

国外卫星搭载有效载荷发展综述

王久龙 徐晨阳 曾文彬 蔡盛

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要 分析了搭载有效载荷的概念, 给出了宿主卫星平台与搭载有效载荷的接口关系, 阐述了搭载有效载荷在降低航天成本、分散任务风险及实现快速发射等方面的优点和挑战; 调研了近年来国外搭载有效载荷在遥感成像、卫星通信、定位导航、导弹预警等领域的发展现状, 梳理了几个代表性的搭载有效载荷项目的发展背景、系统组成、技术指标, 如商业搭载红外有效载荷、广域增强系统、专用超高频通信有效载荷、天基杀伤评估系统; 分析了搭载有效载荷在天基侦察、预警探测卫星通信系统、高轨空间态势感知等领域的应用前景, 提出了制定平台与载荷标准化接口、建立合理有效载荷价格模型等建议。

关键词 搭载有效载荷; 宿主卫星; 卫星通信; 天基杀伤评估; 态势感知; 价格模型

中图分类号: V474.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1673-8748.2023.01.016

Review on Development of Foreign Hosted Payloads

WANG Jiulong XU Chenyang ZENG Wenbin CAI Sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The concept of hosted payloads is analyzed, the interface relationship between the host satellite platform and payloads is given, and the advantages and challenges of payloads in reducing aerospace costs, dispersing mission risks, and achieving rapid launch are expounded. The development history of foreign hosted payloads in the fields of remote sensing imaging, satellite communications, positioning and navigation, and missile early warning in recent years is investigated, and the development background, system composition, and technical indicators of several representative commercial payload projects are reviewed, for instance, commercially hosted infrared payload, wide area augmentation system, UHF communication payload, space-based kill assessment. The application prospects of hosted payload in space-based reconnaissance and early warning detection, satellite communication system, GEO space situation awareness and other fields are analyzed. Some suggestions are put forward, such as formulating standardized interface between platform and payload and establishing reasonable payload price model.

Key words: hosted payload; host satellite; satellite communication; space-based kill assessment; situational awareness; price model

近几年来,随着航天技术的不断发展和航天产业的日益扩大,以低轨巨型星座^[1]为代表的商业航

收稿日期:2022-09-22; 修回日期:2023-01-10

基金项目:中国科学院青年创新促进会会员资助项目(2019226)

作者简介:王久龙,男,硕士,助理研究员,研究方向为光电载荷总体设计。Email:wangjiulong@ciomp.ac.cn。

通讯作者:蔡盛,男,博士,研究员,研究方向为空天地一体化光电对抗。Email:caisheng@ciomp.ac.cn。

天得到迅速推进,航天产业呈现新的发展态势,大规模低成本进入太空的时代已经来临。同时,为保持太空优势和太空行动自由,美国等发达国家全面调整了太空发展策略^[2],提出以下一代太空体系架构、“黑杰克”项目等为典型代表的计划,改变了以往以大型复杂单星为主的模式,将建设重点转向由多颗小卫星组成的灵活、弹性、敏捷的低轨星座。

搭载有效载荷已经成为太空体系弹性发展的重要方式之一,为推动相关技术发展,美国提出了一系列重要举措。2010年,美国《国家太空政策》强调要联合采办可靠、进度符合政府要求,且费效比高的航天发射服务和搭载有效载荷,明确提出鼓励政府发展搭载有效载荷,提高空间态势感知和轨道碎片的监测能力。2011年,美国波音、洛马、劳拉、轨道科学、欧洲卫星协会、国际通信卫星、铱星等7家公司发起成立搭载有效载荷联盟,旨在架起政府和私营企业的沟通桥梁,促进搭载有效载荷的实施。2013年,美国海军研究生院开展了搭载有效载荷的应用研究,建立了基于搭载有效载荷的天基局部空间态势感知架构,将搭载有效载荷放置在宿主卫星平台前后方,以对局部空间区域进行长期观测,实现威胁自感知、目标检测和碰撞预警,为实现天基态势感知提供了新的解决思路^[3]。2015年,美国空军发布《在商业卫星上搭载军用载荷指南》^[4],分析了在商业卫星上搭载有效载荷面临的挑战,成立搭载有效载荷管理办公室,简化相关项目的授予流程,促进商业卫星搭载空军有效载荷的实施。2018年,基于通用仪器接口项目,NASA联合空军空间和导弹中心的搭载有效载荷办公室以及航天公司发布《搭载有效载荷接口指南提案》^[5],描述了搭载有效载荷与宿主平台之间的接口协议,包括尺寸、质量、功率和传输速率,旨在为相关组织开发基于低轨或高轨卫星有效载荷提供标准。为了研究搭载有效载荷的发展现状和军事应用价值,本文系统性的梳理了搭载有效载荷的概念和发展历程,总结了典型项目的系统概况、指标参数,并提出相关建议。

1 搭载有效载荷概念

搭载有效载荷^[6]是指除主要载荷外搭载在卫星平台上的、为满足特殊需求而设计的额外载荷(如转发器、传感器或者其他星载设备)。搭载有效载荷与主要有效载荷共用一个卫星平台,使用户能够快速高效且低成本的将有效载荷送入太空。在某些情况

