列出了 WindSat 各个通道的具体参数。Wind-

表 5 俄罗斯 3 代微波成像探测仪与美国 SSMIS 的比较

Table 5 Comparison of 3 Russian Microwave Imaging sounders with the American SSMIS

MTVZA/GHz	MTVZA-GY/GHz	MTVZA-GY-MP/GHz	SSMIS/GHz	瞬时视场 IFOV/km	像元 /km	极化
—	—	6.9	—	135×302	32×2	V, H
—	10.6	10.6	—	89×198	32×32	V, H
18.7	18.7	18.7	19.35	52×116	32×32	V, H
22.238	23.8	23.8	22.235	42×94	32×32	V, H(V)
33	31.5	31.5	—	35×76	32×2	V, H
36.5	36.7	36.7	37	30×67	32×32	V, H
42	42	—	—	26×60	32×32	V, H
48	48	—	50.3	24×43	32×32	V(H)
—	—	52.3	52.8	21×48	32×32	V(H)
52.8	52.8	52.8	53.596	21×48	48×48	V(H)
53.3	53.3	53.3	54.4	21×48	48×48	V(H)
53.8	53.8	53.8	55.5	21×48	48×48	V(H)
54.64	54.64	54.64	57.29	21×48	48×48	H(RC)
55.63	55.63	55.63	59.4	21×48	48×48	H(RC)
57.290344± 0.3222±0.1	57.290344± 0.3222±0.1	57.290344± 0.3222±0.1	60.792668± 0.357892±0.050	21×48	48×48	H(RC)
57.290344± 0.3222±0.05	57.290344± 0.3222±0.05	57.290344± 0.3222±0.05	60.792668± 0.357892±0.016	21×48	48×48	H(RC)
57.290344± 0.3222±0.025	57.290344± 0.3222±0.025	57.290344± 0.3222±0.025	60.792668± 0.357892±0.006	21×48	48×48	H(RC)
57.290344± 0.3222±0.01	57.290344± 0.3222±0.01	57.290344± 0.3222±0.01	60.792668± 0.357892±0.002	21×48	48×48	H(RC)
57.290344± 0.3222±0.005	57.290344± 0.3222±0.005	57.290344± 0.3222±0.005	60.792668±0.357892	21×48	48×48	H(RC)
—	—	—	63.283248±0.285271	14×30	16×16	(RC)
91.655	91.655	91.655	91.655	9×21	32×32	VH
—	—	—	150±1.25	9×21	32×32	(H)
183.31±7.0	183.31±7.0	183.31±7.0	183.31±6.6	9×21	32×32	V(H)
183.31±3.0	183.31±3.0	183.31±3.0	183.31±3.0	—	—	V(H)
183.31±1.0	183.31±1.0	183.31±1.0	183.31±1.0	—	—	V(H)

Sat 与 AMSR-E 或者 AMSR2 的主要区别在于全极化通道的交叉极化电平小于–30 dB, 为此馈源喇叭的长度更大。这也导致了不同馈源的安装位置不在一个水平圆弧上, 因此不同频段和极化的入射角存在差异(AMSR-E 或者 AMSR2 的入射角除了 89 GHz 的 B-scan 以外都为 55°), 需要在数据处理时进行地面像元的匹配。

WindSat 卫星推动中国全极化微波辐射计 FPMR(Full Polarized Microwave Radiometer)遥感技术的发展, 2016 年 FPMR 开始成功在轨运行。最近, 2022 年美国发射了小型化的全极化微波辐射计(COWVR), 包含了 18.7, 23.8 和 33.9 GHz 三个频率 18 个通道, 每个频率都具有 V, H, +45°, –45°, LC 和 RC 六个极化状态, 以验证这种小型化的全极化辐射计的测量风场的能力[51,52]。COWVR 天线口径 75 cm, 设计寿命 3 年。在美国 WindSat 后续业务卫星(WSF-M)中, 计划有两台全极化微波辐射计 MWI [22,53], 频率范围 10～89 GHz, 仍然采用 180 cm 的偏置抛物面天线。在 10, 18 和 37 GHz 频率仍然采用全极化接收方式, 但是他们把接收类型从极化组合

表 6 全极化微波辐射计的比较

Table 6 Comparison of fully polarized microwave radiometers

载荷	天线尺寸/m	发射时间	频率/GHz: 极化方式	轨道
WindSat	1.83	2003	6.8, 23.8: V, H; 10.65, 18.7, 37.0: V, H, P, M, L, R	极轨
FPMR	1.8	2016	6.8, 23.8: V, H; 10.65, 19.35: T3, T4 37.0: V, H, P, M, L, R	极轨
COWVR	0.75(小卫星)	2022	10.65, 18.7, 33.9: V, H, P, M, L, R	51.6°倾角中低轨
MWI WSF-M	1.8	2024	23.8, 37.3, 89: V, H 10.85, 18.85, 36.75: V, H, T3, T4	极轨
CIMR	7.0	2028	1.4135, 6.875, 10.65, 18.7, 36.5: V, H, P, M, L, R	极轨

型辐射计变为极化相关型辐射计, 通过直接测量 H 和 V 极化的相关系数进行第三和第四斯托克斯参数亮温的测量, 这与中国的 FPMR 的 10.7 和 19.35 GHz 的接收类型相同。此外在 ESA 正在研制的哥白尼哨兵扩展卫星计划(Copernicus Sentinel Expansion Missions)中的哥白尼成像微波辐射计(CIMR)是一台新型综合微波成像仪, 5 个频率分别为 1.4, 6.9, 10.7, 18.7 和 36.5 GHz, 全部采用全极化的形式[54]。表 6 给出几个主要全极化微波辐射计参数的比较。采用全极化辐射计的形式不但可以反演海面的风速和风向, 同时还能提高其他参数(如海面温度、盐度等参数)的反演精度, 减小反演误差。原则上讲, 任何频段海面发射率都包含风向的调制, 如果忽略必然使得海面发射率的误差增大, 进而导致反演的海面参数误差增大。

2.3 应用频率不断扩展

2.3.1 电磁波频率的拓展应用

空间微波遥感经过 50 多年的发展, 对地球表面的观测电磁波频段主要集中在微波波段, 频率范围 0.3～3000 GHz(经典文献到 300 GHz, 对应波长 1 mm), 对应的波长 1 m～0.1 mm。目前通用的微波波段划分及其名称见表 7。需要说明的是, 40 GHz 以上的频率范围, 不同的文献略有不同, 更高频段的名称及其划分目前没有统一说法。

观测频率和通道的选择取决于探测目标的需求, 本质上取决于表面发射率和大气透过率。表面发射率决定了表面辐射的强度。图 8[55] 分别给出 40 GHz 以下陆表和海表参数对于亮温的相对敏感性[55]。大气透过率决定了大气在接收的辐亮度中所占的比例, 如图 9 所示。由于大气和地球表面的作用是耦合在一起的, 因此通道的选择需要根据遥感参数对于亮温的敏感性来确定。目前海面发射率模型已经有较为成熟的发展[56]。陆地表面由于混合像元的问题导致发射率模型还不够完善[57], 有待建立适应不同地表类型和空间分辨率的微波陆表发射率模型, 提升微波辐射计陆地遥感数据的应用能力[57–60]。

表 7 微波波段的名称及频率范围

Table 7 Microwave band name and frequency range

名称	频率范围/GHz	名称	频率范围/GHz
P波段	0.3～1	Q波段	30～50
L波段	1～2	U波段	40～60
S波段	2～4	V波段	50～75
C波段	4～8	E波段	60～90
X波段	8～12	W波段	75～110
Ku波段	12～18	F波段	90～140
K波段	18～27	G波段	140～220
Ka波段	37～40	R波段	220～325

图 9 给出利用美国空军地球物理实验室(AFGL)提供的亚北极地区冬天(subarctic-winter)廓线计算的透过率和不同大气成分(水汽、氧气、臭氧)的光学厚度在 1000 GHz 以下随着频率的变化, 可见频率越低大气的影响越小, 频率越高大气对于空间遥感的作用越大。频率越低表面(陆地和海洋)的作用越强, 频率越高表面的作用越弱。在 100 GHz 以上大气的吸收和辐射起主要作用, 而表面的作用很小。地球大气的主要吸收气体包括水汽和氧气。在微波范围这两个吸收气体提供大气湿度和温度廓线的探测手段, 而在 THz 波段, 很多大气成分, 例如臭氧等对于卫星观测的辐亮度都有贡献。

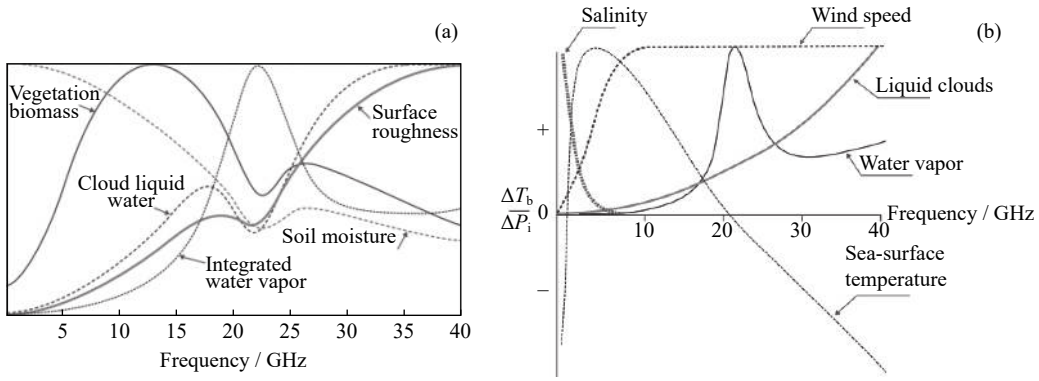


图 8 40 GHz 以下陆地表面（a）和海洋表面（b）参数对于亮温的敏感性

Fig. 8 Sensitivity of land surface (a) and ocean surface (b) parameters below 40 GHz to brightness temperatures

