

将天气雷达网建到太空

■ 许小峰

将雷达安装在卫星上,通过主动发射电磁波的方式获取云雨的内部结构特征,能够改善对全球降雨的系统性完整测量。文章对天气雷达探测卫星的发展做了介绍,从TRMM卫星到GPM全球测雨卫星星座,以及CALIPSO和CloudSat的成功发射,极大提升了对全球雨、云和气溶胶的观测能力。FY-3G星将是我国自主研发的首颗测雨雷达卫星。RainCube雨立方星的成功使发展空基测雨雷达小卫星星座的构想成为可能,在研的MASTR三频小卫星有可能推进雷达小卫星星座在同时获取云雨特征方面取得新的进展。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.01.001

自从20世纪40年代开始将雷达应用到气象探测业务以来,这项技术取得快速发展,特别是近20~30年来,在东亚、西欧、北美、澳大利亚等区域和国家先后建成了较完整的天气雷达探测网,对天气系统的演变发挥了重要的监测预警作用,成为地基气象探测业务系统中最重要工具之一。作为对灾害天气的监测,及对天气系统的发生发展规律的认识,地面雷达系统的建设基本可以满足某一区域的需求,但由于雷达具备强大测云、测雨功能,使气象学家无法仅满足于此,全球的云雨分布并不仅是在陆地或人类活动较多的区域,更多发生在广大的海洋洋面上。特别是热带洋面上空,是大范围对流降雨系统发展的重要区域,不将云雨结构探测分析清楚,对于天气、气候演变规律的认识,包括对全球天气的实时监测预测,都会存在盲区。特别是云雨形成过程中会释放大量潜热,是驱动大气环流运动的重要能量来源,探测分析广大洋面上和人类活动稀少区域的云雨变化,显然存在迫切需求。

走向海洋,通过船舶和飞机加载雷达后都可以实现对海洋云、雨的观测,但明显的缺陷是探测时空范围有限,难以满足对全球天气气候问题研究的需求。可能的选择是星载雷达,将雷达安装在卫星上,通过主动发射电磁波的方式获取全球云雨的内部结构特征,若能实现,则会改变对全球降雨缺少系统性完整测量的局面。星载测雨雷达正是在这一需求推动下发展的。

1 TRMM 卫星的成功

热带降雨测量任务(TRMM)卫星的起源可追溯

到1972年,当时美国国家航空航天局(NASA)的科学家获取到了卫星上第一个微波成像仪器(ESMR)云结构图像,被微波仪器洞穿云层的能力迷住了,可以清晰看到云内降雨轮廓。1976年,ESMR的首席研究员Tom Wilheit博士等首次通过试验对观测数据进行了量化,标志着直接、定量、全球卫星观测太空降雨的开始。同年,Rao等通过ESMR数据,生成了一个全球海洋降雨图集。尽管存在明显缺陷,但比当时任何可用的全球云雨图集都要完整,此时人们相信“与其诅咒黑暗,不如点燃一支蜡烛。”

1984年,NASA的科学家经过多种方案的讨论,提出了新的发展计划(TRMM),即在卫星上安装以ESMR为基础的主动遥感的雷达装置,将可以在全球降雨观测定量数据获取方面取得新的跨越,获取更为精准的云、雨探测信息。但由于经费和需求问题,技术上的先进性与可行性都还不足以说服NASA立项投资,相关的科学家在美国及世界各地开展了广泛说服工作,试图证明TRMM计划的价值,并从科学角度做出分析和验证。如诺斯博士(Dr. North)根据他对全球大气研究计划大西洋热带试验(GATE)雷达数据的研究,证明若通过TRMM获取数据,足以确定用于气候目的的月平均降水量,即尽管从天气预报角度,一颗雷达星由于重复频率低,难以满足对天气系统的有效监测,但从气候分析角度,则有其特殊的应用价值,可以获取全球降雨的时空平均分布信息。

1985年,TRMM计划的积极倡导者读到了日本无线电研究实验室(RRL)(后改为通信研究实验室CRL)的富冈诺博士(Dr. Nobuyoshi Fugono)撰写的论文,

收稿日期:2022年11月8日;修回日期:2023年1月29日
第一作者:许小峰(1957—),Email: xuxf@cma.gov.cn

阐述了RRL同时使用雷达和微波辐射计对降雨进行遥感观测的成果。有趣的是，RRL的关注点是如何修正受到降雨干扰的无线电信号，而NASA专家关心的则是如何获取那些干扰信号特征，即降雨。NASA的约翰·席恩(John S. Theon)在一次路过东京时与富冈诺博士见了面，并促成了双方在TRMM计划中的合作，在经过双方的多方协调后，TRMM在美、日两国太空计划中得到了最高级别的认可，实现了在发展战略、科技研发和经费支持上的互补^[1]。

