中国科学:信息科学 2026 年 第 56 卷 第 10 期: 2551–2590
SCIENTIA SINICA Informationis
面向 6G 的通感算可重构无线网络专题 • 评述

可重构星群通感算: 概念框架、关键技术与典型应用

郑子元[1], 武庆庆[1*], 胡海鹰[2], 陈文[1], 林欣[3], 景文鹏[4]

1. 上海交通大学信息与电子工程学院, 上海 200240
2. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203
3. 上海卫星工程研究所, 上海 201109
4. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876

* 通信作者. E-mail: qingqingwu@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2026–04–30; 修回日期: 2026–08–06; 接受日期: 2026–09–04; 网络出版日期: 2026–10–10

国家自然科学基金 (批准号: 62371289, 62331022, 62531015, U25A20399, 624B2094)、北京市自然科学基金 (批准号: L254062, L242011)、上海市青年科技启明星计划 (批准号: 23QA1408800) 和中国科协青年人才托举工程 (批准号: YESS20230186) 资助项目

摘要 面向下一代低轨卫星通信、分布式对地观测和在轨智能任务, 卫星系统正由预设构型和固定分工向任务驱动的多星协同演进. 围绕这一趋势, 本文综述可重构星群通感算的概念框架、技术基础、典型应用与研究方法. 首先, 本文界定可重构星群与固定星座、编队飞行、分离模块航天器、软件定义卫星和可重构天线等相邻概念的边界, 将可直接调整的系统对象归纳为构型、链路、功能和资源四个相互耦合的重构维度, 并建立由状态感知、网络组织、任务执行和重构决策构成的四层运行架构. 其次, 本文从任务窗口出发, 给出基于预先声明且充分调优的可比基线、分项预算、硬约束、风险边界和任务级结果的重构净收益判据, 并总结任务驱动的构型选择与控制、跨星同步与协同标定、星间动态互联与任务感知路由、多时间尺度资源调配, 以及可编程载荷与星群任务运行机制. 然后, 面向通信, 梳理分级多星协同传输与分布式多输入多输出、手机直连与海量随机接入、区域热点增强与干扰管理、星间骨干路由与网关协同回传; 面向感知, 讨论低轨机会信号定位与导航增强、电磁辐射源定位、分布式合成孔径雷达与多基线观测、事件驱动敏捷观测和多星接续跟踪; 面向计算, 分析在轨预处理、事件筛选与任务导向信息压缩、协同推理与分布式模型更新, 以及任务放置、状态迁移与负载均衡. 最后, 本文按照模型、基线、指标、证据归纳各类问题的必要建模要素、对照方案、任务级指标和关键验证问题, 说明多星协同增益可能受到同步标定、链路建立、状态迁移、能源热控和安全风险等代价的限制. 本文旨在为判断何时需要重构、应调整何种系统对象, 以及如何以可复现证据验证其任务收益边界提供系统参考.

关键词 可重构星群, 多星协同, 分布式卫星系统, 星群通信, 星群感知, 卫星计算, 在轨处理, 通感算协同

1 引言

1.1 从固定星座到任务驱动可重构星群

低地球轨道 (low Earth orbit, LEO) 巨型星座与分布式卫星信息网络[1,2]、星地融合移动通信与非地面网络 (non-terrestrial network, NTN)[3,4]、敏捷对地观测与多星协同任务规划[5~7]、在轨人工智能与轨道边缘计算[8,9]

引用格式: 郑子元, 武庆庆, 胡海鹰, 等. 可重构星群通感算: 概念框架、关键技术与典型应用. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 2551–2590, doi: 10.1360/SSI-2026-0203
Zheng Z Y, Wu Q Q, Hu H Y, et al. Reconfigurable satellite swarms for communication, sensing, and computing: concepts, key technologies, and applications. Sci Sin Inform, 2026, 56: 2551–2590, doi: 10.1360/SSI-2026-0203

© 2026《中国科学》杂志社

正在共同改变卫星系统的基本形态. 传统卫星体系通常围绕 “轨道预设、功能封装、单星执行、地面主导” 展开设计: 星座构型在发射前基本确定, 星间关系主要由轨道运动被动产生, 星上载荷完成采集或转发, 复杂处理、任务重规划和系统级优化主要依赖地面完成. 这一范式在广播通信、周期遥感、导航增强和传统空间任务中已经形成成熟体系. 然而, 面向非地面网络和手机直连 [3,10]、卫星物联网 (Internet of Things, IoT) [11]、灾害应急与海事监视 [6,7]、空间态势感知 [12]、在轨智能处理与低时延闭环控制 [13,14] 等新任务时, 固定拓扑和静态分工正在暴露出明显局限. 这种局限首先来自任务时空分布的高度动态性. 通信业务可能在局部热点、海上远域、极区航线或灾害区域突然聚集, 服务星簇、波束跳变和多网关接续等研究已体现这种动态需求 [15~17]; 感知任务可能需要在短时间内完成异常发现、接续观测、多模态确认和有效信息回传 [6,7,18]; 计算任务则可能要求在数据产生位置附近完成筛选、压缩、推理、融合和反馈 [8,14,19]. 若仍将轨道构型、链路关系和节点角色视为不可调背景, 系统只能在给定条件下调度波束、频谱、功率、存储和计算资源, 难以在任务窗口内形成与需求匹配的服务能力 [20~22]. 未来天基系统需要能够围绕任务目标动态组织多星几何、星间链路、功能角色和多域资源的分布式系统能力 [2,23,24].

由此, 可重构星群成为连接分布式卫星系统、卫星通信、协同遥感、轨道边缘计算和天基智能的重要概念 [1,25~28]. 本文将可重构星群概念上表述为由多个具备通信、感知、计算或控制能力的卫星节点构成, 在轨道动力学、空间安全、链路可见性、能源热控和资源约束下, 能够围绕任务目标对相对几何、协作链路、功能角色和多域资源中的一个或多个对象进行动态调整, 并通过星间协同获得可验证任务收益的分布式天基信息系统. 与固定星座相比, 可重构星群不再只关注长期覆盖和平均容量, 而是关注任务窗口内的结构组织能力 [1,2,29]; 与传统编队飞行相比, 它不只追求队形保持和碰撞规避, 而是将几何构型作为影响通信、感知和计算性能边界的任务资源 [23,30~32]; 与软件定义卫星或再生载荷相比, 它强调单节点可编程能力如何上升为跨星协作关系、任务执行与重构决策能力 [19,33,34]. 本文所称感知、通信与计算协同 (integrated sensing, communication, and computing, ISCC) 主要发生在星群层面: 通信提供控制、同步、观测和模型等信息流的可达性, 感知产生环境与系统状态, 计算完成筛选、融合、推理和决策支持. 三者可以共享任务窗口、节点角色和多域资源, 但不以同一波形、同一频段或同一载荷实现物理层融合为必要条件. 在狭义物理层通感一体化中, 导频、训练时长和传输波束可以联合设计, 以协调信道估计、目标检测和通信传输性能 [35]; 本文关注的则是更高层的星群任务链与结构协同. 因此, 本文讨论的 “通感算” 不等同于狭义的波形级通感一体化或通感算一体化, 后者是可选实现机制而非概念成立的前提 [25,26]. 具体而言, 构型重构改变真实相对位置、观测基线和物理相位中心 [31,32,36]; 链路重构改变服务节点连接、星间与星地链路、路由图和网关接续 [2,17,37]; 功能重构改变节点在观测、中继、接入、计算、聚合、控制和备份中的角色 [21,33,34]; 资源重构则在频谱、功率、波束、时隙、缓存、计算资源、模型副本、能源、热余量和机动预算之间进行跨节点调配 [16,21,22]. 四个维度共同塑造星群由多星并存走向任务驱动协同的能力边界 [24~26].

从通信角度看, 低轨卫星高速运动导致星地距离、仰角、多普勒、波束驻留时间和链路可见窗口不断变化 [4,38~40], 星间链路和网关关系也随轨道演化而动态改变 [2,37,41]. 可重构星群通信的研究对象因此不再是给定星座上的单纯资源分配, 而是面向用户、区域或任务形成服务星簇 [15], 协同孔径和分布式阵列 [10,31,42,43], 干扰图和波束资源关系 [16,44,45], 路由图和端到端服务链 [46~48] 的组织问题. 然而, 多星协同传输和分布式多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) [31,49~51]、手机直连增强 [10,52,53]、星物联网随机接入 [11,38,54]、热点区域容量提升 [16,55,56]、光星间链路路由 [41,57] 和多网关接续 [17], 都依赖几何、链路、同步、信道状态信息 (channel state information, CSI)、载荷能力和控制开销之间的平衡.

从感知角度看, 天基观测的性能上限高度依赖观测几何 [32,58,59]. 分布式合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 和多基线测绘受到编队基线、相位同步和干涉误差传播的约束 [32,58,60]; LEO 机会信号定位和星基导航增强依赖卫星几何、信号可用性和多星联合观测 [61~63]; 电磁辐射源定位和弱信号探测需要分布式孔径与多星联合检测能力 [64,65]; 多目标跟踪、多模态遥感和空间态势感知则受到视线夹角、重访序列、数据关联和多源融合质量的影响 [12,18,66]. 在固定星座中, 几何条件通常被视为任务调度的约束; 在可重构星群中, 星群几何进入观测过程并直接影响可辨识性, 因此构成感知系统设计的一部分 [67~69]. 系统可以围绕高价值区域或目标形

成临时观测簇, 通过多视角、多基线、多模态和接续观测提高信息增益、可辨识性和信息时效 [6,7,70].

从计算角度看, 卫星计算、轨道边缘计算、空间计算和在轨处理正在推动卫星系统由 “采集 – 转发 – 地面处理” 转向 “采集 – 筛选 – 分析 – 反馈” 的分布式任务链 [8,13,14,71]. 在可重构星群中, 计算能力的价值不仅取决于处理器性能, 还受到数据产生位置、观测几何、星间链路、回传窗口、能源热控和任务运行状态的共同影响 [19,22,34]. 任务卸载和计算资源分配需要同时考虑星间链路、星地回传和节点移动性 [72~74]; 在轨预处理和任务导向信息压缩需要兼顾任务信息价值与传输开销 [14,75,76]; 协同推理和模型切分依赖中间特征、模型状态和链路窗口的联合调度 [77~79]; 联邦学习需要在星间或星地之间进行模型参数、梯度或权重更新 [80~82]; 服务迁移和星群任务运行机制则要求任务依赖、数据路径、链路窗口、节点资源和必要软件状态能够协调维护 [21,34,83].

1.2　本文定位、贡献与组织

可重构星群并非由单一技术分支线性演化而来, 而是形成于四条研究谱系的交汇. 第一, 编队飞行与分布式航天器研究建立了相对运动建模、构型保持、重构控制、授时同步与安全控制基础 [23,30,84]; 分离式模块化航天器、联邦卫星系统和卫星集群进一步将功能分布、模块化协同与系统韧性纳入多星体系设计 [27,28,85], NetSat 等任务则为小规模多星编队的自主运行提供了在轨证据 [86]. 第二, 分布式卫星信息网络、非地面网络和可编程再生载荷研究将星间互联、接入、路由与载荷内处理纳入网络化设计 [1,3,33]; 多星 MIMO、卫星群阵列和无小区非地面网络进一步表明, 通信协作的潜在增益同时受几何信道、同步精度、信道状态信息和星间信息交换能力约束 [10,50,56]. 第三, TanDEM-X 等编队干涉测量任务表明, 受控基线会影响干涉相干性、测量精度与遥感产品质量 [58]; 机会信号定位、多星观测调度和 D-SHIELD 等研究则将几何选择拓展至定位增强、事件响应和跨窗口观测链组织 [5,6,61]. 第四, 在轨人工智能和轨道边缘计算研究逐步由单星预处理扩展至任务放置、跨节点处理、模型更新和服务状态维护 [8,19,21], OPS-SAT 与 PhiSat-2 等任务为星载图像分类和在轨人工智能应用提供了单星任务证据 [87,88].

需要指出的是, 上述四条路径描述的是可重构星群的知识来源, 并不与构型、链路、功能和资源四类重构维度机械地一一对应. 例如, 协同遥感同时依赖观测构型、信息链路、节点分工和处理资源, 轨道边缘计算也受到星间连接、服务角色和任务状态迁移的共同约束. 现有研究虽然分别回答了卫星如何改变相对关系、如何建立协作网络、如何组织多星观测以及如何在轨处理信息, 却通常将其余系统状态视为外生条件, 尚未形成对星群 “可重构性” 的统一刻画. 因而, 当前的关键缺口并非缺少某一项孤立技术, 而是缺少能够贯通可控结构、任务结果与实施代价的系统化框架. 该框架至少需要回答三个相互关联的问题: 星群中哪些结构状态能够被观测、控制并作为重构对象; 在何种任务窗口、约束条件和比较基线下, 重构相较于保持原结构具有可验证的任务收益; 在计入轨道机动、同步标定、链路建立、状态迁移、能源热控和安全风险后, 通信、感知与计算增益能否仍然转化为可交付的任务级结果. 表 1 总结了部分已有综述与本文的对比, 其中 “强” 表示该维度是代表性研究的核心决策对象, “中” 表示其通常作为显式变量或约束出现, “弱” 表示其主要构成背景条件. 这一标注用于说明不同研究视角覆盖的重构对象, 不是对相关领域成熟度或研究质量的评价.

基于上述认识, 本文定位为问题牵引的框架型综述, 目标是在已有编队控制 [23,30]、分布式卫星信息网络 [1]、卫星通信与非地面网络 [3,50]、协同遥感与多星观测 [6,18,58]、轨道边缘计算和在轨智能 [8,13,19] 等研究基础上, 回答可重构星群的三个基本问题: 星群中哪些结构能够被直接重构, 重构如何改变通信、感知和计算任务的性能边界, 以及任务收益如何覆盖相应代价. 围绕这一目标, 本文建立面向可重构星群通感算的概念框架、共性技术基础和典型任务体系, 全文组织结构如图 1 所示, 主要贡献如下.

第一, 建立可重构星群的概念框架. 本文从分布式天基信息系统角度界定可重构星群, 明确其与固定星座、编队飞行、分离模块航天器、软件定义卫星、再生载荷以及移动/流体天线等相邻概念之间的联系与差异; 进一步提出构型、链路、功能和资源四个相互耦合的重构维度, 阐明其从几何可行域、网络可达域、任务执行域到资源调度域的作用链条, 并给出从固定星座、资源可调、链路 – 功能可调、局部构型可调到闭环自治可重构的能力分级. 与此同时, 本文从状态感知、网络组织、任务执行和重构决策四个层次刻画运行架构, 使横向重构维度与纵向系统功能形成统一描述, 并进一步讨论指标体系、任务价值和重构净收益判据.

表 1　已有综述视角与本文增量的对比.

Table 1　Comparison of existing survey perspectives and the incremental contribution of this survey.

Survey perspective	Representative topics	Primary focus	Formation reconfiguration	Link reconfiguration	Function/ resource reconfiguration	Incremental contribution of this survey
Formation flying and distributed spacecraft	Formation flying; distributed satellite systems	Relative motion, formation keeping, and safety control	Strong	Weak	Weak	Elevates geometric configuration to a shared task resource for communications, sensing, and computing [23, 30, 84].
Satellite Internet and non-terrestrial networks	LEO/NTN; inter-satellite links; regenerative payloads	Access, routing, beams, gateways, and resource management	Weak	Strong	Moderate	Emphasizes joint reconfiguration of service satellite clusters, link graphs, and end-to-end task flows [1, 3, 33].
Collaborative remote sensing and multi-satellite observation	Multi-satellite Earth observation; agile observation	Observation scheduling, multisource fusion, and task planning	Moderate	Moderate	Weak	Incorporates observation geometry, information freshness, and result validation into a unified criterion [5, 6, 18].
Orbital edge computing and onboard intelligence	Orbital edge computing; onboard AI	Offloading, service deployment, federated learning, and onboard processing	Weak	Moderate	Strong	Incorporates data value, link windows, task states, and model-version consistency into satellite-swarm reconfiguration [8, 13, 19].
Communication-sensing-computing coordination	ISCC; satellite communication-sensing-computing coordination	Functional coordination, task organization, and resource coupling	Weak	Moderate	Moderate	Defines swarm-level reconfiguration through four coupled dimensions: formation, link, function, and resource [22, 25, 26].

第二, 凝练可重构星群的共性技术基础. 面向通信、感知和计算三类任务, 本文将任务驱动的构型选择与控制、跨星同步与协同标定、星间动态互联与任务感知路由、多时间尺度资源调配、可编程载荷与星群任务运行机制抽象为共同支撑能力. 构型控制影响几何自由度, 星间互联塑造信息流路径, 同步标定约束协同增益的可实现程度, 多时间尺度资源调配影响重构动作能否稳定执行, 任务运行机制则支持节点角色、任务状态和软件功能在星群范围内协调、迁移和异常恢复. 这些共性基础为后续通信、感知和计算章节提供统一支撑, 避免将可重构星群简化为单一物理层、网络层或任务调度问题.