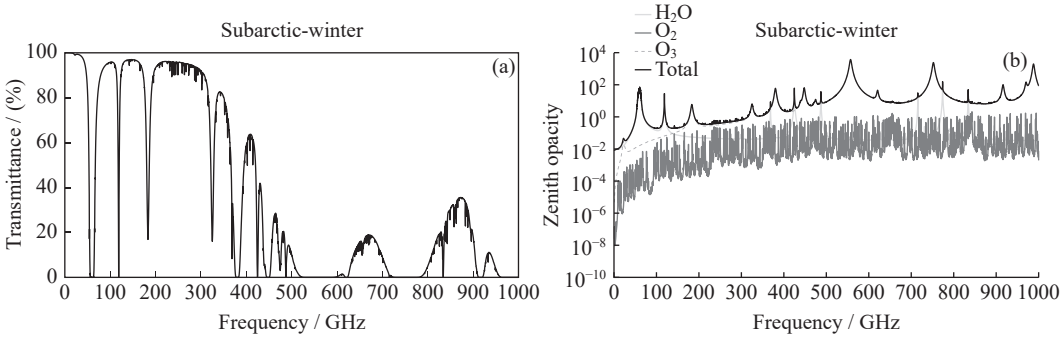


图 9 利用美国空军地球物理实验室提供的亚北极地区冬天廓线计算的透过率（a）和不同大气成分（水汽、氧气、臭氧）的光学厚度（b）

Fig. 9 Transmittance (a) and optical depth (b) calculated using a subarctic winter atmosphere profile from ARGL

根据国际电联(ITU)对被动微波遥感频率的带宽的推荐[61], 1～1000 GHz 范围内可用于遥感的参数见表 8[61]。从表 8 可以看出, 这些频段中 700 GHz 以下频段已经有所应用, 而在更高频率(包括 1 THz 以上频段), 由于硬件技术发展水平不足的限制, 尚未得到充分应用。这些是未来空间地球遥感的发展方向之一。主要应用方向包括中高层大气成分和痕量气体、风场等参数的遥感。这些应用可以拓展到天文学和行星遥感探测的应用上。

随着被动微波遥感技术的发展及其应用需求的深入, 空间被动微波遥感向电磁波谱的两侧发展。一是向更高频率—THz 波段发展, 主要用于中高层大气成分和参数的遥感, 例如由戈达德太空飞行中心(GSFC)向 NASA 提议的用于热层风、温度和密度探测的太赫兹临边探测仪(TLS)[62], 其包括两台辐射计, 工作频率分别为 1.12 和 2.06 THz; 二是向更低频率—L 和 P 波段发展, 主要利用低频电磁波更大的穿透深度, 可以获得次表层和一定深度以内的地物参数信息, 例如探测极地冰川的厚度和温度分布等[63]。这两个发展方向的实施需要配合硬件技术的发展, THz 技术需要 THz 辐射计技术, 特别是低噪声技术的发展, 使得探测灵敏度符合探测的需求; 低频微波和无线电遥感技术的发展需要大口径天线技术和复杂抗 RFI 干扰技术的实现。

表 8 给出了 1000 GHz 以下的被动频段应用的选取需求, 如前所述, 空间微波辐射遥感技术探测频率达到几个 THz, 因此对于频率使用的规范性需要特别重视。一方面频率的使用有利于不同遥感手段(主被动微波遥感、通信等)的多元化, 从而丰富对目标和场景特性的识别和参数获取。另一方面频率的使用一定优先保证重要的被动微波载荷通道的需求, 例如 L, C 波段海面温度和盐度的探测通道, K 和 Ka 波段大气水汽和液水探测通道需求, 50～60 GHz, 176～192 GHz 大气温度和水汽廓线的通道需求。因为这些通

表 8 国际电联 ITU 推荐的被动微波遥感通道

Table 8 Passive microwave remote sensing channels recommended by ITU

频段/GHz	带宽需求/MHz	谱线或中心频率/GHz	测量参数	扫描方式
1.37～1.4 s, 1.4～1.427 P	100	1.4	土壤湿度、海洋盐度、海面温度、植被指数	N
2.64～2.65 s, 2.655～2.69 s, 2.69～2.7 P	45	2.7	土壤湿度、海洋盐度、植被指数	N
4.2～4.4 s, 4.95～4.99 s	200	4.3	海面温度	N
6.425～7.25	200	6.85	海面温度	N
10.6～10.68 p, 10.68～10.7 P	100	10.65	雨率、雪水当量、冰形态、海况、海面风	N
15.2～15.35 s, 15.35～15.4 P	200	15.3	水汽、雨率	N
18.6～18.8 p	200	18.7	雨率、海况、海冰、水汽、海面风、土壤发射率和湿度	N
21.2～21.4 p	200	21.3	水汽、液水	N
22.21～22.5 p	300	22.235	水汽、液水	N
23.6～24 P	400	23.8	水汽、液水、大气探测相关通道	N
31.3～31.5 P, 31.5～31.8 p	500	31.4	海冰、水汽、溢油、云、液水、表面温度、50～60 GHz的参考窗区通道	N
36～37 p	1000	36.5	雨率、雪、海冰、云	N
50.2～50.4 P	200	50.3	大气温度廓线的参考窗区通道(表面温度)	N
52.6～54.25 P, 54.25～59.3 p	6700	多个频点	大气温度廓线(氧气吸收线)	N
86～92 P	6000	89	云、溢油、冰、雪、雨、118 GHz附近温度探测的参考窗区	N
100～102 P	2000	100.49	N_2O, NO	L
109.5～111.8 P	2000	110.8	O_3	L
114.25～116 P	1750	115.27	CO	L
115.25～116 P, 116～122.25 p	7000	118.75	大气温度廓线(氧气吸收线)	
148.5～151.5 P	3000	150.74	N_2O、地表温度、云参数、温度探测的参考窗区	N, L
155.5～158.5 p	3000	157	地表和云参数	N
164～167 P	3000	164.38, 167.2	N_2O、云水和冰、雨、CO、ClO	N, L
174.8～182 p, 182～185 P, 185～190 p, 190～191.8 P	17000	175.86, 177.26, 183.31, 184.75	N_2O、水汽廓线、O_3	N, L
200～209 P	9000	200.98, 203.4, 204.35, 206.13, 208.64	N_2O、ClO、水汽、O_3	L
226～231.5 P	5500	226.09, 230.54, 231.28	云、湿度、N_2O(226.09), CO(230.54), O_3(231.28), 参考窗区	N, L
235～238 p	3000	235.71, 237.15	O_3	L
250～252 P	2000	251.21	N_2O	L
275～277	2000	276.33	NO, N_2O(276.33)	L
294～306	12000	301.44	NO, N_2O(301.44), O_3, O_2, HNO_3, HOCl	N, L
316～334	18000	325.15	水汽廓线(325.15), O_3, HOCl	N, L
342～349	7000	345.8, 346	CO(345.8), HNO_3, CH_3Cl, O_3, O_2, HOCl	N, L
363～365	2000	364.32	O_3	L
371～389	18000	380.2	水汽廓线	N
416～434	18000	425	温度廓线	N

续表 8

频段/GHz	带宽需求/MHz	谱线或中心频率/GHz	测量参数	扫描方式
442～444	2000	443	H_2O, O_3, HNO_3, N_2O, CO	N, L
496～506	10000	498.1, 498.2, 498.3, 498.4, 498.5, 498.6	O_3, CH_3Cl, N_2O, BrO, ClO, 水汽廓线	N, L
546～568	22000	557	水汽廓线	N, L
624～629	5000	624.27, 624.34, 624.77, 625.37, 625.92, 627.18, 627.77, 628.46	HCl, BrO, O_3, HCl, SO_2, H_2O_2	L
634～654	20000	635.87, 642.85, 647.2, 649.45, 649.7, 650.28, 650.73, 651.77, 652.83	CH_3Cl, HOCl, ClO, 水汽, N_2O, BrO, O_3	N, L
659～661	2000	660.49	BrO	L
684～692	8000	688	ClO, CO, CH_3Cl	L
730～732	2000	731	O_2, HNO_3	L
851～853	2000	852	NO	L
951～956	5000	952, 955	O_2, NO	L

注 P表示首选频段, 只能与被动服务共用; p也表示首选频段, 但是可以与主动服务共用; s表示次要分配频段。N表示天底观测, L表示临边观测。

道已经广泛用于数值天气预报等重要领域, 而且发挥了不可替代的作用。所以表 8 既是一个被动微波遥感通道及其应用的需求表, 也是一个通道保护的频段设置表, 应该得到有关管理部门的特别重视。

2.3.2 星载 THz 辐射计遥感技术

星载 THz 辐射计遥感通常是指利用 THz 频段(通常频率范围是 0.1～10 THz)的辐射计对地球或者行星大气进行探测的技术手段。THz 辐射计技术在很早就已经用于空间遥感了。表 9 给出了已经在轨的 THz 辐射计遥感卫星参数及其相关描述。这里没有包括表 1、表 2 和表 5 中的对地观测的工作频率大于 100 GHz 的辐射计。THz 辐射计观测通常采用临边观测的方式, 以减小背景辐射(如地球背景)的影响, 提高探测灵敏度和垂直分辨率。THz 是目前广受关注的电磁波频段, 其在一定程度上可以穿透云雨、不依赖太阳作为辐射源、可以全天时全天候工作的特点使得太赫兹遥感在大气遥感探测中相比可见光、红外、紫外遥感具有独特的优势。

太赫兹临边探测技术可以用来监测大气温度、臭氧、温室气体以及其他影响对流层和平流层臭氧化学的痕量气体(例如: NO_2, BrO, ClO, SO_2 等)的全球时空分布。通过大量的观测数据, 分析大气痕量气体的含量变化及其对辐射收支和大气状态参数的影响, 可以更好地了解污染物的输送特性及其复杂性, 为研究平流层臭氧与大气的物理和化学过程提供新的认识途径。此外, 太赫兹临边探测仪对于中高层大气动力过程的研究具有非常大的应用潜力。例如, 热层动力学和电离层状态取决于中层大气向上传播的重力波、行星波和潮汐, 对全球大气特别是风矢量和温度进行观测将有助于评估这些影响[64]。目前中高层大气风场的测量尚缺少有效的测量手段, 特别是对于对流层顶到中间层的大气中层风场的观测非常稀少。这项技术自 20 世纪 90 年代以来得到了充分的发展, 获得了关于大气成分变化的宝贵的历史数据, 对于地球气候和环境变化的研究起到重要的作用。

对于地球大气太赫兹临边探测, 迄今为止的星载载荷只有 4 个: UARS 卫星上的 MLS[65], Odin 卫星上的 SMR[66], Aura 卫星上的 MLS [67] 和 国际空间站(ISS)上的 SMILES[68]。其中 Aura/MLS 和 Odin/SMR 工作至今, 频率已经达到 2.5 THz[67](见表 9), 为大气模式提供了高精度的温度、臭氧观测数据, 已有大量研究使用了 MLS 的观测数据。得益于太赫兹器件和技术的进步, 特别是基于量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)、超导 SIS 混频器、HEB 混频器和高分辨率数字光谱仪等新技术[69–71], 可以使仪器在 0.1～4.7 THz 的频率范围内以较高的谱分辨率和较低的系统噪声工作, 在 0～160 km 进行关键大气要素的高精度观测, 特别是中高层大气风场已