虽然有美、日科学家的深度参与，随后的进程也不算顺利，要做的事很多，经费并不充裕，有的参与者甚至一度对TRMM的缓慢进展感到不耐烦。但最终还是见到了曙光，1991年，NASA得到了一笔5000万美元的TRMM计划启动资金，正式成立了项目办公室，进展明显加快，1991年4月，硬件研制正式启动。

TRMM卫星为近地轨道卫星，采用三轴定向稳定，轨道倾角为 35° ，覆盖范围为 $35^\circ\text{N}-35^\circ\text{S}$ 。共包括5个科学仪器，除测雨雷达(PR)外，还包括微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)、可见光和红外扫描仪(VIRS)、云和地球辐射能量系统(CERES)、闪电成像传感器(LIS)(图1)^[2]。按照协议，日本宇航研发局(National Space Development Agency of Japan, NASDA)负责PR和发射火箭(H-II)的研制，NASA负责其他的仪器。在设计过程中，也曾考虑过PR使用13.8和24.15 GHz的双频方案，但因重量和能源等因素而放弃了。而将PR与TMI信息结合，形成主动与被动微波探测信息的互补，对提升降雨信息定量计算的可靠性确实起到了重要作用。TRMM上安装的TMI，其是在美国国防卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)开发的微波成像探测仪(Special Sensor Microwave/Imager Sounder, SSM/I)基础上改进，增加了10.7 GHz通道，

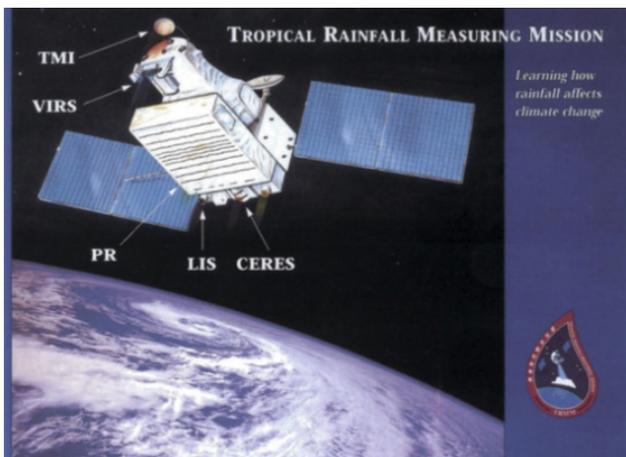


图1 TRMM仪器分布概念图^[2]

并将22.235 GHz频率改为21.3 GHz，同时使用10.7、19.4、21.3、37与85.5 GHz五个微波频段，除21.3 GHz通道采用垂直极化外，另四个均为水平与垂直双极化通道。TMI的扫描宽度约为760 km。

1997年11月28日，一切准备就绪，通过H-II运载火箭，将3620 kg重的TRMM卫星从日本种子岛航天中心(Tanegashima Space Center)成功升空，成为世界上首颗空基天气雷达卫星，覆盖范围为 $35^\circ\text{N}-35^\circ\text{S}$ 。从这颗卫星设计目标来看，尽管可以提供强对流天气降水系统的垂直立体分布(图2)，因存在单颗卫星重复频率低的弱点，但并不像地基天气雷达那样主要用于观测短时强降水系统，其定位是用来开展热带降雨气候学的研究。PR可以从太空对星下观测区域的降雨实现全天候立体探测，避免了地形和建筑物影响，从而获取到了较高分辨率的全球陆地与海洋上空的降雨立体结构信息。且PR经过了精确定标后，与TMI信息结合计算，数据具有较高的可信度和一致性(图3)。

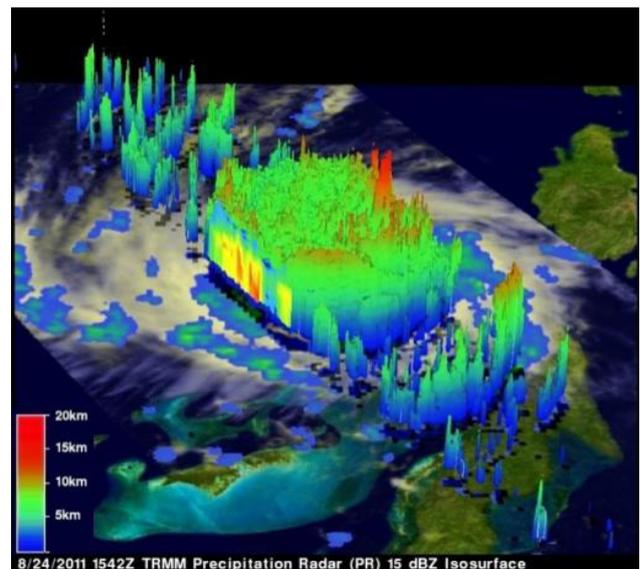


图2 2011年TRMM探测到的飓风艾琳(Irene)
(来源: NASA网站)

