

# 浅析美国国防气象卫星发展历程及经验

■ 叶梦姝 樊奕茜

2017年,太空和导弹系统中心主导成立了太空企业联盟(SpEC),旨在通过简化合同流程、弱化太空初创公司和军事买家的文化差异、允许承包商共同投资项目,来保持国防订单的开放性,吸引以前未与国防部合作过的公司在内的各种成员公司响应研发活动。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.03.002

美国国防气象卫星项目(DMSP)是世界上发展历史最为悠久、产品应用范围最为广泛的气象卫星项目之一。本文从技术发展和项目组织两个角度出发,梳理了在美国气象卫星技术飞速发展的大背景下,DMSP项目从1960年代至今走过的三个发展阶段。尝试梳理了DMSP项目发展过程中形成的三条经验,包括SSMIS仪器设计和产品迭代的持续性,在美国海军研究实验室(NRL)主导下资料应用的开放性,探讨该系列卫星在不同时期技术探索的前瞻性,对我国气象卫星国家战略具有一定的启发性。

## 1 DMSP项目三个发展阶段

1960年,美国发射了第一颗气象卫星泰罗斯-1(Tiros-1)。从此,气象卫星的研究和应用蓬勃发展,推动大气科学进入了全新的时代。从冷战时期的美苏卫星竞赛,到和平年代的欧美卫星合作,美国一直处于气象卫星研发和卫星气象应用的国际领先地位。在技术上,由美国国防部(DOD)负责的美国国防气象卫星项目(DMSP)作为美国气象卫星战略布局中的重要组成部分,和同期美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、美国国家航空航天局(NASA)主导的气象和地球观测卫星同步发展,但同时又因独特的战略定位发展出了差异化的技术侧重。在研发模式上,美国军方雄厚的资金支持,以及政府、研究机构、军企合作研发模式,使得DMSP项目走出了一条独特的发展之路。

### 1.1 1960—1980年代:卫星技术试验阶段

1960年代,美国陆续启动了四个国防卫星计划,分别是国防卫星通信系统(DSCS)、国防气象卫星计划(DMSP)、国防支持计划(DSP)和全球定位系统(GPS),其中国防气象卫星项目最初旨在开发一个专

注于云层摄影的气象系统,满足和支持战略空军司令部(SAC)和国防情报局(NRO)的侦察需求。DMSP项目卫星研发从卫星批次(Block)考虑,Block 1~4均为实验卫星,和10颗泰罗斯实验卫星、9颗艾萨业务卫星,以及同期雨云(Nimbus)实验卫星相似,主要通过类似照相机和摄像机的载荷完成的光学成像。随着1972年发射的诺阿-2(NOAA-2)卫星标志着光电摄像时代的结束以及多通道高分辨率扫描辐射计时代的开始,1975年发射的DMSP的Block 5卫星在卫星重量及载荷数量也得到了大幅度提升,并在1976年通过“业务线扫描系统(OLS)”得到像素级别的数据,在可见光和红外成像基础上逐渐拓展至微波频段。

从项目组织上来看,DMSP隶属国防部,是美国空军、海军在太空领域的探索性联合项目。位于加利福尼亚州洛杉矶空军基地的太空和导弹系统中心(SMC)负责项目管理,位于华盛顿的美国海军研究实验室(NRL)负责载荷研发和定标校准。SMC于1954年成立,是美国国防系统中历史最悠久的机构之一。2019年美国太空军成立时,SMC更名为“太空系统司令部”。NRL于1923年建立,1950年代后一度成为空间科学技术的全球领导者,曾成功研制并发射了美国第二颗人造卫星——先锋一号(Vanguard I),这是目前仍在存续在太空的历史最为悠久的人造卫星。无论是SMC还是NRL,都是历史悠久、空间研发力量雄厚的政府军事部门,它们的联合为DMSP项目的最初起步打下了坚实的基础。

总的来看,DMSP项目从Block 1到Block 5的F7卫星,从卫星技术上来看均处于试验探索阶段,尝试不同载荷、测试极轨卫星技术、在遥感技术上不断精

收稿日期:2022年5月29日;修回日期:2022年6月13日  
第一作者:叶梦姝,Email:297268006@qq.com  
资助信息:国家自然科学基金(42142009)

