

大规模异构遥感星座技术发展、应用范式与未来展望

蔺骁龙, 张学阳, 王 训, 马聪慧

(中国人民解放军军事航天部队航天工程大学, 北京 101416)

摘要: 传统遥感系统难以满足全球化、高时效的对地观测需求, 推动对地观测体系向大规模异构星座深刻转型。系统综述该领域进展, 在架构层面聚焦异构协同设计、星上智能处理与动态资源调度等关键技术; 在应用层面分析通导遥一体化、即时遥感等新型范式及产业生态变革; 同时剖析系统管控、协同控制、处理效能、资源优化与生态成熟度等核心挑战。未来, 该技术将向认知化、融合化与柔性化方向演进, 成为支撑可持续发展的重要空间基础设施。

关键词: 遥感星座; 高低轨协同; 在轨智能处理; 太空数据中心; 通导遥一体化; 资源调度

中图分类号: V443.5; TP79

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026013

Development, application paradigms and future prospects of large-scale heterogeneous remote sensing constellation technologies

Lin Xiaolong, Zhang Xueyang, Wang Xun, Ma Conghui

Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract: Traditional remote sensing systems struggle to meet the globalized and high-timeliness demands for earth observation, driving a profound transformation of the earth observation system toward large-scale heterogeneous constellations. This study provides a systematic review of recent advances in this field, at the architectural level, it focuses on key technologies such as heterogeneous collaborative design, onboard intelligent processing, and dynamic resource scheduling; at the application level, it examines emerging paradigms including the integration of communication, navigation, and remote sensing, as well as real-time remote sensing, along with associated industrial ecosystem shifts; it also analyzes core challenges in system governance, collaborative control, processing efficiency, resource optimization, and ecosystem maturity. Looking forward, the technology is expected to evolve toward cognition, integrated, and adaptive capabilities, serving as critical space-based infrastructure for sustainable development.

Key words: remote sensing constellation, high-low orbit cooperation, on-board intelligent processing, space data center, integration of communication, navigation, and remote sensing, resource scheduling

0 引言

大规模异构遥感星座的建设与应用已成为全球航天领域的重要趋势。当前, 对地观测数据在资源管理、灾害预警、环境监测等众多国民经济与国家安全领域发挥着不可替代的作用。随着各行业对遥感数据时效性、覆盖能力和信息维度要求的持续提升, 传统单星或小规模同构星座已难以满足日益增长的全球化、高频次、多维

度协同观测需求^[1-2]。

当前, 以美国 Planet Labs 的“鸽群”星座、Capella Space 的 SAR 星座以及中国“吉林一号”星座为代表的系统, 正通过数百颗乃至数千颗卫星组网, 实现前所未有的全球高频次、高时效对地观测能力^[3-6]。这些系统不仅服务于商业与民生领域, 其军事与战略价值也日益凸显, 如 SpaceX “星链”衍生的“星盾”计划, 即面向国家安全领域应用^[7]。这些星座标志着对地观测从传统单星或

多星协同模式迈入巨型星座时代^[8]。

本文所述“大规模异构遥感星座”指在低轨、太阳同步轨道等多层轨道上部署，由具备高分辨率光学、合成孔径雷达（synthetic aperture radar, SAR）、高光谱、视频及电子侦察等不同载荷的卫星组成的规模化协同网络。该系统通过多星组网、异构协同、智能处理，实现高重访、全天候、多波段对地观测能力，显著提升数据获取效率与服务响应水平。

本文在总结国内外典型星座发展现状的基础上，从系统顶层设计、星上智能处理、动态资源调度、通导遥一体化服务等维度，梳理大规模异构遥感星座的关键技术体系与发展路径，分析其面临的主要挑战，并展望未来发展趋势，以期对相关研究与实践提供参考。

1 大规模异构遥感星座系统架构与技术进展

大规模异构遥感星座的构建是一项复杂的系统工程，其技术内涵远超传统单星或同构星座范畴。本文从星座顶

层设计与优化、在轨智能处理与信息提取、星地协同与资源调度优化3个层面，剖析其关键技术进展与现存不足。

1.1 星座顶层设计与优化:从覆盖分析到协同构型

星座顶层设计决定其整体效能。对于大规模异构星座来说，设计目标应从单一追求全球或区域覆盖，转向实现多维度性能指标（如重访时间、空间分辨率、辐射分辨率、任务响应时间）在特定约束下的综合最优。典型大规模异构遥感星座系统架构如图1所示。

（1）异构协同构型设计：异构协同构型的核心在于将不同轨道、不同性能的卫星与载荷组合为有机整体。现有研究多采用群智能优化算法优化轨道与载荷配置，以提升区域覆盖性能^[9-10]。Wang等^[11]通过优化地面轨迹分配策略，提升了星座对区域的持续覆盖能力。此类精细化设计直接关系到星座在数字经济场景下的服务效能^[12]。