第三, 系统讨论可重构星群通信. 本文从几何传播、协同孔径、服务星簇、干扰图、链路拓扑和功能运行时等角度, 阐明星群重构如何改变链路预算、多普勒结构、可见窗口、空间自由度、用户中心覆盖、区域热点容量、频谱复用和端到端服务连续性; 进一步梳理分级多星协同传输与分布式 MIMO、手机直连与海量随机接入、区域热点增强与干扰管理、星间骨干与任务感知路由等四类典型任务. 本文强调, 多星协作的核心并非扩大协作规模, 而是在任务窗口内选择合适协作等级、局部服务簇和服务链路, 使协同增益能够覆盖 CSI 获取、跨星同步、星间传输、控制信令、载荷处理和能源热控等开销.

第四, 系统讨论可重构星群感知. 本文从观测几何塑形、多视角多基线多模态互补、重访序列与接续观测、数据关联与信息处理链重构等方面, 揭示星群重构如何提升天基感知任务的可辨识性、信息增益、信息新鲜度和应用级价值; 进一步讨论 LEO 机会信号定位、导航增强与电磁辐射源定位, 分布式 SAR 与多基线几何测绘, 事件驱动敏捷观测与目标持续跟踪等三类典型应用. 本文强调, 星群感知不应只评价单次观测分辨率或检测精度, 还应关注观测基线、几何精度因子、重访间隔、告警时效、轨迹不确定度、数据关联正确性, 以及感知信息

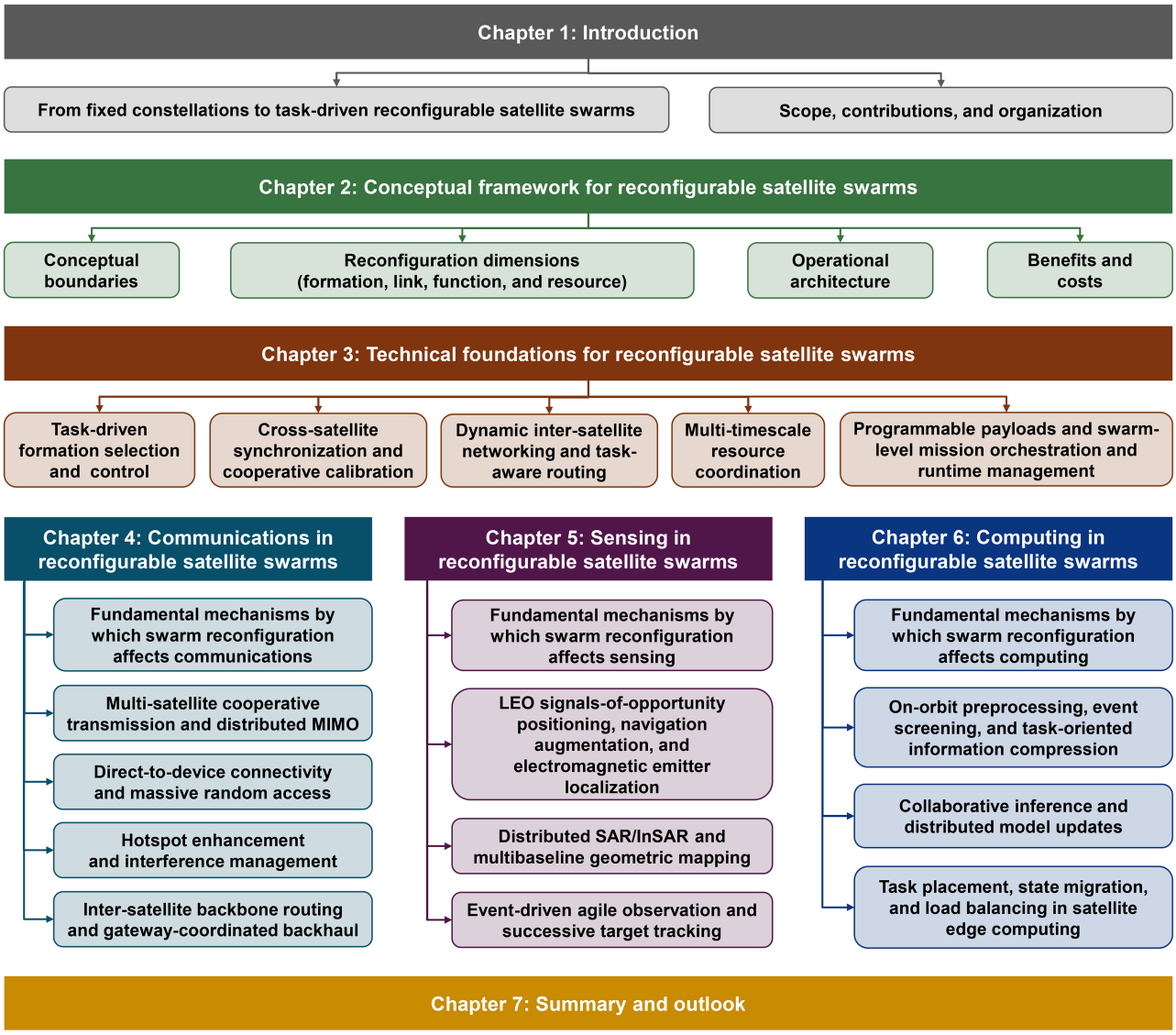


图 1　(网络版彩图) 本文的组织架构.

Figure 1　(Color online) Organization of this survey.

有效性、形变场、定位结果和态势告警等最终任务结果质量.

第五, 系统讨论可重构星群计算. 本文从数据价值与任务入口、通信图与数据路径、分布式计算资源与功能角色、任务状态与迁移等方面, 揭示星群重构如何影响在轨计算的输入价值、任务可达性、执行组织方式和收益边界; 进一步梳理在轨预处理、事件筛选与任务导向信息压缩, 协同推理、分布式训练与模型更新, 卫星边缘计算、任务迁移与星间负载均衡等三类典型任务. 本文指出, 星群计算的关键是围绕数据位置依赖、链路窗口、任务时限、能源热控和状态演化选择适合在轨处理的工作负载, 并建立支持模型部署、状态复制、轻量任务执行、异步聚合、故障降级和安全恢复的运行机制.

本文余下部分组织如下: 第 2 节给出可重构星群的概念框架; 第 3 节总结可重构星群的共性技术基础; 第 4~6 节分别讨论可重构星群通信、感知和计算; 第 7 节总结全文并展望未来发展方向.

2　可重构星群的概念框架

可重构星群的核心特征在于将多星几何构型、星间关系、节点角色和多域资源从任务执行的外部条件转化

为能够动态调整并承担代价约束的系统状态. 本节从概念边界、重构维度、运行架构和指标判据四个方面建立可重构星群的概念框架.

2.1　可重构星群的概念边界

分布式卫星系统通常指由多个航天器通过协作完成任务的系统形态, 涵盖编队飞行、分离模块航天器、分布式遥感、分布式通信平台和分布式卫星信息网络等方向 [1,23,28,30,85]. 在此基础上, 进一步聚焦于 “群体可协同” 和 “结构可调整” 两项特征, 本文将可重构星群定义为: **由多个具备通信、感知、计算或控制能力的卫星节点构成, 在轨道动力学、空间安全、链路可见性和资源约束下, 能够围绕任务目标对相对几何、协作链路、功能角色和多域资源中的一个或多个对象进行动态调整, 并通过星间协同获得可验证任务收益的分布式天基信息系统.**

该定义包含三个必要要素. 其一, 系统具有任务牵引的多节点协同行为, 协同过程伴随授时同步、相位校准、星间链路建立、信息关联、状态迁移和任务接力等代价 [21,58,84,89]. 其二, 构型、链路、功能和资源中至少有一类对象能够被直接调整, 并需说明该动作对其他维度的耦合影响; 仅具备波束、频谱或单星载荷模式调节能力的系统可视为资源可调的过渡形态, 但不能据此宣称已具备几何或网络结构重构能力 [20,22,33,34]. 其三, 调整动作能够引起通信、感知或计算任务结果的可测变化, 并可与相同任务窗口和约束下的可比策略进行验证 [13,31,42,58]. 由此, 普通巨型星座若主要研究固定结构下的接入、路由和资源分配, 更适合纳入卫星互联网或非地面网络框架 [1~3]; 单星在轨智能、单星遥感压缩和单星再生载荷若缺少多节点任务协同, 也不构成本文意义上的核心星群问题 [9,88,90].

表 2 概括了可重构星群与相邻概念的联系和边界. 编队飞行提供相对轨道保持、构型控制和碰撞规避基础, 重点在于几何可维持性与安全控制 [23,30,89]; 相关制导与控制综述系统梳理了相对运动、队形建立和保持问题 [91,92]. 可重构星群进一步关注几何如何参与任务收益塑造 [31,42,58,68]. 分离模块航天器、联邦卫星系统和卫星集群强调功能分布、模块化和系统弹性, 是星群可重构的重要前置形态 [27,28,85]. 软件定义卫星、再生载荷和在轨计算平台增强单节点可编程能力, 为功能重构和资源重构提供支撑, 但节点内部灵活性需通过星间任务组织上升为星群级能力 [19,33,34]. 地面可移动天线、流体天线和可重构天线通过局部电磁空间采样点调节获取传播自由度 [93~95]; 可重构星群则在千米至轨道尺度上调节节点间几何、协作拓扑和任务角色 [31,42,43]. 二者均体现 “空间位置是资源” 思想, 但重构对象、作用尺度、约束机制和信息结构不同.

2.2　可重构星群的重构维度

如图 2 所示, 本文将构型、链路、功能和资源定义为四个相互耦合的重构维度, 而非彼此独立或正交的决策变量. 构型重构回答节点 “位于何处、以何种几何关系协同”; 链路重构回答星间和星地链路 “如何连接、何时连接、以何种质量连接”; 功能重构回答单星或多星 “在当前任务链中承担何种角色”; 资源重构回答频谱、功率、波束、计算、缓存、能源和模型副本 “如何跨节点配置”. 四个维度共同构成由几何可行域、网络可达域、任务执行域和资源调度域组成的星群结构空间 [24~26].

构型重构作用于卫星节点相对位置、相对速度、相位中心分布、编队形态和跨轨道协同关系, 是最具星群特征的重构层 [23,30,31,89]. 其影响同时体现在通信、感知和计算三类任务中: 通信侧表现为协同孔径、信道相关性、传播距离、多普勒结构和链路保持时间变化 [10,31,42,50]; 感知侧表现为观测基线、视角多样性、几何精度因子、重访序列和相位中心稳定性变化 [32,58,60,61]; 计算侧表现为数据汇聚路径、临时计算簇和服务迁移可行域变化 [13,19,24,96]. 从研究脉络看, 构型重构经历了从 “保持性编队” 到 “任务化编队”、再到 “区域性重构” 和 “服务性重构” 的转变. 前者强调相对运动建模、燃料优化和碰撞规避, 后者则进一步把几何作为观测、通信、回传和在轨处理的共同上游变量 [23,30,67,68]. 构型重构的技术链包括高精度相对状态测量、受约束机动规划、编队安全控制、任务驱动滚动重规划, 以及与链路、载荷和运行时系统的联动 [58,84,89,97].

链路重构作用于星间链路、星地链路、馈电链路、网关接续和跨轨中继关系, 影响这些链路元素的建立、释放、保持与优先级调整, 核心是将网络关系从轨道运动的被动结果转化为任务需求驱动的可调对象 [2,37,47]. 链路图不仅承载用户比特流, 也承载同步信息、信道状态信息、观测特征、中间结果、模型参数和控制指令, 故而同

表 2　可重构星群与相邻概念的关联.

Table 2　Relationships between reconfigurable satellite swarms and related concepts.

Concept	Primary focus	Relationship to reconfigurable satellite swarms	Incremental research focus
Fixed constellations	Coverage, access, routing, spectrum, and power scheduling	Provide the networking foundation but do not necessarily possess swarm-level reconfiguration capabilities.	Whether geometry, topology, and functions are incorporated into task decision-making.
Formation flying	Relative-orbit keeping, formation control, and collision avoidance	Provides the dynamics and control foundation for formation reconfiguration.	Whether the system advances from formation keeping to task-driven reorganization.
Fractionated spacecraft and satellite clusters	Functional distribution, system resilience, and collective cooperation	Provide the basic system form of distributed satellite systems.	Whether formation, link, function, and resource reconfiguration mechanisms are available.
Software-defined satellites and regenerative payloads	Programmable payloads on individual satellites, onboard processing, and flexible beams	Support function and resource reconfiguration.	Whether single-node flexibility is elevated to multi-node orchestration.
Movable, fluid, and reconfigurable antennas	Adjustable local electromagnetic spatial sampling points	Provide inspiration for the concept of position as a resource.	Local array reconfiguration cannot be equated with orbital-scale network reconfiguration.
Reconfigurable satellite swarms	Task-driven dynamic organization of geometric formation, link topology, functional roles, and multidomain resources	Core subject of this survey.	–

时影响传输的吞吐量和时效性 [76,98,99]. 链路重构的关键技术包括高可靠射频/激光星间链路及指向捕获跟踪、时变图预测路由、任务感知路径规划、链路优先级控制、主动容错和软件定义控制面 [46,57,100]. 链路重构的任务价值取决于端到端服务连续性和信息时效性, 而不仅是物理连边数量 [47,99,101].

功能重构关注星群节点角色和任务分工的动态变化. 具备多种载荷或多种软件模块只说明功能集合丰富; 当节点能够在任务执行过程中从观测节点转为中继、计算、聚合、主控或备用节点, 并完成必要状态、权限和资源配置的同步调整时, 才构成功能重构 [13,21,34]. 其实现基础包括再生载荷、软件定义载荷、在轨人工智能 (artificial intelligence, AI)、轻量任务运行机制和可信软件更新机制; 星群操作系统可以是上述任务运行机制的一种实现形式, 但并非功能重构成立的前提 [33,34,83]. 关键指标包括角色迁移时延、任务实例初始化代价、状态一致性、版本一致性和故障恢复成功率, 可进一步区分为静态多功能、预设角色轮换和任务驱动角色重分配三个层级 [19,21,83].

资源重构作用于频谱、功率、波束、时隙、缓存、算力、模型副本、能源、热余量和机动预算等可分配量 [20~22,33]; 服务状态属于运行状态, 安全裕度属于约束边界, 不再重复列为资源. 资源配置同时受到构型、链路和功能关系约束. 例如, 通信热点增强不仅需要波束和功率, 还需要服务节点选择、回传路径和同步控制 [16,17,49,55]; 多星干涉合成孔径雷达 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 不仅需要观测时隙, 还需要基线保持、相位同步、在轨预处理和下传优先级 [32,58,60]; 协同推理不仅需要算力, 还需要模型切分、中间特征传输、缓存和热控预算 [21,76,78]. 因此, 资源重构是在既定结构关系下形成可执行任务配置的必要环节, 而不是凌驾于其他维度之上的 “集成层” [22,24,48].

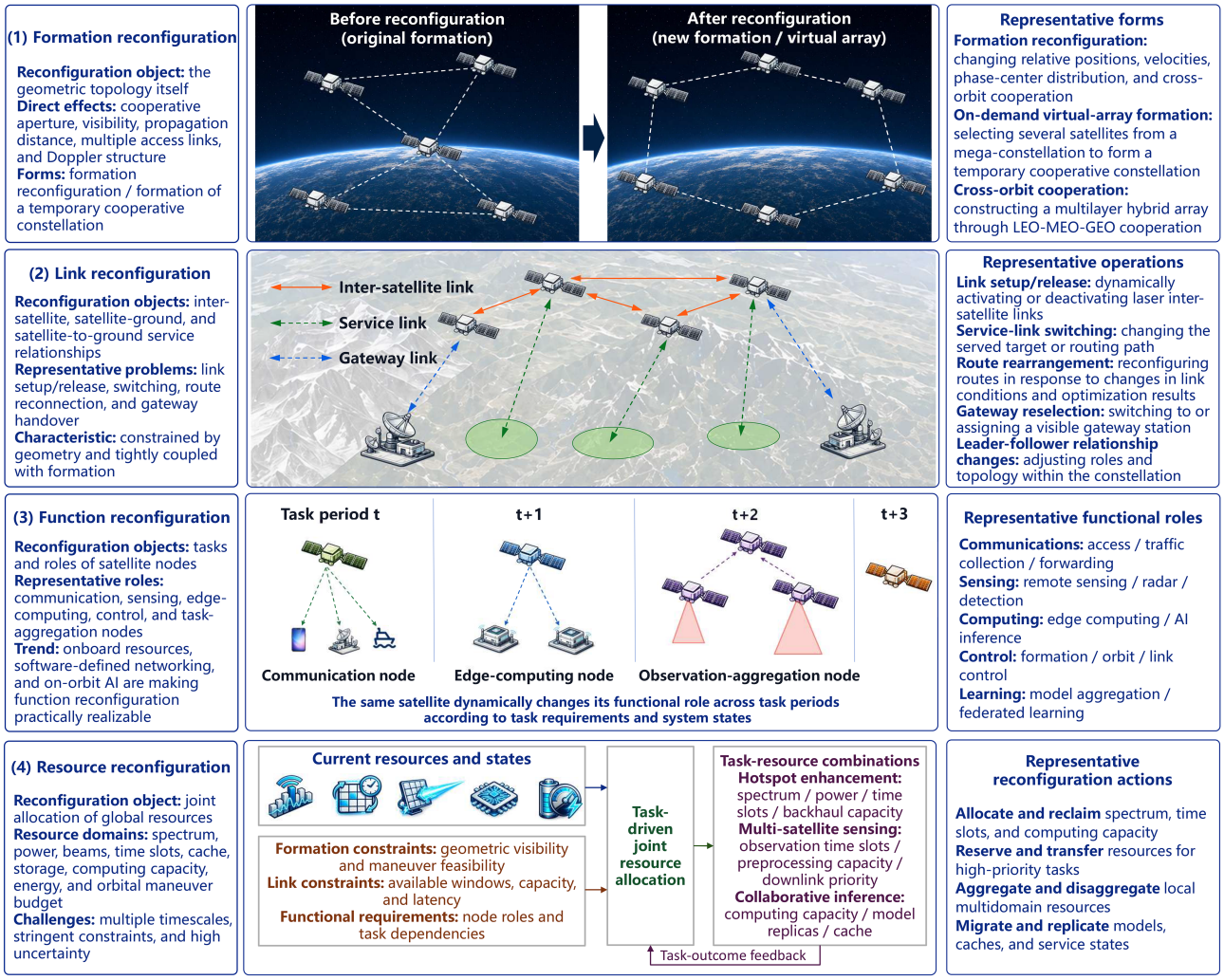


图 2　(网络版彩图) 可重构星群的四个耦合重构维度.