下,搭载有效载荷也被称为二级有效载荷或寄宿有效载荷。宿主卫星平台为搭载有效载荷提供结构、能源和通信等资源,二者物理连接和传输接口关系如图1所示。

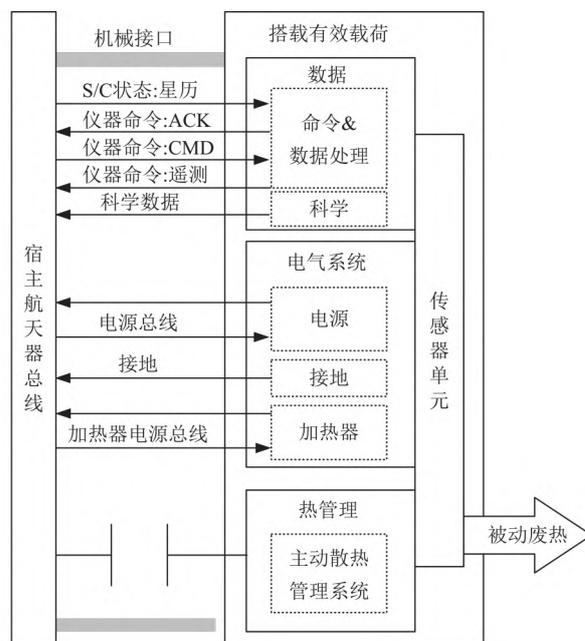


图1 搭载有效载荷接口

Fig 1 Hosted payload interfaces

搭载有效载荷的费用仅是研制、发射与运行整颗卫星费用的一小部分,可以有效降低卫星建设和部署成本,因此,逐渐受到业界的广泛关注,尤其是面临预算压力的机构。当然,在卫星平台上搭载有效载荷也面临一些挑战,比如怎样实现宿主卫星平台与搭载有效载荷的接口标准化、如何确保搭载有效载荷与宿主卫星的研制周期相一致、怎么改变用户对传统卫星项目的管理方法、如何确定搭载有效载荷的价格等。

2 国外发展现状

搭载有效载荷在国外已经初步得到广泛的应用,任务领域包括空间态势感知^[7]、碎片监测^[8]、激光通信^[9]、定位导航^[10]以及气象监测^[11]等领域;按照载荷的任务类型,本文从环境监测类载荷、技术试验类载荷以及专用转发器类载荷角度出发,介绍近年来国外搭载有效载荷的发展动态。

2.1 环境监测类载荷

为了研究空间天气对气候、全球定位系统、电力传输、高频无线通信以及卫星通信的影响,NASA牵头研制了太阳X射线成像仪(SXI Solar X-ray)^[12],工

作波段为 0.6~6.0 nm,可每分钟成像一次,每周 7×24 h 运行,2001 年搭载环境观测卫星-12 (GEOS-12)发射。2005 年,由美国劳拉空间系统公司建造、日本国土交通省和日本气象厅运营的地球静止卫星多用途运输卫星-IR(MTSAT-IR)发射升空,搭载了航空类和气象类 2 种有效载荷,航空类载荷分为通信载荷和导航载荷,为飞机提供通信和导航服务;气象类载荷由 1 个可见光(分辨率 1 km)成像载荷、4 个红外(分辨率 2~4 km)成像载荷以及 1 个气象通信载荷(S 频段、UHF 频段)组成。2008 年,为执行对地观测任务,美国军方将可见光 CCD 相机作为有效载荷搭载在美国回声星-XI(EchoStar-XI)和中圆轨道-G1(ICO-G1)卫星发射升空。2011 年,为降低下一代天基红外预警系统的研制风险,美国空军启动了商业搭载红外有效载荷(CHIRP)项目^[13],即用于导弹预警的宽视场红外传感器,搭载平台为欧洲卫星公司 2 号卫星(SES-2)。2018 年,美国导弹防御局启动天基杀伤评估(SKA)项目^[14],利用天基传感器获取导弹拦截状态,并对拦截效果进行评估,为后续拦截提供支持。2017 年,为解决航天器异常、识别潜在敌对行为提供详细的空间辐射数据,美国空军启动商业搭载的响应式环境评估(REACH)^[15]项目,在铱星(Iridium)星座上搭载 32 个有效辐射载荷。

2.2 技术试验类载荷

搭载有效载荷为新技术的正式太空部署提供了一种测试、演示与验证的新方式,美国军方、NASA 等部门都纷纷利用这种方式进行新技术的试验。2009 年,为在轨验证思科公司的空间路由能力,美国国防部将空间因特网路由(IRIS)^[16]有效载荷搭载在国际通信卫星-14 上发射升空,该载荷质量 90 kg,功率 450 W,体积 0.127 m³,用户数据率 60 Mbit/s。2011 年,为验证地球同步轨道与地球之间双向激光中继通信的效果,美 NASA 启动了激光通信中继演示(LCRD)项目^[17],载荷由 2 个单独的收发光通信终端和 1 个高速电子单元组成,地面系统由 1 个任务运营中心和 2 个地面站组成,2021 年 12 月搭载空间测试计划卫星-6(STPSat-6)上发射,初步研究结果表明:激光通信传输速率比射频高 10~100 倍,可满足空间科学和爆炸领域对更高数据速率的日益增长的需求。2018 年,为将可释放的有效载荷运送到地球同步轨道,降低天基系统研制成本,作为“凤凰”计划^[18]的一部分,美国国防部先进研究计划局启动了有效载荷在轨交付系统(POD)^[19]项目,将由