异构性在功能上体现为互补（不同类型遥感载荷在异构星座中的互补特性对比见表1）：高分辨率光学卫星

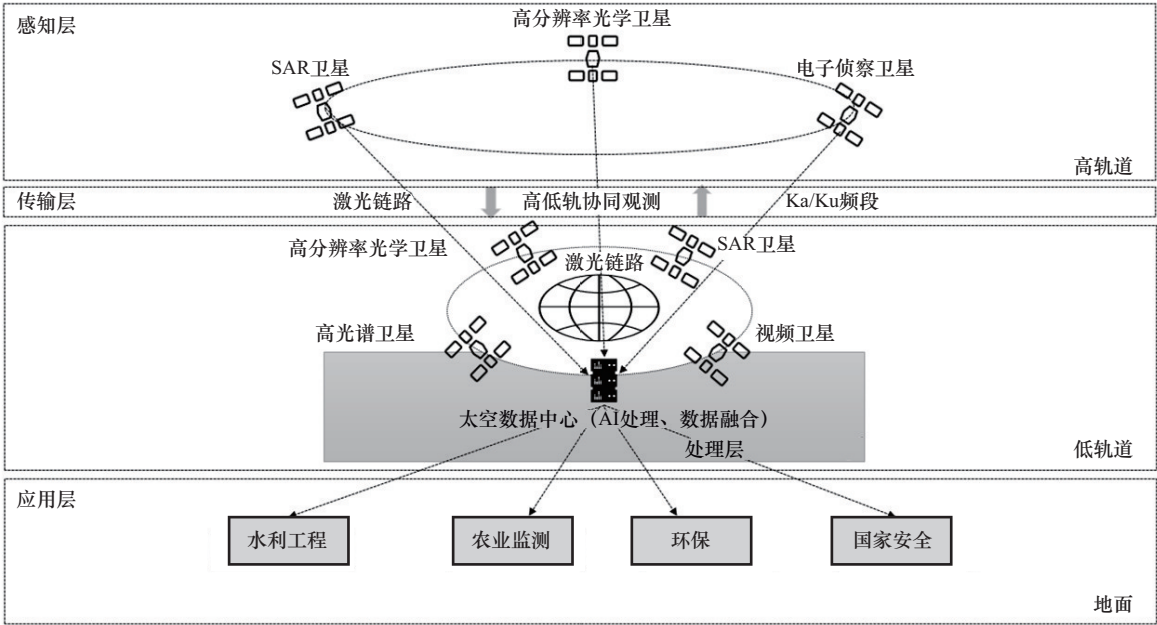


图1 典型大规模异构遥感星座系统架构

表1 不同类型遥感载荷在异构星座中的互补特性对比

载荷类型	核心优势	主要局限	在异构星座中的角色
高分辨率光学	空间分辨率高,地物细节丰富	受云、雨、黑夜条件影响	提供基准高清真彩色影像,用于目标识别等场景
SAR	全天时、全天候工作,对形变敏感	图像解译专业性要求高	穿透云层,实现连续观测,用于防灾减灾、形变监测等场景
高光谱	具备连续光谱信息,能识别物质成分	数据量大,空间分辨率通常较低	精准分类地物,用于矿产勘探、环境监测等场景
视频	具备时间维度信息,可动态监测	覆盖范围窄,数据量极大	对动态目标(如交通流、船只)进行实时监控
电子侦察	被动接收信号,隐蔽性强;不受气象条件限制,可探测非合作目标电磁信号	无法直接光学成像,定位精度依赖技术体制,目标属性需通过解译分析获取	提供电磁频谱态势与目标信号特征,用于态势感知、目标识别与预警等场景,与光学/SAR信息形成多维情报互补

可获取高分辨率图像，合成孔径雷达卫星保障全天候观测，高光谱卫星识别地物成分，电子侦察卫星则捕获并解析目标电磁频谱信号，与光学、SAR 等成像载荷形成深层互补。高低轨协同架构已成为重要发展趋势，该架构通过结合高轨卫星的广域持续凝视能力与低轨卫星的高频重访优势，可提升对动态目标的发现、跟踪与识别效率。

(2) 优化模型与求解算法。由于设计空间庞大、约束条件复杂（如载荷功耗、星上存储、发射成本及轨道资源冲突），传统解析方法难以适用。群智能优化算法成为解决此类高维、非线性问题的主流工具，主要包括遗传算法、粒子群算法、蚁群算法及其改进变体。

文献[9]提出的改进“小龙虾”优化算法，是新兴元启发式算法在星座优化领域的成功应用，该算法具备较强的全局搜索能力与较快的收敛速度，能够高效获取异构星座的 Pareto 最优解集。文献[13]将多种群智能优化算法系统应用于低轨遥感星座设计，验证了此类方法在复杂优化问题中的有效性。然而，现有算法仍普遍面临工程约束建模不够精细、多目标权衡主观性强、实时动态调整能力不足等问题。未来需进一步发展融合物理模型与数据驱动的混合优化方法，并加强算法在轨部署的轻量化与实时性研究。不同类型算法技术路线对比见表 2。

当前不足与展望：尽管群智能优化算法在求解星座高维优化问题上展现出潜力，但其工程实效性仍面临多重挑战。首先，现有优化模型常对轨道动力学、载荷物理约束及星间链路条件进行过度简化，导致“设计最优”与“在轨可行”之间存在偏差；其次，算法本身在应对实时动态任务注入与星座构型在线调整时，计算时效性常显不足；最后，多目标帕累托解集的权衡依赖人工经验，缺乏面向特定任务需求的智能决策支撑。

可行的技术发展方向包括：① 构建“模型—数据”

混合驱动的优化框架，利用高保真仿真与在轨数据训练代理模型，以平衡计算速度与设计保真度；② 探索分层分布式求解策略，将全局优化分解为星座层协同规划与单星层自主调整，提升响应敏捷性；③ 集成知识嵌入与可解释人工智能技术，将领域专家规则融入优化过程，增强解集的工程可解释性与可信度。