Figure 2　(Color online) Four coupled reconfiguration dimensions of satellite swarms.

四个重构维度相互耦合. 为避免重复归类, 本文按动作的直接控制对象确定其主导维度: 改变相对轨道、观测基线或物理相位中心属于构型重构; 建立、释放链路或调整连接优先级属于链路重构; 改变节点在任务链中的职责属于功能重构; 调整频谱、功率、波束、时隙、缓存、计算和能源配置属于资源重构. 构型影响链路可见性、传播条件和观测几何, 链路塑造信息与控制关系, 功能规定节点分工, 资源配置则支撑任务执行. 某一动作引起的其他变化仅作为跨维耦合影响. 例如, 轨道机动虽然会改变链路可见性和计算路径, 但仍归为构型重构; 服务星切换若不改变真实轨道, 则根据其直接改变的是连接关系还是节点职责, 归为链路重构或功能重构. 能源、热控、同步标定、状态迁移和安全风险进一步限制各类重构动作的可行范围与实施频率 [21, 22, 89]. 因此, 相关研究应明确直接控制对象、主导重构维度、耦合影响及扣除相应代价后的任务收益, 而不能仅以局部性能指标的改善判定重构是否有效 [24~26]. 表 3 概括了四个维度的主要变量与作用路径.

可重构星群具有典型多时间尺度特征. 构型重构受轨道动力学、推进能力和空间安全约束, 通常处于慢时间尺度 [36, 67, 68]; 链路重构受星间可见性、激光指向、路由状态和业务负载影响, 多发生在中时间尺度 [2, 37, 41]; 功能重构涉及任务实例、模型副本、缓存和处理链迁移, 通常介于中慢时间尺度之间 [21, 34, 83]; 资源重构包括波束、功率、时隙、接入、队列和推理调度, 更多发生在快时间尺度 [19, 22, 102]. 突发目标发现、链路中断、节点故障、业务激增和安全告警则触发事件驱动重构 [2, 6, 34]. 较可行的实现路线是在慢层规划构型和候选协作范围, 在中层

表 3　可重构星群的重构维度与作用机制.

Table 3　Reconfiguration dimensions and their mechanisms in reconfigurable satellite swarms.

Reconfiguration dimension	Main variables	Mechanism
Formation reconfiguration	Relative positions, velocities, baselines, phase centers, formation geometry, and cross-orbit cooperation	Changes visibility, propagation distance, cooperative aperture, observation baselines, and data-aggregation graphs.
Link reconfiguration	Inter-satellite/satellite-ground links, gateways, routing, service chains, and link priorities	Changes traffic graphs, control graphs, synchronization graphs, and backhaul paths.
Function reconfiguration	Observation, relay, access, traffic collection, computing, aggregation, and primary-controller/backup roles	Changes task-chain division of labor and service execution locations.
Resource reconfiguration	Spectrum, power, beams, time slots, cache, computing capacity, models, energy, and thermal margins	Translates the structural feasibility region into concrete communications, sensing, and computing service capabilities.

重构链路和功能角色, 在快层执行波束、接入、队列和推理调度, 并通过任务价值、接口约束、预测窗口和滚动重规划实现层间协调 [21, 24, 34].

为便于横向比较, 本文综合提出 R0∼R4 系统级重构能力分级. R0 是固定星座或固定编队的参照基线, 几何和拓扑基本不可调, 系统主要依赖常规资源调度 [1, 23, 30]; R1 是资源可调的过渡层级, 波束、频谱、功率、缓存和计算资源可编程, 而几何与链路主要由既有结构决定 [20, 22, 33]; R2 为链路 – 功能可调系统, 星间链路、网关、路由和节点角色可按任务调整, 大尺度轨道形态近似固定 [2, 21, 34]; R3 为局部构型可调系统, 能够在安全和机动预算内改变局部星簇的相对位置、编队基线或物理相位中心 [31, 36, 67]; R4 为闭环自治可重构系统, 能够根据环境、任务、观测结果和节点状态开展滚动规划、异常恢复和自适应重构 [24, 103, 104]. 该分级是本文用于组织文献的综合归纳, 并非现有文献已经确立的线性技术代际或单一成熟度标量; 同一系统在不同维度上可能处于不同等级 [22, 36, 89].

2.3　可重构星群的运行架构

四个横向重构维度回答系统可以改变哪些对象, 纵向运行架构则回答系统依据何种信息、通过何种关系完成重构. 如图 3 所示, 本文将可重构星群的运行架构划分为状态感知层、网络组织层、任务执行层和重构决策层. 四层分别回答系统掌握哪些可信状态、当前窗口内哪些节点能够协同、通信感知计算任务如何完成, 以及是否需要重构和应当怎样重构. 四层并非单向串行关系: 状态估计、可行关系和任务结果向上形成决策依据, 重构目标、资源预算和降级边界向下约束网络组织与任务执行, 从而构成闭环运行过程.

状态感知层负责获取、融合和预测星群内部状态、外部环境与任务需求. 这里的 “感知” 是对系统运行状态和任务环境的认识, 不特指遥感或目标探测. 该层需要描述相对轨道与姿态、钟差与同步误差、链路和网关状态、载荷健康、能源与热余量、计算与缓存余量、目标态势以及任务截止期等信息. 其输出不应只是离散观测值, 而应包括带时间戳和置信度的状态估计, 以及对可见窗口、链路保持时间、资源余量和任务机会的预测 [2, 89, 103]. 状态信息的价值同时取决于精度、新鲜度和预测提前量; 即使当前估计较为准确, 若其到达时已不足以完成建链、状态迁移或构型调整, 也无法支撑有效重构.

网络组织层在轨道几何、星间可见性、链路终端数量、建链时延和网关状态等约束下, 建立并维护可实现的节点协作关系. 其主要输出包括候选服务星簇、可用链路图、路由路径、网关接续关系、控制信息通道和故障备份路径. 几何可见只构成候选连接; 只有能够在任务窗口内完成建立、保持足够时长且不违反终端占用与容量约束的链路, 才能进入可执行网络图 [2, 37, 41]. 该层主要落实链路重构: 构型状态规定其几何可行域, 网络关系进一步约束节点角色分配和资源调配的可行范围.

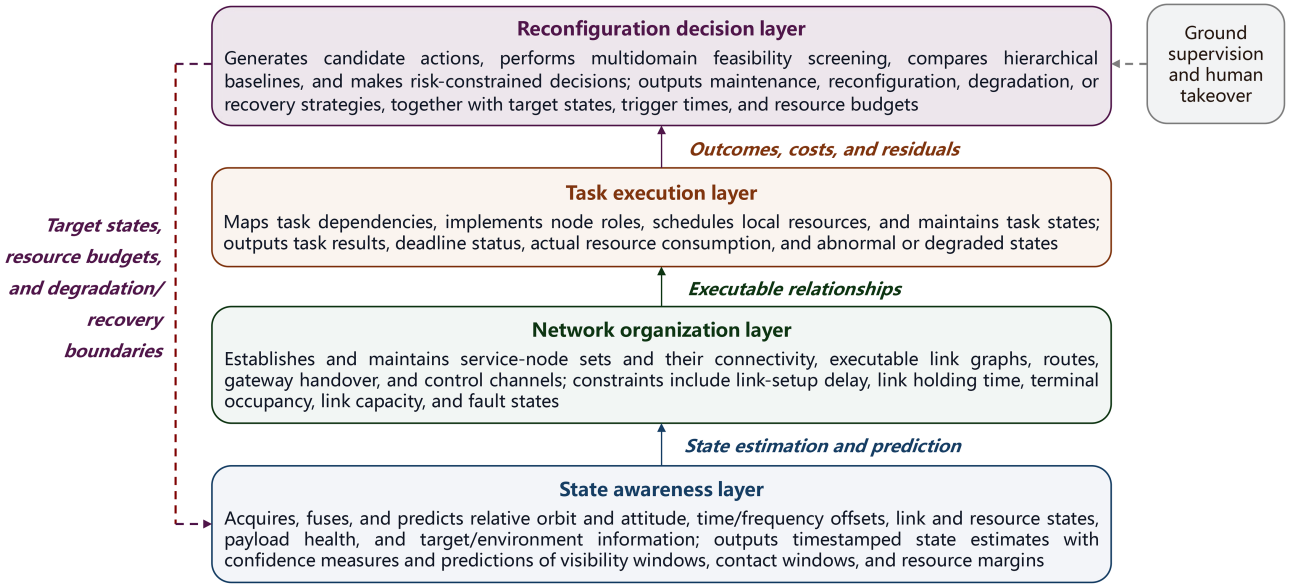


图 3　(网络版彩图) 可重构星群的运行架构.

Figure 3　(Color online) Operational architecture of reconfigurable satellite swarms.

任务执行层按照重构决策层给定的目标状态、任务优先级和预算边界, 将可用节点与网络关系落实为通信流、观测链和计算任务图. 通信任务包括多星接入、协同传输、回传中继和接续保障 [31, 49]; 感知任务包括多基线观测、多视角接力、协同标定和在轨预处理 [58, 60]; 计算任务包括任务切分、协同推理、模型聚合、状态迁移和结果回传 [78, 81]. 该层应向重构决策层返回任务结果、截止期满足情况、实际资源消耗、链路中断和降级恢复状态. 其评价对象是任务是否按时、按质完成, 而不只是某项功能是否已经部署或某类资源是否得到利用.

重构决策层综合任务价值与截止期、状态估计及其不确定度、可执行网络图、任务反馈和资源风险边界, 对候选重构动作进行筛选和比较. 该层需要在相同任务窗口和外部资源预算下, 将候选方案与公平的非重构基线进行比较, 进而决定是否重构、以哪个维度为主导、需要哪些跨维调整、何时触发、目标状态是什么, 以及采用何种预算、降级和恢复策略 [6, 103, 104]. 候选动作的评价还应纳入轨道动力学与空间安全、同步标定、链路建立、任务状态迁移、能源热控和网络安全等约束 [105]. 重构决策既可以由地面完成, 也可以采用星上或星地分层方式; 该层名称并不预设系统具有完全自治能力. 当状态不确定度、碰撞风险或策略可信度超出允许边界时, 系统应维持基线状态、降低协作等级或请求地面接管.

四层的更新周期不必相同. 状态感知的更新频率取决于状态变化速度和任务精度, 网络组织受到接触窗口与链路建立时间限制, 任务执行受到传输、观测和计算截止期约束, 重构决策则必须在候选动作仍来得及实施时完成 [41, 104]. 任一环节未能在任务窗口内完成, 均可能使理论上有利的重构方案失去实际可行性. 表 4 据此概括各层的输入输出及其与四个重构维度的关系.

2.4　任务窗口、分层基线与净收益判据

可重构星群需要判断的不是候选动作能否改善某个局部指标, 而是新增的重构自由度能否在结果失去效用之前产生可交付任务收益. 本文将任务窗口定义为从需求或事件出现到任务结果仍具有决策或服务价值的有限时段; 它不同于单一的星地可见、星间接触或载荷观测窗口, 一个任务窗口可以包含多个物理机会窗口, 连续通信业务则可采用滚动服务区间. 候选动作应按照直接控制对象描述, 包括构型状态、连接关系、节点角色和资源配置的调整; 仅从既有星座中选择服务、观测或计算节点, 并不改变真实构型, 应根据其直接作用对象归入链路或功能重构. 研究还应说明动作的触发、建立、有效持续和恢复时间, 以及主导维度和跨维影响. 本文所称净收益并非异量纲指标的直接求和, 而是候选动作通过时限和硬约束筛选后, 相对于可比基线形成的任务增量判断.

表 4　四层运行架构的输入输出及其与重构维度的关系.

Table 4　Inputs and outputs of the four-layer operational architecture and their relationships with the four reconfiguration dimensions.

Operational layer	Main inputs and outputs	Relationship with the four reconfiguration dimensions	Main processes
State awareness layer	Input: relative orbit and attitude, time/frequency offsets, link and resource states, payload health, task requirements, and target/environment information. Output: timestamped state estimates with confidence measures and predictions of visibility windows, contact windows, and resource margins	Provides current states, forecasts, and uncertainty bounds for formation, link, function, and resource adjustments.	Relative-state measurement; time/frequency offset and link-state estimation; payload-health monitoring; window and resource prediction
Network organization layer	Input: geometric visibility relationships, predicted contact windows, link-terminal occupancy, task loads, and gateway states. Output: service-node sets and their connectivity, executable link graphs, routes, gateway handover, and control channels	Primarily implements link reconfiguration and defines the network feasibility region for functional-role adjustment and resource coordination.	Service-relationship establishment; link setup and maintenance; time-varying routing; gateway handover; congestion avoidance; fault recovery
Task execution layer	Input: reconfiguration targets, task-dependency relationships, executable network graphs, and resource budgets. Output: task results, deadline status, actual resource consumption, and abnormal or degraded states	Implements functional roles and resource configurations under the selected formation and link conditions to produce deliverable task outcomes.	Task-graph mapping; implementation of node roles; local resource scheduling; task-state maintenance; result feedback
Reconfiguration decision layer	Input: task value and deadlines, state estimates and their uncertainty, the network feasibility region, task-execution feedback, and resource/risk boundaries. Output: maintenance, reconfiguration, degradation, or recovery decisions, together with the primary dimension, target state, trigger time, and resource budget	Determines whether the four reconfiguration dimensions should be adjusted and coordinates the adjustment objects, implementation order, and constraint boundaries.	Candidate-action generation; multidomain feasibility screening; hierarchical baseline comparison; multicriteria decision-making; rolling updates; abnormal degradation and recovery

基线的选择直接影响重构收益是否可信. 状态保持基线不主动改变四类重构对象, 仅执行安全维持所必需的跟踪与控制; 固定结构资源优化基线保持构型、连接关系和节点角色不变, 但允许在相同任务窗口和资源上限下优化频谱、功率、波束、时隙、缓存与计算资源; 低代价重构基线进一步允许在既有几何条件下调整服务节点、链路和功能角色, 但不进行真实轨道机动. 评价链路或功能重构时, 应至少与固定结构资源优化基线比较; 评价真实构型重构时, 则应与既有几何条件下经过充分优化的节点选择、链路调整和角色分配策略比较. 所有方案应采用相同的任务输入、状态信息、外部资源上限和不确定性条件, 基线及其调优范围应在比较前明确声明.

图 4 给出了任务窗口内的候选动作筛选、基线比较、执行与反馈过程. 候选动作首先接受任务时限、轨道动力学、空间安全、同步标定、链路可达、能源热控和状态一致性筛选; 不可行动作直接排除, 可行动作再与预先声明且充分调优的可比基线比较任务结果、实施代价和失效风险, 并依据预先声明的多准则偏好作出保持、重构、降级、恢复或请求地面接管的决定. 通信任务应重点评价业务完成率、接入成功率、服务中断时间、覆盖可用率和区域容量; 感知任务应评价高程或形变误差、事件发现与确认时间、轨迹连续性、结果可用时间和有效信息增益 [6,7]; 计算任务应评价结果最早可用时间、截止期满足率、高价值信息保留率、模型更新时效和任务连续性. 链路速率、单次观测精度、处理器利用率和下传数据量可以解释作用机制, 但不宜作为证明重构有效的唯一依据.