通过对TRMM资料的研究分析，确实取得了大量成果，如显著降低了对热带降雨的气候学估计的不确定性，给出了热带地区潜热估计的垂直剖面，还通过对降雨时间变率的分析，建立了与MJO(Madden-Julian oscillation)和ENSO(El Niño-Southern Oscillation)变化的相关联系等^[3]。此外，也取得了许多包括天气分析在内的研究成果，可以说是超预期完成了预期目标。

为提高卫星的寿命，2001年8月，将卫星运行高度从350 km提升到了400 km，这样做可以降低来自大气的阻力。PR扫描宽度约为215 km，轨道高度提升后

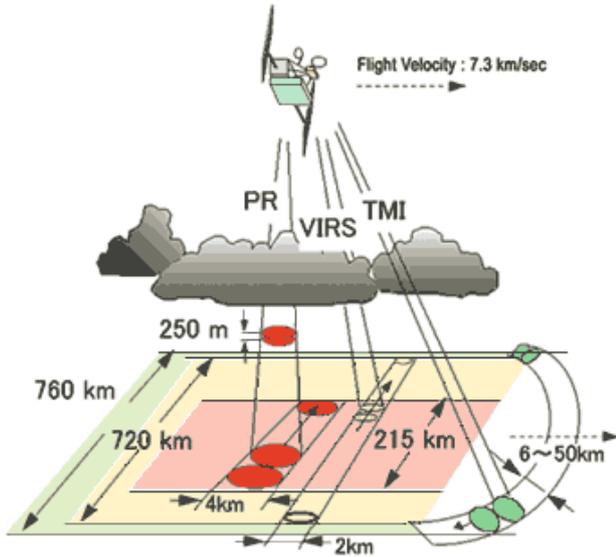


图3 350 km高度时PR、TMI和VIRS测雨时空范围概念图(来源: JAXA网站)

为247 km;星下点水平分辨率约4.3 km,轨道提升后约为5 km;垂直分辨率为250 m;探测高度范围为自地表向上至约20 km处。

最初设计寿命为3年的TRMM卫星持续工作了17年。提供了大量云雨和风暴的三维结构信息,于2015年4月15日因燃料耗尽而正式结束使命,6月15日在南印度洋上空关闭并坠入地球大气层。这一成功设计和运行的项目为后来的测雨卫星发展提供了宝贵的技术积累,并加速了随后的发展,如全球降雨测量计划(Global Precipitation Measurement, GPM)测雨卫星,显然是在TRMM成功的基础上研制发展的。

2 GPM全球测雨卫星计划成功接力

TRMM的成功对于决策、研发和应用部门都是极大的鼓舞,美国NOAA和日本JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)没有停止他们的合作(2003年NASDA并入JAXA),而是启动了更为庞大的GPM计划^[4]。GPM任务重点任务仍是要满足地球科学界对解释气候变化中全球水和能量循环(GWEC)研究和应用的需求,同时也将对天气研究计划提供支持^[5]。

GPM计划有两个重要改进,一是对于核心星GPMCO(GPM Core Observatory)性能的提升;二是以核心星为平台,构建了全球测雨卫星星座,从而达到能在3 h左右的时间周期获取一次经过质量标校的全球降雨信息。其基本构想是通过使用一颗主卫星(核心星)和多颗携带微波辐射计的卫星对全球降水(降雨和降雪)进行准确且高频次的测量,从而达到获取全球降水时空演变完整信息,提升对地球水和能量循环

的理解,监测全球降水气候演变,改善对与降水相关的极端天气气候事件预警、预测的目标。

GPMCO仍由日本和美国联合开发,2007年7月,NASA局长查尔斯·博尔登(Charles Bolden)和JAXA主席立川敬二(Keiji Tachikawa)在美国佛罗里达州肯尼迪航天中心正式签署了合作协议^[6]。基于该协议,GPMCO将携带一个双频测雨雷达(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR),在Ku(13.6 GHz)和Ka(35.5 GHz)频段下工作,和一个在10~183 GHz频段范围工作的多通道微波成像仪(GMI)(图4)。与TRMM计划相比,GPMCO携带的观测仪器数量明显减少,但无论是测雨雷达还是微波成像仪的性能都显著提升。DPR和GMI将协调发挥对降水的量化观测作用,提供来自主动和被动探测器的三维互补信息,以提高GPMCO降水算法的可靠性。根据协议,NASA重点负责研制GPMCO的卫星搭载平台和GMI等设备,而JAXA则负责制造核心观测平台上的DPR和H-IIA运载火箭。发射任务最初计划于2013年7月在日本种子岛执行。

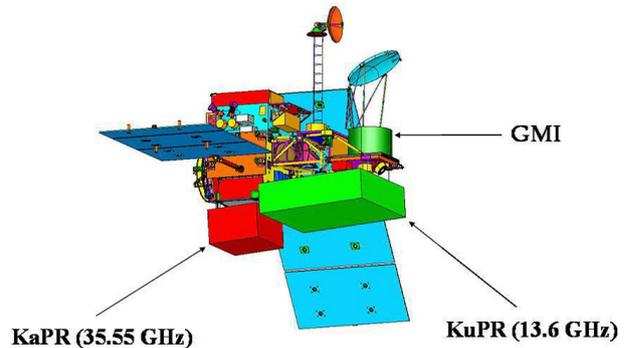


图4 GPMCO结构示意图^[7]