进，虽然在越南战争中初步展示了气象侦察能力，但真正业务化、广泛的应用尚未开始。

## 1.2 1980—2000年代：军民差异化探索阶段

随着1973年DMSP项目解密，数据向民间和科学界公开，国防和民用卫星形成了“并驾齐驱”的布局，并在1980年代后明确了各自定位，呈现出差异化发展的态势。民用气象卫星的重点在于利用全球可见光红外成像满足民用天气预报分析的需要，并且持续努力改进全球大气垂直探测，以促进全球数值天气预报的发展。例如，针对特殊吸收光谱设计探测仪器并不断提高探测器的信噪比，技术方法上利用多波段观测仪器沿着卫星前进轨道跨轨扫描获得大气温湿度垂直廓线；国防气象卫星则更加侧重穿云透雨看地表的能力，OLS扫描成像系统还包括夜间微光成像仪器，因此以优化可见光/红外成像功能为主要的技术改进方向。国防气象卫星也有垂直探测器，但是技术路线上直到DMSP F15（1999年）以前基本上与民用气象卫星的大气垂直探测仪器类似，一直到DMSP F16（2003年）以后的新仪器SSMIS，使得该仪器可以同步地获得圆锥成像和斜程大气探测信息。

1987年，DMSP的F8星首次搭载了SSM/I微波成像仪，该传感器共7个通道、4种频率，可探测海表风速、降水强度、海冰覆盖和土壤湿度等环境要素，产品可用于评估平均气候状态及其年际/季节变化。SSM/I的微波圆锥扫描成像仪器是DMSP卫星成像观测的一大特色和亮点，并不断提高国防卫星成像的空间分辨率。此后数十年里，SSM/I在技术迭代中保持了仪器的稳定性和产品的连贯性，成为了气象卫星微波探测最具代表性的仪器，贡献了跨度达三十多年的长时间序列高质量观测数据，在气候变化等研究领域表现出了巨大的学术价值：一方面推动国际卫星微波遥感技术取得了长足的发展；另一方面也帮助DMSP项目成为了在世界范围内有持续影响力的卫星项目。除了SSM/I之外，可用于夜间微光探测的业务线性扫描系统(OLS)，以及用于空间环境探测的特殊传感器紫外成像仪(SSULI)等也是DMSP项目有特色的代表性仪器。

从项目组织上来看，美国国防部在卫星产品研发和应用上进行了有效探索，建立了面向军队、政府、高校科研机构开放的定标团队和验证团队(Cal/Val Team)，通过“科研向业务转化机制”面向针对性需求。在美国国防部相关研究机构深厚的理论基础和产品研发能力、开放的应用机制、有效的项目管理能力共同支撑下，DMSP项目在1980年代末—1990年代初取得了快速发展。由于美国国防部在气象卫星研发上的经验和理念得到了充分认可，1994年白宫指示国防

部(DOD)、商务部(DOC)以及宇航局(NASA)的极地轨道气象卫星计划合并运营，空军负责系统开发和采购，NOAA卫星业务办公室负责卫星运维。但遗憾的是，由于三个不同政府部门的应用需求优先级差异，以及预算管理方面的风格差异，导致合并后的项目持续超支，极轨卫星合并计划在执行一段时间后被迫解体。

## 1.3 2000年代至今：协同发展阶段

进入21世纪，NOAA民用极轨气象卫星发展迅速。微波廓线仪(AMSU)、扫描干涉大气探测器(CrIS)、先进技术微波廓线仪(ATMS)等一批更高光谱、更多通道、更高分辨率的探测仪器，支撑了卫星数据在高分辨率地球系统数值模拟中的大规模应用。2003年，DMSP项目的F16星也曾进行了一次重大升级。主要是将DMSP的F15以前的相互分离的圆锥成像(SSM/I)和横跨轨迹大气垂直探测(大气温湿度廓线探测仪SSM/T和大气湿度廓线SSM/T-2)融合为一体的新仪器SSMIS，使得该仪器可以同步地获得圆锥成像和斜程大气探测信息。仪器通道增加到24个、21种频率，可探测近地表风速，水汽、云水、雪，在洋面风等陆面参数反演的基础上，也具备了大气探测功能。二是更新了太空环境探测器SSULI和SSUSI，探测高度可以达到100 km左右，探测来自地球大气和电离层的紫外线辐射，满足导弹探测和发射保障等涉及到高层大气和空间环境的国防需求。与此同时，美国的气象业务极轨卫星主要定位在下午轨道，具有相似探测水平的欧洲的MetOp系列卫星定位为上午轨道，与美国国防卫星的晨昏轨道，形成了三足鼎立的协同发展布局。