4 颗小卫星构成的 POD 发射成功,顺利进入地球同步转移轨道。

2.3 专用转发器类载荷

专用转发器作为搭载有效载荷,不仅可提供可靠的通信能力,还能够根据用户需求选择特定通信频段,已逐渐成为各国快速构建天基通信能力的主要手段。2003 年,澳大利亚国防部在民用澳普图斯-C1(Optus-C1)卫星平台上搭载了军用 UHF/X/Ka 频段的通信载荷^[20],UHF 频段有 5 个 5 kHz 和 1 个 25 kHz 的转发器,用于低数据速率双向语音和数据通信;X 频段有 4 个 60 MHz 的转发器,用于中高数据速率单向、双向视频以及语音、数据通信;Ka 频段有 4 个 33 MHz 有源转发器和 1 个备用转发器,用于中高数据速率覆盖和双工视频、语音和数据通信。2012 年,由国际通信卫星公司为主承包商,携带澳大利亚国防部队专用超高频有效通信载荷(ADF UHF)的国际通信卫星-22(IntelSat-22)发射升空,载荷由波音公司研制,具有 18 个 UHF 转发器,频率为 25 kHz,此外该星还搭载 48 个 C 频段转发器、24 个 Ku 频段转发器。2005 年,由美国劳拉航天公司和西班牙共同研制的“X 星-欧洲”(XTAR-EUR)通信卫星发射升空,搭载了北约可配置 X 频段载荷,具有 12 个 72 MHz 的转发器,总功率 100 W,用于加强西班牙与北约军事、外交和保密通信业务。2006 年,由美国劳拉公司研制的西班牙军用电信卫星(Spansat)发射升空,搭载有效载荷为在轨可重构多波束天线(IRMA)^[21],该天线的 4 个波束可以从地面单独重新定向,无需移动天线本身,主要服务于西班牙国防部,与 XTAR-EUR 卫星一起使用,为军事行动、图像传输、大使馆服务和政府通信提供支撑。2008 年,美国海岸警卫队将国家自动识别系统(NAIS)的甚高频通信载荷搭载在轨道通信卫星(Orbcomm)上发射升空,该载荷质量 3 kg,功率 8 W,体积 0.003 m³,数据率 10 kbit/s,用于增强现有的自动识别系统,实现海域态势感知。2005 年,美国联邦航空管理局将广域增强系统^[22]的 L 频段转发器作为有效载荷搭载在银河-15(Galaxy-15)卫星以及加拿大阿尼克-F1R 通信(Telesat Anik-F1R)卫星上发射升空,此后又分别于 2008 年、2016 年、2017 年、2022 年搭载国际海事卫星-4F3(Inmarsat-4F3)、墨西哥-9 通信卫星(Satmex-9)、欧洲卫星公司 15 号卫星(SES-15)以及银河-30(Galaxy-30)卫星进行补充发射。2011 年,搭载 Ka 频段通信载荷^[23]的高吞吐量卫讯卫星-1(ViaSat-1)发射升空,该载荷发射频率为 28.1~30.0 GHz,接收频率为 18.3~20.2 GHz,质量

34 kg,功率 185 W,用户速率可达 10 Mbit/s,设计寿命 15 年,主要为加拿大农村地区提供高质量宽带服务。2012 年,欧洲卫星公司 5 号卫星(SES-5)成功发射,主载荷为 24 个 C 频段和 36 个 Ku 频段转发器,搭载有效载荷为 L1 和 L5 频段的转发器,作为欧洲地球静止导航重叠服务(EGNOS)^[24]一部分。2022 年,美国空军通过其增强型极地系统资本重组(EPS-R)计划完成 2 颗超高频通信有效载荷研制,旨在为北极地区的美军提供安全、抗干扰的卫星通信能力,计划 2023 年搭载在挪威太空公司的北极卫星宽带任务上发射。

3 典型实例

近年来,国外成功开展了多项搭载有效载荷应用案例,领域覆盖导弹预警、定位导航、卫星通信、杀伤评估等方面,本文选取其中比较有代表性的项目进行介绍,如商业搭载红外有效载荷、广域增强系统、澳大利亚国防部超高频通信有效载荷、天基杀伤评估,分析搭载有效载荷的应用现状。

3.1 商业搭载红外有效载荷

商业搭载红外有效载荷(CHIRP)由美国空军于 2010 年提出,在一颗商业地球静止轨道卫星上搭载一个军用红外载荷,通过在轨收集红外数据,以研究用于导弹预警和防御的宽视场相机、红外凝视型传感器的性能。历经 39 个月的研发,于 2011 年 9 月搭载 SES-2 卫星发射升空,在轨运行 27 个月于

2013 年 12 月正式停止使用,运行期间共采集超过 300T 红外数据,为美国空军分析 70 多次导弹/火箭发射事件以及 150 次其他红外事件提供帮助。CHIRP 上的宽视场红外望远镜由科学应用国际公司开发,长、宽、高尺寸为 75 cm×54 cm×75 cm,质量为 75 kg,探测波段包括短波红外、中波红外以及直视地表波段(See-to-Ground),像素规模 2000×2000,可实现对 1/4 地球圆盘凝视观测,外观结构如图 2 所示。