由于DPR增加了Ka波段,对小雨和降雪的测量灵敏度更高。GMI使用一组经过优化的频率来检索重、中和轻度降水估计值,与TRMM卫星相比,增加了4个高频通道,从而提升了对微量降水及固态降水的观测能力,能够更加精确地捕捉微量水(<0.5 mm/h)和固态降水^[7]。这对于GPMCO十分重要,可以提升对中高纬度地区降雨特征的探测能力,与TRMM重点关注热带地区降雨有所区别。增加了新通道后,GMI的13个通道频率为10.65 GHz(双极化V&H)、18.7 GHz(V&H)、23 GHz、36.5 GHz(V&H)、89 GHz(V&H)、165.5 GHz(V&H)、183.31 GHz(±3V)和183.31 GHz(±7V),9个微波频段和4个毫米波频段。如图5所示,左侧的5个低频通道对大雨和中度降雨较敏感,中间的4个通道可以较好地感应云层内冰雪和降雨混合物,右边的4个高频通道对水汽和降雪较敏感。对每个类别降水设置多个通道可以使GMI捕获尽可能完整的降

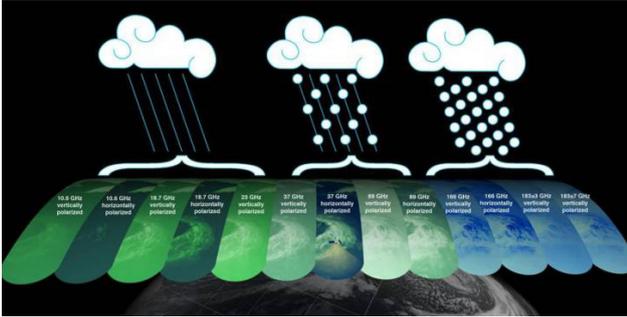


图5 与不同降水类型适应探测频道示意图 (来源: NASA网站)

水类型。

GPMCO飞行高度为407 km, 通过65°的轨道倾角不仅能够观测热带地区, 还能到观测中高纬度地区, 通过非太阳同步轨道, 可以在一天内捕获全球降水变化DPR探测的条带宽度13.6 GHz频段为245 km, 在35.5 GHz频段为125 km, 可以通过两个频段的重叠扫描区域同步开展探测。GMI通过锥形扫描, 其探测条带宽度为885 km (图6)。

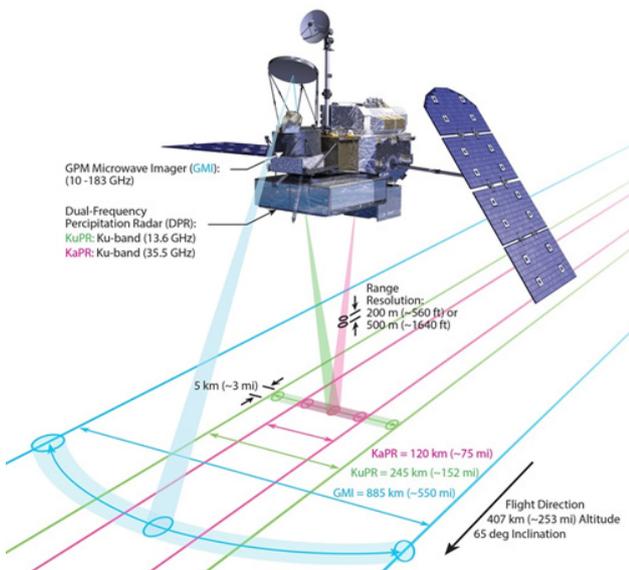


图6 GPM核心星测量范围示意图 (来源: NASA网站)

GPM是一项国际卫星计划, 除核心星外, 还需要更多携带微波辐射计的卫星共同参与, 构成GPM星座, 从而获取高时空分辨率的全球降雨测量, 提供新的全球降水数据产品。而GPMCO可通过提供对不同降水类型主动与被动组合传感器观测和算法来锚定不同卫星提供的数据, 建立来自太空的降水测量参考标准, 与合作卫星共同提供完整、一致性的降水数据集。

参与GPM星座 (图7) 的卫星微波仪器数据交换的包括美国国防气象卫星计划 (DMSP) 卫星上的特殊微波成像/测深仪 (Special Sensor Microwave