在组织运营方面，美国国防部不断完善同上下游、大中小军企的合作机制。从1960年代起就和美国空军合作密切的非营利性企业航天公司(Aerospace Corporation)从DMSP项目的策划阶段，就承担了军事气象卫星需求研究工作，并从1970年代中期起承担了DMSP的一般系统工程和集成责任。美国无线电公司(RCA)及后来并入到的洛克西德·马丁公司，更是作为主承包商，在50多年的时间里和美国空军在DMSP项目上保持着合作。与此同时，2017年，SMC主导成立了太空企业联盟(Space Enterprise Consortium, SpEC)，旨在通过简化合同流程、弱化太空初创公司和军事买家的文化差异、允许承包商共同投资项目，来保持国防订单的开放性，吸引以前未与国防部合作过的公司在内的各种成员公司响应研发活动。

## 2 DMSP项目发展经验

### 2.1 仪器产品持续性

在DMSP卫星上搭载微波成像仪(SSM/I)和微

波成像仪/辐射计(SSMIS)是NASA“探路者计划”的一部分。SSM/I是一种七通道无源微波成像仪,1987年至今,分别被搭载在DMSP的F8(1987年)、F10(1990年12月)、F11(1991年11月)、F12(1994年8月)、F13(1995年3月)、F14(1997年4月)和F15(1999年12月)卫星上,2003年后升级为SSMIS,是第一个提供大气温度和水汽剖面信息的锥形扫描探测仪器,在19~183 GHz的24个通道上测量从地球发射的热辐射,分别搭载在DMSP的F16(2003年10月)、F17(2006年11月)、F18(2009年10月)和F19(2014年4月)卫星上。SSM/I和SSMIS月平均产品包括降水、云液态水、可降水总量、积雪和海冰范围,可用于评估平均气候状态及其年际/季节变化,并检测与大尺度(例如ENSO和北极涛动)和区域气候变化相关的异常。

和超长时间的仪器部署连续性相伴随的,还有卫星遥感产品研发的持续性。负责仪器和产品研发的美国海军研究实验室(NRL)在卫星资料质量控制上做了大量工作:一是非常注重不同卫星上同一个载荷的数据质控,在亮温水平上进行了仔细的校准,使得这一长时间序列探测数据集保持了连续性和气候均一性,产品的整体误差几乎没有变化;二是伴随着仪器制造工艺和卫星应用算法的不断升级,在开展业务应用的同时申请单独的经费,不断使用最先进的算法对历史数据开展持续性的“再分析”,既弥补了因业务技术升级形成的数据集不连续,也保证了气候数据集制作技术的与时俱进。正如一位同化专家所说,正是由于很多科学家对该数据集持续不断地研究迭代,用的人多了,就使得这个数据集成为了“经典”。

通过以上两个措施,SSM/I和SSMIS被反复打磨成为了一套经典的气候研究数据集,成为媲美MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)的高引用卫星资料,不仅在ERA5再分析数据集的制作中发挥了重要作用,在ECMWF数值预报贡献度排名中,DMSP F17和F18的SSMIS资料均榜上有名。与此同时,不断深入开展的“再分析”过程也孵化了对遥感领域科学问题的研究,通过密切的团队合作培养出了一批专注卫星资料研发的国际顶尖人才。

## 2.2 资料应用开放性

高度持续的开放性是影响一个卫星计划是否成功的重要因素之一,这一点已经成为了从卫星设计到产品研发应用整个链条科学家们的共识。在研发端,需要确保新理论、新模式、新算法能够不断地融入到卫星业务体系中,在应用端,如果这个卫星的应用领域

越多、方法越全面,卫星资料越容易成为经典,也能够反哺卫星研发项目,获得持续发展。

美国国防部为推进DMSP卫星资料的应用,以美国海军研究实验室(NRL)为核心,建立了一套资料研发和应用机制。NRL的航天器工程部和空间科学部负责卫星仪器开发,传感器研究部负责载荷的校准和定标等工作。在1980年代,NRL凭借大气探测遥感深厚的理论积淀,在地球辐射偏振效应、多频率效应、圆锥扫描成像、海洋散射发射理论等方面的研究具有领先地位。