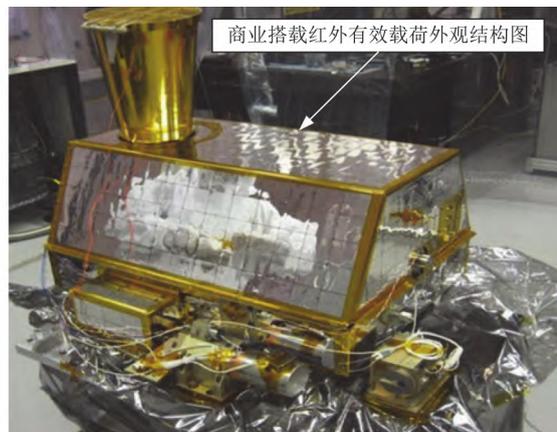


图 2 CHIRP 红外载荷
Fig 2 CHIRP infrared payload

CHIRP 载荷的宿主平台为地球同步轨道通信卫星 SES-2,卫星平台为轨道科学公司开发的 STAR 2.4,包含一个标准化的次级载荷接口、专用的有效载荷热辐射器以及由宿主转发器提供的任务数据通信模块,CHIRP 载荷在宿主平台上的布局如图 3 所示。

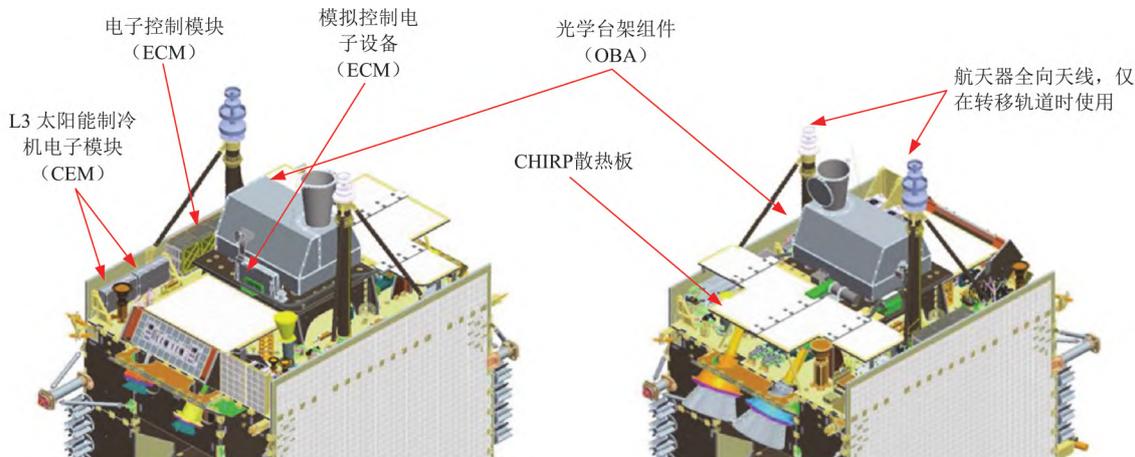


图 3 安装在宿主主机上的 CHIRP 载荷
Fig 3 CHIRP payload mounted on host

CHIRP 的任务目标包括:

(1) 提供实战环境数据,开发和评估宽视场(WFOV)地球圆盘凝视算法;

(2) 验证凝视算法的性能;

(3) 使用大规模焦平面阵列(FPA)评估 WFOV 性能;

(4)评估卫星平台对 WFOV 传感器约束边界,包括视轴稳定性、热稳定性指标和性能。

3.2 广域增强系统

广域增强系统(WAAS)是美国专为民航开发的基于卫星的导航增强系统,该计划始于 1992 年,由美

国联邦航空局负责实施,2003 年 7 月 10 日开始运行。WAAS 由 38 个广域监测站、3 个广域主控站、7 颗地球静止轨道卫星、6 个地面上行注入站、2 个操作控制中心以及陆地通信网络组成(见图 4),可覆盖美国本土、阿拉斯加、加拿大和墨西哥等大部分北美地区^[25]。

