

我国风云卫星体系的发展思考

董瑶海

(上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘 要: 风云系列气象卫星发展始终坚持以国家重大战略为蓝图, 以解决中国的气象观测问题为宗旨, 秉承“开放合作、服务世界”的理念, 发展具有中国特色的气象卫星观测体系。风云卫星是我国民用遥感卫星中应用范围最广、效益发挥最好的卫星系列之一, 为国民经济发展和国防建设作出了重要贡献, 已成为世界气象组织全球卫星观测网重要成员, 是服务国家重大战略的实践者。新时代, 全球气象卫星发展迈入新阶段, 面向经济社会高质量发展、防灾减灾、应对气候变化、生态文明建设和国家安全, 风云卫星将坚持创新驱动发展, 坚持应用效能导向, 充分发挥体系效能, 突破卫星及遥感关键技术, 率先实现遥感卫星及体系的自主运行、快速响应、智慧观测, 拓展风云卫星在军民各领域各行业的应用。在实现遥感数据的获取途径和处理算法自主可控的基础上, 坚持“走出去”战略, 加强技术交流与合作, 提升全球及重点区域的精密监测覆盖率, 为全人类提供更加精准的气象预报和更加精细的气象服务。

关键词: 气象卫星; 体系化; 定量化遥感; 卫星平台; 互联互通; 智慧观测

中图分类号: TN 212.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.03.010

Consideration on the Development of Fengyun Series Satellite System

DONG Yaohai

(Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: The development of Fengyun series meteorological satellites has always adhered to the blueprint of national major strategies, with the purposes of solving meteorological observation problems in China, adhering to the concept of “open cooperation and serving the world”, and developing a meteorological satellite observation system with China’s characteristics. Fengyun series satellites are one of the satellite series with the widest application range and the best benefits among the civil remote sensing satellites in China. It has made important contributions to the development of the national economy and national defense construction. It has become an important member of the global satellite observation network of the World Meteorological Organization and a practitioner of major national strategies. In the new era, the development of global meteorological satellites has entered a new stage. For high-quality economic and social development, disaster prevention and mitigation, climate change, ecological civilization construction, and national security, Fengyun series satellites will adhere to the innovation-driven development and the application efficiency orientation, make a full use of the system efficiency, break through the key technologies of satellites and remote sensing, take the lead in achieving the autonomous operation, rapid response, and intelligent observation of remote sensing satellites, and expand the application of Fengyun series satellites in various fields and industries. On the basis of realizing the independent and controllable access to remote sensing data and processing algorithm, China will adhere to the strategy of “going out”, enhance technical exchanges and cooperation, improve the coverage of precision monitoring in the world and key areas, and provide more accurate weather forecasts and more refined weather services for all mankind.

Key words: meteorological satellite; systematize; quantitative remote sensing; satellite platform; interconnection; intelligent observation

收稿日期: 2021-04-23; **修回日期:** 2021-05-25

作者简介: 董瑶海(1966—), 男, 本科, 研究员, 主要研究方向为卫星总体技术、遥感载荷技术。

0 引言

我国幅员辽阔,气象灾害频发,台风、暴雨洪涝、干旱、雾霾等气象灾害每年均给我国带来巨大的经济财产损失和人员伤亡。据统计,我国气象灾害造成的经济损失占有所有自然灾害的 71%,平均每年约 2 500 亿~3 000 亿元。在全球气候变化背景下,极端天气气候事件趋多趋强,对人类的生命和财产安全造成极大威胁。气象卫星的观测不同于传统的气象观测,主要特点是从宇宙空间自上而下、连续不停地进行全球或大区域范围的观测^[1-2]。我国的风云卫星可对全球和区域范围内的极端天气、气候和环境事件进行及时高效观测,是防灾减灾、应对气候变化和生态文明建设的重要手段^[2-3]。有关部门统计数据表明,气象灾害造成的经济损失占 GDP 的比例由 20 世纪 90 年代的 3% 左右逐年下降至目前的小于 1%,年平均死亡人数至少减少了 50%。

当前,我国高度重视风云气象卫星事业发展,已成功发射两代四型 17 颗风云气象卫星,实现了长寿命、高可靠、覆全球、高精度、全定量的系列化和业务化自主发展,实现了从无到有、从跟跑到并跑,再到局部领跑的跨越式发展^[4-5]。习近平总书记对推广风云气象卫星国际应用提出了明确要求和殷切期望。2018 年,习近平先后在上海合作组织青岛峰会、中国-阿拉伯国家合作论坛第八届部长级会议

和中非合作论坛北京峰会提出要利用风云气象卫星和气象遥感卫星技术为“一带一路”沿线国家和地区提供服务。2019 年,习近平访问吉尔吉斯斯坦期间,见证了中吉两国风云气象卫星服务合作协议的签署,并在两国联合声明中指出要“建立气象卫星数据共享机制”。