表 9 已经完成的星载 THz 辐射计卫星

Table 9 Completed spaceborne THz radiometer satellites

载荷/平台名称	发射时间	国家/机构	科学目标	频段/GHz	备注
UARS-MLS	1991	NASA	地球	63, 183, 205	第一个超外差接收机, 高分辨率平流层成分光谱仪
SWAS	1998	NASA	天文学	490, 550	第一台亚毫米波超外差仪器: 水、氧气和CO
Odin	2001	瑞典	天文学和地球	118, 490～500, 540～580	使用斯特林制冷的超外差空间/地球探测仪
MIRO	2004	ESA	彗星	188, 560	第一个亚毫米波行星探测卫星, 超外差接收机, 测量水、CO、NH_3 和 CH_3OH
Aura-MLS	2004	NASA	地球	118, 190, 240, 640, 2520	第一个THz超外差任务: 臭氧和气候变化
Herschel	2009	ESA	天文学	480～1900, 1500～5000	超外差和直接检波接收机, 制冷望远镜, 多台仪器
Planck	2009	ESA	天文学	30～70, 100～850	高低频率探测宇宙背景
SMILES	2009	日本	地球	625～650	第一台超导超外差接收机的地球观测

经成为一个全新的、有潜力的探测要素[64]。尽管国际上已提出多个太赫兹临边探测载荷, 但高昂的成本使得目前还没有新的载荷在轨运行, 而 NASA 正在研制小型化的临边探测仪(Continuity-MLS)来接替已经工作近 20 年的 Aura/MLS[72]。随着紧凑型、外差式接收机的发展, 使得小卫星搭载小型化、低功耗的太赫兹临边探测仪成为可能[73]。

从技术的发展来看, 由于 THz 硬件技术的发展, 探测频率逐步提升, 对于探测的成分种类也是越来越丰富。同时 THz 大气临边探测还能够提供大气风场测量的能力, 填补了这个范围测量能力缺乏的空白。同时由于接收机技术的发展, 使得探测频率不断提高, 对于遥感器的天线尺寸要求也随之降低, 因此降低了对于卫星安装条件的限制。目前 400 GHz 以上的小型化探测仪不但可以用于常规的大气探测卫星上, 还可以用于小卫星或者行星大气探测卫星上。这个频段大气的各种成分谱线分布非常广泛, 至少延伸到 1～3 THz, 可以选用的频段极大地增多, 因此探测的成分也随之增加。当接收机噪声能够满足灵敏度指标要求的时候, 利用更高频率探测技术将大大提高大气谱线的探测能力。

目前国际上已经确定在未来几年有发射计划, 正在研制中的仪器项目包括: 瑞典的微型亚毫米波临边探测器(SIW)[74] 和日本的 SMILES 的后续型号 SMILES-2[75]。SIW 是一个计划安装在一颗小卫星上的小型探测仪, 采用一对垂直正交(45°和 135°)的辐射计天线用于测量中高层大气的二维风场和痕量

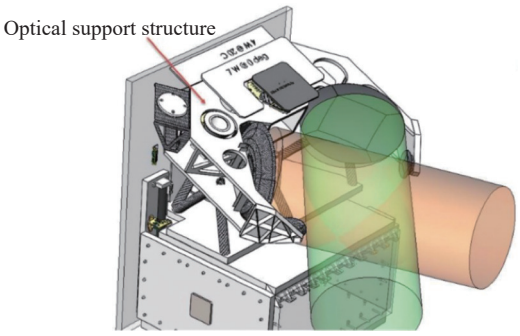


图 10 SIW 载荷

Fig. 10 SIW payload

气体, 采用制冷到比环境温度低 70 K 的方式将 638 GHz 双边带外差式接收机的系统噪声温度控制在 1000～1200 K。后端包括一个 8 GHz 带宽、1 MHz 分辨率的自相关谱仪, 垂直扫描范围为 10～90 km, 垂直分辨率为 5 km[74]。SIW 的工作频率范围为 619.1～627.1 GHz 和 649.05～657.05 GHz, 除了 655 GHz 频段主要用于测风, 还包含了 O_3 及其同位素, H_2O, HDO, HCl, ClO, N_2O, HNO_3, NO, NO_2, HCN, CH_3CN 和 HO_2 等成分的吸收谱线探测。图 10[68] 给出了 SIW 的载荷结构。

SMILES-2 也采用了与 SIW 类似的一对正交方向的天线用于测量二维风场和痕量气体, 并在 638 GHz 频段的基础上增加了 763 GHz, 1.83 THz 和 2.06 THz 辐射计。763 GHz 频段用于测量 O_2 和 H_2O 的吸收谱线, 1.83 THz 用于测量 OH, 而 2.06 THz 可以将大气风场的观测范围拓展到 160 km。计划采用

与 SMILES 一样的 4 K 制冷的 SIS 混频器，可以将 GHz 频段辐射计的系统噪声温度控制在 150 K 左右，THz 频段辐射计的系统温度控制在 990 K 左右。其中 GHz 辐射计的频谱带宽为 6 GHz，THz 辐射计的频谱带宽为 1 GHz，频谱分辨率为 0.5 MHz。主要探测目标包括了 30 km 以上的水平风场，20 km 以上的大气温度，90 km 以上的基态原子氧，中间层顶的大气密度以及 15 种大气成分的含量[76]。表 10 给出了上述国外临边探测载荷的指标对比。

国内对 THz 临边探测仪的研究起步较晚，还没有在轨的临边探测器。目前在民用航天技术预先研究项目的支持下，中国科学院国家空间科学中心开展了太赫兹中高层大气临边垂直探测仪（TALIS）的研制[77]。TALIS 是一台用于大气临边探测的太赫兹辐射计，工作频段包括 118, 190, 240, 640 GHz，后端采用了自研的快速傅里叶变换（FFT）数字频谱仪，具有 2 GHz 频谱带宽和 2.3 MHz 频谱分辨率，天线投影口径 1.6 m。测试结果表明，TALIS 的原理样机在 640 GHz 频段系统噪声温度可以达到 2300 K，可以反演的大气参数达到 16 种，如图 11 所示[78]。

2.3.3 低频微波被动遥感技术

低频微波遥感使用最多的 L 波段的微波辐射计。L～S 波段对于土壤湿度和海面盐度的变化非常敏感，因此从很早的时候就用于机载或者地面的遥感应用。星载的应用开始于 2009 年欧洲的 SMOS 卫星，其搭载了第一台二维综合孔径微波辐射计 MIRAS，用于全球的土壤湿度和海洋盐度的遥感。美国 2015 年发射了一颗 L 波段土壤湿度卫星 SMAP，采

表 10 地球大气临边探测仪指标对比

Table 10 Comparison of specifications of spaceborne limb detectors of the Earth

临边探测仪	探测频率/GHz	系统噪声温度/K	频谱仪带宽/MHz	频谱分辨率/MHz	积分时间/s	扫描范围/km	垂直分辨率/km
Aura/MLS	118, 190, 240, 640, 2500	1200, 900～1100, 1200～1600, 4000～4400, 11000～18000	1300, 190, 10, 500	6～96, 6～32, 0.15, 500	0.16	2～60	1.5～6
JEM/SMILES	625, 650	< 700	1200	1.4	0.5	10～60	3.5～4.1
SIW	655	1000～1200	8000	1	0.5	10～90	5
SMILES-2	638, 763, 1830, 2060	150, 180, 990, 990	8000, 6000, 1000, 1000	0.5	0.25	20～200	1.9

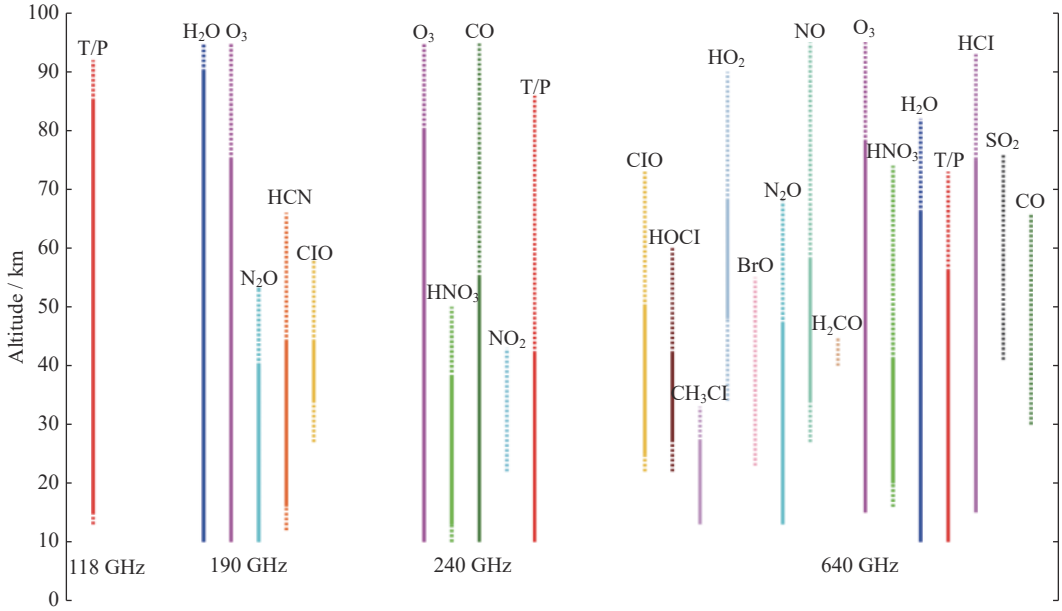


图 11 TALIS 可以观测的参数及其高度范围分布

Fig. 11 Parameters that may be observed by TALIS and their height range distributions

用 6 m 口径的网面天线(见图 12),通过圆锥扫描实现 1000 km 刈幅的全球土壤湿度和冻融的观测[79]。表 6 中欧洲正在研制的哥白尼成像微波辐射计 CIMR 天线口径达到 7 m,有效提升了 L 波段空间分辨率,进而提高对于海面盐度、土壤湿度和冰的监测能力[54],减少综合孔径辐射计中的系统噪声和各种干扰的影响。

低频电磁波遥感的最大优势是其可以探测到一定深度(取决于穿透深度)的场景或者目标,其接收到的亮温中包括这个深度内温度和介电特性的分布特征。SMOS 辐射计可以提供极地边缘冰厚的遥感数据[5]。Jezek 等[63] 利用机载低频微波谱仪进行格陵兰冰厚飞行试验,初步验证了遥感观测极冰的可行性。低频遥感不但面临天线口径巨大的工程安装问题,还需要考虑 RFI、宇宙背景噪声的干扰等对于观测数据质量的影响。例如银河噪声的时间变化的影响[6]。