1.2 在轨智能处理与信息提取:从数据下传到信息上行

海量遥感数据对星地数据传输链路构成巨大压力，用户对信息获取时效性要求日益提高，驱动遥感卫星系统的处理能力从“地面中心”向“星上边缘”前移，在轨智能成为技术竞争的制高点。

(1) 星上轻量化智能检测：在资源受限的星载嵌入式平台上实现高精度目标识别与分类是研究热点。陈铖等[14]提出一种面向嵌入式平台的轻量化深度学习检测模型，该模型可对遥感图像中的特定目标进行在轨识别与定位，仅下传目标位置与类别等关键信息，显著缓解星地数据传输链路压力。王密等[2]提出的“云—边—端”智能服务架构，将具备星上计算能力的智能卫星或星簇视为“边”节点，使其能够在轨执行部分原本依赖地面云端的处理任务，为提升星上处理效能与系统响应速度提供了路径。

国际上，欧空局的 Φ -sat-1 针对海洋浮游植物水华检测任务设计了轻量化深度神经网络（deep neural network, DNN）星上部署方案，将需下传的数据量降低约 90%[15]。然而，星上智能处理仍面临模型精度与轻量化之间的权衡、在轨自适应学习能力有限、硬件可靠性及抗辐照要求高等挑战。

(2) 分布式协同与自主控制：分布式协同控制技术旨在使星群以整体形式实现自主运行。刘付成等[16]系统阐述了分布式协同微纳遥感星群智能控制系统涉及的关键技术，包括星间相对状态测量、协同任务规划与分配，

表 2 不同类型算法技术路线对比

算法类别	典型算法	求解效率	约束适配性	工程可实现性	主要适用场景
传统优化算法	整数规划、动态规划	对于小规模问题性能最优；规模扩大后计算复杂度剧增	严格，擅长处理线性与明确的约束	高，模型成熟，但依赖精确的数学模型	早期星座设计，子系统优化或小规模静态优化
元启发式算法（群智能）	遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)	全局搜索能力强，收敛速度中等，适用于中高维问题	强，能灵活处理多种非线性、离散型约束	较高，参数调优依赖经验，但框架通用易实现	大规模星座多目标协同设计、轨道与载荷联合优化
改进元启发式算法	改进“小龙虾”算法、混合蛙跳算法等	通常针对特定问题改进，在收敛速度或避免早熟方面性能有提升	强，针对具体约束类型（如时间窗口、资源）进行适配增强	中等，算法改进可能增加复杂性，需额外验证稳定性	区域覆盖增强、带复杂时空约束的实时任务规划
基于学习的算法	强化学习、神经网络	训练阶段耗时，但训练完成后在线决策速度极快	依赖训练数据与场景，对未见过的约束泛化能力有待验证	当前较低，星上部署需解决模型轻量化、在轨更新等难题	动态环境下的实时自主调度、自适应协同控制

以及集群自主导航与控制。张国云等^[17]提出的阻力差分控制方法,则为实现星座的构型保持与动态重构提供了具体技术途径,保障了协同观测所需的几何关系。此类具备自主协同能力的“智能星群”可即时响应突发观测需求,支撑多星联合成像与信息融合^[18]。但目前协同控制仍多受限于同构或简单异构星群,面向高度异构、动态可重构星座的协同感知、决策与控制体系尚不成熟。

星上轻量化智能处理虽已取得突破,但其发展仍受星载极端环境与有限资源的严格制约。模型轻量化往往伴随精度损失,且在轨面临数据分布漂移时,现有模型缺乏持续自适应学习能力。同时,星上硬件的算力、内存及抗辐照性能严重限制了复杂算法模型的部署。

可行的技术发展方向主要聚焦于:①软硬件协同设计,研发面向星上智能处理的专用芯片(如存算一体、神经拟态芯片),并设计与之匹配的超轻量、高鲁棒算法;②星地协同演进学习,建立星上模型轻量更新与地面模型增量训练相结合的机制,使星上智能具备“越用越准”的能力;③跨模态融合推理,探索多源载荷数据在轨特征级融合与联合推理,以提升复杂场景下的解译可靠性。

1.3 星地协同与资源调度优化:从静态规划到动态调度

大规模异构星座的成像机会、星上存储、数据传输链路及地面测控资源共同构成一个复杂且动态的资源池。如何高效、动态地调度这些资源,以满足多用户、多类型的任务需求,是提升星座运营效能的关键。

(1) 资源动态调度:资源调度本质上是一个具有复杂约束的动态优化问题。姜乐等^[19]提出面向遥感星座的地面测控资源调度方法,重点保障大规模卫星的跟踪、遥测与遥控能力。赵航^[20]提出基于虚拟资源池的多任务规划模型,通过将物理分散的卫星资源抽象并聚合为统一的逻辑资源池,有效屏蔽底层系统异构性,为上层任务规划提供一致的调度接口,提升了资源调度的灵活性与整体运行效率。

(2) 面向即时响应的在轨自主任务规划:为支撑灾害监测、移动目标跟踪等高时效性应用场景,任务规划需从传统依赖地面长时延规划转向在轨实时自主决策。Chen等^[21]提出面向热点区域的快速组网任务规划方法,可在短时间内重组观测资源,实现对突发事件的快速响应。文献^[18]聚焦即时响应的在轨分布式智能任务规划方法,使卫星能够依据实时观测结果与星上态势,自主调整后续观测任务序列。张斌弛^[22]进一步针对具备轨道机动能力的卫星星座开展协同任务规划研究,将任务规划