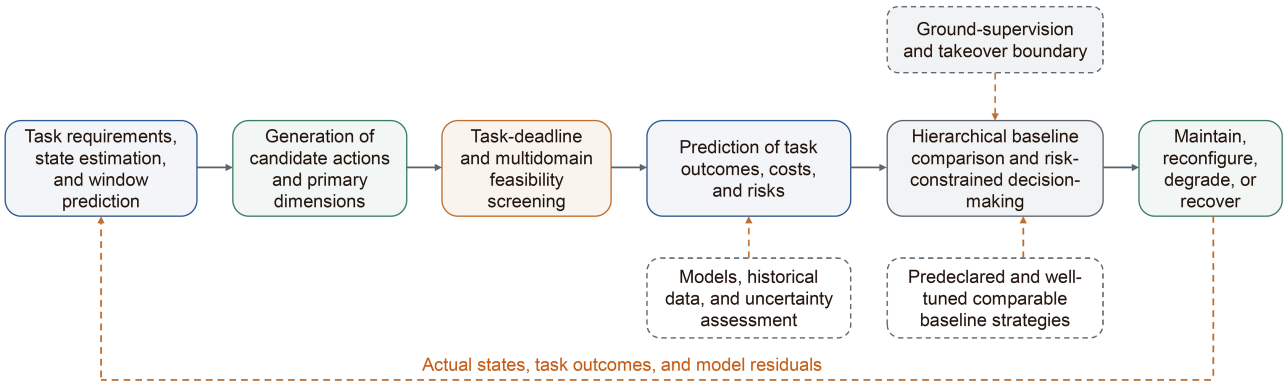


图 4　(网络版彩图) 面向任务窗口的可重构星群判决与反馈流程.

Figure 4　(Color online) Task-window-aware decision and feedback workflow for reconfigurable satellite swarms.

只有当候选动作能够在任务窗口内完成、满足全部硬约束, 并在既定评价规则下优于可比基线, 且任务增量超过模型不确定性、测量误差或统计波动所能解释的范围时, 才能认为其具有任务净收益. 若多星协同传输增益被同步误差、CSI 陈旧和星间交换开销抵消 [49,50], 多基线观测的几何收益被相位误差、配准误差和结果迟到削弱 [58,60], 或在轨处理节省的下传资源不足以覆盖中间特征传输、状态迁移和能源热控代价 [21,78], 维持原有策略就是科学上成立的判决结果, 而不应被视为系统失效. 因此, 重构研究至少应报告任务窗口、直接控制对象、动作建立与持续时间、可比基线及其调优范围、任务级结果、实施代价、置信区间或稳健性检验, 以及维持、降级和恢复条件. 表 5 给出了四类代表性任务的对应关系.

3　可重构星群的技术基础

可重构星群的通信、感知和计算任务虽然评价指标不同, 但均依赖若干共性基础: 轨道构型与相对导航塑造几何自由度, 星间互联形成信息流路径, 同步标定约束协同增益的可实现程度, 可编程载荷和星群任务运行机制支持角色调整与必要状态维护. 本节将这些共性机制从后续三类任务中抽象出来, 表 6 进一步概括其对通信、感知和计算任务的作用.

3.1　任务驱动的构型选择与控制

卫星构型描述节点之间的相对位置、相对速度和相位中心分布. 传统编队控制主要研究预设构型下的相对轨道保持、燃料消耗与碰撞规避 [23,30,36]; 可重构星群则进一步根据任务需求选择或调整几何关系. 通信任务关注协同孔径、信道相关性和分布式阵列增益 [31,42], 感知任务关注观测基线、视角分布和干涉测量精度 [32,58], 网络与计算任务则关注链路可达时间、数据汇聚路径和计算节点的可访问性 [13,15]. 因此, 构型设计的评价对象应是最终任务结果, 而不是几何变化本身.

任务所需几何可以通过四种方式获得. 第一, 既有几何选择, 即不改变卫星轨道, 而是从当前可见节点中选择通信簇、观测簇或计算簇 [15,29,106]. 这种方式利用现有节点分布, 不属于严格意义上的构型重构, 其直接控制对象通常是节点角色或连接关系. 第二, 等效观测或辐射几何调节, 即在不改变轨道的情况下, 通过卫星姿态和载荷视轴调整改变观测方向 [5,107], 或通过阵面单元与波束配置改变有效辐射孔径 [95,108]. 这类调整应根据直接控制对象归入功能或资源重构, 而不作为严格意义上的构型重构. 第三, 局部相对构型控制, 即在有限机动预算、相对导航精度和安全距离约束下, 改变小规模星簇的相对位置或观测基线 [36,109,110]. 第四, 轨道或星座构型重构, 即通过轨道相位、轨道面或区域性星座调整, 长期改变覆盖与任务机会分布 [67,68,111]. 后两类涉及真实轨道变化, 是严格意义上的构型重构.

构型控制研究应明确控制范围、时间尺度、动力学与安全约束、比较基线以及最终任务指标. 已有最小燃料重构和低推力编队机动研究给出了局部构型调整的控制模型 [112,113], 面向不可达目标的轨道机动规划进一步

表 5　代表性任务族的重构动作、可比基线、任务结果与主要代价.

Table 5　Reconfiguration actions, comparable baselines, task-level outcomes, and major costs for representative task families.

Task family	Typical reconfiguration actions	Comparable baselines	Task-level outcomes	Major costs
Direct-to-device enhancement and local cooperative transmission	Select serving nodes and adjust connectivity, node roles, and beam, spectrum, and power configurations, thereby changing available propagation conditions, cooperation levels, and interference relationships.	Resource-optimized single-satellite service under the same formation; selection or switching cooperation; feasible noncoherent cooperation	Service completion rate, access success rate, service interruption duration, coverage availability, and regional capacity	Cooperation-setup delay, synchronization errors, CSI acquisition and aging, inter-satellite traffic, control overhead, and neighboring-area interference
Multibaseline SAR/InSAR and geometric mapping	Adjust observation baselines, phase centers, observation roles, and operating periods, thereby changing measurement geometry, observation information content, and error propagation.	A fixed satellite combination and fixed baselines, or fully optimized observation combinations selected from the existing constellation without maneuver	Elevation or deformation errors, phase-unwrapping success rate, localization accuracy, and time to result availability	Propellant consumption, relative navigation, phase calibration, data registration, downlink overhead, and loss of future task opportunities
Event-driven agile observation	Adjust observation roles, link priorities, and observation/backhaul resources according to event-detection results to form a successive observation chain across windows.	A fixed observation plan, or ground-only replanning under the same satellites and resource conditions	Time to event detection and confirmation, age of useful information, track continuity, and task completion rate	Window-prediction errors, task conflicts, false alarms and missed detections, data-association errors, link congestion, and required maneuver costs
On-orbit screening and collaborative inference	Adjust processing, aggregation, and backup roles and the paths of data, models, and task states; reallocate computing, cache, link, and energy resources.	Ground processing after full-data downlink, independent processing on the source satellite, or onboard processing using fixed computing nodes	High-value information retention rate, time to earliest result availability, deadline satisfaction rate, and task completion rate	Computing energy and thermal pressure, intermediate-feature and model transmission, state migration, version conflicts, and fault-recovery overhead

体现了机动对后续任务机会的影响 [114]; 多基线沿航迹 InSAR 星群则将自主轨道控制与海事观测结果直接关联 [115]. 为判断真实机动是否必要, 应在相同任务窗口下比较固定构型、既有节点选择和主动轨道调整, 并同时报告任务结果、推进剂消耗、同步与链路重建开销以及后续任务损失.

近期研究可优先利用既有几何选择和小规模局部构型控制, 在多基线 InSAR [58, 60]、分布式卫星阵列 [31, 42] 和应急连续覆盖 [67, 70] 等结果可验证的任务中评估构型收益. 区域性或跨轨道构型重构则应进一步计入长期机会代价和轨道安全约束. 无论采用何种方式, 相对导航、跨星同步、碰撞规避和机动预算均应作为构型可行性的基本条件 [36, 84, 89].

3.2　跨星同步与协同标定

跨星同步与协同标定约束了多星观测或传输结果能够被有效合并的程度. 本文所称同步主要包括时间、频率、相位以及数据时间戳的一致性, 协同标定则包括相对轨道、观测基线、姿态、相位中心和载荷参数的联合估计与校正. 对通信任务, 时间、频率、相位和波束指向误差会降低分布式波束赋形、协同 MIMO 和联合接收增益 [49, 51, 116]; 对感知任务, 相对轨道、基线和相位中心偏差会传播至 InSAR 反演、高精度定位与多视角测量结果 [58, 60, 89]. 计算任务中的对应问题主要是时钟与任务状态一致性, 模型版本陈旧或中间状态不一致可能导致协同推理中断、模型聚合失真或任务迁移失败 [21, 78, 80]. 因此, 上述误差应作为系统状态和不确定性纳入任务模型,

表 6　共性技术基础及其对通信、感知与计算任务的作用.

Table 6　Common enabling foundations and their roles in communication, sensing, and computing tasks.

Common enabling foundation	Role in communication tasks	Role in sensing tasks	Role in computing tasks
Task-driven formation selection and control	Changes propagation distance, visibility windows, cooperative aperture, and the duration of serving satellite clusters.	Changes observation baselines and viewing angles, geometric accuracy, and revisit and successive-observation windows.	Changes reachability between data-generating and processing nodes, aggregation paths, and temporary computing clusters.
Cross-satellite synchronization and cooperative calibration	Constrains the feasible cooperation level for joint reception, cooperative beamforming, and distributed MIMO.	Constrains InSAR phase errors, localization accuracy, multiview registration, and target-tracking errors.	Affects the consistency of data timestamps, task states, and model versions.
Dynamic inter-satellite networking and task-aware routing	Carries user, control, synchronization, and CSI flows, affecting end-to-end reachability and gateway handover.	Carries raw data, features, summaries, and alerts, affecting the timeliness with which observation information arrives.	Carries model parameters, intermediate features, and task states, constraining task migration and continuous execution.
Multi-timescale resource coordination	Coordinates spectrum, power, beams, time slots, queues, and gateway capacity.	Coordinates observation windows, payload operating periods, downlink, cache, and processing resources.	Coordinates computing capacity, cache, links, energy, and thermal margins, thereby controlling deadline-violation risk.
Programmable payloads and swarm-level mission orchestration and runtime management	Supports role switching among access, relay, aggregation, and backup functions and adjustment of regenerative-processing modes.	Supports adjustment of observation, screening, processing, and alerting roles and maintains observation-chain states.	Supports task-graph mapping, cross-satellite state migration, model-version maintenance, and fault recovery.

而不能统一设为理想值.

同步与标定要求取决于具体协作方式. 多点覆盖、节点选择和任务接力通常主要依赖时间戳、位置和链路状态的一致性; 半相干协作还需要稳定的信道状态信息、局部相位校正和误差补偿; 强相干分布式传输则要求更严格的时间、频率和相位对齐 [31, 49, 84]. 感知任务的要求应由最终测量结果确定: 粗粒度事件发现可以容忍较大的几何和标定误差, 多基线干涉与高精度定位则需要更严格的基线、时钟和相位误差控制 [32, 58, 61]. 计算任务则应根据任务状态依赖程度, 区分无状态处理、模型同步和强状态工作流 [21, 78, 81]. 因此, 研究应给出任务类型、协作方式与误差预算之间的对应关系, 而不能笼统追求最高同步精度.

误差模型还应包括校准初始化时间、校准有效期、误差漂移速度和重校准开销. 构型调整可能改变基线与相位中心, 链路重建可能中断时间或相位连续性, 载荷模式切换也可能使已有标定参数失效 [41, 60, 89]. 通信研究应将误差预算与协同增益、干扰泄漏和传输性能关联 [49, 51]; 感知研究应将其与基线误差、相位残差及最终反演或定位误差关联 [58, 60]. HT-01 四星 InSAR 系统的精密基线确定、TanDEM-X 跨机构基线解算比较以及全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 机会信号双基地 SAR 的地形相位补偿, 均表明轨道、基线和相位误差需要追踪至最终任务结果 [117~119].

因此, 跨星同步与协同标定的评价重点不应是孤立的最高精度, 而应是给定误差和校准开销下的任务性能. 近期可在局部多星 MIMO [50, 120]、多基线 InSAR [58, 60]、机会信号定位 [61, 62] 以及跨星模型更新 [80, 82] 等任务中建立分级误差预算. 相关实验至少应报告误差来源及幅度、漂移特性、校准方法与频率、同步和校准开销、校准

有效期、任务结果变化以及失配后的降级或恢复方式.

3.3　星间动态互联与任务感知路由

星间动态互联是可重构星群组织多节点任务链的网络基础. 星间链路除了承载用户数据, 还需要传输控制与同步信息 [24,34]、观测摘要与中间特征 [76,98] 以及模型参数与任务状态 [19,80]. 这些信息流在传输时限、可靠性和信息新鲜度方面具有不同要求, 链路图重构的目标因而是在时变链路窗口内, 为任务链维持满足传输要求的端到端路径 [37,47,101].

轨道运动和通信终端约束使星间路由成为时变可行链路图上的建链与路径选择问题. 射频链路具有较强的指向容差和较高的技术成熟度, 但其容量和频谱复用受到带宽与干扰限制 [100]; 激光星间链路具有高带宽、窄波束和低干扰等优势, 但链路建立依赖精确的指向、捕获与跟踪, 并受可见窗口和终端数量限制 [41,57,121]. 光通信终端数量、指向捕获时间和编队状态进一步限制了可同时维持的链路集合 [122,123], 跨轨连接和链路中断容忍机制虽可增加备选路径, 也会增加终端调度与路由更新开销 [101,124]. 因此, 一条星间链路只有在可见窗口内完成建立、保持足够时间、具有可用容量且通信终端未被占用时, 才能作为路由图中的可行边. 仅依据几何可见性构造理想全连接图, 可能高估网络可达性和任务链连续性.

对此, 本文将根据任务流的时限、可靠性和信息新鲜度要求选择主备路径的机制称为任务感知路由. 多星协同传输需要及时交换同步与信道状态信息 [49,116], 事件驱动观测需要优先传输异常信息和后续观测指令 [70], 协同推理与联邦学习则需要传输中间特征或模型更新 [78,80]. 路由模型应显式考虑链路容量、队列状态、路径更新时间、控制开销和故障恢复, 并采用任务完成率、端到端时延、中断时间和控制开销等指标评价性能, 而不能仅比较路径长度 [37,47,101].

现有研究已探索物理约束与服务质量感知的深度强化学习路由、面向负载均衡的预编码式路由以及主动容错机制 [125~127], 相关仿真工具也能够在统一拓扑和业务条件下比较路由策略 [128]. 当前仍缺少链路建立时延、终端并发能力和路由控制收敛时间等实测参数. 近期可优先围绕激光链路时延约束下的路由 [41,129]、非均匀业务负载下的路径调整 [29,130]、多网关接续 [17] 和链路故障恢复 [127] 建立可复现的验证基准.

3.4　多时间尺度资源调配

可重构星群的资源状态天然分布在多个时间尺度上. 构型调整、长期服务区域规划、轨道相位和星座演进通常处于慢时间尺度 [67,68,104]; 服务星簇与星间链路多处于中等时间尺度 [2,15], 功能角色和任务状态也需要在该尺度更新 [21,34,83]; 波束、频谱、功率、时隙、接入控制、队列和推理任务分配则处于快时间尺度 [20,38,102]. 如果将这些状态全部压入单一时隙的联合优化, 不仅会导致模型维度过大, 也会混淆变量语义, 使所得策略难以解释和恢复 [21,22,102].

多时间尺度分层调配可在复杂度与可执行性之间取得平衡. 慢层负责确定长期服务区域、候选协作星簇、构型安全边界、能源热控预算和任务优先级 [6,67,68,104,131]; 中层根据任务负载、观测需求、星间链路预测、网关状态和节点健康, 更新服务图、链路图、功能角色和计算/缓存放置 [21,24,34,37,48]; 快层执行波束调度、功率控制、频谱复用、随机接入、局部干扰协调、队列管理和轻量任务调度 [16,20,33,38,132]. 这种分层在统一任务目标下进行结构化分解, 使慢变量保持稳定性, 中变量提供关系弹性, 快变量吸收瞬时业务和信道波动 [21,22,24,102].

多区域遥感任务规划已有工作采用模拟退火与邻域搜索处理跨窗口任务冲突 [133]. 这类结果可作为中慢尺度调配的基线, 但在可重构星群中还需加入链路、计算、能源和构型机会代价.

多时间尺度调配的关键在于层间接口必须清晰. 慢层应向中层提供候选星簇、资源预算、安全约束和任务优先级; 中层应向快层提供可用链路、功能角色、路径约束、服务要求和降级策略; 快层则应向上反馈接入失败、拥塞、链路退化、同步异常、能源热控压力、截止期风险和模型状态变化 [19,24,102]. 当突发热点、灾害事件、链路中断、节点故障或安全告警出现时, 系统可跨越常规时间尺度, 触发中层或慢层重规划 [6,101,103].

对于通感算协同星群, 多时间尺度资源调配还必须避免单域最优. 通信侧的热点增强可能挤占感知数据回传与模型同步链路 [16,55,132], 感知侧的高频重访可能消耗姿态机动、下传窗口和在轨计算资源 [5,107,134], 计算侧

的协同推理可能占用星间带宽、缓存和热余量 [21,22,78]. 因此, 资源调配应统一进入任务净收益框架: 慢层判断是否值得重构结构, 中层判断如何组织任务关系, 快层判断如何执行局部资源动作 [24~26]. 可优先在手机直连增强与局部多星 MIMO [10,31,50]、灾害敏捷观测 [6,7]、光链路路由 [41,57]、在轨预处理和星上任务链 [14,19,21] 等代表性任务中验证分层调配机制.