我国正在制订《我国气象卫星及其应用发展规划(2021—2035 年)》,预计到 2035 年,将逐步建立高低轨协同观测、天地一体化发展、运行稳定、布局合理、性能优良和效益突出的第三代风云气象卫星及应用体系,地面系统集约智慧运行,有效支撑国内各行业应用;全面建成卫星遥感综合应用体系,打造服务“一带一路”建设的品牌,使风云气象卫星观测能力和应用能力达到国际领先水平^[4]。

1 全球气象卫星发展现状和趋势分析

1.1 国外气象卫星发展现状

自 1960 年世界上第一颗气象卫星发射成功以来,先后经历了从试验到业务、从民用到军用、从极轨卫星到静止卫星、从单一仪器观测到综合仪器观测、从定性到定量的发展历程。国外气象卫星经过几十年的发展,已形成多轨道、种类较为齐全的卫星发展系列,目前已组成了全球气象卫星观测网^[2]。国外典型气象卫星见表 1。

表 1 国外典型气象卫星系列
Tab.1 Typical meteorological satellite series abroad

卫星系列	所属国家	卫星特点	主要载荷
NOAA	美国	太阳同步轨道,上、下午星组网观测	甚高分辨率扫描辐射仪(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)
JPSS	美国	极轨气象卫星	可见红外成像辐射计套件(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS)
GOES	美国	静止轨道气象卫星	先进基线成像仪(Advanced Baseline Imager, ABI)
METOP	欧盟	极轨气象卫星	超高光谱分辨率红外大气探测仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)
MTG	欧盟	静止轨道气象卫星	MTG-I 多通道成像仪、闪电成像仪等 MTG-S 红外探测仪、紫外高光谱仪
GMS	日本	静止轨道气象卫星	可见光红外自旋扫描辐射计(Visible Infrared Spin Scanning Radiometer, VISSR)
Himawari	日本	静止轨道气象卫星	先进向日葵成像仪(Advanced Himawari Imager, AHI)

随着气象业务的不断发展,对天基气象观测的准确度、时效、分辨率、观测种类以及全球和全天候观测能力等提出更高的要求,各国都竞相开发研制

新一代气象卫星^[5]。美国和欧盟分别发展了低轨系列气象卫星上、下午星,采用光学、微波综合观测手段,实现组网业务观测,美国还发展了专用的科研

业务星在观测时间维度上进行必要的补充。欧空局通过“哥白尼计划”进一步拓展天气气候综合业务观测,计划约有 30 颗卫星组成庞大的观测系统。日本、韩国和俄罗斯等最新一代高轨气象卫星已成功发射,卫星平台和载荷性能相比上一代大幅提升,可以高频次获取地球圆盘和中小区域气象观测数据,预计服务至 2030 年前后。

国外气象卫星观测体系有如下发展特点^[4]:

1) 卫星系列完备。美国有完善气象卫星发展体制,低轨方面有民用 NOAA 卫星系列、联合极轨卫星系统(Joint Polar Satellite System, JPSS)等;俄罗斯有 Meteor-3 极轨气象卫星;欧空局有 METOP 专用气象卫星;静止轨道主要以 GOES、MTG 等光学卫星系列为代表。

2) 载荷性能优越。美欧气象卫星有效载荷性能日益提升,极轨气象卫星方面以 JPSS 卫星为代表,其主要有效载荷可见红外成像仪、跨轨红外大气探测器(Cross-track Infrared Sounder, CrIS)等探测载荷,探测波段包括紫外至微波,可见红外成像仪设置了可见至长波红外 22 个通道,同时还包含微光通道;静止气象卫星方面,GOES-R 卫星装有先进基线成像仪(Advanced Baseline Imager, ABI)等,ABI 具有 16 个通道,可见光近红外分辨率 0.5~1.0 km,红外分辨率 2.0 km,特别是可以每 5 min 提供一次全圆盘图。

3) 卫星组网观测高效。NOAA 卫星系列采取上、下午星的组网观测方式,美国“国防气象卫星”(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)为晨昏轨道军事气象卫星,轨道设计和应用中考考虑与 NOAA 卫星的探测结合和分工。欧洲 METOP 卫星在载荷配置上考虑与 NOAA 卫星组网观测的效能,美国 NASA 积极组织多国参与进行全球观测,建立 EOS 系统,并积极发展 TRMM 低倾角全球降水卫星系列和“A-train”全球气候观测卫星编队等。

4) 军民共同使用。DMSP 卫星是专用军事气象卫星,所获得的资料主要为军队所用,但也向民间提供云高、陆地和水面温度、水汽、洋面和空间环境等信息。美国国防部负责的国防气象卫星系统(Defense Weather Satellite System, DWSS),以及由 NOAA 和 NASA 共同负责的 JPSS,形成了美国军民共用气象卫星系统计划。