Imager/Sounder, SSMIS); 日本JAXA全球变化观测计划水1号卫星 (GCOM-W1) 上的先进微波扫描辐射计 (AMSR-2); 法国国家空间研究中心 (CNES) 和印度空间研究组织 (ISRO) 提供的Megha-Tropiques卫星上的多频微波扫描辐射计 (MADRAS) 和多通道微波湿度测深仪 (SAPHIR); 美国NOAA系列卫星上的微波湿度测深仪 (MHS); 欧洲气象卫星应用组织 (EUMETSAT) 发射的MetOp系列卫星上的MHS仪器; 美国国家极轨运行环境卫星系统 (NPOESS) 预备项目 (NPP) 的高性能微波测深仪 (ATMS); 美国联合极轨卫星系统 (JPSS) 上的ATMS仪器; 美国国防气象卫星系统 (DWSS) 上使用的微波成像仪。根据GPM计划, 将根据发展情况接受更多相关卫星加入星座, 使星座具备更为强大的全球测雨能力, 并使更多的用户从中受益。



图7 GPM星座示意图 (来源: NASA网站)

2014年2月27日, GPMCO按调整后的预定时间成功发射, 地点仍在日本种子岛航天中心, 通过H-IIA运载火箭将重约3900 kg重的卫星成功送入太空, 并开始实时作业, 提供全球降水信息。至今, GPM项目已为与全球降水相关的科研和业务提供了大量珍贵数据, 成为最成功的国际气象卫星合作发展计划。

3 气溶胶探测卫星 CALIPSO 和云探测卫星 CloudSat

在发展TRMM和GPMCO的同一时期, NASA还合作发展了另外两颗主动探测遥感卫星, 气溶胶探测CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Satellite Observation) 和云探测CloudSat。CALIPSO是NASA和法国宇航局 (Centre national d'études spatiales, CNES) 合作研发的, 星上载荷532和1064 nm的双波长激光雷达 (CALIOP), 垂直分辨率为30~60 m, 水平分辨率

为333 m；另一个为三通道红外成像辐射计（IIR），可在8.7、10.5和12.0 μm 三个红外通道窗口进行测量，光谱分辨率为0.6~1.0 μm ，成像条带宽度为64 km；另一个载荷为覆盖620~670 nm光谱区域的广角摄像头（WFC）。通过这些载荷可以测量大气气溶胶及薄云的垂直分布信息，探测和估算气溶胶和云在发展过程中的演变关系，这些信息有助于满足对日益增长的气候变化和大气环境研究分析的需求。

CloudSat是NASA与加拿大航天局（Canadian Space Agency, CSA）合作开发的，于1999年被选为NASA地球系统科学探路者（Earth System Science Pathfinder）计划，目标是通过探测云的垂直结构，增进对云密度分布、结构和辐射特性等的理解。星上搭载了一台94 GHz毫米波雷达CPR（Cloud Profiler Radar），用来探测云剖面信息，获取包括从云顶到云底的云垂直结构、云中液态水和冰晶含量、云对大气热量垂直分布的贡献等直接或间接估算信息。探测垂直分辨率为500 m，水平分辨率为1.4 km \times 2.5 km^[8]。

这一构想始于20世纪90年代初，美国和欧洲航天和气象界的科学家提出了极具创新的想法，通过在太空中放置两个“主动遥感”探测器，获取大气层中的云粒子和气溶胶信息，与大多数被动遥感卫星配合组成星座，对地球大气进行互补测量。这一创新在当时条件下具有一定风险性，但经过十多年的研发，最终获得了成果。2006年4月18日，CALIPSO和CloudSat在美国加州发射成功，成为午后星座（A-Train Constellation）的重要成员，使星座同时具备了主动和被动遥感的能力（图8）。

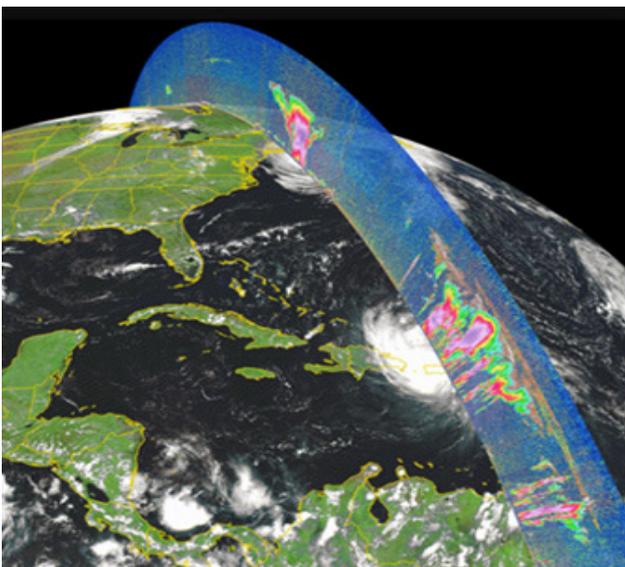


图8 2017年9月20日CALIPSO和CloudSat共同监测到的飓风玛丽亚（Maria）和热带风暴何塞（José）

所谓午后星座（A-Train，图9）是美国NASA与国际合作伙伴共同设计的一个卫星观测星座，若干个具有不同探测功能的卫星沿着非常相似的轨道紧密跟随，在地方时13:30左右以上升方向穿越赤道，相距数秒至数分钟，A是指下午的意思，故得名午后星座，或直译为午后列车^[9]。利用多种仪器开展几乎同时的观测显然有助于对地球进行更为系统的了解。A-Train计划正是在2006年前后开始的，在CloudSat和CALIPSO进入轨道之前，还有Aqua（美国2002年发射）、Aura（美国2004年发射）和PARASOL（法国2004年发射）。随着GCOM-W1（日本2012年发射）和OCO-2（美国2014年发射）的加入，A-Train星座又进一步得到扩展。