3.5　可编程载荷与星群任务运行机制

可编程载荷为卫星节点提供功能调整能力. 再生载荷、灵活波束、星上基带处理、在轨缓存和可编程转发, 使单星能够根据任务需求改变接入、传输与处理方式 [20,33,108]. 但单星载荷可编程并不等同于星群可重构. 星群级功能重构还要求接入、中继、观测、处理、聚合、控制和备份等任务角色能够在不同节点之间重新分配 [13,21,34]; 为使这些角色在时变链路下可执行, 星群任务运行机制需要支持任务依赖描述、跨星角色分配、运行状态维护与故障恢复, 星群操作系统可作为其中一种实现形式 [34,71,83].

星群任务运行的核心问题是在时变链路和异构资源条件下完成任务图映射与必要状态维护. 具体而言, 需要确定任务的各个处理阶段由哪些节点执行、能否在截止期前完成、节点切换时必须迁移或复制哪些状态, 以及链路中断或节点失效后如何降级和恢复 [19,21,78]. 相关决策需要联合利用链路可用窗口、容量、时延和可靠性信息 [2,37,47], 观测数据的时效与任务价值 [14,18], 以及模型参数、中间特征、缓存和任务状态的传输需求 [76,78,80]. 评价指标应包括任务启动时延、截止期满足率、状态迁移数据量、模型或任务状态一致性、故障恢复时间、能源消耗和热约束违反情况, 而不能仅报告计算利用率或单次卸载时延.

现有研究已经分别讨论星座操作系统架构、低轨边缘服务、任务调度和空间计算任务部署 [21,34,83,135], 但相关证据目前主要来自架构设计、算法仿真和原型验证. OPS-SAT 与 Φ-Sat-2 等任务为应用和人工智能模型在单星星载硬件上的运行提供了任务级证据 [87,88], 但其验证范围尚未覆盖跨星角色切换、任务状态迁移和故障恢复. 近期可优先面向小规模星簇建立验证任务, 公开任务依赖图、链路窗口、节点资源、状态规模和故障条件, 并在相同资源约束下比较固定角色、本星执行与跨星动态分配策略. 除任务完成率和结果时延外, 还应报告状态传输开销、模型或任务状态不一致、链路中断后的任务损失及恢复时间, 以判断功能重构是否产生实际任务收益.

4　可重构星群通信

传统卫星通信通常将轨道、星座构型和网关分布作为给定条件, 重点在既定网络上优化波束、频谱、功率、接入与路由. 可重构星群通信则将相对几何、星间链路、服务星簇、载荷角色和多域资源纳入同一任务设计空间. 其中, 几何结构影响星地距离、仰角、遮挡、可见窗口和多普勒结构, 进而塑造链路预算、频偏补偿和信道预测难度; 服务星簇与多星基线共同影响协同孔径、信道相关性、阵列/分集/空间复用增益, 同时引入同步、CSI 共享、星间带宽和控制开销; 星间链路、路由图和网关关系约束端到端时延、拥塞位置、业务可达性和服务连续性; 再生载荷、灵活波束、星上处理和软件定义控制面则支持卫星节点在接入、协同传输、中继、缓存、控制汇聚和任务协调等角色之间切换. 因此, 本节将可重构星群通信理解为以任务价值为牵引的多星通信组织问题. 其核心设计变量包括协作卫星集合、服务关系、星间链路图、网关接续关系、载荷功能角色、波束/频谱/功率/时隙配置以及同步和控制开销; 评价指标也应从瞬时速率和平均吞吐扩展到覆盖弹性、区域容量、接入保持时间、端到端时延、链路鲁棒性、服务连续性、协同净收益和业务完成质量等任务级指标.

4.1　星群重构影响天基通信的基本机制

表 7 概括了可重构星群通信的主要作用路径、应用与瓶颈. 星群重构本身并不直接产生通信增益, 而是通过改变传播条件、多星空间自由度、服务关联、干扰关系和端到端网络可达性, 影响通信任务的最终结果. 其作用可沿 “单链路条件、协同传输、服务星簇、干扰耦合、端到端连接” 五个层次展开. 这五类机制是相互关联的作用路径, 而非彼此独立的重构维度; 同一构型或链路调整可能同时影响其中多个层次.

(1) 几何关系改变传播条件与可用窗口. LEO 卫星的高速运动使星地距离、仰角、相对径向速度和过境时

表 7　可重构星群通信的机制、应用、挑战与趋势.

Table 7　Mechanisms, applications, challenges, and trends of communications in reconfigurable satellite swarms.

Reconfiguration pathway	Main communication effect	Representative applications	Key bottlenecks and future directions
Geometry-channel reconfiguration	Changes propagation distance, elevation angle, Doppler, visibility windows, and synchronization difficulty.	Link-budget optimization, multi-satellite direct-to-device connectivity, and cooperative beamforming	Geometry-constrained channel models; CSI freshness; synchronization-error modeling
Cooperative-aperture reconfiguration	Changes the effective array aperture, channel correlation, spatial degrees of freedom, and user-separation capability.	Distributed MIMO, multi-satellite joint transmission/reception, and user-centric service	Cooperation-cluster selection; asynchronous cooperation; net-benefit evaluation
Service-association reconfiguration	Concentrates beam, spectrum, power, and gateway resources on high-value regions.	Hotspot enhancement, emergency communications, and maritime/polar broadband	Task-value-driven scheduling; cluster-lifetime management; service continuity
Interference-graph reconfiguration	Changes cochannel interference edges, sidelobe leakage, and inter-cluster/inter-layer interference structures.	Spectrum reuse, satellite-terrestrial spectrum sharing, and cross-orbit interference suppression	Interference-graph modeling; cooperative precoding; joint spectrum-beam design
Link-topology reconfiguration	Changes the inter-satellite backbone, backhaul paths, gateway handover, and traffic-flow priorities.	Optical-link routing, deterministic services, and model/control-flow transport	Task-aware routing; proactive fault tolerance; optical-link maintenance and switching

长持续变化, 进而影响链路预算、传播时延、多普勒频移、波束驻留时间和信道预测精度 [4,39,40]. 星群可以通过既有节点选择或局部构型调整, 在候选范围内改变服务距离、仰角分布、星地路径差和链路保持时间, 但二者具有不同的时间尺度和实施代价. 服务星选择可以较快适应用户位置和链路状态, 真实构型调整则受到轨道动力学、机动预算和安全约束. 几何条件改善也可能增加时间对齐、频偏补偿、波束跟踪和信道状态更新难度. 因此, 相关研究应同时报告链路质量、有效服务窗口、预测误差以及同步和控制开销, 而不能仅依据理想几何条件计算传输增益.

(2) 协同孔径改变多星传输的空间自由度. 在时间、频率、相位和 CSI 满足相应条件时, 空间分布的多颗卫星可以形成分布式阵列. 合适的基线与角度分布能够降低部分信道相关性、提高用户可分辨性, 并为协同波束赋形和空间复用提供额外自由度 [31,42,43]. 但协同收益并不随基线或节点数量单调增加: 基线增大可能加剧传播时延差、相位漂移和指向误差, 参与节点增多也会增加 CSI 交换、同步校准、星间传输和协作建立开销 [50,51,116]. 因此, 协作簇规模和协作方式应根据任务窗口、同步误差、CSI 新鲜度和星间链路容量确定, 并在相同频谱、功率和任务条件下比较边缘用户性能、业务完成率、星间流量及协作建立时间, 而不能仅以理想同步条件下的和速率判断多星协作收益.

(3) 服务星簇调整改变接入范围与区域资源供给. 服务星簇由当前可见卫星、链路状态、节点能力和任务角色共同确定. 通过调整主服务星、协作星、中继星、备份星和网关关系, 系统可以改变用户可接入的节点集合、服务关系保持时间以及特定区域可获得的波束、功率、频谱和回传资源 [15,55,56]. 这种机制适用于局部业务负载显著变化或用户快速移动的场景, 但其收益不仅取决于瞬时峰值速率, 还取决于接入成功率、服务持续时间、切换中断、区域容量以及新增星间控制和回传开销. 服务星簇过大可能增加覆盖与协作机会, 也可能造成控制流量增长、频谱竞争和频繁切换, 因而需要根据区域负载和任务期限确定其规模与维持时间.

(4) 几何与服务关系改变干扰耦合和频谱复用边界. 多星多波束系统中的主瓣重叠、旁瓣泄漏、跨轨干扰、星地共频干扰和随机接入冲突会随卫星几何、服务关联和波束调度发生变化. 干扰图是描述这种耦合关系的分

析工具, 而不是独立的重构对象. 服务星选择、波束覆盖、频谱复用和协同预编码的联合调整, 可以削弱部分强干扰关系并改善热点区域容量 [16,44,45]. 但局部增强可能提高邻区干扰或占用其他任务所需的星间带宽, 波束跳变也会改变队列积压和业务时延. 因此, 干扰管理应同时评价区域吞吐量、边缘用户性能、邻区影响、队列稳定性和回传负载, 而不能只报告目标区域的容量增益.

(5) 链路图与网关关系约束端到端可达性. 星间链路、星地接入链路、馈电链路、网关和跨轨中继共同构成时变通信图. 链路的建立、释放、保持和切换, 以及路由与网关选择, 会改变端到端时延、拥塞位置、传输可靠性和故障恢复能力 [2,17,37]. 物理层协同增益可能被星间信息交换、激光链路建立时延、数据重排序或馈电链路拥塞抵消 [41,99]. 因此, 通信性能评价应追踪数据能否在任务截止期前到达目标节点, 并同时报告端到端交付率、业务完成时间、中断持续时间、网关负载和故障恢复时间. 对于低时延控制、手机直连和大规模物联网等任务, 这些端到端指标通常比单一链路的瞬时峰值速率更能反映星群重构的实际作用.

4.2　多星协同传输与分布式 MIMO

多星协同传输与分布式 MIMO 利用空间分布的卫星节点形成联合发射、联合接收或分布式阵列, 是星群几何影响通信性能的代表性应用. 相关研究已从多星 MIMO、卫星簇协作、超稀疏分布式阵列和用户中心多星服务等角度展开 [43,50,136]. 为区分不同实现条件, 本文定义 C0∼C4 通信协作强度: C0 为单星服务, C1 为多星选择或切换协作, C2 为非相干多点协作, C3 为半相干协作, C4 为强相干分布式 MIMO. C3 仅要求局部、统计或有限的相位协调, 不假设整个任务窗口内维持全局载波相位一致, 残余相位和频偏需进入鲁棒设计; C4 则要求共享时间与频率基准, 并对各协作链路进行相位标定和持续跟踪, 以在校准有效窗口内实现符号级相干合并或联合预编码 [31,49,51]. 该分级是本文为比较实现条件而作的综合归纳, 不代表系统整体重构能力或技术成熟度. 各等级的操作性特征见表 8.

分级协作首先需要能够连接轨道几何、等效信道与协作条件的最小模型. 该模型应描述卫星与终端之间的距离、仰角、相对速度、多普勒和可见窗口, 以及服务星簇的基线分布、空间相关性和等效信道秩 [137,138]; 同时还应保留残余时间、频率和相位误差, CSI 陈旧度以及星间链路容量等影响协作可行性的因素 [40,139]. 对 C0 和 C1, 模型可以主要依赖大尺度信道与几何状态; C2 需要支持多点接收、分集或联合检测; C3 应显式建模有限相位协调后的残余误差, C4 则需刻画校准有效期内的链路相位跟踪误差和 CSI 共享时延. 由此, 不同协作等级能够在同一几何与误差模型下进行比较, 而不必为每一种算法重新设定理想化信道条件.

有限终端反馈和星间链路容量使完全依赖瞬时 CSI 的全局协作难以持续. 星历、终端位置、相对速度、可见窗口和统计信道特征具有较强的可预测性, 可用于位置辅助信道估计、统计 CSI 预编码、分级反馈和预测式波束控制 [40,116,140]. 因此, 协作状态不应仅指瞬时信道矩阵, 还应包括服务星可见时间、同步误差、链路质量和星间共享状态. C2 可主要依赖大尺度或统计信息完成多点接收与联合检测, C3 可采用位置辅助或统计 CSI 进行鲁棒协作, C4 则需要更及时的信道、时间和相位状态. 同步和 CSI 要求应由协作等级确定, 而不应在所有场景中统一假设为完美状态.

在给定几何和状态信息后, 核心决策是联合选择协作成员、协作等级、持续时间和失配后的降级方式. 协作簇过小可能无法获得足够的分集或空间自由度, 协作簇过大则会增加 CSI 交换、相位校准、星间流量、控制信令和载荷处理开销. 非相干协作可侧重重复接收、联合检测和随机接入, 半相干与强相干协作则需要面向残余频偏、相位漂移和 CSI 陈旧进行鲁棒预编码与波束控制 [49,51,140]. 因此, 协作节点数量和 C 等级均应作为任务相关的决策变量, 而不能预设最大星簇或 C4 必然最优.

不同协作方案应在相同用户分布、任务窗口、频谱、发射功率、星间链路容量和载荷处理预算下比较. 除用户速率和频谱效率外, 还应报告边缘用户性能、业务完成率、星间传输量、协作建立时间、同步与 CSI 获取开销、服务持续时间以及节点或链路失效后的性能下降. 研究的重点不是再次证明理想条件下多星联合传输优于单星, 而是确定在何种基线、同步误差、CSI 陈旧度、星间容量和协作窗口下, C2, C3 或 C4 相较较低协作等级仍能取得可验证的任务收益.

表 8　多星协同传输的协作模式与等级.

Table 8　Cooperation modes and levels for multi-satellite cooperative transmission.

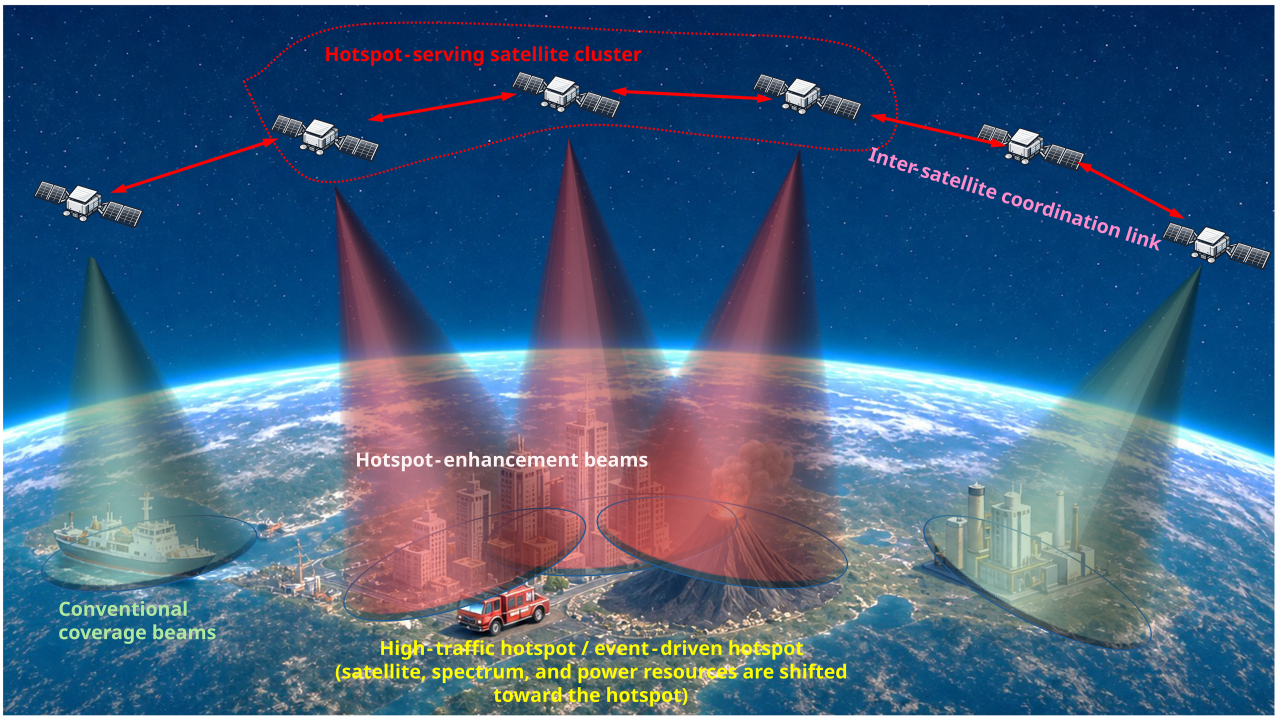
Cooperation level	Representative mode	Synchronization/CSI requirements	Inter-satellite link requirements	Applicable scenarios
C0: Single-satellite service	Independent transmission/reception by one satellite	Single-link timing and channel estimation	No real-time cooperation information required	Conventional access and baseline coverage
C1: Selection/switching cooperation	Multiple candidate satellites, predictive handover, and backup service	Consistency of candidate-satellite states and handover timing	Exchange of link states and handover signaling	Coverage-gap filling and service continuity
C2: Noncoherent multipoint cooperation	Repeated reception, joint detection, and diversity access	Compensation of arrival-time and frequency offsets; carrier-phase consistency is not required	Exchange of observations, soft decisions, or duplicate data	IoT, weak uplink, and random access
C3: Semi-coherent cooperation	Limited-phase coordinated beamforming and statistical or robust precoding	Local/statistical CSI and limited phase correction, with residual errors explicitly modeled	Exchange of cooperation parameters, limited CSI, and synchronization states	Hotspot enhancement and edge-user protection
C4: Strongly coherent distributed MIMO	Symbol-level coherent joint transmission/reception and joint precoding	Shared time/frequency references and per-link phase calibration and tracking	Timely exchange of CSI, data, control information, and phase states	Dedicated terminals and high-value short-duration windows

4.3　手机直连与海量随机接入

手机直连与海量随机接入都面向能力受限的地面终端, 但两者对应不同的通信问题. 手机直连主要关注普通终端的双向链路预算、覆盖保持与切换连续性; 窄带物联网和短报文接入则更关注突发上行中的活跃用户检测、接入冲突与低功耗传输 [4, 11, 52]. 二者共同受到终端发射功率、天线增益、同步与反馈能力限制, 同时还需应对 LEO 链路的大时延、多普勒变化和短可见窗口. 因此, 星群协作应尽量由卫星侧和网络侧完成, 避免要求普通终端持续感知多星状态或频繁反馈高维 CSI.