5) 重视空间天气监测。美国、欧洲等国家已建

立空间环境监测卫星体系,监测空间环境并发布监测、预警报告。空间环境数据不但作为空间天气预报、警报的输入条件,也促进了空间环境模型的完善,有力保障了航天器在轨安全,我国目前还尚无专门的空间天气监测卫星。

1.2 我国气象卫星发展趋势

我国同时发展极轨和静止轨道两种气象卫星,可实时准确监测不同时空尺度的天气系统、气候过程和全球变化,获取完整的大气遥感资料。经过近 50 年的发展,我国研制并发射了“两代四型”气象卫星,建立了长期、稳定、连续运行的高低轨组网气象卫星观测系统,实现了业务化、系列化的发展目标^[2]。

风云一号、风云二号系列卫星为我国第一代风云气象卫星,实现了我国气象卫星的从无到有和业务化运行。风云一号卫星是我国自主研制的第一代太阳同步轨道气象卫星,也是我国第一颗传输型遥感卫星,使我国首次实现了气象、海洋和空间环境的综合探测应用,真正实现了“一星多用”,开创了我国气象卫星事业和航天事业的新纪元。风云二号卫星是我国第一代地球静止轨道气象卫星,突破了自旋静止卫星 5 通道观测技术、高精度图像质量的卫星设计技术、星地一体化图像配准与定位技术、高精度定量产品及应用、星地一体化的业务能力扩展等关键技术。风云二号系列共发射 8 颗卫星。

风云三号、风云四系列卫星为我国第二代风云气象卫星,实现了我国气象卫星的性能大幅提升和量化应用。风云三号已成功发射了 2 批次 4 颗卫星,实现了从紫外、可见光、红外到微波探测的多载荷集成,可实现全球、全天候、多光谱、三维、定量综合对地观测,探测能力达到国际先进水平。世界气象卫星协调组织(Coordination Group for Meteorological Satellite, CGMS)已将风云三号卫星纳入新一代世界极轨气象卫星网发展规划。风云四号卫星作为我国第二代静止轨道气象卫星,是目前全球所有静止轨道气象卫星中综合对地观测能力最强的气象卫星;其为国际首次由一颗星实现“高精度二维扫描成像+红外高光谱三维探测+超窄带闪电探测”,率先实现了静止轨道红外高光谱大气垂直探测,达到世界领先水平;首次实现了我国天基

高帧频高灵敏闪电探测。目前正在同步研制多颗风云三号和风云四号卫星,2025年前将建成完整的第二代风云气象卫星观测系统。

随着气象应用技术的发展,对星载遥感仪器的探测时间、空间和光谱分辨率要求大幅度提高,对探测信息反演物理量的要求越来越趋于精确量化,必须具备长期稳定连续观测的能力。WMO全球综合观测系统预计,到2040年用户将需要:更高分辨率的观测和更高的时间与空间采样、覆盖;数据质量提升;新型数据类型,填补目前的观测空白;高效且可交互操作的数据传输。从国内外气象卫星发展的现状和未来需求来看,气象卫星的发展趋势如下:

1) 多星组网观测,发挥不同轨道卫星观测的优势。不同轨道探测具有其独特的观测优势,结合不同轨道气象卫星进行组网观测,能够充分发挥不同轨道卫星的作用,通过优势互补,实现对气象、气候的高时空分辨的高精度预报和预测。

2) 卫星平台能力不断增强,为高精度探测提供保障。欧美气象卫星平台功能不断增强,性能逐步提高,具有高性能的在轨自主管理、高精度的定位和姿态控制以及灵活高效的业务观测,确保观测数据的高质量和长期有效性。

3) 配置多种探测手段进行数据融合处理,发挥不同探测体制的作用。目前欧美新一代气象卫星均注重星载有效载荷的综合探测技术,配置了多种探测手段,如光学探测、微波主被动探测、临边探测、高光谱探测等探测手段,通过对多类型传感器协同观测数据的融合处理,进一步提高对整个地球5大圈层(大气圈、水圈、岩石圈、土壤圈和生物圈)的综合探测。

2 新一代风云卫星发展设想

新一代风云卫星在观测要素、探测精度、探测手段、长期稳定性、协同观测、数据高效融合和应急快速响应等方面实现跨代,最终实现新一代风云卫星协同智慧观测体系。通过网络化协同运行,提高综合观测效益。

2.1 卫星系统体系化发展

随着气象观测需求的强劲增长和应用的不断深入,风云气象卫星及应用技术快速发展,新一代

风云卫星由单星观测向体系化、智能化方向发展。体系化包含两层含义:

1) 高效协同的体系化。对于短临天气预报而言,特别是突发天气事件,其决策需要更高频次的气象观测数据。比如:实时监测台风、强对流系统的强度和路径变化;对局地灾害性事件(森林火灾、火山爆发、局地暴风雪、空气污染、化学或放射性事故等)进行实时监测和发展趋势预测。新一代风云卫星通过卫星组网、协同观测提供全球1 h级和中国区域1 min级数据,提高数据观测和获取时效性。通过空间布局、多星组网和协同观测等方式充分发挥各类观测手段的体系化优势,实现高时空分辨率连续观测能力^[3]。低轨风云气象卫星将建成由上午轨道、下午轨道、晨昏轨道等综合观测卫星和低倾角轨道专用测量卫星组成的完备观测系统;高轨风云气象卫星将建成光学星和微波星组网、东西布局、在轨备份的总体格局,最终形成高低轨、大中小卫星结合,支撑全要素和多圈层综合观测、高低轨互联、智能协同的新一代智慧气象卫星观测体系^[5]。

2) 观测要素的体系化。从观测需求的角度出发,我国气候种类多样,地理特征独特,自然灾害频发。我国自然灾害以台风、洪涝、地质和风电等灾害为主,地震、干旱、低温冷冻、雪灾、森林火灾和草原火灾等灾害也以不同程度发生;数值天气预报需要卫星能够准确完整地给出大气的初始状态,涉及大气温、湿、压、风、云和大气成分等关键变量信息;青藏高原被誉为“世界屋脊”“地球第三极”“亚洲水塔”,是我国重要的生态安全保障、战略资源储备基地、生态环境脆弱区,也是全球气候变化最为敏感的地带之一。目前我国对青藏高原多圈层综合观测不足,对灾害风险预估的科技水平有待提升。

目前,风云气象卫星缺乏对影响与气象、气候预测精度的温室气体、痕量气体和三维云微物理特性参数、全球风场以及高频次的大气降水测量等信息的探测能力,下一代气象卫星将发展激光雷达、红外高光谱和多普勒全球测风技术,近红外、微波等气压探测技术,高频次云雨穿透主被动微波及激光探测技术等。气象卫星以国内气象、气候和自然灾害监测迫切需求为牵引,开展体系组网、轨道布局、仪器配置等针对性研究,形成全要素观测能力。通过光学与微波、主动与被动、天底与临边、偏振、

多角度等观测手段,实现全要素组合观测能力,服务天气气候预报、生态环境监测和防灾减灾。

2.2 定量精度和稳定性提升

新一代气象卫星将瞄准世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)全球综合观测系统(WMO Integrated Global Observing System, WIGOS)2040年愿景和我国气象卫星后续观测需求,在补全探测要素的同时进一步提高定量化观测精度,实现定量化更准的气象观测。未来数值天气预报、短临天气预报和微尺度天气现象观测,均需要更高的空间分辨率和光谱分辨率。到2040年,全球数值天气预报分辨率将达到1 km(目前为10 km),区域数值天气预报分辨率将达到100 m(目前为1.5 km),垂直分辨率将达到200 m(目前为2 km),对卫星观测要求空间分辨率优于100 m,垂直分辨率优于200 m。

高精度天气预报需要气象卫星测量精度优于1%(可见通道)、0.1 K(红外通道)、0.4 K(微波);对于气候预测和服务而言,由于气候的长时间序列的缓慢变化特点,其对气象卫星遥感仪器探测精度和稳定性的要求非常高,探测稳定性要求10年变化率优于0.3%(可见通道)、0.1 K(红外通道)、0.01%(太阳辐射测量)。因此,需要进一步提高观测精准度(高精密度、高信噪比)以满足气候和痕量及污染气体的观测需求。

目前我国气象卫星在观测要素的全面性和精度方面,还无法满足未来气象业务的需求,而准确及时的精细天气预报与国民经济建设、国防安全,以及保障人民生命财产安全和提高生活质量密切相关。未来数值天气预报水平分辨率全球尺度要达到“公里级、小时级”,区域尺度达到“百米级、分钟级”,其关键突破口在于提供更高时间和空间分辨率、更高精度和稳定性的大气温湿度廓线等气象卫星资料,需要进一步拓展观测要素,填补天基观测空白,从空间三维、时间和要素等三个维度来刻画地球大气圈层的快速发展变化,满足应用需求^[1-2]。