NRL召集了一个开放性的产品研发团队——定标验证团队(Cal/Val Team),该团队由40位左右专家学者组成,分为十几个小组,包括海风、大气、液态水等,每个小组只有约3~4位专家。该团队对NOAA、NASA等美国政府机构,以及高等院校、国家实验室等研究机构开放,由国防部设立专项经费,发放给参与团队的各机构和大学。例如,NOAA有5~6个人参与到团队中,主要关注DMSP项目的卫星数据如何用到大气探测领域,尤其是降水、大气中云、水汽等气象领域关注的要素;威斯康星州立大学等高校主要用微波成像仪得到的新资料,拿来验证辐射传输理论等。这种开放性的产品研发和应用模式取得了巨大成功,并在1990年代后在NASA等机构得到了推广应用。为给业务用户提供足够的支持,建立了“科研向业务转化机制”,由政府和高校模式中心、试验基地、原型设计中心组成,具体包括NASA、美国国家科学基金会资助的波士顿大学综合空间天气建模中心(CISM)、美国海军研究实验室(NRL)、空军气象局(AFWA)、NOAA空间天气预报中心、空军研究实验室(AFRL)等的研发人员。

## 2.3 卫星技术前瞻性

相比较业务卫星的稳扎稳打和为支撑业务持续性的刚需,国防卫星更重视技术的前瞻性,没有支撑业务预报预测和公共服务的业务压力,因此更多的投资在为未来发展做技术储备,而不是体现在对当下业务的支撑。例如1970年代NRL制造了可应用于太空环境的原子钟及其原型系统,从而使得目前应用极为广泛的全球定位系统成为可能,关心未来的战略领域,NRL开展范围广泛和科学研究和先进技术发展,领域包括计算机科学、人工智能、等离子体物理、声学、雷达、流体动力学、化学、材料科学、光学科学、凝聚态与辐射科学、电子科学、环境科学、海洋地球科学、遥感、海洋学、海洋气象学、空间技术和空间科学等。

(下转24页)

- 法对比. 应用气象学报, 2017, 28(3): 306-317.
- [76] LI W, Duan Q, Miao C, et al. A review on statistical postprocessing methods for hydrometeorological ensemble forecasting. WIREs Water 2017, e1246.
- [77] 代刊, 朱跃建, 毕宝贵. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述. 气象学报, 2018, 76(4): 493-510.
- [78] Gebhardt C, Susanne T, Peter K, et al. Experimental ensemble forecasts of precipitation based on a convection-resolving model. Atmospheric Science Letters, 2008, 9(2): 67-72.
- [79] Ebert E E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. Monthly Weather Review, 2000, 129(10): 2461.
- [80] 林建, 宗志平, 蒋星. 2010-2011年多模式集成定量降水预报产品检验报告. 天气预报, 2013, 5(1): 67-74.
- [81] Novak D R, Bailey C, Brill K F, et al. Precipitation and temperature forecast performance at the Weather Prediction Center. Weather and Forecasting, 2014, 29(3): 489-504.
- [82] Sobash R A, Schwartz C S, Romine G S, et al. Severe weather prediction using storm surrogates from an ensemble forecasting system. Weather and Forecasting, 2016, 31(1): 255-271.
- [83] Gneiting T, Raftery A E, Ili A H W, et al. Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation. Monthly Weather Review, 2005, 133(5): 1098-1118.
- [84] Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, et al. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. Monthly Weather Review, 2005, 133(5): 1155-1174.
- [85] 王建鹏, 薛春芳, 潘留杰, 等. 陕西省精细化网格预报业务系统技术方法. 气象科技, 2018, 46(5): 910-918.
- [86] 潘留杰, 薛春芳, 张宏芳, 等. 基于多模式和网格预报产品融合的降水预报释用方法. 气象, 2021, 47(5): 550-560.
- [87] Yuan H, Gao X, Mullen S L, et al. Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network. Weather and Forecasting, 2007, 22(6): 1287-1303.
- [88] 农吉夫, 金龙. 基于MATLAB的主成分RBF神经网络降水预报模型. 热带气象学报, 2008(6): 713-717.
- [89] 黄健敏, 赵国红, 廖芸婧, 等. 基于Logistic回归的降雨诱发区域地质灾害易发性区划及预报模型建立——以安徽歙县为例. 中国地质灾害与防治学报, 2016(3): 98-105.
- [90] 吴凡, 阙志萍. 基于多分类logistic模型的铁路水害分级警戒概率预报研究. 灾害学, 2017, 32(1): 17-21.
- [91] 熊秋芬, 曾晓青. SVM方法在降水预报中的应用及改进. 气象, 2008, 34(12): 90-95.
- [92] 陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 基于交叉验证的多模式超级集合预报方法研究. 气象学报, 2010(4): 464-476.
- [93] 孙俊奎, 王占良, 张颖. 3种修正的机器学习算法在逐3h降水量预报中的比较应用. 甘肃科学学报, 2020, 32(1): 46-51.
- [94] 黄威, 牛若芸. 基于集合预报和支持向量机的中期强降雨集成预报试验. 气象, 2017, 43(9): 1110-1116.
- [95] 王玉丹, 南卓铜, 陈浩, 等. 基于K最近邻模型的青藏高原CMORPH日降水数据的订正研究. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 607-617.
- [96] 陈浩, 宁忱, 南卓铜, 等. 基于机器学习模型的青藏高原日降水数据的订正研究. 冰川冻土, 2017, 39(03): 583-592.