对手机直连而言, 较现实的起点是 C1 选择与切换协作以及 C2 非相干多点协作. 系统可根据未来可见时间、链路质量和接续条件选择主服务星, 并由辅助卫星提供上行联合侦收、下行覆盖补充或切换备份 [10, 50, 53]. C3 或 C4 协作只有在跨星同步、CSI 获取和协作控制能够对普通终端保持透明时才具有实际意义. 相关研究应重点考察主辅服务星选择、可持续覆盖时间预测、切换触发与失败恢复, 而不能仅在理想多星信道下比较接收信噪比或峰值速率. 评价指标应包括接入成功率、覆盖可用时间、切换中断、终端发射功耗、控制信令量和业务完成率.

海量随机接入的核心问题是在大差分时延、多普勒和稀疏业务到达条件下识别活跃终端并恢复短报文. 多星联合接收能够增加观测维度和空间分集, 为弱信号检测和冲突消解提供条件, 但也会增加跨星时间对齐、观测信息交换和重复数据处理开销 [38, 39, 54]. 已有多星弱信号联合检测和区域性直连物联网研究进一步说明, 候选卫星集合与观测几何会影响检测可靠性和接入覆盖 [65, 141]. 因此, 应在相同终端功率、接入负载和星间链路预算下, 比较经过充分优化的单星接入、多星选择接入与非相干联合检测, 并同时报告活跃用户检测率、漏检与虚警率、接入时延、碰撞恢复率、单个成功报文能耗及星间传输量.



Required key steps, reconfiguration dimensions, and their roles

Processing stage	Primary reconfiguration dimension(s)	Supporting reconfiguration dimension(s)	Specific role
Hotspot-demand and interference-situation estimation	**No direct reconfiguration (state awareness)**	**Formation, link, function, and resource**	Estimate hotspot location, user density, and service priority; obtain candidate-satellite visibility windows, beam loads, interference levels, and inter-satellite link capacities; construct timestamped demand, load, and interference maps with confidence measures.
Determination of candidate service relationships and functional roles	**Link and function**	**Formation and resource**	Select the primary serving satellite, capacity-augmentation satellites, edge coverage-gap satellites, relay satellites, and backup satellites from visible candidates; determine the temporary service cluster, cooperation level, holding time, and handover sequence; establish the necessary service and control links.
Reconfiguration of beam coverage and the interference graph	**Resource and link**	**Formation and function**	Adjust beam centers, coverage regions, beam-hopping sequences, and service relationships; redefine interference edges among cochannel beams, neighboring regions, and different satellites; configure coordination, muting, isolation, or interference-suppression relationships.
Wireless-resource and cooperative-transmission configuration	**Resource**	**Link and function**	Jointly configure spectrum reuse, transmit power, time slots, beam dwell time, access opportunities, and cooperative precoding; allocate resources according to service priorities, interference budgets, and queue states to balance capacity, interference, and overhead.
Inter-satellite backhaul and gateway coordination	**Link and function**	**Resource and formation**	Select inter-satellite paths, cross-orbit relays, and gateway egresses for hotspot traffic; allocate backhaul bandwidth, cache, and transmission priorities; configure backup paths and gateway-handover relationships to prevent inter-satellite links or gateway egresses from becoming bottlenecks.

图 5　(网络版彩图) 区域热点增强应用示例.

Figure 5　(Color online) Illustration of regional hotspot enhancement.

4.4　区域热点增强与干扰管理

图 5 以局部高负载区域为例展示服务关系、波束资源与星间回传的联合调整. 区域热点增强面向业务需求在空间和时间上的局部聚集, 包括灾害区域、海上平台、临时大型活动、偏远地区回传和战术区域通信等场景. 其输入应包括热点位置、持续时间、业务强度、优先级和卫星可见窗口, 目标是在不进行大尺度轨道机动的条件下, 将现有星群能力临时调配至目标区域. 相关决策可以分为两个时间尺度: 较慢尺度上选择服务星簇、回传路

径和网关, 较快尺度上调整波束照射、频谱、功率和业务调度 [15,16,20]. 服务星簇中的节点可分别承担稳定接入、容量补充、边缘增强和回传中继等角色, 但角色数量与维持时间应由实际业务需求确定.

热点区域的空口容量提升只有在星间回传和馈电链路能够承载新增业务时才具有意义. 增加波束或协作卫星可能把拥塞从用户链路转移至星间路由或网关, 并可能降低其他区域的可用容量 [17,29,130]. 与此同时, 服务星选择、波束跳变和协同预编码会改变邻区、跨轨以及 LEO 与地球静止轨道 (geostationary Earth orbit, GEO) 系统之间的干扰关系 [44,45,142]. 因此, 热点增强需要联合考虑接入侧容量、邻区干扰、星间链路负载和网关瓶颈, 而不能将波束功率增加等同于端到端服务能力提升. 波束跳变还应结合业务队列和波束切换开销进行设计, 避免局部容量增加伴随排队时延恶化 [16,143].

不同方案应在相同卫星集合、频谱、发射功率、星间链路和网关容量下, 与固定波束和静态服务关系进行比较. 除热点区域吞吐量外, 还应报告业务需求满足率、阻塞率、首包时延、边缘用户性能、非热点区域容量损失、星间链路占用和网关负载. 对于多网关多波束系统, 还需计入馈电链路干扰和网关切换开销 [17,144]. 只有当热点区域新增任务收益没有被邻区损失、回传拥塞和控制开销抵消时, 区域热点重构才具有实际意义.

4.5　星间骨干路由与网关协同回传

大规模低轨星座的端到端通信路径由星地接入链路、星间骨干、馈电链路和地面网关共同构成. 接入侧获得的覆盖或多星协作增益, 只有在用户数据和必要控制信息能够及时通过星间链路到达可用网关时, 才能转化为端到端通信性能. 若星间路径拥塞、馈电链路容量不足或网关暂时不可用, 物理层增益可能无法形成可交付业务. 因此, 该应用的核心不是增加星间连边数量, 而是在时变链路条件下联合确定星间路径、网关出口和备份关系 [2,17,37].

路由模型应将不同数据流表示为具有数据量、截止期、可靠性、优先级和目标出口的传输任务, 并显式考虑星间链路的可用窗口、容量、建立时延和保持时间, 以及网关容量和馈电链路状态 [37,41,47]. 决策内容包括是否建立或保持某条星间链路、选择哪条主备路径、从哪个网关回传, 以及链路或网关失效后何时切换. 网关选择与星间路由不能彼此独立: 选择距离较近但负载较高的网关可能加剧馈电链路拥塞, 更换网关则会同时改变星间路径长度、队列位置和数据到达顺序 [17,99]. 较长时间尺度可规划骨干拓扑和主备网关, 较短时间尺度则根据链路中断和队列变化调整路径.

现有研究已分别讨论非均匀业务下的动态拓扑控制、按需路由、负载感知路由和低时延高可靠路径选择 [29,130,145], 也研究了多网关馈电干扰与网关切换问题 [17,144]. 但星间路径、链路建立和网关选择通常仍被分开评价. 后续研究应在相同链路窗口、业务负载和网关容量下, 至少要比较下面三类方案: 第一是最临近网关或固定网关最短路径下的负载感知路由, 第二是固定星间拓扑下的网关切换, 第三是链路与网关联合调整. 除平均时延外, 还应报告端到端交付率、截止期满足率、数据重排序、星间链路最大负载、馈电链路拥塞、切换中断、故障恢复时间和控制开销. 表 9 据此列出四类通信问题的最小模型、基线和可证伪结果.

5　可重构星群感知

天基感知面向目标、环境与事件的信息获取, 其性能取决于载荷体制、波形和估计算法, 也深受观测几何、采样时序、信息融合和处理链影响. 对于多星 SAR/InSAR、机会信号定位与导航增强、遥感成像、动态目标跟踪、电磁环境感知和空间态势感知等任务, 星群构型已由轨道背景转变为影响基线、视角、重访、可辨识性和信息增益的核心状态. 在可重构星群中, 感知任务应围绕任务窗口联合选择参与节点、观测基线、接续时序、处理角色和回传路径. 构型重构塑造观测几何, 链路重构影响数据、特征和告警的流动方式, 功能重构组织观测、处理、融合和回传分工, 资源重构分配波形、功率、驻留时间、计算、缓存和下传优先级. 评价指标应从分辨率或单次检测精度扩展到高程反演误差、形变测量精度、定位几何精度因子、检测概率、跟踪误差、重访间隔和告警时效等任务级结果. 表 10 [6,12,58,60~62,64,70,134,146] 概括了四类典型任务的作用机制、输出和成立条件.

表 9　可重构星群通信的 “模型 − 基线 − 指标 − 证据” 研究范式.

Table 9　Model-baseline-metric-evidence research template for communications in reconfigurable satellite swarms.

Research problem	Minimum model	Fair baseline	Core metrics	Falsifiable outcome
Direct-to-device terminal enhancement	Ephemerides, terminal capabilities, link windows, and standards constraints	Highest-elevation single satellite; standards-compliant handover	Access success rate, link holding time, handover interruption, and terminal power consumption	Multi-satellite signaling or synchronization overhead causes the service completion rate to decrease rather than increase.
Local distributed MIMO	Geometry-based channels, residual phase errors, CSI aging, and inter-satellite capacity	C0 single-satellite service; C2 noncoherent cooperation	Edge-user rate, inter-satellite traffic, synchronization time, and net utility	Once phase or CSI errors exceed a threshold, C3/C4 underperform C2.
Hotspot emergency communications	Regional queues, interference graph, backhaul graph, and task window	Fixed beam resources; nearest gateway	Service completion rate, recovery time, neighboring-region loss, and backhaul congestion	Air-interface capacity increases, but the end-to-end completion rate does not improve.
Task-aware routing	Predicted link windows, link-setup delay, and deadlines of multiple traffic classes	Snapshot shortest path; fixed gateway	On-time delivery rate, high-value-flow completion rate, recovery time, and control overhead	Prediction errors or link-setup overhead make dynamic paths inferior to fixed routing.

5.1　星群重构影响天基感知的基本机制

星群重构对感知的作用并非简单增加观测节点或量测数量, 而是改变观测几何、可用量测集合、观测时间序列以及误差传播关系. 构型重构改变基线、视角和相位中心分布, 链路重构约束哪些量测能够在任务期限内共享, 功能重构调整观测、校准、融合与回传角色, 资源重构则影响驻留时间、波形、功率、处理能力和下传优先级. 上述变化通过几何可辨识性、多源信息互补性、观测时效以及误差与处理链四类机制作用于最终定位、反演、检测或跟踪结果.

(1) 观测几何改变状态可辨识性与误差边界. 多星感知的可观测状态及其估计精度高度依赖基线长度与方向、视线夹角、方位和俯仰分布以及相位中心稳定性. 费舍尔信息、克拉美罗下界和几何精度因子等指标可以描述这种几何敏感性, 但它们属于中间分析量, 并不等同于最终任务性能. 对于分布式 SAR/InSAR, 横轨基线影响地形高程灵敏度、高程模糊度和几何去相关, 过大基线还会增加相位解缠、配准和轨道控制难度; 形变测量灵敏度则主要由载波波长和视线投影决定, 不能简单归因于基线长短 [32, 58, 59]. 对于多星定位与机会信号导航, 卫星空间分布影响时延、多普勒和角度量测能否形成稳定解算几何 [61, 63]. 因此, 构型设计的目标应是形成与具体任务匹配且能够维持的观测几何, 而不是单纯扩大基线或增加节点间距.

(2) 多视角、多基线和多模态量测增加信息互补性. 不同节点在观测方位、入射角、时间、基线尺度和载荷模态上的差异, 可以提供单星量测中缺失的信息. 构型重构影响可用视角和基线组合, 功能重构规定各节点承担的观测与融合角色, 链路和资源重构则影响原始数据、特征或局部结果能够在何处、何时完成融合 [18, 147]. 多源观测的收益取决于新增量测能否降低目标状态的不确定性, 而不是参与卫星或载荷模态的数量. 高度相关的观测可能只增加传输与处理开销, 跨模态偏差、配准误差和标定不一致也可能抵消信息互补收益. 相关研究应同时报告融合前后的不确定性、最终结果精度、数据交换量和处理时延, 并通过单星、同模态多星和多模态多星基线区分几何增益与信息融合增益 [18, 147].

(3) 重访与接续观测改变信息时效和状态连续性. 对于灾害演化、海事目标、空间目标和电磁异常等动态过程, 感知价值不仅取决于单次观测精度, 还取决于观测结果何时形成以及目标状态能否被连续更新. 可重构星群可以根据当前观测结果选择后续观测节点、调整区域优先级和组织接力观测, 使粗探测、目标确认、高分辨

表 10　可重构星群感知典型任务的作用机制、结果输出与成立条件.

Table 10　Mechanisms, final outputs, and validity conditions of representative sensing tasks in reconfigurable satellite swarms.

Task family	Key changes induced by reconfiguration	Final sensing outputs	Main validity conditions and failure factors
Distributed SAR/InSAR and multibaseline observation [58, 60]	Select or adjust participating nodes, observation baselines, phase centers, and interferometric combinations, thereby changing the observability of elevation, deformation, and motion parameters.	Digital elevation models (DEMs), deformation fields, surface-velocity fields, or moving-target parameters	Coherence, orbit and baseline accuracy, phase synchronization, registration and phase-unwrapping reliability, and maneuver and formation-safety constraints
LEO signals-of-opportunity positioning and electromagnetic emitter localization [61, 62, 64]	Select available signal sources or receiving nodes and their geometric combinations, and adjust measurement-sharing and fusion relationships.	Estimates of position, velocity, time, and integrity, as well as emitter position, trajectory, and spectral activity	Signal observability, correlated clock and ephemeris errors, synchronization trustworthiness, propagation errors, and short visibility windows
Event-driven agile observation [6, 70]	Initial detection triggers adjustment of subsequent observation nodes, observation times, payload modes, and information-transmission priorities.	Confirmed event location, extent, and evolution state, together with alerts or thematic information generated within the deadline	Detection confidence, onboard-processing and cue-transmission delay, matching with subsequent observation windows, false triggers, and resource competition
Successive multi-satellite target tracking [12, 134, 146]	Select subsequent observation nodes and viewing angles according to the predicted state and its uncertainty, and transfer track states across nodes.	A continuous target trajectory, motion-state estimates, and their uncertainty	Cross-satellite measurement association, target-maneuver models, intermittent observation windows, freshness of state information, and target-reacquisition capability

补充和结果回传形成跨窗口观测链 [66, 70, 134]. 因此, 平均重访时间不足以完整描述动态感知能力, 还应报告事件发现时间、确认时间、最大观测间隔、轨迹连续性、任务截止期满足率和结果可用时间. 局部提高某一区域的观测频率也可能占用姿态机动、下传窗口和后续任务机会, 因而需要在当前任务收益与长期观测计划之间进行比较 [6, 67, 148].

(4) 误差传播与处理链影响几何收益向任务结果的转化. 几何或量测信息的增加只有经过同步标定、数据配准、量测关联、反演或检测处理, 并在任务期限内形成可用结果, 才能构成实际感知收益. 轨道与基线误差、时钟和相位漂移、载荷偏差、跨模态配准误差以及错误关联, 都可能使理论上的信息增益无法转化为定位、成像或跟踪性能. HT-01 四星 InSAR 系统的精密基线确定、TanDEM-X 跨机构基线比较以及 GNSS 机会信号双基地 SAR 的地形相位补偿, 均表明误差需要沿处理链追踪至最终反演结果 [117~119]. 因此, 相关研究应同时报告几何或信息量指标、主要误差模型、配准或解算成功率、最终结果误差及结果形成时间. 仅凭理想条件下的误差下界、基线长度或量测数量, 不能充分证明多星重构优于固定构型或单星观测.

