

星载 AI 推动太空侦察智能化

■王奕阳 曾 掠 唐宇谦

2025 年底,英国 BAE 系统公司研制的 3 颗 Azalea 射频卫星入轨后,与先前发射的 1 颗合成孔径雷达卫星组成星座,在太空利用 AI 融合处理射频与雷达数据,将可用情报直接回传陆、海、空作战平台。同一时期,丹麦与瑞典联合推进的“彩虹桥”卫星项目也具备 AI 支持的态势感知能力,面向北极和北大西洋地区开展地基监视、目标识别与即时事态报告等任务。

这些案例共同反映了一个重要趋势:星载 AI 已经从技术构想走向实际部署,将推动太空侦察迈向智能化。

太空相机变“在轨星脑”

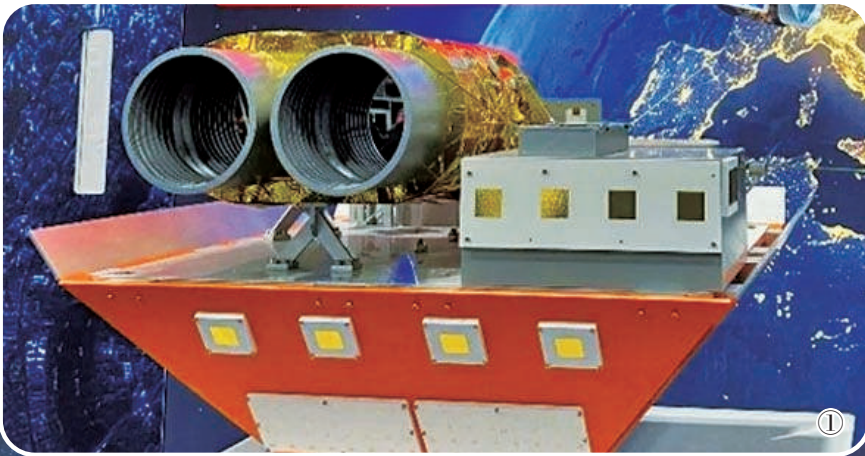
在太空侦察体系中,侦察卫星本质上就是一台太空相机,负责对地成像,并将海量原始图像下传至地面站,由地面站完成存储、处理和判读。随着现代战争对情报时效性的要求日益提高,这种“卫星拍摄、地面分析”的分工模式逐渐暴露出诸多问题:星地通信链路带宽有限,大量无效数据挤占信道;地面站数据处理速度慢,从影像获取到情报产出往往需要数小时甚至数天,一旦目标转移或消失,这些情报便会失去价值。

星载 AI 的出现,从物理层面改变了这一局面。2020 年,欧洲航天局发射一颗 ΦSat-1 试验卫星,首次将 AI 算法送入太空并实现在轨运行。这颗搭载英特尔视觉处理芯片的立方体卫星,采用深度神经网络算法,能够在轨识别云层覆盖并直接剔除无效图像,仅回传有用影像,节省了约三成的下行带宽。ΦSat-1 试验卫星成功验证了星载 AI 在太空环境下的稳定运行能力,成为太空侦察智能化的开端。

2022 年,美国 Palantir 公司与 Satellogic 公司联合发射一颗遥感卫星。该卫星配备英伟达的边缘计算芯片,具备在轨情报分析能力,不仅能对地成像,还能分析图像内容、识别关键信息,打破了过去“卫星拍摄、地面分析”的分工模式,标志着星载 AI 开始承担情报分析功能。

与此同时,卫星的自主任务能力也在快速提升。2024 年 3 月,美国洛克希德·马丁公司发射“小马快车二号”试验卫星。它采用软件定义架构,支持 AI 驱动的自主任务规划、协同编队飞行及故障检测修复,还能根据任务需求自主调整观测计划。这对长期在轨运行的侦察卫星而言,意味着更高的响应效率和更强的生存能力。

不仅如此,2025 年 5 月,以色列图像卫星国际公司完成一颗遥感卫星升级工作。这颗卫星搭载 AI 自主处理芯片,能够在轨完成从图像采集、目标识别到分类研判的全流程作业,随后向地面回传情报,将过去数分钟乃至数小时的情报时延压缩至近乎实时水平,从拍摄到形成情报,所有环节均在卫星上自主完成,标志着星载 AI 完成全部技术验证,将成为新一代侦察卫星的“标配”。



图①:展会上的 Azalea 射频卫星。图②:英国 BAE 系统公司的 3 颗 Azalea 射频卫星与 1 颗合成孔径雷达卫星组成星座(示意图)。

让数据直达作战平台

星载 AI 让卫星具备了“在轨思考”能力,但“思考结果”能否及时送达作战平台,是紧接着要解决的问题。

过去,卫星图像先在轨完成初步处理,再回传地面站,由地面站进行情报分发。这一环节耗时漫长,在整个情报链条中不确定性最高。星载 AI 的突破,在于同时改变了信息处理方式和分发路径,不仅让卫星能在轨分析,还能将分析数据直接送达作战平台。