与轨道控制进行一体化联合优化。然而,现有动态调度算法在多星多任务冲突消解、不确定性处理以及人机协同决策等方面仍存在提升空间。

(3) 效能评估与柔性重构:为科学评估和预测星座的长期服务能力,需建立相应的效能评估体系。孙景云等^[23]应用Markov-ADC模型对星座覆盖性能进行量化分析,能够系统评估不同构型在指定指标下的综合效能。为解决部分卫星失效、性能衰减等问题,白保存等^[24]研究了遥感星座的效能分析与重构控制方法,通过动态调整在轨卫星的工作模式或轨道参数,可实现系统整体效能的自主恢复与维持。

现有调度方法大多基于确定性模型或假设,对系统内不确定性(如天气突变、载荷故障、任务优先级动态变化)的应对能力不足。集中式调度虽能保证全局最优,但存在单点故障风险与通信时延问题;分布式调度提高了鲁棒性,却难以保障全局效能最优。此外,任务规划、资源调度与轨道控制的多环节分离优化,导致系统整体效能存在折损。

未来可行的技术发展方向在于:①开发不确定性场景下的鲁棒与自适应调度算法,内嵌情景感知与实时重规划能力;②构建“集中—分布”混合协同调度体系,在全局监督下赋予节点自主决策权;③推动“任务—资源—轨道”一体化联合优化,利用模型预测控制等技术,实现多环节耦合决策的整体最优。

2 新兴应用范式与产业变革

上述关键技术的突破与融合,正从底层重塑遥感系统的能力边界与服务模式,直接催生了以下新型应用范式。其中,星上智能处理与动态资源调度是即时遥感应用的使能基石;通导遥一体化架构革新了信息获取与分发的路径;而顶层异构协同构型设计则为垂直行业的精细化、定制化应用提供了系统性保障。

2.1 “通导遥”一体化:从功能叠加到系统融合

当前,低轨卫星通信星座与遥感星座在系统设计上朝着一体化方向发展,推动“通信—导航—遥感”融合范式的形成,该范式通过将天基信息的获取、传输与定位服务能力深度集成,构建统一高效的空天信息网络。这一范式的实现,不仅依赖第1.1节所述的顶层异构协同构型设计,以规划通信与遥感载荷的优化配置,更直接得益于星间激光链路(动态资源调度范畴)与多功能一体化载荷(系统融合设计范畴)等底层技术的成熟。

(1) 服务模式革新:传统遥感应用受地面接收站布

局限制,数据获取常存在数小时至数天的时延。通导遥一体化系统通过星间激光链路或同平台通信载荷,能够将近实时获取的观测关键信息直接中继至用户终端或区域指挥中心。赵辰乾等^[25]提出的“通遥”融合卫星即时遥感系统架构,为应急指挥、目标持续跟踪等对时效性要求高的应用场景提供了技术支撑。

(2) 赋能广域连续监视与跟踪:王泽瑞^[26]开展的基于低轨星座的海上目标识别与连续跟踪技术研究,通过遥感星座实现对海上目标的广域搜索与识别,并借助同体系中的通信链路,将目标位置、航向等关键信息近实时分发给执法单元或指挥中心,提升了在海洋权益维护、航行安全保障等领域的全天候、广域态势感知水平。

(3) 深度融合的技术挑战

实现通导遥一体化不仅依赖系统架构融合,更需突破底层技术瓶颈。当前研究多集中于平台集成与数据链路协同,而在波形一体化设计、硬件资源复用、多功能射频前端、联合信号处理等深层技术融合方面探索不足。真正的系统融合需解决通信信号与遥感信号之间的干扰抑制、频谱资源共享、一体化载荷轻量化与高性能矛盾等难题,这也是未来技术攻关的重要方向。

2.2 即时遥感与服务响应:从数据产品到决策信息

即时遥感范式的形成,是直接驱动在轨智能处理与信息提取、资源动态调度两项技术突破的必然结果。星上轻量化智能模型实现了观测数据的在轨实时解译(感知),而分布式自主任务规划与调度算法则使得卫星集群能够基于解译结果即时重组资源、调整任务(决策与响应)。通导遥一体化架构进一步为此闭环提供了高速、直达的信息传输通道。因此,“感知—决策—响应”全链条技术的贯通,使得星座从被动数据收集平台转变为主动信息服务体系。

(1) 在轨事件触发与自主响应:通过星载智能算法实时分析观测数据,星座系统可独立完成目标信息识别。史好迎^[18]面向即时响应需求,开展了在轨分布式智能任务规划研究,使星座系统能够自主识别如林火、洪涝、溢油等突发事件,并在无地面干预条件下,动态调度多星进行协同观测与加密重访,同时优先上传预警信息,将灾害应急响应的时效从“小时级”提升至“分钟级”。

(2) 信息直达与按需服务:“云—边—端”智能服务架构的引入,为即时遥感定义了新的服务模式。该架构将数据处理与信息提取任务分布在云端、边缘(智能卫星)及用户终端之间。当前发展主要沿两条路径推进:一是建设太空数据中心,通过在轨部署集中式计算与存

储资源,构建空间信息处理枢纽;二是发展“天数天算”与“天感地算”相结合的混合模式,优化计算任务在星地之间的分配^[27-29]。相关实践已逐步展开:浙江省在空天信息产业布局中,已将太空数据中心建设列为重点方向^[28];我国“三体卫星”计划旨在构建支持在轨计算的卫星星座^[30];国际上,英伟达公司亦提出“星云卫星”等构想,推动高性能AI算力嵌入太空平台^[31]。这些进展的核心在于,用户可直接获取经系统处理后的结构化信息产品,标志着服务模式从提供原始遥感数据向提供可直接支撑决策的信息服务转变^[2]。