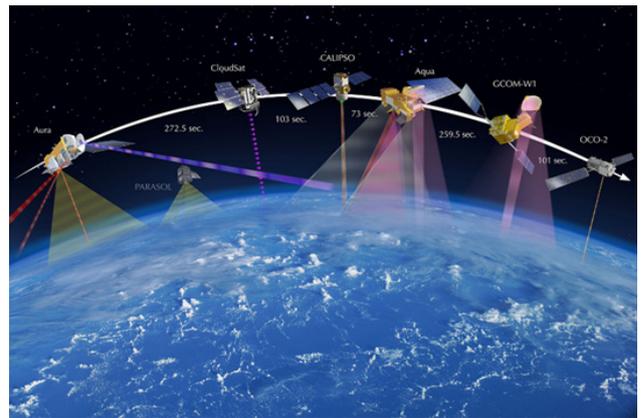


图9 A-Train构成示意图

4 风云三号规划中的测雨雷达星

在中国目前规划的风云三号（FY-3）系列极轨气象卫星中包含有两颗测雨雷达卫星，FY-3G星和FY-3I星，其中FY-3G星计划于2023年年初发射。从FY-3G星的设计功能看，是一颗携带多载荷的综合探测卫星，除搭载Ka/Ku双频测雨雷达（PMR）外，还包括微波成像仪（MERI-RM）、中分辨率光谱成像仪（MERSI-RM）、掩星探测仪（GNOS-II）、近红外偏振成像仪（MAPI）和高精度定标器（HAOC），从综合探测能力看，应优于GPM/CO星。从PMR的功能看，其刈幅宽度和杂波抑制能力较GPM/CO星也有一定优势^[10]。FY-3雷达星的发射将填补我国气象卫星探测业务在这一领域的空白。

5 发展中的天气雷达小卫星及星座

通过大卫星实现太空天气雷达观测，对全球天气气候的研究与业务起到了重要的推进作用，取得了多方面的研究成果。但独立运行的低轨大雷达卫星也有其固有的缺陷，即单点重访频率低，难以捕捉到对流天气系统的分钟至小时级时间周期变化过程。随着近

年来小卫星技术的发展，特别是立方体卫星标准的建立和技术研发的实现^[11]，为天基气象雷达观测创造了新的机遇，若能将雷达安装在立方体小卫星上对大气云雨进行主动遥感观测，其潜在价值是可以建立卫星雷达星座，对全球范围的天气系统开展高频次的实时主动遥感观测，如果能与被动微波遥感小卫星结合，将会对全球云雨信息的获取实现重大变革，使天基雷达观测除满足气候分析外，还可以对天气系统开展实时观测。

在GPM/CO成功发射之后，2015年美国NASA开始启动了气象雷达小卫星的研制。从传统雷达技术看，由于要发射和接收大气云雨变化信号，要想将雷达做到体积小、重量轻、功率小、成本低且能保持雷达测雨的基本性能要求，确实有难度。为此，NASA的喷气推进实验室（JPL）设计了与6 U小卫星相匹配的一维剖面探测降水雷达架构，如同一个鞋盒大小，重量为12 kg，较大卫星压缩了约100倍。其中0.5 m的雷达天线占用1.5 U，35.75 GHz的Ka波段雷达载荷占用3 U，余下的1.5 U分配给卫星系统控制总线。这个架构能否实现，需要制造一个试验模型并通过检验。2015年5月，制造立方体测雨卫星RainCube计划正式被提出（图10），9月正式立项，由NASA的地球科学技术办公室（Earth Science Technology Office, ESTO）通过InVEST-15（In-Space Validation of Earth Science Technologies）计划负责资助^[12]，并于2016年被NASA的立方体卫星发射计划（CSLI）选中。

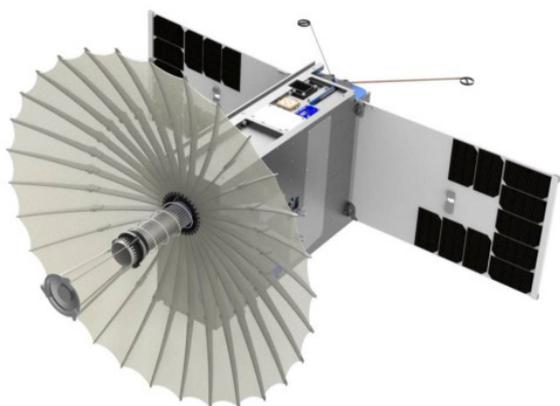


图10 雨立方（RainCube）设计示意图

RainCube的研制由JPL和特瓦克纳米卫星系统公司（Tyvak Nano-Satellite Systems）共同承担，包括卫星的开发、发射和运行。最终要通过实际测试验证Ka波段雷达的新架构在CubeSat平台上的可行性。卫星的两个主要有效载荷由JPL负责，一是小型化的Ka波段气象廓线探测雷达（miniKaAR），另一是直径为