2.3 观测手段和体制升级

气象卫星产品是对地球多圈层、多要素和多尺度的长序列、高分辨率、高精度和高质量的多源观测资料融合产品集。根据WMO全球观测系统和我

国气象卫星后续观测需求,气象卫星需填补观测要素空白,补齐现有气象观测短板,提高卫星和有效载荷性能,实现多圈层、全要素、高效能和高质量观测。

1) 填补气象观测要素空白及短板。针对温室气体、痕量气体和三维云微物理特性参数、全球风场以及高频次的大气降水测量等信息的探测空白,气象卫星需配备“光学+微波、主动+被动、天底+临边”等多门类的新型的遥感仪器,采用新型的航天载荷探测技术,包括主动激光气象雷达、主被动相结合的气压探测雷达、多频段云雨测量雷达、气象合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、紫外-可见-红外-微波全波段临边大气痕量气体廓线探测仪等新型探测手段,有效获取地球多圈层、全要素的气象宏观参量和微观特征信息,实现对大气关键参量的高精度、准实时的有效观测。后续静止轨道卫星将考虑扩大观测覆盖范围,提升全球观测能力,进一步加强中小微尺度天气现象的高动态观测,如台风、暴雨的秒级视频成像观测。通过要素的补齐和时空分辨率的提升,为天气预报及全球气候预测、生态和空间环境监测、气象灾害应急观测等应用领域提供精细化的探测资料。

2) 提升气象卫星综合观测性能。随着气象卫星探测技术的不断进步,在提升定量化测量精度的同时,气象卫星用户对航天器的智能化、网络化提出了迫切的需求,要求新一代气象卫星“好用、易用、管用”,要求卫星提升操控性和自主健康管理能力,减少地面运行维护的负担。现有气象卫星常规固化的观测模式和数据时效性,制约着载荷探测资料在气象灾害应急观测中有效快速应用,对区域强对流天气高时间、空间分辨率探测及数据融合处理能力也不足。新一代气象卫星通过星间互联互通、协同观测和多源数据融合,提升气象卫星体系综合观测效能^[6-7],实现星上自主任务规划、自主健康管理、灾害信息实时处理,以及高低轨星间、星地一体化网络的运行^[8-9]。

3 新一代风云卫星技术特点

新一代风云卫星体系将进一步满足数值天气预报、天气气候分析、生态环境监测等领域高精度、高稳定度的定量应用需求,全面瞄准国际先进和领先水平。

3.1 智能互联互通体系技术

新一代气象卫星数据传输呈现大吞吐量、多星组网通信、应急信息分发等特点,气象卫星组网通信已成为信息快速获取、多星协同智慧观测的必备链路,新一代风云卫星体系朝着体系化及智能化方向发展。

3.1.1 气象卫星体系网络互联互通总体技术

围绕数据高效传输、暴雨、台风、火灾、陆地灾害等应用需求,一体化气象卫星网络传输组网体系架构从功能架构、控制架构、部署架构三方面构建多场景适用、多任务满足、资源高效利用和灵活可扩展的网络体系架构。高轨卫星作为体系骨干网和核心网络,利用其覆盖和星上处理能力的优势,并控制接入层低轨卫星实现高效的切换。风云卫星将具有高低轨异构星座自主接入模式多、可靠运行要求高、需要快速精准建链等特点,将实现星间网络和星地传输网络的互联互通及高效融合^[8-9]。

3.1.2 典型气象遥感信息星上智能融合处理分发技术

面向未来天气和气候应用、环境和自然灾害监测、海洋环境探测需求,在保障业务应用和应急观测场景下,卫星遥感监测产品的实时业务化生成及分发,发展可见光/微光、红外、微波等载荷的星上预处理、融合处理及动态生成算法;通过实现星上可见与红外、红外与微波数据融合处理,加强气象灾害应急处理能力,实现风云卫星体系协同智慧观测,提升气象卫星体系观测及应用效能,进一步提升我国天基系统应急综合服务能力^[10-12]。

3.1.3 高低轨气象卫星智能协同观测及自主任务规划技术

面向气象要素遥感的星上知识系统构建、气象遥感任务星上自主决策、在轨启发式智能任务推理和基于网络化协同的星上自主任务规划等内容^[13],综合利用载荷信息、资源信息、引导信息,实现对气象常规、突发、自主生成等任务目标的最优化处理、资源管控和动作序列生成,从而大幅度提升星上智能化任务执行能力,实现自主智能的气象灾害快速响应智慧观测体系^[14-17]。

3.2 空间高精度基准传递技术

受传统遥感载荷定标系统设计及地面辐射校正技术理论极限的制约^[18],目前气象卫星辐射定标停留在太阳反射谱段2%、红外谱段0.2 K的不确定

性水平,其精度难以继续提高。进入21世纪后,气候变化问题成为全球关注热点,对气象卫星辐射测量精度提出了前所未有的要求。气候变化研究需要甄别每百年不到1 K(每10年0.1 K)的温度变化,现有的辐射定标技术无法满足这一需要。ASIC(Achieving Satellite Instrument Calibration for Climate Change)报告提出,为准确预测气候变化,遥感卫星观测必须长期保持在太阳反射谱段0.3%、红外谱段0.1 K、太阳总辐射0.01%的不确定性水平。