2.3 垂直行业深度赋能:从示范应用到业务化运行

行业业务化运行得以实现的前提,是星座能提供稳定、高频、多源的数据供给。这直接依赖于第1节所讨论的通过异构协同构型设计实现的全局覆盖与重访能力优化,以及通过星地协同与资源调度优化保障的可靠数据获取与回传计划。

(1) 自然资源与生态环境:高频次遥感数据已成为国土资源调查、矿产资源开发监管、生态修复效果评估的常态化数据源。例如,“吉林一号”星座数据已成功应用于内蒙古黄岗梁矿区的生态修复遥感监测,实现对矿区植被恢复、土地整治效果的高精度动态评估^[32]。面向生态系统生产总值核算等精细化管理需求,构建专业化的生态环境遥感监测星座或数据平台(如“GEP星座”构想)正成为重要方向^[33]。

(2) 水利与防灾减灾:遥感星座为河湖水域动态监管、水文参数反演、洪涝干旱灾害监测预警提供了稳定、宏观、快速的天基视角。文献^[34]提出构建面向水利业务的专用遥感卫星应用星座或数据服务体系,以实现重点流域、水利工程、水文情势的常态化监测,提升水资源安全保障能力。

(3) 精准农业与粮食安全:美国行星公司通过其商业遥感星座提供全球范围的高频次观测数据,已成为农业监测体系中的核心数据支撑,广泛应用于作物识别、长势动态监测与产量预测等业务环节^[35]。这为我国发展自主可控的农业遥感监测体系、提升粮食安全风险预警与决策支持能力,提供了明确的技术路径与业务范式参考。

2.4 产业生态重构与商业化浪潮

大规模异构星座的发展,降低了空间数据获取成本,推动遥感产业生态发生结构性调整,并带动商业航天领域的快速发展。

(1) 商业航天崛起:我国民营商业航天已在卫星制造、发射服务、数据运营与应用开发等领域形成多元化

市场格局^[36]。以“女娲星座”等^[37]为代表的商业遥感项目的持续推进与业务化运行,表明商业力量正逐步成为国家空间基础设施建设与运营体系中的重要组成部分。

(2) 数据产业化与价值链延伸:在数字经济背景下,遥感数据作为关键生产要素的价值日益凸显,推动产业价值重心从上游制造与发射环节向下游数据智能处理、专题信息产品开发、行业解决方案与平台服务延伸^[12]。

(3) 国际合作新模式:“金砖国家遥感卫星星座”作为一项重要的国际合作倡议,其核心机制在于推动参与国之间卫星资源的共享与协同观测能力构建,主要服务于全球气候变化监测、重大灾害应急响应等共同挑战。该项目的推进与实施,也为中国卫星数据产品与遥感应用服务的国际化推广提供了机制化、多边化的新路径^[38]。

3 挑战与展望

大规模异构遥感星座在展现出系统优势的同时,正经历从系统构建到高效应用的过渡阶段,并面临一系列源于其内在复杂性的挑战。这些问题涉及技术、管理、商业及生态等多个层面,表明其发展重点需从初期规模扩张,转向提升运营效能、智能化水平与可持续价值的新阶段。

3.1 核心挑战:系统演进中的关键瓶颈

(1) 系统复杂性的建模与管控挑战。传统基于孤立假设和静态模型的分析方法,已难以准确反映系统的整体行为。例如,在轨卫星的轨道机动、功能状态变化及星间/星地交互,可能引发级联效应,影响整个系统的性能与稳定性。目前,在系统级精确建模、实时状态诊断与自主管控等方面,仍缺乏成熟的理论与工具体系,这不仅制约了顶层设计的优化空间,也为系统长期可靠运行带来潜在风险。

(2) 异构卫星协同控制的难点。实现高分辨率光学、SAR、电子侦察等不同类型卫星之间的高效协同控制,是另一关键挑战。不同载荷在观测条件、数据产出模式及任务优先级等方面存在显著差异,统一的控制指令体系难以直接适用。此外,大规模异构星座往往由不同国家、不同机构研制的卫星组成,其数据格式、通信协议、控制接口各异,缺乏统一的互操作标准,严重制约了跨系统协同能力的发挥。建立开放、标准的星间接口与数据交换协议,是未来实现真正意义上“即插即用”异构组网的基础。

(3) 全链路信息处理效率的瓶颈。现有智能处理多局限于单星或单一任务节点,从原始数据到最终决策信

息需经历星上感知、星间协同及地面深度融合等多个环节,导致处理链路时延显著。构建“太空数据中心”被视为突破该瓶颈的关键路径,但该模式依赖卫星、轨道计算节点与地面用户间的高带宽、低时延传输,对星间链路和星地链路性能提出了更高要求,反而成为新的约束。

(4) 有限资源约束下的效能最大化挑战。星座的成像时间窗口、星上存储与能源、数据传输带宽,以及日益紧张的轨道与频谱资源均存在明确约束。在满足多用户、多类型且动态变化的任务需求的同时,实现对这些资源的高效利用成为一个典型的多目标约束优化问题。