0.5 m的Ka波段抛物面天线（KaPDA）。Tyvak公司则承担开发系统控制总线，有效载荷的集成，并负责卫星的运控。雷达将收集地球上空0~18 km高度的垂直降水分布信息，水平分辨率小于10 km，垂直分辨率小于250 m。有效载荷功率为35 W，每天产生高达1.73 Gb的压缩数据，计划运行寿命为3个月。

项目的研发用了约3年时间，主体于2018年2月完成集成和测试，并于3月交付。RainCube于2018年5月21日搭载在OA-9E天鹅座补给飞船上，从美国佛吉尼亚州瓦洛普斯岛发射升空，5月24日，飞船与国际空间站对接，2018年7月13日RainCube从国际空间站放飞，布设在了地球400 km高度的低轨轨道上，轨道倾角为51.6°。2018年8月5日，获取到了第一幅雷达回波图，并于2018年8月27日在墨西哥上空进行了首次降水测量（图11）。

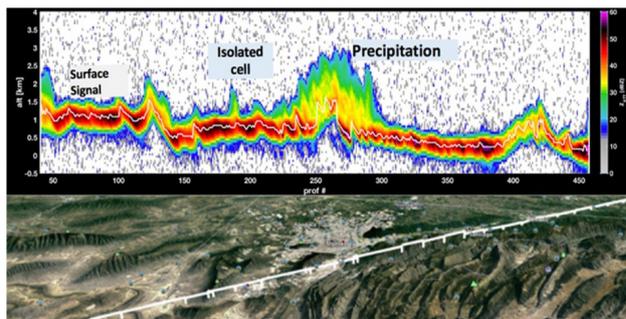


图11 2018年8月27日，在墨西哥湾上空RainCube首次开展降水测量，图像显示在谷歌地形图上

RainCube的研制、发射和运行都是成功的，实际运行了约两年半的时间，获取了大量云雨信息，于2020年12月24日坠入大气层后燃烧殆尽。RainCube是一个技术演示，旨在表明将气象雷达缩小至立方体卫星平台后也可以如同大卫星那样提供满足质量需求的气象数据，这为将来构建气象雷达小卫星星座提供了技术依据，使通过更为广泛的全球视野获取高时空分辨率的云雨内部结构信息成为可能。按照JPL气候科学中心主任斯蒂芬斯（Graeme Stephens）的说法：“在地球科学中我们认识到，空间和时间的覆盖率比拥有一个仅完成独立任务的昂贵卫星仪器更为重要。”雨立方星获取的是一维云雨廓线，与GPM/CO这样的具备扫描宽度的雷达星相比尚有不足，但在雨立方星发射的同时，NASA通过空间站还发射了另一颗5波段微波星TEMPEST-D，可与雨立方星配合观测地球大气云雨状况，起到了互补作用，从实际探测效果看，也取得了较理想的产品（图12）。若能将微波主被动探测结合，构成小卫星星座，应可以达到更好的大气云雨结构探测效果。

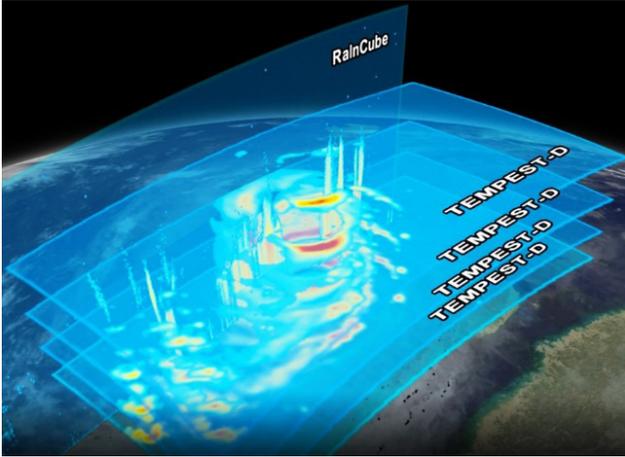


图12 2020年9月28日TEMPEST-D和RainCube两颗立方体小卫星结合探测台风特拉米 (Trami) 效果图

雨立方星的演示成功和小卫星技术的逐渐成熟,使构建雷达测雨小卫星星座的发展自然成为下一步的选择。2021年2月24日,位于美国波士顿的一家气象数据公司ClimaCell宣布将启动“明日太空行动”(Operation Tomorrow Space)计划,向太空发射30颗天气雷达小卫星,构成首个太空天气雷达星座。2022年5月,ClimaCell已改名为明日公司(Tomorrow.io),并宣布将在计划中的星座上增加微波载荷,同时开展主被动微波探测。第一批卫星预计将于2023年发射,并计划在2025年完成整个星座的布设^[13]。若这一计划可以实现,对全球大气云雨内部结构的探测在时空分辨上将取得重要进展。