为提升全球气象等遥感卫星辐射测量精度水平和满足全球气候变化研究需求,美欧和中国科学家几乎同时提出了空间辐射测量基准传递的概念。空间辐射测量基准卫星是具有极高辐射测量精度的定标卫星,与其他遥感卫星对地球同一目标的同时空观测,去“标定”其他卫星,从而将辐射测量基准“传递”到别的卫星之上。既可以订正其他遥感仪器不确定度,解决不同遥感仪器相互一致性问题,为空间地球观测系统提供高精度可溯源的统一基准,又可以实现长期稳定的超高精度辐射测量,满足全球气候变化监测需求。

我国高度重视空间辐射测量基准问题,连续通过国家重点研发计划等渠道支持空间辐射测量基准技术发展,部署了“空间辐射基准源研制”和“空间辐射基准载荷研制”等前瞻性预研项目,为空间辐射测量基准系统研制奠定了坚实的技术基础^[19]。空间辐射测量基准卫星定标精度要比现有遥感卫星高一个数量级,必须完成原理突破和技术革新。近几年,国内相关优势单位在空间辐射基准方面均取得了一定的理论突破和技术攻关成果,都为空间辐射基准载荷研制和基准传递技术奠定了基础^[20-21]。

瞄准支撑实现国际首次空间辐射测量基准溯源的目标,面向新体制的空间辐射测量基准载荷和复杂的辐射基准传递模式,必须采用全新的设计思想和实现方法,开展精细化、量化、智能化遥感平台技术研究,突破全球高低轨卫星遥感仪器高精度基准传递系统指标体系,构建面向长时间序列气候观测的大尺度平台与载荷一体化高精高稳控制、面向多星交叉定标场景实时智能自寻优和调度管理等关键技术,进一步提高卫星平台长寿命、高可靠、敏捷性、稳定性等方面能力,提升全球气象、遥感卫星整体定标精度。根据我国相关规划,中国将成为第一个建立空间辐射测量基准的国家,率先实现直

接向国际单位(SI)溯源。

3.3 高性能新体制载荷技术

根据 WMO 地球观测系统 2040 远景目标和我国气象观测需求,新一代气象卫星在现有载荷基础上,发展气象观测必需的核心高精尖气象观测载荷,开展换代载荷功能、性能提升方面的技术攻关,带动我国载荷核心技术发展,同时,对新型载荷开展技术攻关,填补应用空白。

3.3.1 换代载荷关键技术

瞄准用户定量化精度、时空分辨率和光谱分辨率等需求,开展气象卫星的多通道成像、高光谱探测、微波成像和极轨主动降雨测量等有效载荷功能、性能换代关键技术研究,包括多功能可见红外多光谱成像技术、红外甚高光谱大气探测技术、一体化高光谱大气温湿度探测技术、高精度一体化高性能微波成像技术、紫外-可见-红外高光谱探测技术和宽幅高光谱温室气体监测技术等研究;突破核心关键技术、关键器件技术,如大面阵/长线列探测器、光栅、高精度定标黑体、高精度测角机构等核心元器件和传感器技术、大功率散热和芯片级散热技术等关键技术,引领天基气象观测核心技术发展。多通道成像载荷实现亚百米级空间分辨率,可见光 1%、红外 0.1 K、微波 0.4 K 定标精度,高光谱探测实现 1~5 km 分辨率、 0.25 cm^{-1} 大气温湿度和痕量气体探测。

3.3.2 新体制载荷关键技术

针对地球系统观测中了解较少的大气信息空白,如大气成分、数值模式中的云、气溶胶、辐射收支、风、太阳风、温室气体、临近空间温度场和风场等,需开展新型载荷关键技术研究,包括太赫兹冰云成像技术、三频降水多普勒雷达技术、激光雷达测云、测风技术、气象 SAR 技术、主动微波海表气压雷达技术、空间辐射基准测量载荷技术、高轨太赫兹冰云探测和低轨大视场闪电观测技术等,突破长寿命高稳定干涉式激光器光源及收发系统、太赫兹雷达天线及发射源技术、高精度高稳定辐射源技术和核心器件低功耗小型化技术等。解决新型载荷面临的工程化难题,填补高功耗三维降水结构探测、高精度三维云结构探测、高灵敏度冰云微物理参数探测和主被动联合高精度海面气压探测等观测手段和观测要素的空白。

3.4 高品质遥感平台技术

为满足高性能载荷提供高品质运行环境,对卫星平台性能提出了更高需求,主要体现在平台静稳能力^[22]、变形测量与控制、图像导航配准技术的提升。

3.4.1 平台静稳能力

平台姿态稳定度是影响载荷成像质量的核心指标。与常规遥感卫星相比,气象卫星配置大型挠性帆板和多台大惯量旋转载荷,具有低频挠性密集、干扰力矩复杂多变等动力学特性,高精高稳控制难度大。需要解决帆板挠性振动的被动抑制、复杂干扰力矩高精度实时辨识与补偿控制等难题,为遥感载荷提供静稳的工作环境^[23-25]。