(5) 应用生态与商业模式的成熟度挑战。目前,下游应用生态的发展相对滞后,大量数据尚未转化为可直接支撑业务决策的标准化信息产品,导致“数据过剩”与“有效信息供给不足”并存。如何降低数据使用的技术门槛,构建可持续的商业模式与开放协同平台,成为产业健康发展的关键。

(6) 异构系统互操作与标准化挑战。大规模异构星座的可持续发展还面临一个根本性的系统级瓶颈:跨平台、跨体制卫星间的互操作性缺失与标准化体系滞后。当前星座中的卫星在数据格式、测控协议、服务接口等方面往往标准不一,形成“数据孤岛”与“控制烟囱”,这不仅使得跨卫星的任务协同、数据融合与资源调度异常复杂,需要大量定制化适配,也严重阻碍了开放应用生态的形成与商业模式的创新。因此,推动建立开放、兼容的星间/星地接口标准与互操作协议,是实现卫星“即插即用”、构建弹性融合空间信息网络的基础。

3.2 未来展望:迈向智能、融合与开放的未来

面向未来,大规模异构遥感星座将朝着智能控制、自主协同、空天一体的趋势发展,为各类用户提供全要素信息产品,未来大规模异构遥感星座发展趋势如图2所示。

(1) 认知化与自主化:从智能处理到星座智能体。未来,星座系统将从当前的“观测工具”演进为具备环境感知、自主决策与协同行动能力的“认知系统”,形成以“太空数据中心”为算力基座、以“大模型智能控制中枢”为决策核心的新型架构,实现全网卫星资源动态调度,自主组织从观测、计算到信息回传的全链条优化策略。

(2) 融合化与网络化。通导遥一体化正从理论架构向系统级集成深度演进。未来的星座系统有望逐步模糊通信与遥感卫星的功能界限,形成统一的天基信息网络,实现全球范围内感知、通信与计算资源的动态按需调度。

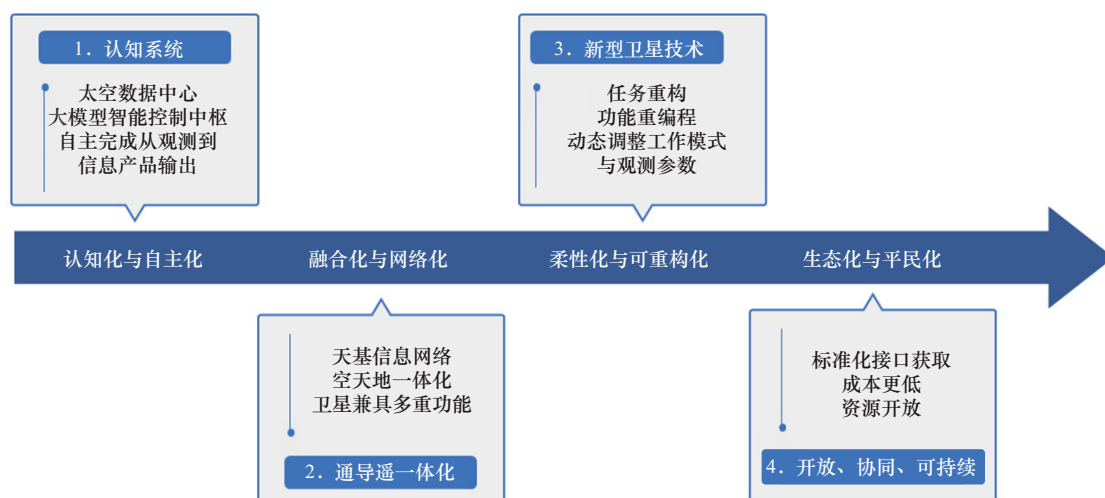


图2 未来大规模异构遥感星座发展趋势

该体系将成为构建未来空天地一体化网络的核心组成部分。

(3) 柔性化与可重构化。通过集成先进推进技术、可重构软件载荷与星上智能算法，卫星将具备在轨任务重构与功能重编程能力，使系统能够灵活响应突发、高优先级观测需求，推动星座从静态资源调度范式向动态能力按需重构范式演进。

(4) 生态化与平民化。随着技术日益成熟与成本持续优化，遥感服务的使用门槛将逐步降低，以推动形成更开放、协同、可持续的产业生态。遥感将不再仅是专业机构的工具，而会成为一项普惠性、深植于生产生活各环节的基础设施，从而全面释放其作为新一代空间基础设施的社会价值与经济潜能。

4 结束语

本文系统综述了大规模异构遥感星座在系统架构、关键技术及应用范式方面的进展，指出它在推动对地观测体系向网络化、智能化转型中的核心作用。当前大规模异构遥感星座发展仍面临系统管控复杂、资源协同困难、产业服务生态不完善等挑战。未来应重点突破智能自主规划、星地协同计算、开放弹性架构等关键技术，推动星座向认知化、融合化方向演进。期望本文能为构建下一代高效智能的遥感星座提供参考，助力我国空天信息服务体系高质量发展。

参考文献

[1] 白照广, 杨志, 朱军, 等. 大型遥感星座技术发展研究[J]. 先进小卫星技术(中英文), 2025, 2(1): 1-13.

Bai Z G, Yang Z, Zhu J, et al. Development of large-scale remote sensing constellation technology[J]. Advanced Small Satellite Technology, 2025, 2(1): 1-13.

[2] 王密, 仵倩玉, 肖晶, 等. 低轨巨型星座遥感信息“云-边-端”智能服务关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1256-1263.