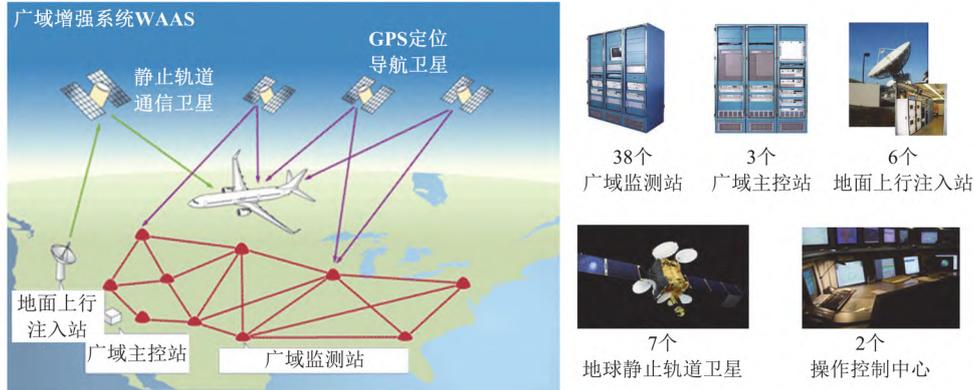


图 4 WAAS 系统体系架构

Fig 4 WAAS architecture

第 11 届中国卫星导航年会上,美国国务院空间事务办公室指出 WAAS 为北美 4700 多个民航机场提供带垂直引导的航向道进近程序(LPV)服务,其中 1000 多个民航机场具备决断高度为 60.96 m 的带垂直引导的航向道进近程序(LPV-200)能力,达到 I 类精密进近操作(CAT-I)服务水平^[26]。近年来,美国政府积极采用搭载有效载荷的方式开展 WAAS 系统的研究工作。2005—2008 年,美国联邦航空管理局采用在商用通信卫星上搭载有效载荷的方式,将 L 频段转发器托管在 Galaxy-15、Telesat Anik-F1R、Inmarsat-4F3 卫星上,有效载荷质量为

60 kg,功率达到 300 W,体积为 1 m³,用户数据率为 10 Mbit/s。2016 年 6 月,WAAS 系统有效载荷搭载 Satmex-9 卫星发射升空,并于 2018 年 3 月投入使用,以取代 Inmarsat-4F3 卫星上的旧载荷;2017 年 5 月,WAAS 系统有效载荷搭载 SES-15 卫星发射升空,并于 2019 年 7 月投入使用,以取代 Galaxy-15 卫星上的旧载荷;2018 年,美国莱多斯公司击败雷神公司获得联邦航空管理局 1.17 亿美元订单,用于开发第 7 代静止轨道通信载荷,2020 年 8 月搭载 Galaxy-30 卫星发射升空,2022 年 4 月投入使用。图 5 展示了 WAAS 系统历史上所使用的商业卫星平台。

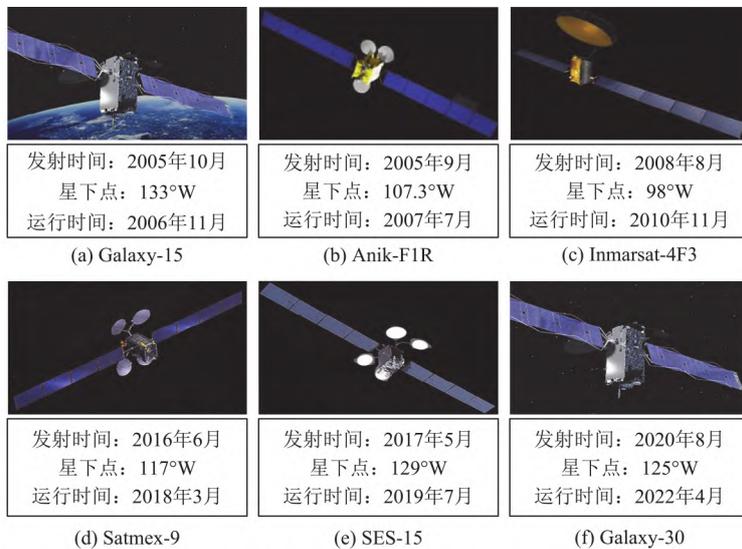


图 5 WAAS 的卫星

Fig 5 WAAS satellites

3.3 澳大利亚国防部 UHF 有效载荷

超高频(UHF)是指工作波长范围为 1 m ~ 1 dm、频率为 300~3000 MHz 的无线电波,广泛用于军事卫星通信领域,特别适合陆地、海上、空中部队使用的移动手持终端^[27]。为了给部署在中东和阿富汗地区的澳大利亚军队提供超高频通信能力,2009 年 4 月,澳大利亚国防部与国际通信卫星(Intelsat)公司签订 1.67 亿美元合同,购买国际通信卫星-22(Intelsat-22)卫星上的超高频段载荷的全部容量,即 18 个 25kHz 信道;根据合同要求,Intelsat 公司负责 ADF UHF 有效载荷的研制、集成和运管,并且在卫星发射后的 15 年间为澳大利亚提供相关的载荷管理服务,包括超高频通信系统监控和在轨测试等^[28]。2012 年 3 月,Intelsat-22 卫星发射成功,运行在星下点 72°E 的地球同步轨道上,ADF UHF 有效载荷拥有 18 个 25 kHz 的大功率转发器,总体积为 8 m³,约占 Intelsat-22 卫星总有效空间容量的 20%,质量为 450 kg,功率为 2 kW。据澳大利亚政府估计,在 ADF UHF 载荷的 15 年寿命中,与单独发射卫星相比,采用搭载有效载荷的方式可以节省 1.5 亿美元。

3.4 天基杀伤评估系统

美国 2014 财年《国防授权法案》要求美国导弹防御局应为地基中段防御系统提供改进的杀伤评估系统,并最晚在 2019 年 12 月 31 日前具备初始作战能力^[29]。于是,2014 年 4 月,导弹防御局启动天基杀伤评估项目,截止到 2019 财年,总研发经费 1.2 亿美元,实现了在轨初步运行。单个 SKA 传感器质量约 10 kg,由 1 个高速光谱传感器、1 个高速偏振成像传感器和 1 个高速偏振非成像传感器组成^[30],从图 6 可以看出,3 个传感器共用一套处理器、控制器和基座。高速光谱传感器用于对拦截中产生的辐射、热和光谱等信息进行成像,高速偏振传感器主要用于确定拦截时产生物质(碎片、颗粒、等离子体、气体等)的粒度分布,以确定弹头的类型。