3.4.2 变形测量与控制

由于气象遥感要素多、精度高,需要卫星采用多种有效载荷对同一目标进行多手段观测。而在轨冷热交变环境下,安装面热变形引起的指向偏差将导致载荷指向偏离预定目标。为解决多载荷精准指向问题,需要通过高导热和低膨胀材料的低变形结构设计、高精度激光光电探测器件(Position Sensitive Device, PSD)测量实现超低变形结构及在轨测量^[26-27]。

3.4.3 图像导航配准

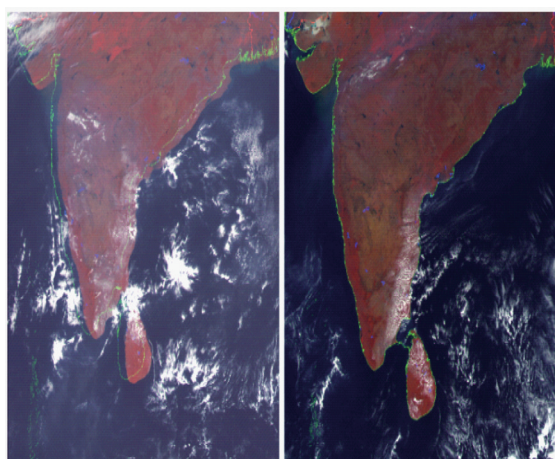
在数值天气预报中,需要使用卫星图像对云、地物进行精确的定位和追踪,传统的地面配准手段因重采样造成的辐射精度或分辨率损失,影响定量应用效果。

针对新一代气象卫星亚角秒级图像定位精度的需求,需要通过相对统一基准的高精度姿态确定、姿态轨道偏差在轨实时补偿(如图 1 所示)、成像系统在轨热变形等效建模等手段,提升遥感图像定位配准精度达到亚角秒级图像定位,为遥感数据的定量化处理和应用提供保障^[13]。

4 发展举措与建议

4.1 卫星研制与遥感应用双向融合,全面提升气象卫星综合应用能力

卫星研制、运行维护、数据分发与遥感应用是气象卫星应用的完整链路。为挖掘应用效能,应促进应用链路中的各项工作,特别是卫星研制与遥感应用的双向融合,努力实现星上人工智能数据处理、多星多站观测自主任务规划、星地人机智能交



(a) 补偿开启前

(b) 补偿开启后

图 1 星上实时补偿开启前后图像定位精度对比(500 m 分辨率)

Fig.1 Comparison of positioning accuracy of images before and after opening real-time compensation (500 m resolution)

互及地面系统自主运维;以气象大数据云平台为基础,建设“云+端”全球气象应用快速响应平台;在现有业务服务的基础上,全面提升气象卫星观测的数值预报、气候变化、防灾减灾、农业生产、生态环境、空间天气、军民融合和全球监测等综合能力。

4.2 加强研发与创新力度,打造全面领先的气象卫星观测体系

我国气象卫星事业经过两代 50 年的发展,与欧美、日本的气象卫星水平基本相当,成为全球对地观测网的主力军,是世界气象组织空间计划的主要参与者和贡献者之一。按照我国对气象卫星高质量发展的要求,气象卫星研制需加强研发和创新力度,围绕不断提高观测的时空分辨率、光谱分辨率和辐射精度等目标,有步骤、分阶段提升气象卫星观测能力和水平,逐步达到和超越国际同类气象卫星的业务技术性能,构建全面领先的气象卫星观测体系。

4.3 立足我国发展重要战略机遇期,推动气象卫星事业高质量发展

气象工作是国家的基础性、公益性事业,气象卫星投入产出比达到 1:30。构建新一代气象卫星观测体系是复杂的系统性工程,建设周期长、技术

难度大、涉及单位多,需要持续投入一定规模的人力、物力、财力。面向新时代的国家战略需求,在国家的统筹规划下,稳步发展业务稳定、布局合理、技术领先、效益突出的气象卫星观测系统,推动气象卫星事业高质量发展。

5 结束语

经过 50 年坚持不懈的努力奋斗和自主创新,成功研制并发射了两代四型共 17 颗风云气象卫星,突破了一批定量遥感核心技术,推动了相关基础工业的发展,牵引了高精度遥感卫星研制基础保障能力的提升,攻克了一批遥感应用关键技术,实现了我国气象卫星业务化运行和定量化应用,气象卫星资源已成为国家基础性战略资源。

2025 年前,我国还将研制发射 7 颗第二代风云气象卫星,实现全球首次晨昏轨道气象综合探测和静止轨道微波大气探测,建成由 4 颗低轨和 3 颗高轨组成的全球最完备的气象卫星观测系统。