5.2　LEO 机会信号定位、导航增强与电磁辐射源定位

大规模 LEO 通信星座可以为定位、测速和授时提供传统 GNSS 之外的观测来源. 较低的轨道高度使部分 LEO 下行信号具有较高的接收功率, 大规模星座能够提供多个候选信号源, 快速轨道运动则带来显著的多普勒变化和持续更新的观测几何 [61, 62, 149]. 这些特征有利于在 GNSS 遮挡、干扰或欺骗条件下增加独立观测, 但也带来过境窗口短、频率变化快、星历与时钟误差敏感以及信号结构未必公开等困难 [63, 150, 151]. 因此, LEO 机会信号的价值并非简单来自可见卫星数量, 而取决于信号能否被稳定捕获、测量模型是否可信以及多星观测能否

形成可辨识的定位几何.

需要区分非合作式机会信号利用与合作式通信导航融合. 在非合作模式下, 接收机利用既有通信信号进行时延、多普勒或载波相位测量, 系统可以选择信号源、共享星历和时钟修正并调整融合位置, 但不能假设发射波形、导频或时频资源能够按定位需求改变. 在合作模式下, 可编程载荷可以为定位配置导频、同步信号或可分离资源, 并联合设计通信波束和定位观测 [151~153]. 可重构星群由此可以根据任务区域和接收条件选择候选卫星集合、确定观测共享路径和融合节点, 并在通信与定位资源之间进行协调. 这里的关键不是使用全部可见卫星, 而是选择能够改善几何条件且其时钟、星历和信号质量满足要求的观测集合.

电磁辐射源定位与 LEO 机会信号定位具有相似的多站几何基础, 但观测方向和先验条件不同. 机会信号定位通常利用位置和信号特征已知或部分已知的 LEO 节点估计用户状态; 辐射源定位则由多颗卫星接收未知或非合作信号, 利用到达时间差 (time difference of arrival, TDOA)、到达频率差 (frequency difference of arrival, FDOA)、相位差、到达角 (angle of arrival, AOA) 和频谱特征估计辐射源的位置、运动状态或活动范围 [64, 65, 154]. 由于非合作辐射源的发射资源不可控制, 星群重构主要作用于接收端, 包括选择观测卫星、安排同步观测窗口、确定局部估计与融合节点以及规划观测量的共享路径. 图 6 给出了观测节点选择、量测形成、跨星共享与融合定位的处理关系. 观测节点增加并不必然改善定位结果; 低信噪比量测、同步偏差、星历相关误差和错误信号关联都可能抵消几何增益.

该类任务的研究模型应显式给出可利用的信号类型、接收机可获得的测量量、星历与时钟误差、传播环境、观测窗口、星间信息交换量和结果截止期. 定位增强研究应在相同任务窗口下比较 GNSS 单独定位、全部可见 LEO 信号、固定或最高信噪比信号集合以及几何感知的动态选星策略; 辐射源定位则应比较单星观测、固定多星集合与动态观测集合. 前者应报告定位、测速与授时误差、完整性风险、可用性、连续性和抗干扰能力, 后者应报告检测概率、虚警率、辐射源定位误差、轨迹连续性和确认时间. 两类任务还应共同报告同步与星历误差、有效观测比例、信息交换开销和结果形成时间, 以检验动态几何选择和多星融合是否在任务期限内产生实际收益.

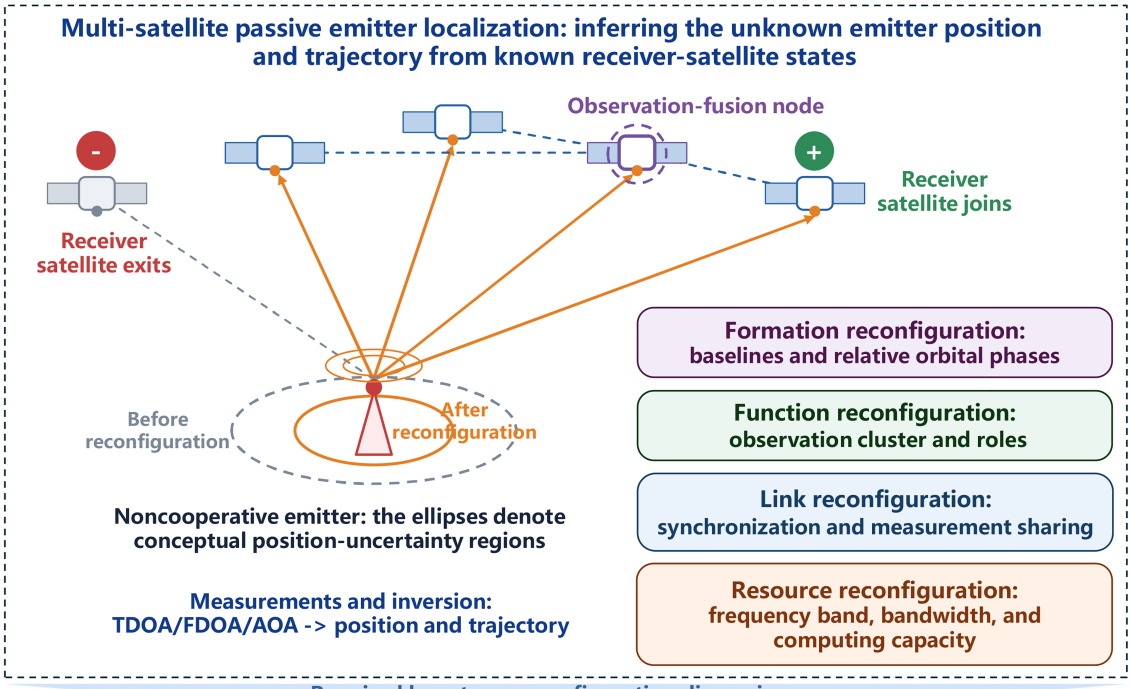
5.3　分布式 SAR/InSAR 与多基线观测

分布式 SAR, InSAR 和沿航迹干涉是星群几何直接进入测量模型的代表性应用 [32, 58, 60]. 不同任务对基线的需求并不相同: 横轨基线主要影响地形高程灵敏度、高程模糊度和几何去相关; 形变相位灵敏度主要由载波波长和视线方向投影决定, 重复轨道观测的时间基线则影响形变演化采样与时间去相关; 沿轨基线通过观测时间差影响运动目标和海表速度估计; 多基地与 MIMO-SAR 利用分离的收发节点扩展空间采样并改善模糊抑制能力 [32, 58, 115, 155]. 因此, 不存在适用于所有 SAR 任务的统一最优基线. 较大的横轨基线可以提高高程灵敏度, 却可能降低相干性并增加相位解缠难度; 较长的时间或沿轨间隔也可能因场景或目标状态变化产生去相关 [32, 58, 59].

可重构星群可以通过既有节点选择和真实构型调整两种方式获得任务所需的基线. 前者从当前可用卫星中选择收发节点和参考节点, 形成临时干涉组合, 并不改变实际轨道; 后者通过局部编队控制改变基线长度、方向及其稳定性, 属于严格意义上的构型重构 [59, 110]. 功能和资源调整还可以改变发射、接收、校准、处理与回传角色, 并安排不同基线观测的获取顺序. 静态地形允许在满足时间相干性的条件下跨窗口积累多基线观测, 海洋过程和运动目标则通常要求更严格的同步或近同时观测 [115, 134, 156]. 因此, 节点选择、基线调整和观测调度应根据目标动态特征分别设计, 而不能将多基线简单理解为增加观测次数.

基线收益能否转化为最终结果, 取决于相对轨道确定、时间与相位同步、载荷标定、图像配准、相位解缠和误差补偿构成的完整处理链. TanDEM-X 表明, 双星干涉测量依赖精确的编队基线与相位稳定性 [58]; GNSS 辅助的多基地 SAR 实验和 HT-01 四星系统分别说明了相位同步标定与精密基线确定的重要性 [60, 117]; TanDEM-X 跨机构基线比较和 GNSS 机会信号双基地 SAR 的地形相位补偿进一步说明, 不同轨道解算或误差校正方法会改变最终反演结果 [118, 119]. 因此, 基线长度、几何精度或理论误差下界只能作为中间指标, 不能替代对最终产品质量的验证.

该类研究应在相同任务窗口和安全约束下, 比较固定双星、固定基线、既有节点选择与主动构型调整等策



Processing stage	Primary reconfiguration dimension(s)	Supporting reconfiguration dimension(s)	Specific role
Window and state prediction	**None (state awareness)**	**Formation, link, and resource**	Predict coverage, baselines, SNR, and inter-satellite reachability, and determine whether multistation localization conditions are satisfied.
Baseline-feasibility assessment and conditional adjustment	**Formation**	**Function, link, and resource**	When necessary, adjust relative baselines, orbital phases, or payload boresights to improve measurement identifiability.
Receiver-satellite and role selection	**Function and link**	**Formation and resource**	Select interception, measurement, fusion, relay, and backup nodes and determine synchronization windows.
Synchronized interception and signal association	**Function and resource**	**Link and formation**	Configure receiver parameters and associate signals from the same source to form an observation set suitable for joint processing.
Measurement calibration and sharing	**Function and link**	**Resource and formation**	Extract TDOA/FDOA/AOA measurements, correct clock and orbit/attitude errors, and organize measurement-sharing paths.
Joint localization and closed-loop updating	**Function and resource**	**Link and formation**	Estimate position and trajectory, and update receiver satellites, observation windows, and fusion relationships according to residuals.

图 6　(网络版彩图) 可重构星群非合作辐射源定位中的观测关系重构与处理链.

Figure 6　(Color online) Reconfiguration of observation relationships and the processing chain for noncooperative emitter localization in reconfigurable satellite swarms.

略. 对于 DEM 和形变测量, 应报告高程或形变误差、相干性、配准与解缠成功率以及结果形成时间; 对于沿轨干涉和海洋观测, 应报告速度或流场误差、时间去相关和有效观测比例; 对于分布式 MIMO-SAR, 还应报告模糊抑制、空间采样完整性和跨星数据交换量. 所有任务均需同时给出机动量、基线保持开销、同步标定开销和后续任务机会损失. 只有当多基线设计改善最终反演结果, 并且其收益能够覆盖构型维持与处理代价时, 才能说明星群重构具有实际感知价值.

5.4　事件驱动敏捷观测与多星接续目标跟踪

事件驱动敏捷观测与多星接续跟踪均面向随时间演化的对象, 但前者关注异常事件从发现、确认到有效信息形成的过程, 后者关注离散观测条件下的状态递推与轨迹连续性. 二者的共同特征是, 当前观测结果会改变后续观测节点、观测时刻、载荷模式和信息传输优先级. 因此, 其核心并非单纯提高平均重访频率, 而是形成 “观测 – 状态更新 – 后续观测” 的闭环, 使有效信息在任务时限内形成并送达决策节点.

在事件驱动观测中, 当前可见卫星首先执行广域搜索、粗粒度观测或异常初检. 当检测置信度、事件影响范围或预期信息增益达到触发条件后, 系统将目标位置、候选区域、检测置信度和有效时限等提示信息传递给后续节点, 由其完成确认观测、高分辨率成像或多模态补充观测. 更新后的事件状态可继续触发观测区域、节点集合和下传优先级调整. 分布式自主观测与灾害监测研究已经体现了利用在轨观测结果更新后续任务的基本思路 [6, 7, 70]. 多星任务分配、重访优化和系统响应时间最小化则为节点选择与观测时序提供了算法基础 [148, 157, 158]. 但若观测结果未进入状态更新和后续决策, 这类方法仍属于预先规划或开环调度. 带在轨处理的敏捷卫星调度和海事目标自主监视进一步将观测结果、处理时延与后续任务联系起来, 更接近闭环观测的验证要求 [146, 159].

多星接续跟踪可视为上述闭环在状态估计任务中的延伸. 由于单颗低轨卫星的可见时间有限, 目标轨迹通常需要由不同卫星跨观测窗口接续维护. 每次观测不仅更新目标的位置、速度、姿态或轨道状态, 还更新目标存在概率、轨迹关联置信度和预测不确定度, 系统据此选择后续观测卫星及其时刻、视角和载荷模式. 空间目标光电跟踪和海面运动目标搜索研究表明, 多星观测可以利用不同视角和时间窗口改善状态估计与接续搜索条件 [12, 134, 146]. 但增加节点并不必然提高跟踪性能: 只有当新增量测能够及时完成配准和轨迹关联, 并提供足以抵消通信、处理和调度代价的独立信息时, 多视角观测才会产生有效增益; 过大的观测间隔、错误关联或迟到的目标提示反而可能造成轨迹分裂、估计偏移或目标丢失.

星群在每次状态更新后需要联合确定后续观测节点、观测时刻与视角、载荷与处理模式、跨星传递的信息以及状态融合位置. 既有几何选择限定候选视角和观测窗口, 链路与功能关系影响目标提示能否在后继窗口关闭前送达, 资源分配则影响驻留时间、成像分辨率、在轨处理和下传优先级. 因此, 更短的几何重访间隔并不等于更快的任务响应: 如果初检处理过慢, 或目标提示在后继窗口之后才到达, 该次重访便不能形成有效接续. 对于短时应急任务, 快速响应主要依赖节点选择、姿态与载荷调整、在轨处理和任务优先级重排; 真实轨道机动更适用于具有较长预见时间和持续高价值需求的区域性任务 [67].

相关研究应显式描述事件演化或目标运动模型、观测窗口、量测误差、检测与关联机制、姿态调整时间、在轨处理时延和提示信息传输时延, 并比较固定周期重访、预先规划的多星调度、地面重规划和在轨结果触发调度等基线. 事件驱动观测应重点报告发现与确认时间、虚警与漏检概率、决策可用时间和时限内任务完成率; 多星接续跟踪则应报告检测概率、轨迹关联正确率、状态估计误差、轨迹连续性和目标重捕获时间. 两类任务还应计入姿态或轨道调整、星间传输、在轨处理和任务替代代价. 只有当观测结果能够及时改变后续行动, 并在相同资源约束下改善最终任务指标时, 才能将性能提升归因于星群重构, 而非卫星数量或观测机会的增加. 表 11 归纳了这些问题的必要建模要素、对照基线和关键验证问题.

6　可重构星群计算

天基计算任务通常包含数据产生、链路传输、节点处理、状态维持、结果回传或闭环控制等环节. 可重构星群通过改变观测几何、星间通信图、节点角色、资源状态和任务运行状态, 影响输入数据价值、任务可达性、执行组织方式和系统收益边界, 不只是单星在轨处理能力的叠加或给定网络中的任务卸载. 可重构星群将多颗卫星的构型、链路、功能角色和资源状态共同纳入计算决策, 形成围绕数据流、模型流和任务状态动态组织算力、存储与链路的跨节点执行问题. 任务执行不仅要确定计算位置, 还要同时考虑采样几何、数据路径、临时计算簇、模型切分与同步、任务状态迁移以及结果回传或闭环控制. 其目标也从降低单次卸载时延, 扩展为在任务时限、链路窗口、能源热控、可靠性和安全约束下, 提高信息新鲜度、有效信息质量、吞吐能力、任务收益和服

表 11　可重构星群感知代表性问题的验证要素与关键验证问题.

Table 11 Validation elements and key validation questions for representative sensing problems in reconfigurable satellite swarms.

Representative problem	Required modeling elements	Comparison baselines	Task-level metrics	Key validation question
Multibaseline InSAR [58, 60]	Candidate baselines, coherence and decorrelation models, orbit/phase errors, and observation windows	A fixed two-satellite formation; baseline selection based only on geometric sensitivity	DEM/deformation errors, phase-unwrapping success rate, result latency, and reconfiguration cost	Beyond what baseline does decorrelation and error propagation offset the gain in geometric sensitivity?
Disaster cueing and guided observation [6, 70]	Event evolution, detection confidence, observation and contact windows, processing delay, and cue-transmission delay	Fixed periodic revisit; preplanned multi-satellite scheduling; ground replanning	Detection and confirmation time, false-alarm/miss rates, task completion rate within the deadline, and resource cost	Can cue information arrive before the subsequent window closes and actually shorten the time to decision-ready information?
LEO signal-of-opportunity positioning [61, 62]	Delay/Doppler measurements, correlated clock and ephemeris errors, the visible-signal set, and measurement availability	All visible signals; highest-SNR or geometry-only selection; GNSS-only	Positioning, velocity, and timing errors; integrity risk; continuity; measurement overhead	In the presence of correlated systematic errors, does adding signal sources still reduce the actual positioning error?
Successive multi-satellite target tracking [12, 134]	Target dynamics, detection and clutter models, association variables, observation windows, and state-transfer delay	Fixed revisit; satellite selection maximizing instantaneous information gain; ground updates	State-estimation RMSE, association accuracy, track-loss rate, reacquisition time, and resource cost	When is viewpoint information gain offset by association errors and information delay, and does the maximum instantaneous gain yield the best track continuity?