美国太空发展局主导的“扩展型作战太空架构”(PWSA)正是这一思路的工程实践。作为下一代低轨卫星星座,PWSA 由数百颗小卫星组成,通过七大功能层(传输层、跟踪层、监管层、威慑层、导航层、作战管理层、支持层)构建覆盖全球的太空作战网络,旨在实现对高超声速武器、时效目标的全天候感知与数据闭环传输。其中,传输层作为体系枢纽,集成 Link16 数据链、光学星间链路等先进技术,提供低延时、高韧性的地基通信支持,首次实现从近地轨道到航母

等作战平台的实时战术数据传输。这种变化对杀伤链影响巨大。对于导弹发射车、机动雷达等时效目标而言,这意味着“被发现即被锁定”。情报时效的提升,直接改变了战场上的攻防节奏。

从单星智能到星座智慧

星载 AI 解决了单星智能问题,如何将单星智能联结成网,形成覆盖全球的星座智慧,是太空侦察智能化面临的下一个问题。

这一改变首先依托低轨星座的出现。低轨星座通常由数十至数百颗小型卫星组成,这些卫星通过星间链路互联互通,构成一个运行在轨道上的分布式网络。每颗卫星既是一个独立的感知节点,又是整个网络的有机组成部分。2024 年,欧洲航天局发射的 ΦSat-2 试验卫星,初步实现单颗小型卫星在轨运行多个 AI 程序的可行性,包括云层识别、船舶检测、图像压缩等多项任务。2025 年 11 月,意大利一家公司参与打造的 AI-eXpress 星座,首次实现多颗卫星在轨协同执行 AI 分析,共享处理结果。从

单星验证到星座组网,这也是从单星智能到星座智慧的跨越。

当单星智能与星座规模相互叠加,太空侦察能力不再是单颗卫星能力的简单相加。单颗低轨卫星对某一区域的重访间隔以小时计,而数十颗卫星组网后,其访问间隔可压缩至几十分钟甚至更短;单颗卫星的在轨算力有限,多颗卫星通过星间链路互相调用闲置算力,将构成弹性分布的太空计算网络。

与此同时,星座的智能调度也提出了新的要求。面对数百颗在轨卫星,传统的人力密集型地面管控方式难以应对,星载 AI 正在从“分析影像”延伸至管理卫星本身,自主完成任务规划、资源分配和网络管理。这种“AI 管理 AI”的模式,正是星座智慧得以高效运转的支撑。

从太空相机到“在轨星脑”,从单星智能到星座智慧,太空侦察的内涵正在被重新定义。未来的太空侦察能力不再取决于某颗卫星的分辨率有多高,而取决于整个星座的智能化水平有多强。这些变化将影响对现代战争“制信息权”的争夺和胜负天平。

“负笈”作战

■张诗宏 德力夏提

左图中,一名全副武装的外军士兵正在握枪瞄准。在他的背上,高高竖起的天线装备犹如古代书生的书笈。其实,这是以色列拉斐尔公司推出的 BSAT-MP 背负式卫星通信终端。这套战术通信装备,意在让单兵及所属任务分队拥有可随行携带的宽带通信链路。

步兵分队在深入敌后或荒山沙漠执行任务时,长期面临通信困扰:大功率电台无法随身携带,便携式电台的通信距离严重不足。这套背负式卫星通信终端将一部相控阵天线集成在单兵能贴身背负的背包里,天线通过支架高高竖起,寻找头顶的卫星信号。士兵背着它,可在行进间实现高速率通信传输。

背负式卫星通信终端,实际上就是一台小型移动卫星中继站。以这套 BSAT-MP 背负式卫星通信终端为例,它集成了 Ka 波段收发组件、GPS 模块和惯性测量单元,能自动追踪卫星波束。当士兵采用卧趴或蹲姿隐蔽时,背包上端的天线能自动调整方位角与俯仰角,确保始终锁定卫星信号。它就像前沿

任务分队“背在身上的通信站”,哪怕身处远离基站的荒郊野岭,这套设备也能把前线态势、语音乃至高清画面实时传回指挥部。

虽然这套卫星终端设备让前沿任务分队拥有千里之外的通信能力,但其局限性同样不容忽视。把电池、天线、背包全算上,系统重约 16 千克,对单兵负重能力要求较高。天线高高竖起,虽然带来良好的信号角度,但也会暴露自身位置。另外,一旦进入密林深处,天线信号被树木遮挡,这套装备可能瞬间“失聪”,迫使士兵退回传统电台通信方式。

从过去依赖车载大型通信装备,到单兵背负卫星终端行动,背负式卫星通信终端的出现,是现代单兵通信方式迎来的一次重要转变。这件“背包”不只是能收发信号,还具备接入地基网络的能力,让前沿任务分队成为战场上持续跳动的信息节点。



图文兵戈

长期以来,卫星发射升空后,如果不出意外,将一直在轨道上“工作到退役”。如今,美国一家初创公司试图打破这一惯例,让卫星在完成任务后返回地球,经过检修、升级、加注燃料后再次使用。据外媒报道,这家位于丹佛的初创公司正在向美国国防部推介“可重复使用卫星”概念,希望为美太空军提供一种介于“低成本卫星用完即换”和“昂贵在轨维修”之间的新选择。