迄今为止,美国国防部和导弹防御局未公布 SKA 载荷具体搭载在何种卫星上,结合美国 2017 财年导弹防御局预算申请文件^[31]以及第二代铱星系统(Iridium NEXT)发射计划,推测 SKA 载荷部署在 Iridium NEXT 通信卫星星座中的 22 颗卫星上。Iridium NEXT 卫星可以搭载多个有效载荷,每个载荷的质量约为 50 kg,体积 30 cm×40 cm×70 cm,平均功率 50 W(峰值 200 W),载荷的安装方向可以选择向下或向卫星运行速度矢量方向。SKA 对美国弹道导

弹防御系统至关重要,可与弹道导弹防御系统的指挥控制元件连接,具备实时任务处理和报告能力,可与雷达数据融合用于综合的、多现象学评估,主要用确定目标是否被拦截、确定目标的类型、确定是否是正面撞击、确定目标是否被摧毁等问题。SKA 工作过程包括 3 个步骤:第一步是通过高速光谱和偏振传感器获取拦截状态信息,如拦截产生的热辐射、高速碎片、等离子体;第二步是进行拦截时间评估,通过与毁伤数据库、拦截弹数据库、目标数据库对比,建立基于时间序列的拦截时间评估模型,判断拦截目标类型以及是否正面拦截;第三步是杀伤效果评估,利用耦合热力学和流体力学激波物理代码和材料碎裂特征,建立基于物理的目标拦截特征模型,以评估目标是否被摧毁,并给出是否需要二次拦截建议^[32]。

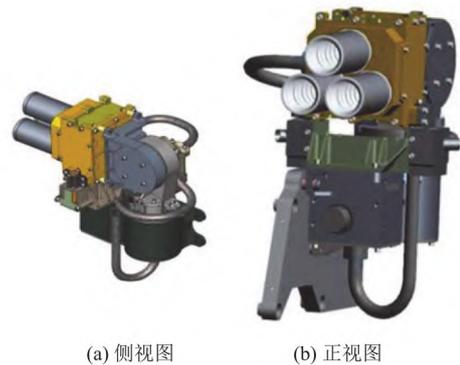


图 6 天基杀伤评估传感器

Fig. 6 Space-based kill assessment sensor

4 展望与思考

在未来空间安全的形势下,太空已成为与陆、海、空、电、网并列的作战域,各国围绕太空的军事竞争与较量不断升级。通过对国外搭载有效载荷的发展分析,可以看出:美国等国积极开展与其他国家、商业机构和国际组织的合作,寻求采用搭载有效载荷的方式提升太空装备的弹性,确保在对抗环境下依然具备强大的用天能力。经过长期的发展,搭载有效载荷已经广泛应用导弹预警、定位导航、卫星通信、杀伤评估等方面,正在逐步形成在轨应用能力。结合国外搭载有效载荷的主要用途,以及针对当前搭载有效载荷面临的主要问题,本文给出以下思考与建议。

4.1 搭载低轨商业卫星,构建天基侦察探测预警体系 高超声速飞行器、超音速隐身战机等空天目标

具有速度快、机动能力强、目标特性不明显等特性,仅依靠单一的天基探测平台很难实现快速捕获与稳定跟踪。为了探测、预警、跟踪和识别高超声速飞行器在内的先进空天目标威胁,美国正大力发展新一代天基低轨预警系统,包括太空发展局的国防太空七层体系架构和导弹防御局的超声速与弹道跟踪天基探测器。未来,加快推动研制更具弹性和生存能力的天基低轨星座的同时,应积极推动低轨小卫星搭载光学、红外有效载荷的方案论证和系统研制,构建功能完备的全天时、全天候天基侦察探测预警体系,逐步实现对重点区域乃至全球范围内高超声速飞行器、F22 隐身飞机等空天目标全生命周期的探测-识别-预警-对抗。

4.2 依托低轨卫星星座,提升军用卫星通信系统弹性

在未来战争中,太空是最先介入的作战领域,专用的军事通信卫星首当其冲遭受攻击。近年来,低轨通信卫星星座依靠其传输时延低、覆盖范围广、数据带宽高等特点,已掀起各国的研究热潮,国外代表性系统有二代铱星、一网(OneWeb)、星链(Starlink)等,我国也提出“鸿雁”、“中国星网”等计划。在低轨星座上搭载定制的通信有效载荷具有广泛的应用前景,不仅可构建全球无死角高速卫星军事通信网,使天基信息传输能力得到空前提升;还可以建立大容量、低延迟、高速率的天基信息指挥平台,实现对无人系统的远程控制、信息共享、目标分配和智能决策,提升联合作战指挥效能。