Wang M, Wu Q Y, Xiao J, et al. Key technologies on “cloud-edge-end” collaborative intelligent service of low-orbit giant constellation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1256-1263.

[3] Boshuizen C, Mason J, Klupar P, et al. Results from the Planet Labs Flock Constellation[J]. 2014: 1-8.

[4] Doan D, Zimmerman R, Leung L, et al. Commissioning the world's largest satellite constellation[J]. 2017: 1-7.

[5] 王栋, 朱瑞飞, 特日根, 等. 吉林一号卫星遥感应用实践[J]. 卫星应用, 2022(7): 12-18.

Wang D, Zhu R F, Te R G, et al. Remote sensing application practices of Jilin-1 satellite[J]. Satellite Application, 2022(7): 12-18.

[6] 柯知非, 黄石生, 李玉良, 等. 低轨大型遥感星座发展现状及其关键技术[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(1): 93-101.

Ke Z F, Huang S S, Li Y L, et al. Research on the development status and key technologies of large LEO remote sensing constellations [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(1): 93-101.

[7] Mohan N, Ferguson A E, Cech H, et al. A multifaceted look at starlink performance[C]//Proceedings of the ACM Web Conference 2024. New York: ACM, 2024: 2723-2734.

[8] 康利鸿, 田菁, 江碧涛. 巨型星座时代遥感卫星应用技术挑战与思考[J]. 遥感学报, 2024, 28(7): 1658-1666.

Kang L H, Tian J, Jiang B T. Challenges and research on remote sensing satellite application technology in the giant constellation era[J]. National Remote Sensing Bulletin, 28(7): 1658-1666.

- [9] 何志谦, 康会峰, 夏广庆, 等. 基于改进小龙虾算法的区域遥感卫星星座优化[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2025, 45(5): 101-109.
- He Z Q, Kang H F, Xia G Q, et al. Optimization of regional remote sensing satellite constellation based on improved crayfish algorithm[J]. Chinese Journal of Space Science and Technology, 2025, 45(5): 101-109.
- [10] 李敬祺, 师鹏. 区域覆盖增强的低轨遥感星座优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(12): 3912-3920.
- Li J Q, Shi P. Optimal design of low earth orbit remote sensing constellations for enhanced regional coverage[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(12): 3912-3920.
- [11] Wang J H, Liu T J, Zhang C X, et al. Enhance uniform observation ability of remote sensing constellation using ground track configuration allocation[J]. Aerospace Science and Technology, 2025, 163: 110344.
- [12] 任伏虎, 李林, 董锦华. 数字经济时代的中国卫星遥感产业转型思考[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 2276-2288.
- Ren F H, Li L, Dong J H. Thoughts on the transformation of China's satellite remote sensing industry in the digital economy era[J]. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 2276-2288.
- [13] 周嘉蕾. 基于群智能优化算法的低轨遥感卫星星座优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- Zhou J L. Optimization design of low earth orbit (LEO) remote sensing satellite constellations using swarm intelligence algorithms [D]. Changchun: Jilin University, 2025.
- [14] 陈铖, 杨彬, 马文佳, 等. 一种面向嵌入式平台部署的星座遥感图像检测方法[J]. 上海航天(中英文), 2025, 42(5): 112-120.
- Chen C, Yang B, Ma W J, et al. A satellite-constellation remote sensing image detection method for embedded platform deployment[J]. Aerospace Shanghai, 2025, 42(5): 112-120.
- [15] Giuffrida G, Fanucci L, Meoni G, et al. The Φ -sat-1 mission: the first on-board deep neural network demonstrator for satellite earth observation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-14.
- [16] 刘付成, 韩飞, 韩宇, 等. 分布式协同微纳遥感星群的智能控制系统关键技术[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(4): 1-24.
- Liu F C, Han F, Han Y, et al. Key technologies of intelligent control system for distributed cooperative micro/nano remote sensing satellites [J]. Aerospace Shanghai, 2022, 39(4): 1-24.
- [17] 张国云, 龚轲杰, 何雨帆, 等. 面向微纳遥感星座构建的阻力差分控制方法[J]. 航天器工程, 2024, 33(1): 11-18.
- Zhang G Y, Gong K J, He Y F, et al. Resistance differential control method for constructing micro nano remote sensing constellations[J]. Spacecraft Engineering, 2024, 33(1): 11-18.
- [18] 史好迎. 面向即时响应的遥感星座在轨分布式智能任务规划研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2023.
- Shi H Y. Research on on-orbit distributed intelligent mission planning of remote sensing constellation for instant response [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [19] 娄乐, 柳震, 齐星, 等. 面向遥感星座的地面测控资源调度方法[J]. 电讯技术, 2024, 64(12): 2016-2023.
- Lou L, Liu Z, Qi X, et al. A ground TT&C resource scheduling method for remote sensing constellation[J]. Telecommunication Engineering, 2024, 64(12): 2016-2023.
- [20] 赵航. 基于虚拟资源池的遥感星群多任务规划模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- Zhao H. Virtual resource pooling based remote sensing constellation multi-Task planning model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [21] Chen J Y, Liu J J, Wu B L, et al. Rapid assembly mission planning of remote sensing constellations for hotspot area observation[J]. IFAC-PapersOnLine, 2025, 59(20): 1404-1409.
- [22] 张斌弛. 机动卫星星座的协同任务规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- Zhang B C. Collaborative mission planning for satellite constellations considering orbital maneuvering [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [23] 孙景云, 张国亭, 柳震, 等. 基于Markov-ADC模型的星座覆盖性能分析[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(5): 24-34.
- Sun J Y, Zhang G T, Liu Z, et al. Constellation coverage performance analysis based on Markov-ADC model [J]. Chinese Journal of Space Science and Technology, 2023, 43(5): 24-34.
- [24] 白保存, 冯孝辉. 遥感星座的效能分析与重构控制[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 10-15, 103.
- Bai B C, Feng X H. Efficiency analysis and reconfiguration control of remote sensing constellation [J]. Computer Simulation, 2022, 39(8): 10-15, 103.
- [25] 赵辰乾, 闫瑞东, 赵贇, 等. 基于通遥融合的卫星即时遥感系统架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2025, 6(2): 27-37.
- Zhao C Q, Yan R D, Zhao Y, et al. Research on architecture of real-time satellite remote sensing system based on communication and remote sensing integration [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2025, 6(2): 27-37.
- [26] 王泽瑞. 基于低轨星座的海上目标识别与连续跟踪技术[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2023.
- Wang Z R. Marine target recognition and continuous tracking technology based on LEO constellation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [27] Kua J, Loke S W, Arora C, et al. Internet of Things in space: a re-