中国正在研制的海洋盐度卫星包含了一个类似 SMOS 卫星的 L 波段二维综合孔径辐射计和一个三波段一维综合孔径辐射计 MICAP。MICAP 采用大口径一维柱面天线在飞行方向是真实孔径,在垂直飞行方向通过多基线干涉实现多入射角的大刈幅观测,工作频率为 L, C 和 K 波段[44]。图 13 是海洋盐度卫星的官方效果图。左上方是 MICAP,下方的 Y 型天线的是二维综合孔径辐射计。

微波辐射计通过接收目标或者场景的微弱的自然辐射来获得相关的地物参数信息,因此不但参数的反演精度受到其自身探测灵敏度的影响,而且参数的空间分辨率也受到天线口径的限制。即使是综合孔径辐射计也同样有物理尺寸、硬件规模等方面的限制。空间微波辐射计的显著优势是其快速的全球覆盖和多参数同时观测的能力,其劣势就是其空间分辨率相对较差。因此其无法实现主动微波遥感器如 SAR 高清晰的观测能力。当然 SAR 也很难实现类似辐射计的快速全球覆盖能力。因此空间分辨率和空间覆盖率需要一个权衡。空间分辨率越高,地面完全覆盖越困难,所以,空间微波辐射计不可能以高空间分辨率实现快速全球覆盖,空间微波辐射计的大尺度快速全球观测能力是其重要特色和能力。空间分辨率的提升还需要权衡考虑系统灵敏度指标的需求。因为空间分辨率提升会进一步缩短每个像元的观测时间,因此留给接收机硬件的积分时间就更短。根据辐射计灵敏度的计算公式,辐射计系统的灵敏度与积分时间的平方根成反比,因此积分时间越短,灵敏度越差。

当然在特殊的应用场合,或者是不需要全球覆盖或者高空间覆盖率的应用场景,可以在牺牲空间覆盖性要求的情况下,通过增大天线口径提升空间分辨率(例如采用推帚式观测模式[7]),一些低频通道也可以采用综合孔径的体制提升图像的空间分辨率。例如对于近岸海水温度和盐度的观测、冰雪的观测、海洋亚中尺度现象如流场的遥感观测[80],以及部分云雨的观测(台风、热带气旋时云雨结构),可以采用这种方式提升空间分辨率。例如大气成分、温度、风场等的临边遥感观测,通过增大天线口径提升垂直分辨率,进而提高对于大气垂直结构的精细化研究水平。

此外,可以通过小卫星组网观测的方式,同时提升时间和空间分辨率。每颗小卫星的微波辐射计载荷可以实现传统微波辐射计的探测能力[81],多颗卫星

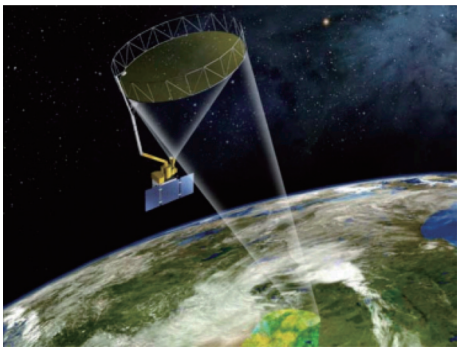


图 12 SMAP 卫星观测。6 m 轻量可展开网面反射面,雷达和辐射计共用一个馈源,天线和接收机同时旋转实现圆锥扫描

Fig. 12 SMAP satellite observation. 6 m lightweight deployable mesh reflector, radar and radiometer share a feed source, the antenna and receiver rotate simultaneously to achieve conical scanning

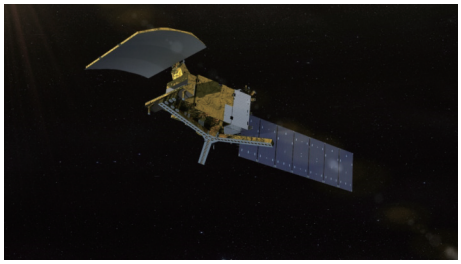


图 13 海洋盐度卫星的官方效果

Fig. 13 Ocean salinity satellite rendering

相同载荷的组网,可以提升时空覆盖率。再通过数据处理的新技术,例如同化技术或者人工智能(AI)技术,提升辐射计处理能力,满足多方位的用户需求。

3 中国空间微波辐射计数据处理及其应用的思考

3.1 数据处理及规范化

空间微波辐射计数据定义需要遵守基本规范,以利于更多用户使用,提升数据效能。NASA 的地球观测数据和信息系统 (EOSDIS)对于数据级别给出如下定义[82]。

0 级数据(L0):重新构建的、原始分辨率的、未处理的仪器/平台的数据包。文件中去掉了人工附加的任何通信信息,例如帧同步数据、通信的头文件等。

1 A 级数据(L1 A):原始分辨率的、未处理的仪器数据、参考时间和一些辅助注释信息在一起重新构建的数据包。辅助信息包括:辐射计定标、几何定标系数、大地参考面的参数等。这些数据有的通过计算给出,有的直接附加在后面,但是没有应用于 L0 数据。

1 B 级数据(L1 B):L1 A 数据转换为传感器的单位(工程单位)。并不是所有仪器都有对应的 L1 B 数据。

2 级数据(L2):根据 L1 数据提取的、相同分辨率和地理位置下的亮温和反演的地物参数数据。

3 级数据(L3):在一致的时空网格下的亮温和参数的图像,通常具有完整性和一致性。

4 级数据(L4):指对低级别数据分析而由相应模式得出的输出结果。

作为例子,表 11 给出 AMSR/AMSR-E 的标准数据定义[83]。AMSR 的地物参数由 L2 和 L3 标准数据给出。AMSR 数据流程如图 14 所示[83]。

下面主要分析 L1 和 L2 级数据的内容及其基本要求。

L1 A 数据用来作为后续定标和数据处理的输入。在这个过程中,要加入表示数据好坏、仪器工作状态是否正常、数据是否缺失等的质量标记。数据除了不同波段的数码值以外,至少应该包括扫描时间、空间分辨率、频率、数据级别、数据类型、数据大小和数据获取方式等数据项。AMSR-E 的 L1 A 数据[83]以半轨为单位,在极点分界(为了重采样,在分界点左右各重复保留一定扫描周期的数据),这样一个轨道就包括升轨和降轨两个文件。每个文件中包括时间序列的天线温度数码值和相关的辅助数据,以层状数据格式(HDF)存储。L1 A 数据包括时间、经度、纬度、天线温度、定标公式的斜率和截距(用于计算天线视在温度)、各种定标源温度数码值、陆地/海洋标识、导航信息等。

L1 B 数据是经过定标、定位以后的各个通道的亮温值,以各自的空间分辨率保存。同时包括工程、定标、卫星等的辅助数据。这些数据包括所有通道、所有观测目标的数码值,即观测地球、冷空和定标源的数码值。同时还包括工程和平台的辅助数据、数据质量、误差估计、定标系数等。这里包括一系列的处理过程,例如源数据包的解码、应用特征数据和定标数据、计算 UTC 表示的时间码、计算工程单位表示的仪器测量结果等。

L2 数据包括空间分辨率重采样后的亮温数据和反演的地物参数标准数据。使用共同天线的微波辐射计,通常情况下不同频率在地球表面产生的增益模式并不相同。这样对于这些测量结果的直接比对是很复杂的,因为观测的位置不尽相同。L2 A 数据由不同频率对应的不同地面足印内的、空间一致的亮温

表 11 AMSR/AMSR-E 的标准数据定义

Table 11 Standard product definition for AMSR/AMSR-E

名称	定义
L1 A	测量的工程量,即仪器输出电压,或者数码值。同时还包括可供高级数据产生的必要信息,包括卫星姿态和仪器条件。数据不是图像形式,但是以刈幅格式存储
L1 B	测量的亮温。同时包括地理位置和数据质量信息。数据不是图像形式,但是以刈幅格式存储。也可以给出图形数据
L2	空间分辨率一致的重采样亮温数据和由反演算法反演的地物参数。同时包括地理位置和数据质量信息。数据不是图像形式,但是以刈幅格式存储。也可以给出图形数据
L3	投影在全球网格上的、时间和空间平均的地物参数值。对于 AMSR/AMSR-E,产生亮温和地物参数的日平均和月平均全球网格图像

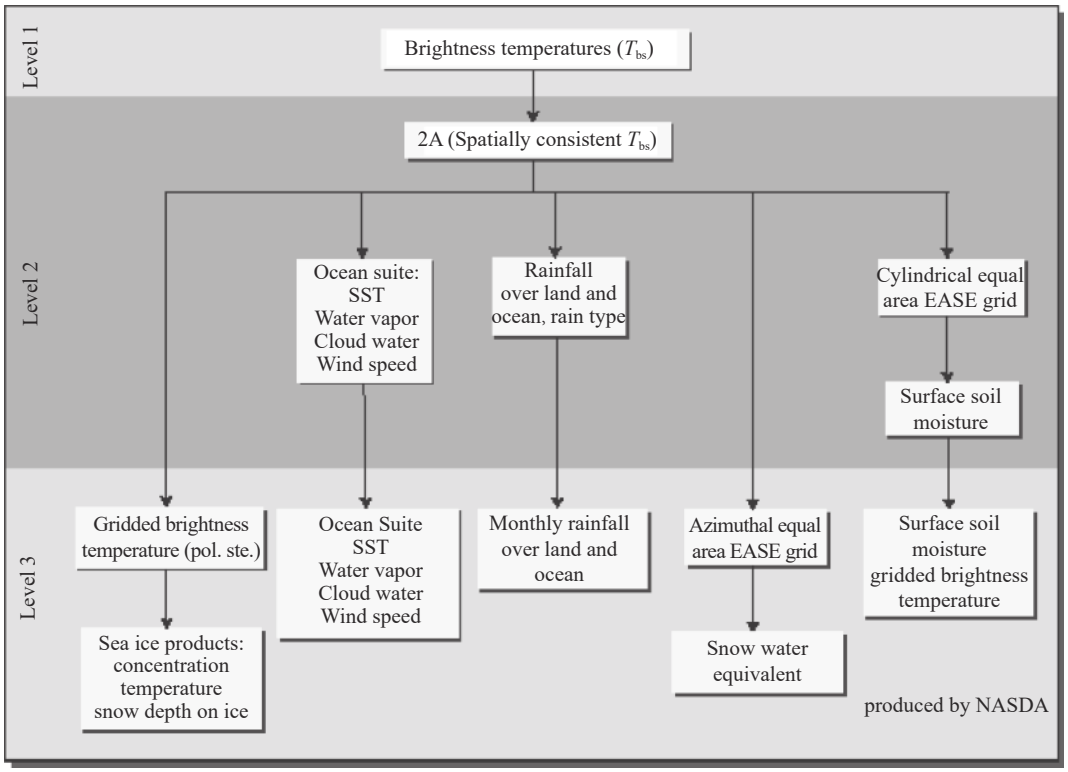


图 14 AMSR 标准数据流程（一级数据由仪器研制方 NASDA 产生）

Fig. 14 AMSR standard product flow chart (Level 1 was produced by NASDA)