在发展雨立方小卫星的同时,NASA地球科学技术办公室(ESTO)还支持了另一个雷达小卫星项目的研发,即多用途三波段雷达小卫星(Multi Application Smallsat Tri-band Radar, MASTR)。目的是将Ku、Ka和W三个波段集成在一起,并具有电子扫描、极化和多普勒功能,同时对大气云雨结构和分布进行主动探测^[14]。目前已设计、研制出原型机,如果最终成功实现,将会在空基主动遥感探测大气技术领域实现新的提升,更加完整地获取到全球大气云雨的发展、结构和分布信息。

6 讨论

从20世纪80年代开始,空基主动遥感技术的发展开始引起科学界关注,并逐步在具体科学计划中得到立项,进入研发阶段。1997年TRMM卫星成功发射,开启了空基天气雷达探测全球降雨的新阶段,为天气气候研究获取了重要信息。GPM/CO除在技术上有了新的提升外,与国际上多颗微波卫星构成星座,协同探测全球大气云雨信息,从信息获取的完整性和时

间频次上有了新的提升。CALIPSO和CloudSat的成功一方面提升了对云和气溶胶的观测能力,同时在加盟A-Train星座后,使星座通过不同探测技术、综合获取大气信息的能力显著提升。FY-3G星将是我国自主研发的首颗测雨雷达卫星,其综合功能优于目前在轨的其他测雨星,要在资料的综合分析处理上给予更多关注,以达到预期的应用效果。RainCube雨立方星的成功使构建空基测雨雷达小卫星星座的构想成为可能,在研的MASTR三频小卫星有可能推进雷达小卫星星座在同时获取云雨特征方面取得新的进展。如何使卫星在小型化的基础上仍能保持较高的性能,在技术上需要克服许多难点,包括标准制定等环节。如何处理好多种探测技术获取的信息仍是天基探测效益发挥的关键环节,特别是多星星座和不同探测方式获取的信息,如何有效应用好是具有挑战性的工作。

参考文献

- [1] Theon J S. My view of the early history of TRMM and Dr. Joanne Simpson's key role in winning mission approval. *Meteorological Monographs*, 2003, 29(51): 175-175.
- [2] Lavigna T A. Working with Dr. Joanne Simpson while managing the TRMM project. *Meteorological Monographs*, 2003, 29(51): 183-183.
- [3] Ackerman S A, Platnick S, Bhartia P K, et al. Satellites see the world's atmosphere. *Meteorological Monographs*, 2019, 59(1): 4.1-4.53.
- [4] Smith E A. International Global Precipitation Measurement (GPM) program and mission: an overview. *Measuring Precipitation from Space: Eurainsat and the Future*, 2007, 18(3): 611-653.
- [5] Azarbarzin A, Carlisle C. The Global Precipitation Measurement (GPM) project, IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, July 6-11, 2008, Boston, Massachusetts, USA.
- [6] NASA and JAXA sign agreement for future earth science cooperation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2009, 81(6): 565-565.
- [7] Bidwell S W. Global precipitation measurement (GPM) microwave imager (GMI) instrument, SPIE Remote Sensing, September 11, 2006, Stockholm, Sweden.
- [8] 马占山, 刘奇俊, 秦琰琰, 等. 云探测卫星CloudSat. *气象*, 2008, 34(8): 104-111.
- [9] Schoeberl M R. The afternoon constellation: a formation of Earth Observing Systems for the atmosphere and hydrosphere, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, June 24-28, 2002, Toronto, Canada.
- [10] 谷松岩, 卢乃锰, 吴琼, 等. FY-3气象卫星降水探测能力分析与展望. *海洋气象学报*, 2022, 42(2): 1-10.
- [11] 许小峰. 气象小卫星: 拓展天基气象观测的新领域. *气象科技进展*, 2020, 10(3): 2-7.
- [12] Peral E, Statham S, Taneli S, et al. RainCube, a Ka-band precipitation radar in a 6U CubeSat, Small Satellite Conference, 2017, North Logan, USA.
- [13] Tomorrow.io. Tomorrow.io Reveals Plans For The 1st Commercial Multi-Sensor Weather Satellite Constellation, May 11, 2022. <https://news.satnews.com/2022/05/11/tomorrow-io-reveals-plans-for-the-1st-commercial-multi-sensor-weather-satellite-constellation/>.
- [14] Im E, Peral E, Sanchez-Barbety M, et al. The next generation of spaceborne radars for cloud and precipitation measurements, International Conference on Radar Systems, October 23-26, 2017, Belfast, Ireland.