4.3 弥补现有系统不足,增强高轨空间态势感知能力

地球同步轨道上运行着通信、气象、数据中继、电子侦察、导弹预警等高价值大型卫星,对这类卫星的监视具有重要的战略意义。传统的空间态势感知主要依靠地基雷达和大型天基系统,地基监视系统存在盲区,而且容易受到天气和大气环境的影响,可能发生观测误差;天基监视系统虽然能够全天时、全天候的工作,但是系统建设成本昂贵、建设周期长。随着空间碎片急剧增加、空间目标机动性提升,传统的空间态势感知手段面临极大挑战。通过在高轨卫星上搭载有效载荷的模式,同时发展近场威胁感知技术、主被动防护技术,快速形成周边全空域、大范围、高时效性的长期持续监视、碰撞预警能力,从而提高天基高价值资产在强对抗环境下的态势感知能力。

4.4 升级系统设计理念,制定平台与载荷标准化接口

为宿主卫星平台、载荷制定统一的接口与参数标准,对于加快搭载有效载荷的建设和应用具有重

要意义。统一的接口标准有助于打破平台与载荷无法互联、各自为战的局面,促进搭载有效载荷与宿主卫星平台在尺寸、质量、功率方面的兼容。未来,卫星平台厂商与有效载荷研制单位应积极参与标准接口制定工作,对不同功能和类型的卫星平台、有效载荷、相关器件进行广泛的标准化讨论,加快通用化的接口规范制定,并建立高效合理的设计、制造、发射和使用流程,逐步完善搭载有效载荷的全链条应用。

4.5 统筹考虑各方因素,建立合理有效载荷价格模型

搭载有效载荷是降低航天任务成本、分散任务风险及实现快速发射的有效手段,受到业界的重视并得到广泛应用。目前关于搭载有效载荷价格的相关研究较少,以往的案例中也没有固定的价格标准,所以确定搭载有效载荷的价格仍是一项重大的挑战。搭载有效载荷的相关方包括卫星运营商、搭载客户以及制造商,在制定搭载有效载荷的价格时,应充分考虑相关方的需求、动机、期望等因素。常见的价格模型有收入损失价格模型、资源成本价格模型、卫星平台或火箭升级价格模型,每种模型都有不同的优点和缺点,各自适用于不同的任务场景。为了降低搭载有效载荷的成本风险,建议搭载有效载荷相关方尽早参与制定合理有效的价格模型,以减少非技术因素导致的研制进度的不可控。

5 结束语

本文分析了搭载有效载荷的概念、优点以及面临的挑战,详细阐述了国外主要国家搭载有效载荷的发展现状,重点梳理了商业搭载红外有效载荷、广域增强系统、专用超高频通信有效载荷、天基杀伤评估系统等典型项目的发展背景、系统概况及能力指标,研判了搭载有效载荷在预警探测、卫星通信、空间态势感知等军事领域的应用前景。研究结果表明,在卫星平台上搭载有效载荷是将政府、部队需求融合到宿主卫星任务中的创新方法,也是降低航天任务成本、分散任务风险及实现快速发射的有效手段,已经受到业界的重视并得到广泛应用。未来,随着航天科技的飞速发展,搭载有效载荷将成为极具吸引力的选择,具有重大的应用前景,需要加强相关领域的工程应用研究。

参考文献 (References)