任务结束返回地球

当前在轨服务产业的主流思路,是让负责维修、加注燃料的航天器飞到目标卫星附近为其服务,以延长卫星寿命。这家公司反其道而行之,让卫星返回地球进行维修。

该公司的国防业务负责人称,这一模式与航天飞机类似,任务需要时进行太空部署,完成任务后返回地面进行维修保养,再重新投入使用。对军方而言,这样做的首要价值未必是降低单颗卫星成本,而是可能改变卫星的全寿命周期管理方式。该公司甚至提出,可把部分卫星作为危机时期临时部署的“太空作业平台”,任务结束后再回收。相关任务包括导航授时、侦察监视、通信以及导弹预警与跟踪。

明年尝试首次回收

据该公司介绍,明年将进行首次卫星回收测试。首颗验证卫星 Delphi-1 重约 200 千克,可携带约 30 千克载荷,计划搭乘太空探索技术公司的“运输者-19”火箭升空。此次任务的主要目标是验证 Delphi-1 卫星完成在轨任务后能否安全返回地球,让卫星经历从发射、在轨运行、到大气再入、着陆等全过程。

该公司计划采用降落伞方式回收卫星,回收场地设在澳大利亚。Delphi-1 卫星返回地面后将被拆解检查,以分析结构、电子设备和其他部件经受再入大气层飞行后的状态,为后续重复使用积累经验。

值不值得再飞

事实上,可重复使用卫星的最大问题,不是“能不能回来”,而是“回来后值不值得再飞”,这也是该方案面临的现实挑战。

目前,卫星制造业正朝着造价更便宜、生产批量化的方向发展。如果一颗卫星回收后需要经历长时间检测、翻修,

卫星有望「可重复使用」

■曲 卫

并更换热防护材料,那么“重复使用”未必比直接发射一颗新卫星更划算。

该公司承认,真正的经济优势只有在同一颗卫星经历多次飞行后才可能显现。同时,要形成良好的商业循环,还需要更多支持。目前,可重复使用卫星仍是一项等待接受工程验证的商业概念。不过,它提出了一个值得关注的新方向:当火箭已经越来越像飞机一样可反复使用,那卫星会不会成为下一种被重新定义寿命周期的航天器?

如果未来这一方式有望实现,未来卫星或许不再只有“发射—运行—报废”一条路径,而是可能变成“部署—执行任务—返回—维修—再次部署”。这不仅会改变卫星成本,还可能改变航天器的使用方式。



英国推出机身一体化结构电池

据外媒报道,英国一家电池公司推出名为“无人机脊骨”的一体化结构电池,不再将电池作为独立组件,而是将电池直接作为无人机承重结构,可解决无人机外置电池过大过重、挤占载荷空间等痛点。

该技术摒弃独立电池组设计,将储能单元集成到无人机承重主梁内部,机身结构同时承担储能功能,可有效释放

机身内部空间、降低整机自重。

该公司表示,使用此技术的无人机航程与载荷能力均得到明显提升。近期该技术已完成测试,研发团队将 400 伏结构电池搭载于 600 千克级重载无人机平台,整机重量降低 45%。试飞中该机携带 220 千克载荷飞行超 100 千米,达到以往无人机的运输指标。

澳大利亚研发耐寒耐高温电池

近日,美国国防创新小组选定澳大利亚 3ME 技术公司开展“便携式弹性综合储能模块”项目(PRISM),交付并测试 EdgeVOLT 便携式储能系统,以强化国防能源韧性和满足野外持续供电需求。

EdgeVOLT 是一款加固的模块化电池系统,采用可扩展架构,可在偏远

恶劣的作业环境中为通信设备、野战设施、无人平台等多种装备稳定供电,旨在减少对传统燃油发电机的依赖。

该系统分为标准版和低温改进版,其中低温改进版采用液化气体电解液电芯,工作温域可达-60 摄氏度至 60 摄氏度,有效解决了野战电源在极端温度下性能衰减的行业难题。

日本开发耐高温固态电池

日本一家电子公司近日宣布,其“高耐热全固态电池开发与演示”项目,已入选日本宇宙航空研究开发机构的“小型卫星空间技术快速评估计划”,双方正式启动联合研究。

目前航天领域常用的液态锂电池,工作温度上限约为 60 摄氏度,在太空极端温差下寿命衰减明显,超过 100 摄氏度时还存在损坏或起火风险,需要配备复杂的温控系统,增加了卫星重量和设计难度。这家公司研发的全固态电池,在超过 100 摄氏度时仍能保持高安全性。此次合作目标是在实现与传统锂电池相当能

量密度的基础上,利用这种电池的耐高温特性,在太空宽温范围内建立稳定输出和延长寿命,从而减少温控设备,减轻卫星重量。

这项研究将进行卫星搭载试验,实际在轨数据用于优化电池在真空、辐射、温差交变环境下的可靠性。相关技术未来有望推广至地面高温工业及高端消费电子领域。

(子渊)



前沿技术