组成。在每个对应的空间分辨率内，都有对应的不同波段的亮温。L2 A 的输出的亮温数据用来作为微波辐射计 L2 参数反演算法的输入数据。

L2 A 数据的主要内容包括：覆盖范围、时空特征、数据用途和级别、数据大小、数据格式等。AMSR-E L2 A 的定义与 L1 A 相同，也是以半轨为一个文件。该文件中包含按时间顺序重采样的亮温。L2 A 重采样亮温和相应数据（原始分辨率亮温数据）使用 HDF 格式存储为一个文件。

L2 A 辅助数据包括内部辅助数据和外部辅助数据。内部辅助数据是指用于微波辐射计数据处理但又不包括在辐射计数据包之内的数据，例如导航系统的轨道信息、平台姿态和特征数据、辐射计特征数据等。外部辅助数据是指外部提供的数据模式，这些数据不是来自卫星平台本身，其主要用来进行地理定位和仪器测量结果的地球物理校正，主要包括：轨道数据、初始轨道、精确定轨、时间关系、闰秒等。此外，还有 L1 A 数据得出的、对某些用户感兴趣的数据，例如起始轨道数、终止轨道数、升交点经度、升交点日期和时间、轨道方向、扫描数目、轨道半长轴、轨道离心率、轨道近地点角矩、轨道倾角、轨道周期、椭球体名称、地球半主轴、地球的扁率等。在 L2 A 阶段的辅助数据还包括权重系数表和通道表。权重系数表以单独文件保存，每个文件对应一种频率组合的权重系数。通道表给出了不同通道数对应的频率[83]。

3.2 数据处理算法及其流程的规范化

空间微波辐射计数据处理应包含图 15 流程中的算法[84]。地面处理系统提供原始数据文件（通常对应 L0 数据，也称为 RDR）。然后应用热参考负载和冷空定标负载的数据对馈源处的天线温度（T_A）辐射计计数值进行定标。T_A 可以直接输出产生天线温度数据（简称 TDR）。另外，通过对进入天线馈源能量溢出的校正（馈源旁瓣和反射面截获效率的影响），获得地面目标的天线温度（T'_A），再经过天线方向图校正，获得观测场景的亮温 T_B（简称 SDR）。地理定位模块计算辐射计的观测角、入射角、方位角和经纬度位置，用于天线方向图校正模块进行交叉极化校正、天线极化旋转校正、大气的法拉第旋转校正等，此外由于天线像元内在地表的入射角存在差异（尤其是天线波束宽度较大的通道），所以需要对像元内进行入射角校

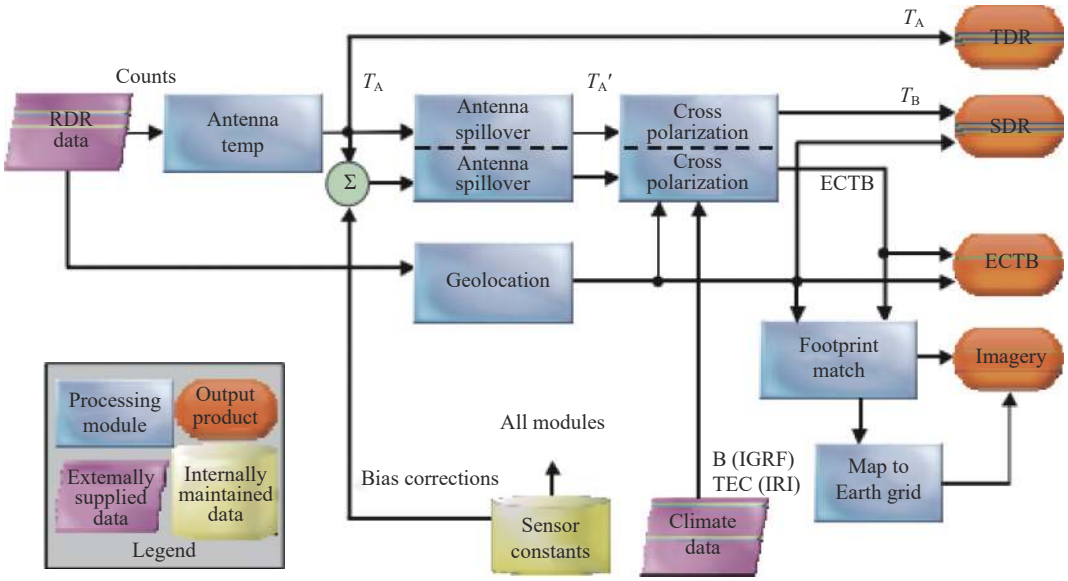


图 15 空间微波数据处理算法流程

Fig. 15 Spaceborne microwave radiometer data processing algorithm

正,这样才能得到准确的亮温数据。在天线温度之前和地理定位之前都要进行数据质量检测,以确保所有的 RDR 在预期的范围之内。在 TDR 和 SDR 数据文件中包括适当的数据质量标志。传感器常数文件(SCF)为所有处理模块提供传感器特定的信息,主要包括频率、极化、通道响应函数、天线方向图、测温电阻的定标系数等。

图 15 包含的主要算法有以下 5 类。

第 1 类 数据处理和定标算法。

主要包括对于定标源温度和亮温的误差分析和校正,对定标源观测电压的稳定性分析和加权平均策略确定,两点定标方程计算,非线性修正系数计算及非线性偏差的计算等,最终得到天线温度的定标结果[13,85,86]。

第 2 类 天线溢出校正算法。

馈源口面定标需要校正馈源方向图的影响;如果是包括天线反射面的整体定标,需要考虑馈源与反射面截获效率(边瓣电平)的影响。这两种情况都体现为天线周围环境温度对于接收到的天线温度 T_A 的贡献[36,84]。因此在仪器研制过程中,馈源的天线方向图和截获效率等参数需要测量并提供给数据处理系统。

第 3 类 天线方向图校正算法。

天线方向图校正包括交叉极化校正、极化旋转校正、法拉第旋转校正、入射角校正等[36,84]。这里所需要的遥感器常数包括不同频段的同极化和交叉极化方向图、载荷姿态、地理位置等[87]。

第 4 类 地理定位算法。

通过卫星姿态和 GPS 信息,利用传感器的观测角度信息和安装矩阵,计算在测地坐标系下的经纬度、入射角和方位角。经典算法可以参考 MODIS 的地理定位算法[88]。此外还有其他算法,例如基于定位和轨道参数的算法、基于数学模型的算法等。

第 5 类 空间分辨率匹配算法。

空间分辨率重新采样包括两个方向:空间分辨率匹配和空间分辨率增强。空间分辨率重新采样的基本算法是 GBI 算法[89]。空间分辨率匹配是把不同空间分辨率观测数据匹配到相同的空间分辨率,也就是把空间分辨率高的观测数据匹配到空间分辨率低的数据[90–93],例如 AMSR-E 数据中 5 个不同空间分辨率的重采样亮温数据集,对应于 6.9, 10.7, 18.7, 36.5 和 89 GHz 5 个不同的空间分辨率[92]。由于星载辐射计的不同探测频点观测波束在地球表面投影足迹大小不同,对地分辨率差距较大。而在被动微波遥感中,大部分的地表参数及气象参数例如土壤湿度,雪覆盖,降水,是需要多通道探测信息协同反演的,并且有时需要多天长时间的观测数据。在进行不同频率探测通道的协同参数反演过程中,各通道足迹的空间分辨率不一致若不经过重采样会导致反演误差。因此必须考虑不同的分辨率引起的误差。为提高反演精度,仪器原始数据需要通过重采样使空间分辨率一

致。当然并不是所有参数的反演，例如大气反演，都需要严格的相同空间分辨率的不同波段亮温。其反演可能直接从测量的 L1 B 亮温开始。从 L1 B 数据到 L2 A 数据，需要使用处理算法，都会人为引入算法误差。一般来讲，L1 数据由载荷的研制单位或生产厂家处理，因为处理过程包括地面定标和质量测试过程中的一些与仪器有关的数据。

空间分辨率重新采样的另外一个方向是空间分辨率增强[94,95]，这个算法通常在 L3 及其以上数据中使用，例如降雨、海冰数据等。被动微波遥感最主要的缺点是空间分辨率较低，因为空间分辨率既依赖于天线的尺寸又依赖于频率。由于受到卫星对有效载荷体积和重量的限制，星载微波辐射计无法装配大型天线，所以星载微波辐射计的固有空间分辨率比较低，通常都在几十千米量级，限制了其在陆地、海洋和冰川等许多研究领域的应用。目前提高星载微波辐射计空间分辨率的方法可大致分为数据融合方法和基于天线方向图反演的方法。数据融合方法主要是通过引入互补观测的额外信息来提高空间分辨率[96]。基于天线方向图反演的方法是根据辐射计本身的过采样测量机制来重建更高分辨率的数据[90–93]。

将高分辨率降低至低分辨率很容易做到，但会导致小尺度信息的平滑。因此，通过增强低空间分辨率去匹配高空间分辨率是一种更好的方法。然而，在不放大噪声的前提下依靠辐射计本身观测信息不足以将低频通道空间分辨率增强至与高频通道匹配。但是如果适当放宽对噪声的限制将会获得更好的分辨率增强效果。在选择合适的采样重叠率与噪声放大策略的前提下，通过空间分辨率增强来匹配通道间的空间分辨率是可以实现的[97]。这方面的研究具有重要的应用价值，其可以通过在一定限度下的硬件提升空间采样和空间分辨率的情况下，结合软件处理技术使空间分辨率和辐射分辨率达到优化。换个角度讲，在满足一定的空间分辨率和采样的条件下，可以通过软件优化技术，实现在一定程度上空间分辨率增强，同时降低观测噪声，从而间接提高灵敏度。这为星载微波辐射计在特定区域或者特殊需求的高分辨率观测，例如近岸海洋参数、极冰、降雨等的高分辨率观测提供了一种新的技术途径。

3.3 定标与真实性检验的标准化

空间微波辐射计要实现对观测目标辐亮度或亮温的精确测量，就需要对其进行定标[4,86,98–100]。微波辐射计定标就是用辐射计系统接收微波辐射特性(辐亮度或亮温)精确已知的定标源的辐射信号，构造出系统输出信号与接收到的辐射量值之间的定量关系。因此，定标技术是微波辐射计系统研究与应用的关键技术之一，是微波辐射计系统数据定量化应用的基础，是获得高质量数据的依据和保障[18,86]。