(上接11页)

对于DMSP项目, 其仪器的探测高度均为80~100 km, 用于支撑未来可能的空间探测需求, 以及空间模式的发展, 而针对目前数值模式层顶约为80 km的需求, NOAA的气象卫星仪器探测高度一般为70 km左右。美国国防部也率先开展了立方体卫星和星座计划的技术尝试, 并将分散化、小型化、轻量化、低成本的理念应用到了国防气象卫星的研发中。DMSP的换代卫星, 将传统集成在一个平台上的多个仪器分散到多颗卫星上, 以降低项目运营风险、缩短研发周期。同时研发小型化的卫星观测仪器, 例如将传统的黑体定标发展为噪声源定标, 压缩卫星的体积, 以适用于更小型化的立方体卫星。

### 3 结果讨论和启示

美国国防气象卫星经过60年的发展, 已经成为了美国气象卫星布局中重要的组成部分, 共同构成了军民协同、政商互补、美欧联动的气象卫星生态。近年来, 国防气象卫星换代计划中, 在仪器小型化、平台分散化、研发市场化等方面的探索, 在一定程度上代表了美国气象卫星整体的发展趋势。美国国防气象卫星的发展经验, 对于我国整合气象卫星国家战略科技力量, 建立健康可持续的卫星研发机制, 实现不同部门卫星气象应用协同发展, 激活企业在科技创新方面的活力, 打通从科研到业务到产业的研发应用链条,

具有一定的参考价值。

致谢: 本文在写作过程中, 与多位专家进行了详实、有意义和广泛的讨论, 让作者得到很多启发性的思路。审稿专家提出的具体修改意见, 为完善本文起到积极作用, 特向这些专家致谢!

#### 深入阅读

- 白彩全, 易行, 何晨. 夜间灯光遥感数据应用研究的文献计量分析——以美国国防气象卫星计划运行线扫描系统为例. 测绘科学, (8): 129-146.
- 杜智涛, 杜晓勇, 姜明波, 等. 美国极轨气象卫星的转型探索. 科技导报, 39(11): 77-83.
- 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. 2020. 世界各国静止气象卫星发展综述. 气象科技进展, 10(1): 22-29, 41.
- 李俊, 方宗义. 卫星气象的发展——机遇与挑战. 气象, 2012(2): 129-146.
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 2003, (4): 552-566.
- 唐世浩, 邱红, 马刚. 2016. 风云气象卫星主要技术进展. 遥感学报, (5): 842-849.
- 许小峰. 2020. 气象小卫星: 拓展天基气象观测的新领域. 气象科技进展, 10(3): 2-7.
- 杨忠东, 刘健. 2016. 气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革. 应用气象学报, (5): 592-603.
- Weng F, Zou X, Yan B, et al. 2011. 卫星专用传感器微波成像仪/探测仪(SSMIS)观测资料在天气和气候研究中的应用. 气象科技进展, 1(1): 14-24.

(作者单位: 叶梦姝, 中国气象局气象干部培训学院; 樊奕茜, 中国气象局发展与规划研究院)