面向新时代、新需求,风云卫星将坚持创新驱动、自主发展的原则,推动气象事业高质量发展,实现体系智能化、天地一体化发展,构建高低轨气象卫星智能观测体系。2035 年前,我国将建设第三代风云气象卫星系统(如图 2 所示),低轨包含 3 颗极轨卫星(上午、下午和晨昏)、3 颗低倾角轨道卫星和空间辐射基准卫星,高轨包含多颗光学星和微波星,全面实现风云气象卫星观测能力和应用水平国际领先,提升气象现代化水平,服务生命安全、生产发展、生活富裕、生态良好和保障国家安全。



图 2 2035 年风云气象卫星系统发展设想

Fig.2 Consideration of Fengyun meteorological satellite system in 2035

参考文献

- [1] 许建民. 风云二号气象卫星图像定位和卫星风精度的改善中解决问题的途径[J]. 南京信息工程大学(自然科学版), 2020, 12(1): 1-6.

- [2] 杨军, 咸迪, 唐世浩. 风云系列气象卫星最新进展及应用[J]. 卫星应用, 2018, 11(5): 8-14.
- [3] 许建民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 气象, 2010, 36(7): 94-100.
- [4] 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. 世界各国静止气象卫星发展综述[J]. 气象科技进展, 2020, 1(5): 22-29.
- [5] 朱爱军, 胡秀清, 林曼筠, 等. 风云三号 D 气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(3): 1-10.
- [6] 何熊文, 李楠, 徐勇, 等. 智能化航天器综合电子系统需求分析及体系架构探讨[J]. 航天器工程, 2018, 27(4): 82-89.
- [7] 崔高峰, 李鹏绪, 张尚宏, 等. 天地一体化信息网络中卫星通信关键技术初探[J]. 电信网技术, 2017, 23(10): 1-6.
- [8] 孙晨华. 天基传输网络和天地一体化信息网络发展现状与问题思考[J]. 无线电工程, 2017, 47(1): 1-6.
- [9] 郑作亚, 薛庆昊, 仇林遥, 等. 基于网络信息体系思维的天地一体通导遥融合应用探讨[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(8): 709-714.
- [10] 杨高伟, 贾艳茹. 气象卫星遥感图像特征目标准确提取仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(7): 372-376.
- [11] 宋熙煜, 周利莉, 李中国, 等. 图像分割中的超像素方法研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(5): 599-608.
- [12] 许晓丽, 赵明涛, 高玲. 一种基于超像素的快速聚类图像分割算法[J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(25): 235-236.
- [13] 常家辉, 王冉, 胡婷婷. 国外主要卫星导航系统协同管理模式与特点[J]. 卫星应用, 2019(5): 56-59.
- [14] 李延祺, 任海, 白亮, 等. 一种面向节能的星载实时任务动态调度算法研究[J]. 上海航天, 2019, 36(3): 82-89.
- [15] 何俊, 易先清. 基于 GEO/LEO 两层星座的卫星组网结构分析[J]. 火力与指挥控制, 2009, 12(3): 47-54.
- [16] TRUCHLY P, VANGEL M. Performance of multilayered satellite network [C]// IEEE ELMAR 2012 Proceeding. 2012: 113-116.
- [17] 常浩, 王佳嘉, 张晓宁, 等. 欧洲新一代通讯卫星平台 Alphabus/Alphas[C]// 第八届卫星通信学术年会论文集. 北京: 中国通信学会卫星通信委员会, 2012: 101-108.
- [18] 郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 2-8.
- [19] 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 等. 中国空间辐射测量基准技术[J]. 遥感学报, 2020(6): 672-680.
- [20] 吴铎, 王凯, 叶新, 等. 空间低温绝对辐射计研究[J]. 发光学报, 2019, 40(8): 1015-1021.
- [21] 汤琪, 李健军, 李琛, 等. 基于参量下转换自校准辐射基准源原理样机的光机设计[J]. 光子学报, 2019, 9(1): 1-11.
- [22] 刘洁, 王淑一, 陆栋宁, 等. 高分七号卫星控制分系统设计及在轨验证[J]. 航天器工程, 2020, 142(29): 103-109.
- [23] 陈长春, 林滢, 沈鸣, 等. 一种考虑摄动影响的星座构型稳定性设计方法[J]. 上海航天(中英文), 2020, 37(1): 33-37.
- [24] 周雅兰. 双体卫星快速姿态机动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [25] 王玉爽, 蒋志雄, 顾斌. 敏捷卫星控制分系统动中成像姿态机动模式的集成测试方案设计[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(5): 68-78.
- [26] 邢思远, 刘洪新, 张玉生. 卫星高稳定复合材料框架结构仿真优化[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(12): 91-97.
- [27] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.