图 16 给出了微波辐射计定标的总流程，为了对辐射计进行完全定标，包括以下四个部分。

第一部分是数据质量控制。包括对辐射计在正常范围的输出的评估(例如热源和冷空温度及其输出的读数的均匀性和稳定性)、像元场景干扰(例如 RFI)分析和判别，以及接收机的工作状态(例如辐射计射频和中频传输路径的温度稳定性)的分析等。

第二部分是发射前定标。发射前定标在实验室进行，利用准确已知的辐射源在可控条件下进行。在发射前对所有仪器状态和压力因素进行测试是非常重要的，因为其是在辐射计暴露到严苛的轨道环境之前对仪器特性准确建模的唯一手段。发射前定标主要目的是通过模拟微波辐射计在轨运行环境来评价其性能，建立系统的输出电压与已知输入辐射量的关系，并获得在轨定标所需的不同工作温度下的非线性系数[85,86,101]。发射前定标需要地面定标基准作为参照，获得定标参数，同时地面定标基准也为星上定标提供参考基准。但是由于目前微波辐射基准体系尚未建立，所以图 16 中地面定标基准和亮温真值都是相对值，还不能进行传递和比较。未来期望能够在规范定标技术流程和定标方法的基础上，进一步梳理和建立定标辐射基准，至少建立一个国家级的传递体系，为地面和空间被动微波遥感提供一个公共的、但不一定绝对的定标参考基准，提高空间微波辐射计的数据之间的一致性[102]。

第三部分是在轨定标。在线性定标基础上，利用发射前定标获取的非线性系数，实时修正系统非线性，从而获得准确的输出亮温。同时开展天线方向图修正和月球污染修正[98,99]。

第四部分是发射后数据的定标/检验。微波辐射计定标检验是利用外部的亮温的真值和星载微波辐射计的亮温测量值进行比较，以确定定标系数/偏差的过程。通过待定标/检验亮温数据(图 16 中“卫星微波辐射计原始数据”)与一个等效真值(图 17[103] 中“亮温真值”)进行比较(例如利用其他卫星 TB 值的交叉定标、确定 TB 偏差的替代定标、利用辐射传输

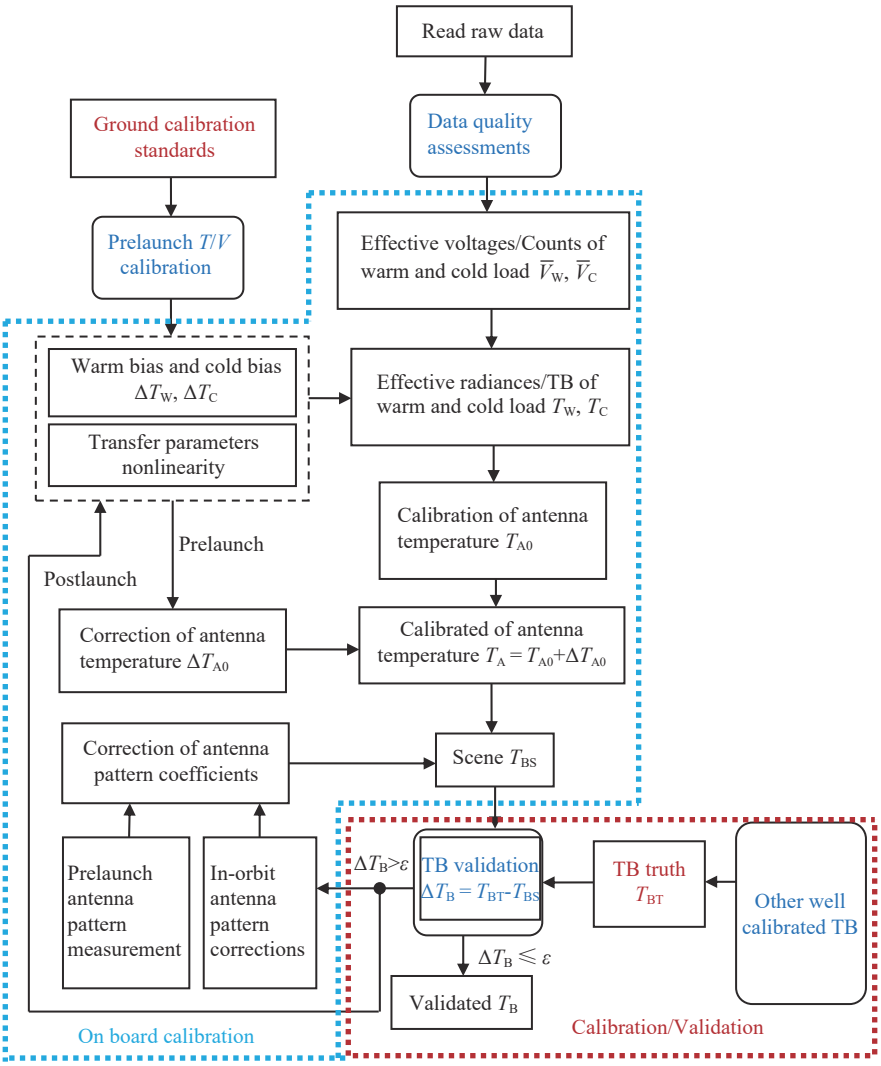


图 16 星载微波辐射计定标总流程

Fig. 16 Overall flow chart of calibration of spaceborne microwave radiometer

模型结合背景场的绝对定标(例如 OMB 方法)得到的定标结果),计算亮温的偏差和精度。当发现被检验的辐射计亮温/辐亮度数据与亮温真值存在差异超过设定的门限值的时候,需要对当前辐射计的传感器定标(图 17[103] 中“星上定标”(天线温度定标与天线方向图定标)和定位)进行重新分析,确定误差分布特性,并进行校正,直到重新定标结果与真值具有很好的一致性。最后还需要对定标的稳定性和一致性进行评价,以生成定标后的亮温和定标的结果[100,102]。发射后定标/检验的标准流程已经由国际标准化组织(ISO)发布,流程如图 17 所示[103]。图 17[103] 中天线温度定标是指对图 16 中天线温度定标中定标源偏差和非线性偏差的在轨校正,天线方向图定标是指利用在轨的实际观测几何、亮温数据(来自模拟或者其他亮温真值)对天线方向图的影响进行校正。辅助数据包括传感器常数文件和卫星相关的辅助信息。

4 结语

空间被动微波遥感技术经过 50 多年的发展,已经成为空间地球科学的重要数据来源之一。以微波辐射计的观测几何作为分类依据,从气象和海洋两大应用方向,系统总结了微波探测仪和微波成像仪技术及应用的发展,对比了中国与国外相关国家和机构的载荷性能,分析总结空间微波辐射计技术发展的趋势,对中国空间微波辐射计数据处理及其应用提出了一些思考,对卫星数据处理及规范化、数据处理算法及其流程的规范化、定标和真实性检验的标准化等方

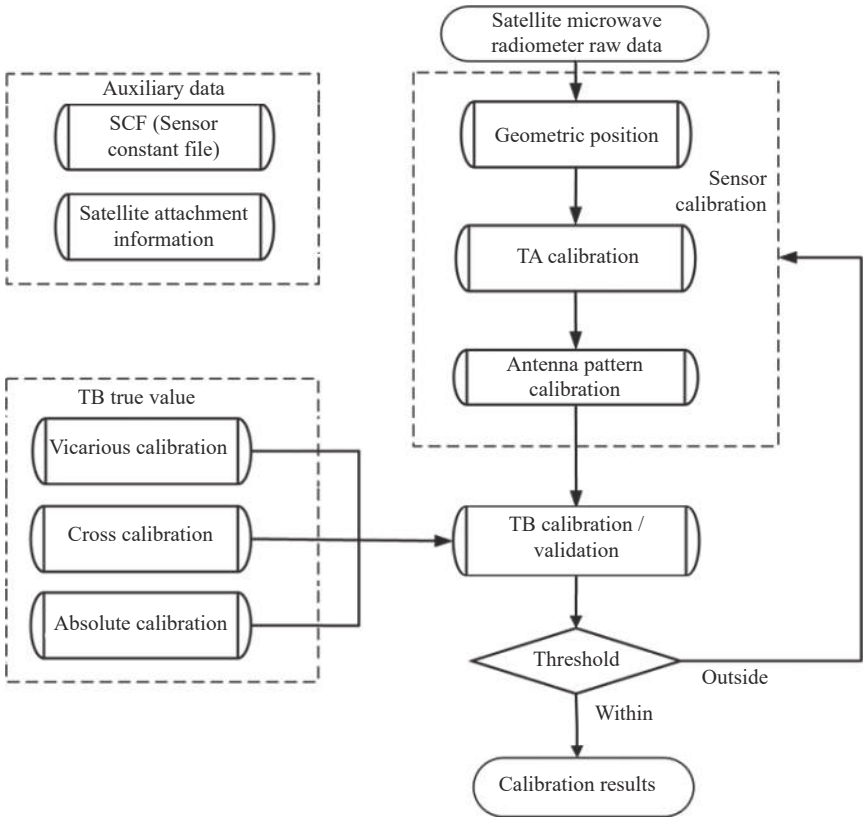


图 17 星载微波辐射计数据定标/检验流程

Fig. 17 Spaceborne microwave radiometer data calibration/validation

面的内容进行了深入分析, 以提升中国卫星微波辐射计的质量和业务化水平, 拓展数据的应用范围, 产生更大的社会经济效益。

本文只针对空间地球科学应用的星载微波辐射计进行分析, 其实微波辐射计的发展得益于早期的射电天文学方面的应用, 由于篇幅限制不再赘述。另外由于 50 多年的发展, 空间载荷形式和技术特点多样, 这里不能完全覆盖全部内容。主要目的是通过对国内外对地星载被动微波遥感技术及其应用发展的分析, 为未来该技术在空间应用提供参考, 尤其是不同类型载荷需要服务不同应用方向, 在载荷的时间、空间、辐射分辨率指标上需要进行折中考虑, 对于特殊需求的遥感需求, 突出要重点解决的应用方向及其关键技术问题, 注重数据标准化和数据的应用, 推动这项微波遥感技术发挥最大应用效能。

参考文献

[1] ULABY F T, LONG D G. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014

[2] URBAN J, BARON P, LAUTIÉ N, *et al*. MOLIERE (v5): a versatile forward- and inversion model for the millimeter and sub-millimeter wavelength range[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, **83**(3/4): 529-554

[3] JAXA. ADEOS-II Data Users Handbook [M]. 3rd ed., 2006. https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/eorc/en/hatoyama/adeos2/adeos2_handbook_e.pdf