- view of opportunities and challenges from satellite-aided computing to digitally-enhanced space living[J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 8117.
- [28] 秦泉. 全球算力竞赛转向太空中国先声夺人[N]. 中国经营报, 2025-11-17(C01).
- Qin X. Global computing power race shifts to space: China takes the lead[N]. *China Business Journal*, 2025-11-17(C01).
- [29] 李乔宇, 冯雨瑶. “太空计算时代”启幕产业链竞逐算力“上天”[N]. 证券日报, 2025-06-12(A01).
- Li Q Y, Feng Y Y. “Space Computing Era” kicks off as industrial chain competes to launch computing power into space[N]. *Securities Daily*, 2025-06-12(A01).
- [30] 谭伦. 开启AI太空征途我国“三体计算星座”进入组网阶段[N]. 中国经营报, 2025-05-26(C01).
- Tan L. AI’s journey into space begins: China’s “three-body computing constellation” enters networking phase[N]. *China Business Journal*, 2025-05-26(C01).
- [31] 宋子晖. 国外航天前沿技术最新进展[J]. 国际太空, 2025(9): 31-38.
- Song Z H. Latest developments in foreign aerospace frontier technologies[J]. *Space International*, 2025(9): 31-38.
- [32] 赵宇恒, 王春月, 刘思言, 等. 吉林一号星座数据在内蒙古黄岗梁矿区生态修复遥感监测中的应用[J]. 卫星应用, 2023(7): 47-52.
- Zhao Y H, Wang C Y, Liu S Y, et al. Application of Jilin-1 constellation data in remote sensing monitoring of ecological restoration in Huanggangliang mining area, Inner Mongolia[J]. *Satellite Application*, 2023(7): 47-52.
- [33] 李莉, 徐崇斌, 孙晓敏. “GEP星座”助力绿水青山——解码生态环境遥感资源平台[J]. 卫星应用, 2023(7): 30-31.
- Li L, Xu C B, Sun X M. “GEP Constellation” assisting green mountains and clear waters: decoding the eco-environmental remote sensing resource platform[J]. *Satellite Application*, 2023(7): 30-31.
- [34] 钱峰, 付静, 陈德清, 等. 水利遥感卫星应用星座构建与应用研究[J]. 中国水利, 2025(1): 15-20.
- Qian F, Fu J, Chen D Q, et al. Construction and application research of water resources remote sensing satellite constellation [J]. *China Water Resources*, 2025 (1): 15-20.
- [35] 苏浩, 张冬梅, 沈璐, 等. 美国行星公司的商业遥感卫星星座在农业监测中的应用[J]. 卫星应用, 2023(12): 53-58.
- Su H, Zhang D M, Shen L, et al. Application of the commercial remote sensing satellite constellation of Planet Labs in agricultural monitoring[J]. *Satellite Application*, 2023 (12): 53-58.
- [36] 何善宝. 民营商业航天: 多点开花, 期待升级[J]. 太空探索, 2024 (2): 12-19.
- He S B. Private commercial space industry: multiple areas flourishing, upgrades anticipated[J]. *Space Exploration*, 2024(2): 12-19.
- [37] 陈飏. 女娲星座[J]. 卫星应用, 2023(5): 66.
- Chen B. Nüwa constellation[J]. *Satellite Application*, 2023(5): 66.
- [38] 赵坚, 王凤宇, 孙霖, 等. 金砖国家遥感卫星星座建设与展望[J]. 卫星应用, 2022(11): 14-16.
- Zhao J, Wang F Y, Sun L, et al. Construction and prospect of the BRICS remote sensing satellite constellation[J]. *Satellite Application*, 2022(11): 14-16.

[作者简介]



蔺骁龙 (1989-), 男, 中国人民解放军军事航天部队航天工程大学硕士生, 主要研究方向为大规模异构遥感星座任务规划。



张学阳 (1988-), 男, 中国人民解放军军事航天部队航天工程大学副教授, 主要研究方向为大规模星座任务规划与遥感应用。



王训 (1989-), 男, 中国人民解放军军事航天部队航天工程大学副教授, 主要研究方向为智能航天器系统与运用、航天器动力学与控制等。



马聪慧 (1987-), 女, 中国人民解放军军事航天部队航天工程大学讲师, 主要研究方向为SAR影像目标检测识别。