- [1] 齐一鸣,陈闯,王沫,等.我国商业遥感卫星的探索实践与发展建议[J].航天器工程,2021,30(6):188-194

- Qi Yiming, Chen Min, Wang Mo, et al. Exploration practice and development suggestions for commercial remote sensing satellites of China[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(6):188-194 (in Chinese)
- [2] 胡旖旎, 钟江山, 魏晨曦, 等. 美国“下一代太空体系架构”分析[J]. *航天器工程*, 2021, 30(2):108-117
Hu Yini, Zhong Jiangshan, Wei Chenxi, et al. Analysis of US Next Generation Space Architecture [J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(2):108-117 (in Chinese)
- [3] Zaman F B. Building a local Space Situational Awareness (SSA) architecture using hosted payloads [R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School Monterey CA, 2013
- [4] Cunningham P A. Military payloads hosted on commercial satellites: How can the space and missile systems center increase the number of commercially hosted military payload contract awards [R]. Maxwell Air Force Base, Alabama: Air University Press, Air Force Research Institute, 2015
- [5] NASA. Hosted payload interface guide for proposers [R]. Washington D.C.: NASA, 2018
- [6] 洪海丽, 倪淑燕, 柴黎. 搭载有效载荷及其发展现状 [J]. *中国航天*, 2014(8):25-28
Hong Haili, Ni Shuyan, Chai Li. Hosted payload and its development status [J]. *Aerospace China*, 2014(8): 25-28 (in Chinese)
- [7] Vallado D, Lowe J, Anderson J. Benefits of hosted payload architectures for improved GEO SSA [C]// Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Maui, Hawaii: AMOS, 2011
- [8] Shell J R. Commercially-hosted payloads for debris monitoring and mission assurance in GEO [R]. Maui, Hawaii: Air Force Space Innovation and Development Center Schriever AFB Co, 2011
- [9] Israel D J, Edwards B L, Staren J W. Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) update and the path towards optical relay operations [C]//2017 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2017:1-6
- [10] Kaul S. Smallsats, hosted payload, aircraft safety, and ADS-B navigation services [J]. *Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation*, 2019: 1-18
- [11] Kraft S, Lupi A, Luntama J P. ESA's distributed space weather sensor system (D3S) utilizing hosted payloads for operational space weather monitoring [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 156: 157-161
- [12] Hill S M, Pizzo V J, Balch C C, et al. The NOAA Goes-12 solar X-ray imager (SXI) 1. Instrument, operations, and data [J]. *Solar Physics*, 2005, 226(2): 255-281
- [13] Levi A, Simonds J, Gruber C. CHIRP technology demonstration project [C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Washington D.C.: AIAA, 2011
- [14] Sherman J. MDA: Space-based Kill Assessment constellation nearly in place [J]. *Inside the Pentagon*, 2018, 34(37): 1-8
- [15] Mann K, Holker D, Conn N. Responsive environmental assessment commercially hosted (REACH) payloads [C]//2017 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2017: 1-6
- [16] Johnson J D, Connary J A, Thompson J, et al. Internet routing in space NMS architecture [C]//2009 IEEE Aerospace conference. New York: IEEE, 2009: 1-11
- [17] 赵方, 刘兴, 罗广军, 等. NASA 激光通信中继演示项目技术 [J]. *光通信技术*, 2020, 44(8):49-54
Zhao Fang, Liu Xing, Luo Guangjun, et al. NASA laser communication relay demonstration project technology [J]. *Optical Communication Technology*, 2020, 44(8):49-54 (in Chinese)
- [18] 陈罗婧, 郝金华, 袁春柱, 等. “凤凰”计划关键技术及其启示 [J]. *航天器工程*, 2013, 22(5):119-128
Chen Luoqing, Hao Jinhua, Yuan Chunzhu, et al. Key technology analysis and enlightenment of Phoenix program [J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(5): 119-128 (in Chinese)
- [19] Sullivan B, Barnhart D, Hill L, et al. DARPA phoenix payload orbital delivery system (PODs): “FedEx to GEO” [C]//AIAA SPACE 2013 Conference & Exposition. Washington D.C.: AIAA, 2013: 5484
- [20] Gunter's Space Page. Optus and defence C1 [EB/OL]. [2022-09-12]. https://space.skyrocket.de/doc_sdat/optus-c.htm
- [21] Montesano A, Luis F, Bustamante M, et al. EADS CASA Espacio RX DRA: IRMA heritage in X band and ELSA development in KU band [C]//2012 15 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. New York: IEEE, 2012: 1-9
- [22] 王杰华. 国外卫星导航增强系统最新进展研究 [J]. *中国航天*, 2011(9):20-23
Wang Jiehua. Research on the latest development of foreign satellite navigation augmentation system [J]. *Aerospace China*, 2011(9):20-23 (in Chinese)
- [23] Vaccaro S, Diamond L, Runyon D, et al. Ka-band mobility terminals enabling new services [C]//The 8th

- European Conference on Antennas and Propagation. New York:IEEE, 2014:2617-2618
- [24] 黄良珂, 刘立龙, 文鸿雁, 等. 亚洲地区 EGNOS 天顶对流层延迟模型单站修正与精度分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(8):808-817
Huang Liangke, Liu Lilong, Wen Hongyan, et al. Single-site improvement and accuracy analysis for zenith tropospheric delay of EGNOS model over Asia area [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(8):808-817 (in Chinese)
- [25] Lawrence D, Bunce D, Mathur N G, et al. Wide area augmentation system (WAAS)-program status[C]// Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Manassas: Institute of Navigation, 2007: 892-899
- [26] 刘天雄, 周鸿伟, 聂欣, 等. 全球卫星导航系统发展方向研究[J]. 航天器工程, 2021, 30(2):96-107
Liu Tianxiong, Zhou Hongwei, Nie Xin, et al. Research on development direction of Global Navigation Satellite System [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(2):96-107 (in Chinese)
- [27] 杜妍, 李亚秋. 超高频卫星移动通信系统通信体制研究[J]. 航天器工程, 2016, 25(3):9-16
Du Yan, Li Yaqiu. Research on communication mechanism of UHF mobile communication satellite system [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(3):9-16 (in Chinese)
- [28] Defense Industry Daily. Australia's intelsat-hosted IS-22 satellite[EB/OL]. [2023-02-23]. <https://www.defenseindustrydaily.com/Australias-Intelsat-Hosted-IS-22-Satellite-06355/>
- [29] Levin C, Howard P B M. National defense authorization act for fiscal year 2015[J]. Public Law, 2014, 113: 291
- [30] Mostly Missile Defense. MDA's Space-based Kill Assessment (SKA) experiment[EB/OL]. [2022-09-28]. <https://mostlymissiledefense.com/2016/08/09/mdas-space-based-kill-assessment-ska-experiment-august-9-2016/>
- [31] MDA. Missile defense agency fiscal year 2017 budget-overview[R]. Department of Defense, 2017
- [32] 刘丙杰, 胡玉颖, 罗珩娟. 美军“天基杀伤评估”系统发展现状[J]. 中国航天, 2020(7):57-61
Liu Bingjie, Hu Yuying, Luo Hangjuan. The development status of the US military's Space-based Kill Assessment system[J]. Aerospace China, 2020(7):57-61 (in Chinese)

(编辑:李多)