[4] WANG Zhenzhan, ZHANG Dehai, ZHAO Jin, *et al*. In-orbit calibration and validation of atmospheric correction microwave radiometer on HY-2A satellite[J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, **15**(7): 44-52,61 (王振占, 张德海, 赵谨, 等. HY-2A 卫星大气校正微波辐射计在轨数据定标和检验研究 [J]. 中国工程科学, 2013, **15**(7): 44-52,61)

[5] BERGER M, CAMPS A, FONT J, *et al*. Measuring ocean salinity with ESA's SMOS mission – Advancing the science[J]. *ESA Bulletin*, 2002, **111**: 113-121

[6] YIN X B, BOUTIN J, SPURGEON P. First assessment of SMOS data over open ocean: Part I – pacific ocean[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(5): 1648-1661

[7] LAGERLOEF G, COLOMB F R, LE VINE D, *et al*. The Aquarius/SAC-D mission: designed to meet the salinity remote-sensing challenge[J]. *Oceanography*, 2008, **21**(1): 68-81

[8] GLOERSEN P, BARATH F. A scanning multichannel

microwave radiometer for Nimbus-G and SeaSat-A[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1977, **2**(2): 172-178

[9] WILHEIT T T, CHANG A T C. An algorithm for retrieval of ocean surface and atmospheric parameters from the observations of the scanning multichannel microwave radiometer[J]. *Radio Science*, 1980, **15**(3): 525-544

[10] MO T, GOLDBERG M D, CROSBY D S, *et al*. Recalibration of the NOAA microwave sounding unit[J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2001, **106**(D10): 10145-10150

[11] MO T. Prelaunch calibration of the advanced microwave sounding unit-A for NOAA-K[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, **44**(8): 1460-1469

[12] MO T. AMSU-A antenna pattern corrections[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(1): 103-112

[13] LAMBRIGTSEN B. AIRS Project Algorithm Theoretical Basis Document: Level 1b, Part 3: Microwave Instruments[R]. Pasadena: JET Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2000

[14] GOODRUM G, KATHERINE B. Kidwell and Wayne Winston[R]. NOAA KLM User's Guide, 2000

[15] SAUNDERS R W, HEWISON T J, STRINGER S J, *et al*. The radiometric characterization of AMSU-B[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995, **43**(4): 760-771

[16] OLSEN E T. AIRS/AMSU/HSB Version 4.0 Data Release User Guide, Version 1.1[R]. Pasadena: JET Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2005

[17] WANG Zhenzhan, LI Yun. Calibration and validation of microwave radiometer (RAD) on-aboard SZ-4 spacecraft: Part I RAD external calibration[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(5): 397-403 (王振占, 李芸. 神舟四号飞船微波辐射计定标和检验(Ⅰ)——微波辐射计外定标 [J]. 遥感学报, 2004, **8**(5): 397-403)

[18] GU Songyan, WANG Zhenzhan, MA Gang, *et al*. Microwave Remote Sensing on Metrological Satellite[M]. Beijing: Science Press, 2021 (谷松岩, 王振占, 马刚, 等. 气象卫星微波大气遥感 [M]. 北京: 科学出版社, 2021)

[19] JIANG X W, LIN M S, LIU J Q, *et al*. The HY-2 satellite and its preliminary assessment[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012, **5**(3): 266-281

[20] LIN Mingsen, HE Xianqiang, JIA Yongjun, *et al*. Advances in marine satellite remote sensing technology in China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, **41**(10): 99-112 (林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展 [J]. 海洋学报, 2019, **41**(10): 99-112)

[21] ZHANG Qingjun. Prospect of satellite ocean remote sensing system for comprehensive carbon management[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, **1**(1): 126-145 (张庆君. 面向碳综合治理的卫星海洋遥感体系展望 [J]. 前瞻科技, 2022, **1**(1): 126-145)

[22] OSCAR. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool[OL]. [2023-09-18]. https://space.oscar.wmo.int/satellites

[23] WENG F Z, ZOU X L, SUN N H, *et al*. Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(19): 11187-111200

[24] WENG F Z, YANG H, ZOU X L. On convertibility from antenna to sensor brightness temperature for ATMS[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(4): 771-775

[25] GHRC. Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Satellite F13 Source/Platform[OL]. [2023-09-18]. https://ghrc.nsstc.nasa.gov/uso/source_docs/dmsp_f13.html

[26] PAGANO T S, CHAHINE M T, AUMANN H H, *et al*. AIRS/AMSU/HSB on EOS Aqua: first-year post-launch assessment[C]//Proceedings of SPIE 5151, Earth Observing Systems VIII. San Diego: SPIE, 2003

[27] WANG Zhenzhan, XU Xiyu, LI Dong, *et al*. New Progress on Satellite Microwave Remote Sensing. Section 3.4 New Progress in Space Technology, 2019 High-Tech Development Report[M]. Beijing: Science Press, 2019 (王振占, 徐曦煜, 李东, 等. 卫星微波遥感技术新进展.《2019高技术发展报告》第三章"航天技术新进展"3.4 节 [M]. 北京: 科学出版社, 2019)

[28] EUMETSAT and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) of the United States today signed an agreement on their Joint Polar System (JPS), which will provide observations from two complementary polar orbits in the period from 2020 to 2040 [OL]. (2015-12-02)[2023-11-24]. https://www.eumetsat.int/eumetsat-and-noaa-sign-agreement-joint-polar-system

[29] KANGAS V, D'ADDIO S, BETTO M, *et al*. Metop second generation microwave sounding and microwave imaging missions[C]//Proceedings of the 2012 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Sopot, Poland, 2012

[30] TENNANT G, SYKES G, BUCKLEY M, *et al*. Microwave sounder for MetOp-SG[C]//Proceedings of the Advanced RF Sensors and Remote Sensing Instruments & Ka-Band Earth Observation Radar Missions. Noordwijk, The Netherlands: ESA/ESTEC, 2014

[31] ZHANG C, LIU H, WU J, *et al*. Imaging analysis and first results of the geostationary interferometric microwave sounder demonstrator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(1): 207-218

[32] KUNKEE D B, POE G A, BOUCHER D J, *et al*. Design and evaluation of the first special sensor microwave imager/sounder[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(4): 863-883

[33] SUN N H, WENG F Z. Evaluation of special sensor microwave imager/sounder (SSMIS) environmental data records[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(4): 1006-1016

[34] KUMMEROW C, BARNES W, KOZU T, *et al*. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, **15**(3): 809-817

[35] SMITH E, ASRAR G, FURUHAMA Y, *et al*. International Global Precipitation Measurement (GPM) program and mission: an overview[M]//LEVIZZANI V, BAUER P, TURK F J. Measuring Precipitation From Space. Dordrecht: Springer, 2007: 611-653

[36] MEISSNER T, FRANK W. GMI Calibration Algorithm and Analysis Theoretical Basis Document[R]//, 2010

[37] PICA G, ALBERTI G, MEMOLI A, *et al*. MetOp Second Generation: a joint ESA/EUMETSAT mission for weather forecast and climate monitoring with an imaging radiometer[C]//Proceedings of the 63rd IAC (International Astronautical Congress). Naples, Italy, 2012

[38] D'ADDIO S, KANGAS V, KLEIN U, *et al*. Microwave imager instrument for MetOp second generation[C]//Proceedings of the 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. Pasadena: IEEE, 2014

[39] CREWELL S, BÜHLER S, PRIGENT C. Potential of the Ice Cloud Imaging Instrument within the EUMETSAT Polar System–Second Generation[OL]. [2023-11-24]. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_peps_ucw3_19.pdf

[40] SOLA R G, PUJADES M B, LABRIOLA M, *et al*. The Ice Cloud Imager for Metop-SG: the development challenge has started[C]//Proceedings of the Advanced RF Sensors and Remote Sensing Instruments & Ka-band Earth Observation Radar Missions. Noordwijk, The Netherlands, 2014

[41] WENTZ F J, MEISSNER T. AMSR Ocean Algorithm, Algorithm Theoretical Basis Document[R]. Greenbelt: National Aeronautics and Space Administration, 2000

[42] OVERVIEW OF THE GLOBAL CHANGE OBSERVATION MISSION (GCOM) [OL]. [2023-11-24]. https://earth.jaxa.jp/files/research/ra/1st_ra_eo/material/material_j.pdf

[43] JIANG Xingwei, LIN Mingsen, ZHANG Youguang. Progress and prospect of Chinese ocean satellites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(5): 1185-1198 (蒋兴伟, 林明森, 张有广. 中国海洋卫星及应用进展 [J]. 遥感学报, 2016, **20**(5): 1185-1198)

[44] LIU H, ZHU D, NIU L J, *et al*. MICAP (Microwave imager combined active and passive): a new instrument for Chinese ocean salinity satellite[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan: IEEE, 2015

[45] RUF C S, KEIHM S J, JANSSEN M A. TOPEX/Poseidon Microwave Radiometer (TMR). I. Instrument description and antenna temperature calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**(1): 125-137

[46] BROWN S, RUF C, KEIHM S, *et al*. Preliminary validation and performance of the Jason microwave radiometer [C]//Proceedings of the IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings. Toulouse: IEEE, 2003

[47] BROWN S. Maintaining the long-term calibration of the jason-2/OSTM advanced microwave radiometer through intersatellite calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(3): 1531-1543

[48] FRERY M L, SIMÉON M, GOLDSTEIN C, *et al*. Sentinel-3 microwave radiometers: instrument description, calibration and geophysical products performances[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(16): 2590

[49] KERR Y H, WALDTEUFEL P, WIGNERON J P, *et al*. The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, **98**(5): 666-687

[50] GAISER P W, GERMAIN K M S, TWAROG E M, *et al*. The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(11): 2347-2361

[51] BROWN S, FOCARDI P, KITIYAKARA A, *et al*. The Compact Ocean Wind Vector Radiometer: A New Class of Low-cost Conically Scanning Satellite Microwave Radiometer System[OL]. https://ams.confex.com/ams/94Annual/webprogram/Manuscript/Paper241605/COWVR_2014_AMS_extended_abstract.pdf

[52] MAIWALD F, MONTES O, PADMANABHAN S, *et al*. RF and electronics design of the compact ocean wind vector radiometer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, **13**: 3816-3823

[53] NEWELL D, DRAPER D, REMUND Q, *et al*. Weather Satellite Follow-on-Microwave (WSF-M) Design and Predicted Performance[OL]. https://ams.confex.com/ams/2020Annual/webprogram/Manuscript/Paper369912/WSFM%20AMS%20Final.pdf

[54] VANIN F, LABERINTI P, DONLON C, *et al*. Copernicus imaging microwave radiometer (CIMR): system aspects and technological challenges[C]//Proceedings of the IGARSS 2020－2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE, 2020

[55] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Handbook of Frequency Allocations and Spectrum Protection for Scientific Uses[M]. 2nd ed. Washington, DC: The National Academies Press, 2015

[56] WENG F Z, YU X W, DUAN Y H, *et al*. Advanced radiative transfer modeling system (ARMS): a new-generation satellite observation operator developed for numerical weather prediction and remote sensing applications[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, **37**(2): 131-136

[57] WANG Xueying. Adaptive microwave land surface emissivity model for observation pixels of spaceborne passive microwave radiometer AMSR2[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences), 2023 (王雪影. 面向星载被动微波辐射计 AMSR2 观测像元的自适应陆表发射率模型研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2023)

[58] NOROUZI H, TEMIMI M, ROSSOW W B, *et al*. The sensitivity of land emissivity estimates from AMSR-E at C and X bands to surface properties[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, **15**(11): 3577-3589

[59] PELLARIN T, WIGNERON J P, CALVET J C, *et al*. Two-year global simulation of L-band brightness temperatures over land[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(9): 2135-2139

[60] NJOKU E G, LI L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(1): 79-93

[61] ITU. Recommendation ITU-R RS. 515-4 Frequency Bands and Bandwidths Used for Satellite Passive Sensing[R]. Geneva: ITU, 2011

[62] WU D L, YEE J H, SCHLECHT E, *et al*. THz limb sounder (TLS) for lower thermospheric wind, oxygen density, and temperature[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2016, **121**(7): 7301-7315

[63] JEZEK K C, JOHNSON J T, TAN S R, *et al*. 500–2000-MHz brightness temperature spectra of the northwestern Greenland ice sheet[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, **56**(3): 1485-1496

[64] WANG Wenyu. Simulation Study on Application for THZ Atmospheric Limb Sounder[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020 (王文煜. 太赫兹大气临边探测辐射计应用仿真研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2020)

[65] BARATH F T, CHAVEZ M C, COFIELD R E, *et al*. The Upper Atmosphere Research Satellite microwave limb sounder instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, **98**(D6): 10751-10762

[66] MURTAGH G, FRISK U, MERINO F, *et al*. An overview of the Odin atmospheric mission[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2002, **80**(4): 309-319

[67] SCHOEBERL M R, DOUGLASS A R, HILSENRATH E, *et al*. Overview of the EOS aura mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(5): 1066-1074

[68] KIKUCHI K I, NISHIBORI T, OCHIAI S, *et al*. Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D23): D23306

[69] FUJII Y, KIKUCHI K, INATANI J, *et al*. Spaceborne 640-GHz SIS receiver based on a 4-K mechanical cooler [C]//Proceedings of SPIE 4013, UV, Optical, and IR Space Telescopes and Instruments. Munich: SPIE, 2000

[70] MASUMICHI S, AXEL M, MANABE T, *et al*. Quasi–Optics for 640 GHz SIS Receiver of International–Space–Station–Borne Limb–Emission Sounder SMILES[C]//14th International Symposium on Space Terahertz Technology, 2003

[71] INATANI J, NARASAKI K, TSUNEMATSU S, *et al*. Mechanical cooler and cryostat for submillimeter SIS mixer receiver in space[C]//Proceedings of SPIE 4540, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V. Toulouse: SPIE, 2001

[72] GERBER D, SWINYARD B, ELLISON B, *et al*. LOCUS: Low cost upper atmosphere sounder[C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVII, 2013

[73] WANG Wenyu. Study on Terahertz Atmospheric Measurement Methods and Applications[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences), 2023 (王文煜. 太赫兹大气探测方法及应用研究, 博士后研究工作报告 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2023)

[74] BARON P, MURTAGH D, ERIKSSON P, *et al*. Simulation study for the Stratospheric Inferred Winds (SIW) sub-millimeter limb sounder[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2018, **11**(7): 4545-4566

[75] OCHIAI S, BARON P, NISHIBORI T, *et al*. SMILES-2 mission for temperature, wind, and composition in the whole atmosphere[J]. *SOLA*, 2017, **13A**(Special_Edition): 13-18

[76] BARON P, OCHIAI S, DUPUY E, *et al*. Potential for the measurement of mesosphere and lower thermosphere (MLT) wind, temperature, density and geomagnetic field with Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2 (SMILES-2)[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, **13**(1): 219-237

[77] WANG W Y, WANG Z Z, DUAN Y Q. Performance evaluation of THz atmospheric limb sounder (TALIS) of China[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, **13**(1): 13-38

[78] WANG W Y, WANG Z Z, DUAN Y Q. Preliminary evaluation of the error budgets in the TALIS measurements and their impact on the retrievals[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3): 468

[79] ENTEKHABI D, NJOKU E G, O'NEILL P E, *et al*. The soil moisture active passive (SMAP) mission[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, **98**(5): 704-716

[80] DU Y, DONG X L, JIANG X W, *et al*. Ocean surface current multiscale observation mission (OSCOM): simultaneous measurement of ocean surface current, vector wind, and temperature[J]. *Progress in Oceanography*, 2021, **193**: 102531

[81] WANG Zhenzhan, SUN Yiling, WANG Wenyu, *et al*. Simulation studies on the applications of small-satellite-based atmospheric microwave sounder (SAMS)[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, **37**(1): 8-16 (王振占, 孙艺玲, 王文煜, 等. 小卫星大气微波探测仪及其应用模拟研究 [J]. 遥感技术与应用, 2022, **37**(1): 8-16)

[82] EARTHDATA. Data Processing Levels[OL]. [2023-09-26]. https://www.earthdata.nasa.gov/engage/open-data-services-and-software/data-information-policy/data-levels

[83] AMSR, AMSR-E. Data Products[OL]. [2023-09-26]. https://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/products/index.html

[84] SMITH C I, WENTZ F, MEISSNER T. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the Conical-Scanning

Microwave Imager/Sounder (CMIS) Environmental Data Records (EDRs) //Volume 17: Temperature Data Record and Sensor Data Record Algorithms, Version 2.0 – 15 March 2001[C]. Solicitation No. F04701-01-R-0500, AER Document P757-TR-I-ATBD-TDR-SDR-20010315

[85] WANG Z Z, LI J, ZHANG S W, *et al*. Prelaunch calibration of microwave humidity sounder on China's FY-3A meteorological satellite[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(1): 29-33

[86] WANG Zhenzhan, LI Jiaoyang. Calibration principle and algorithm of microwave sounder onboard FengYun-3 satellites[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, **34**(6): 1197-1204 (王振占, 李娇阳. 风云三号卫星微波探测仪定标原理及算法 [J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(6): 1197-1204)

[87] WANG Zhenzhan, DING Jia, LU Hao, *et al*. Design of airborne full polarization microwave radiometer system and extraction method of sea surface brightness temperature[J]. *Acta Electonica Sinica*, 2023, **51**(2): 275-285 (王振占, 丁甲, 陆浩, 等. 机载全极化微波辐射计系统设计及海面亮温的提取方法 [J]. 电子学报, 2023, **51**(2): 275-285)

[88] MODIS Level 1A Earth Location: Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.0[OL]. (1997-08-26) [2023-11-24]. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod28_v3.pdf

[89] BACKUS G, GILBERT F. Uniqueness in the inversion of inaccurate gross Earth data[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*: *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1970, **266**(1173): 123-192

[90] STOGRYN A. Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, **26**(5): 720-726

[91] POE G A. Optimum interpolation of imaging microwave radiometer data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, **28**(5): 800-810

[92] ASHCROFT P, WENTZ F J. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) AMSR-E Level 2A Algorithm [R]. Greenbelt: National Aeronautics and Space Administration, 2000

[93] MAEDA T, TANIGUCHI Y, IMAOKA K. GCOM-W1 AMSR2 Level 1R product: dataset of brightness temperature modified using the antenna pattern matching technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, **54**(2): 770-782

[94] FARRAR M R, SMITH E A. Spatial resolution enhancement of terrestrial features using deconvolved SSM/I microwave brightness temperatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(2): 349-355

[95] HU T, ZHANG F, LI W, *et al*. Microwave radiometer data superresolution using image degradation and residual network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(11): 8954-8967

[96] SABAGHY S, WALKER J P, RENZULLO L J, *et al*. Spatially enhanced passive microwave derived soil moisture: capabilities and opportunities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **209**: 551-580

[97] ZHANG Z, WANG Z Z, HE W M, *et al*. Analysis of the effect of enhanced FOV and sampling strategy on the spatial resolution enhancement of spaceborne microwave radiometer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, **16**: 8249-8261

[98] GU Songyan, WANG Zhenzhan, LI Jing, *et al*. FY-3A/MWHS data calibration and validation analysis[J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, **15**(7): 92-100 (谷松岩, 王振占, 李靖, 等. FY-3A/MWHS 在轨辐射定标及结果分析 [J]. 中国工程科学, 2013, **15**(7): 92-100)

[99] GU Songyan, GUO Yang, DOU Fangli, *et al*. Radiometric calibration technology of microwave atmospheric sounders of FY-3 satellites[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, **36**(1): 141-154 (谷松岩, 郭杨, 窦芳丽, 等. 风云三号微波大气探测载荷辐射定标 [J]. 遥感技术与应用, 2021, **36**(1): 141-154)

[100] GU Songyan, GUO Yang, XIE Xinxin, *et al*. Recalibration of the FY-3 microwave payload historical data records[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, **27**(10): 2252-2269 (谷松岩, 郭杨, 谢鑫新, 等. 风云三号卫星微波载荷历史数据再定标 [J]. 遥感学报, 2023, **27**(10): 2252-2269)

[101] WANG Zhenzhan, XIAO Yuwei, ZHANG Shengwei, *et al*. Analysis on applicability of nonlinearity coefficients derived from prelaunch calibration tests to onboard calibration of Microwave Humidity Sounder (MWHS-Ⅲ) on FY-3E satellite[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, **27**(10): 2327-2336 (王振占, 肖雨伟, 张升伟, 等. FY-3E 微波湿度计发射前定标的非线性系数在星上定标中的适用性分析 [J]. 遥感学报, 2023, **27**(10): 2327-2336)

[102] LI Jiaoyang, WANG Zhenzhan, GU Songyan, *et al*. Common re-calibration technology for spaceborne microwave atmospheric humidity sounder[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, **34**(6): 1212-1220 (李娇阳, 王振占, 谷松岩, 等. 星载微波大气湿度探测仪再定标共性技术分析 [J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(6): 1212-1220)

[103] ISO/TS 19159-4: 2022 Geographic information — Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data — Part 4: space-borne passive microwave radiometers[S]. 2022