务连续性. 星群计算前移应以任务净收益为标准, 而非以在轨计算规模为目标, 例如云检测、异常筛选、任务导向信息压缩和事件触发下传等任务, 通常可通过轻量星上处理获得主要收益; 协同推理、联邦学习和轨道内任务链则需要更紧密的多星数据、模型与状态协同.

6.1　星群重构影响天基计算的基本机制

天基计算的有效能力体现为任务结果能否在截止期前形成并到达使用者, 而不是星群处理器算力的简单求和. 轨道运动使观测数据源、执行节点、星间路径和对地出口均随时间变化, 能源、热控和存储状态也限制任务能够在何处、何时执行. 因此, 星群重构主要通过输入信息价值、任务图映射、依赖数据传输和跨窗口状态连续性四个环节影响计算结果. 其共同判据是: 跨星处理产生的任务收益能否覆盖数据传输、窗口等待、状态维护和资源消耗, 并在任务时限内形成可用结果 [71, 160]. 表 12 [21, 74, 78, 79, 82, 83, 90, 161∼163] 概括了四类计算任务的关键决策、输出和成立条件.

可重构星群计算可描述为任务依赖图向时展接触图和节点资源状态的联合映射. 任务依赖图中的节点表示预处理、特征提取、推理、融合、聚合和结果生成等处理阶段, 连接关系表示原始数据、中间特征、模型参数和任务结果之间的先后依赖; 时展接触图则描述不同时刻可用的星间与星地连接. 计算重构需要确定各处理阶段的执行节点、依赖信息的传输方式与路径, 以及必要状态的保存位置, 并满足任务截止期、链路窗口、计算与缓存容量、能源热控和模型一致性约束 [21, 78].

(1) 输入信息价值与处理层级选择. 天基计算的输入通常来自观测、定位或目标跟踪过程, 其价值取决于数据对最终任务结果的贡献, 而非数据量本身. 星群几何影响观测视角、时空相关性和模态互补性, 从而改变输入数据的冗余程度与边际信息增益. 具有互补性的多星观测可能提高融合和推理收益, 重复或难以配准的数据则

表 12　可重构星群计算典型任务的关键决策、结果输出与成立条件.

Table 12 Key decisions, final outputs, and validity conditions of representative computing tasks in reconfigurable satellite swarms.

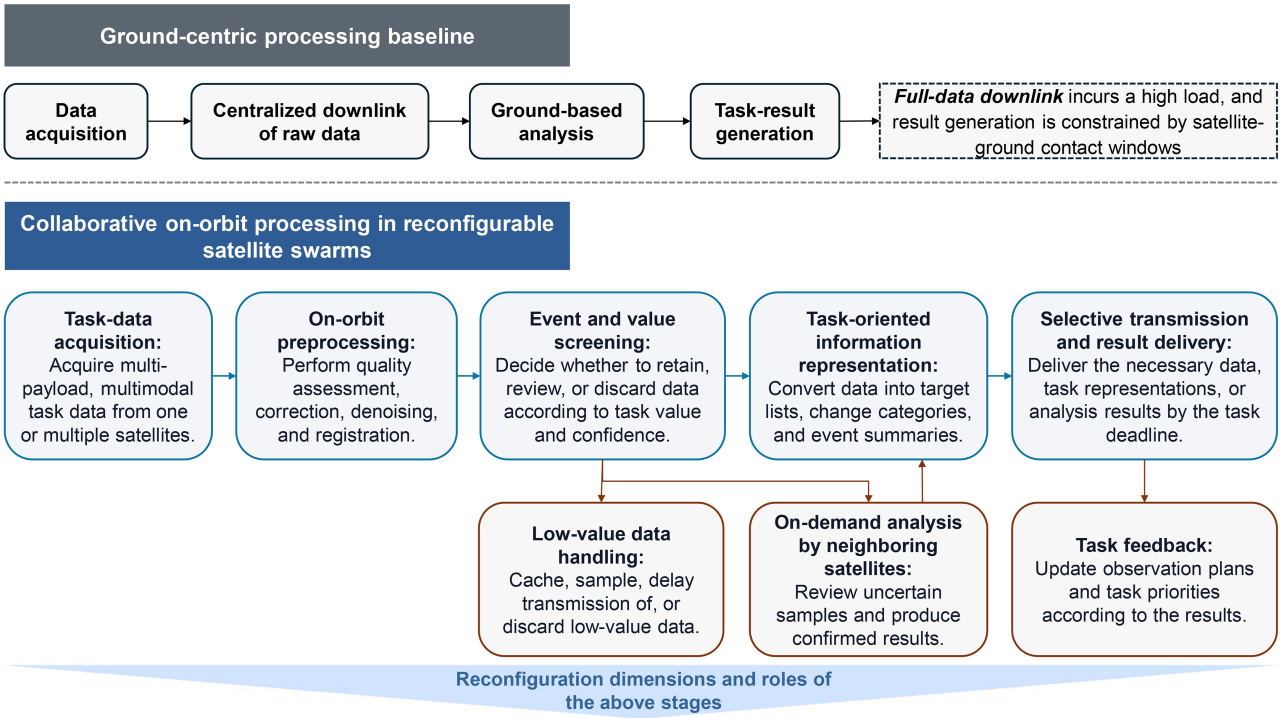
Computing task family	Key decisions induced by reconfiguration	Final task output	Main validity conditions and failure factors
On-orbit preprocessing, event screening, and task-oriented information compression [90, 161, 162]	Adjust processing location, screening threshold, representation granularity, and downlink priority according to data value and future windows.	Candidate targets, event alerts, and task-relevant features or summaries	Missed high-value events, data-distribution shifts, onboard-processing delay, and loss of task-relevant information after compression
Collaborative inference [78, 79]	Select participating nodes, the model-splitting or feature-fusion location, transmission paths for intermediate representations, and degradation modes.	Inference results and confidence generated within the task deadline	Intermediate-activation size, waiting caused by serial dependencies, node memory and energy, model-version mismatch, and node failure
Distributed model updating [82, 163]	Adjust participating nodes, aggregation nodes, parameter-propagation paths, update frequency, and parameter-compression methods.	A validated new model version and its cross-region adaptation capability	Non-IID data, parameter staleness, node dropout, compression errors, and anomalous updates
Task placement, state migration, and load balancing [21, 74, 83]	Adjust execution nodes, model and cache locations, checkpoint distribution, migration timing, and load-transfer relationships.	Task results generated on time and execution continuity across windows	State size, future contact duration, task-initialization overhead, energy/thermal constraints, and migration-failure risk

会增加处理与传输负担. 因此, 计算决策应同时回答哪些数据值得保留、应在何处完成筛选或特征提取, 以及原始数据、特征还是任务结果更值得传输. 在轨压缩、检测和分类研究表明, 部分处理可以前移至观测节点 [14, 87], 但处理层级的选择仍应由最终检测、估计或决策质量验证, 而不能仅以数据压缩率或计算时延评价.

(2) 任务图映射与执行角色调整. 星群节点在处理能力、存储空间、能源、热余量、载荷状态和对地窗口方面具有明显差异, 且节点与数据源、后续处理节点和回传出口之间的关系随轨道运动变化. 星群计算因而需要将预处理、推理、融合、聚合和回传等阶段分配给适当节点, 并根据未来接触关系和资源状态调整执行位置 [21, 78]. 处理器性能最高或距离数据源最近的节点未必是最佳选择: 如果其后续链路无法及时承载中间结果, 或缺少可用对地窗口, 局部计算加速可能无法缩短结果形成时间. 有效计算能力应由任务依赖的可满足程度和截止期内形成的结果衡量, 而不是由参与节点数量或峰值算力衡量.

(3) 接触窗口约束下的依赖信息传输. 任务图中的前后依赖只有通过可实现的数据路径才能转化为连续执行过程. 原始数据、中间特征、模型参数和部分结果在数据规模、时效要求及任务价值上存在差异, 其传输决策应同时考虑链路容量、接触窗口、队列状态、多跳等待和后续执行位置 [19, 76]. 远端节点即使具有更强算力, 也可能因等待下一次接触或多跳转发而晚于本星处理完成任务; 过度切分任务还会增加排队、重传和同步开销. 因此, “函数在哪里执行” 必须与 “依赖信息以何种形式、沿何种路径传输” 联合决定. 只有当传输中间表示能够在保持任务信息的同时减少数据量或缩短结果形成时间时, 跨星任务切分才具有实际收益.

(4) 任务状态与跨窗口连续性. 对于连续推理、目标跟踪、分布式学习和多阶段处理, 任务往往跨越多个接触窗口, 其可用性取决于模型版本、缓存数据、中间结果、任务进度和必要检查点能否保持一致. 当执行节点、链路或对地出口发生变化时, 系统需要在状态复制、迁移、局部恢复和重新执行之间选择. 状态依赖程度较高的任务可能因同步与迁移开销失去跨星执行收益, 而可独立重启或仅依赖少量检查点的任务更适合随窗口变化调整执行节点. 卫星流式分析、任务调度和星群联邦学习研究已经揭示移动执行位置与模型更新面临的连续性约束 [19, 21, 82], 但跨窗口状态恢复、版本冲突和节点失效后的任务损失仍缺少充分的在轨证据. 因此, 星群计算收益应以任务截止期内结果的可用性为准, 并计入窗口等待、依赖信息传输和状态维护代价, 而不能仅依据处理加



Processing stage	Primary reconfiguration dimension(s)	Supporting reconfiguration dimension(s)	Specific role
Task-data acquisition	**Function and resource**	**Formation and link**	Assign acquisition roles and payload modes; configure observation time slots, power, and energy. For multi-satellite observation, select the observation cluster and geometry and exchange task commands and synchronization information.
On-orbit preprocessing	**Function and resource**	**Link**	Determine whether preprocessing is performed by the acquisition satellite or a neighboring satellite; allocate computing capacity, cache, model replicas, and energy/thermal margins. The data path changes only when cross-satellite offloading is used.
Event and value screening	**Function and resource**	**Link and formation**	Assign initial-screening, review, and disposal roles; configure models, computing capacity, cache, and retention priorities. Cross-satellite review requires links, while formation is affected only when follow-up observations are triggered.
Task-oriented information representation	**Function and resource**	**Link**	Determine where feature extraction, fusion, and summary generation are performed; configure models, computing capacity, and cache. Distributed fusion requires transmission of intermediate features.
Selective transmission and result delivery	**Link and resource**	**Function**	Select inter-satellite paths, gateways, and downlink links; configure bandwidth, time slots, cache, and downlink priorities. Reassign relay, aggregation, and downlink roles when necessary.

图 7　(网络版彩图) 可重构星群中的在轨预处理、事件筛选与任务导向信息压缩流程.

Figure 7　(Color online) Workflow of on-orbit preprocessing, event screening, and task-oriented information compression in reconfigurable satellite swarms.

速比、峰值算力或参与节点数量判断.

6.2　在轨预处理、事件筛选与任务导向信息压缩

图 7 展示了在轨预处理、事件筛选与任务导向信息压缩由数据规整、价值判定到选择性传输的递进关系. 在轨预处理主要完成质量评估、校正、去噪和轻量特征提取; 事件筛选依据云覆盖、目标候选、变化区域或异常活动决定哪些数据需要保留、下传或触发后续处理; 任务导向信息压缩则将原始数据转换为目标列表、变化图斑、分割掩膜、中间特征或事件摘要, 并以保持下游检测、估计和决策性能为约束, 而非仅追求像素级重建质量. 三者共同将传统 “采集 – 全量下传 – 地面处理” 转变为 “采集 – 在轨分析 – 选择性传输或任务触发”, 从而减少

低价值数据占用的下传资源并缩短高价值信息的形成时间 [14,164].

该类处理适用于原始数据规模较大、价值分布稀疏、任务时效性较强、处理结果显著小于输入, 且误筛风险能够通过分级确认或原始数据保留加以控制的任务. CloudScout, OPS-SAT 和 PhiSat-2 相关研究分别报告了在轨云检测、图像分类和图像压缩的单星任务证据 [87,90,162]. 这些结果表明轻量模型和数据筛选能够在受限星载硬件上运行, 但尚不能据此推断跨星处理位置调整、任务状态传递和多节点协同处理已具备普遍的在轨可行性. OrbitChain 和 EarthSight 等研究进一步探索了实时或分布式卫星数据分析 [97,161], 其证据主要来自系统架构与实验性验证.

对于可重构星群, 关键不只是把处理模型部署到卫星上, 而是动态决定三个问题: 数据在采集星本地、邻近处理节点还是地面处理, 原始数据、区域切片、中间特征或事件结果中的哪一种表示值得传输, 以及处理结果应立即下传还是触发后续观测. 相关决策需要联合考虑数据位置、任务截止期、未来星间和星地窗口、节点计算能力、能源热余量及传输数据规模 [19,21]. 算力更强的邻近节点未必优于采集星本地处理; 如果原始数据转移需要等待后续接触窗口, 或中间特征传输量并未明显降低, 跨星处理反而可能延迟结果形成.

在时效敏感任务中, 采集星可以先完成低复杂度初筛, 并将候选区域、事件类型、时间戳、置信度和必要特征传递给后续处理或观测节点, 由其进行确认、融合或高分辨率补充观测. 对于置信度不足或漏检代价较高的数据, 系统应保留原始数据、降低筛选阈值或安排后续复核, 而不能不可逆地丢弃观测结果. 由此, 筛选阈值应由事件先验、错误代价、剩余下传机会和后继观测窗口共同决定, 而不能仅依据分类准确率设定. 信息效用驱动的传输与分布式自主观测研究为这种任务相关的数据选择提供了初步依据 [6,98].

该类方法的评价应同时覆盖模型性能、任务结果和系统代价. 除精确率、召回率和压缩率外, 还应报告高价值事件漏失率、有效信息形成时间、下传数据量、星上处理开销以及不同数据分布下的性能变化 [14,164]. 对于任务导向信息压缩, 压缩后数据量减少并不等同于计算收益; 只有当下游检测、估计或决策质量得到保持, 并且高价值结果更早到达所需节点时, 处理前移和选择性传输才产生实际任务价值.

6.3　协同推理与分布式模型更新

协同推理解决一次推理任务如何由多个节点共同完成, 分布式模型更新则解决不同节点积累的数据如何用于模型持续适配. 二者均涉及模型参数、中间特征和版本状态的跨星或星地传输, 但时间尺度与评价目标不同: 协同推理强调任务截止期内的结果质量与可用时间, 模型更新更关注达到目标性能所需的实际时间、通信代价及更新后的模型一致性. 随着遥感基础模型和多模态模型逐步进入天基应用, 模型规模与星载资源之间的矛盾更加突出 [165]. 近期预印本报告了地理空间基础模型的单星在轨演示 [166], 但这一证据尚不足以推断跨星模型切分、长期分布式训练或模型更新已经获得系统级收益.

协同推理可采用三种基本形态: 采集星利用轻量模型独立完成筛选或初步判断; 不同节点顺序执行模型的不同部分并传递中间激活; 多个节点分别处理不同视角或模态的数据, 再融合特征或推理结果. 模型切分和协同推理研究已经开始考虑动态任务流及星间链路条件 [78,79]. 其关键不是把模型平均分配给更多卫星, 而是选择能够在任务窗口内维持的执行结构. 切分位置需要同时考虑各层计算量、中间激活规模、节点内存、星间可用窗口、能源热余量和故障后的降级路径. 若中间激活的传输量接近甚至超过原始输入, 或任一前序节点和链路的等待时间过长, 跨星切分可能晚于本星推理或直接下传地面处理. 因而, 近期更可行的形态是由少量相邻节点组成局部协作集合, 并保留本星轻量推理或地面处理作为降级方式.

分布式模型更新主要利用卫星在不同区域、时段和载荷条件下积累的数据, 在不集中传输全部原始样本的情况下完成模型适配. 卫星数据通常具有明显的空间、时间和模态差异, 节点可用窗口、计算能力和能源状态也不一致, 使固定参与节点和同步聚合容易受到等待时间与非独立同分布数据的共同影响. 现有研究已分别讨论星地协同联邦学习 [167]、异构低轨卫星网络中的联邦学习 [163] 以及利用星间链路开展星簇内模型聚合 [82]. 在此基础上, 可重构星群能够根据数据价值、未来接触窗口和节点状态调整参与节点、聚合节点、参数传播路径及更新频率. 参数量化可以降低星地更新开销 [80], 局部或轨道内聚合则有望减少对地面窗口的等待, 但其收益仍取决于模型精度损失、聚合时延和节点掉线情况.

模型更新完成参数聚合, 并不意味着新模型已经能够被星群一致使用. 断续连接可能使不同节点长期运行不同版本, 进而造成跨星特征不兼容、融合结果偏移或同类观测产生不可比较的输出. 对于切分推理, 上下游模型版本不匹配还可能直接破坏中间表示之间的对应关系. 因此, 模型更新需要记录模型版本、适用数据范围、聚合时间和验证结果, 并规定节点在无法获得最新版本时继续使用旧模型、执行局部更新还是回退到基础模型. 异常更新隔离、更新前后性能验证及版本不一致条件下的任务降级, 应作为星群分布式学习的研究问题, 而不能默认每次聚合都能稳定提高模型性能. 现有研究主要提供算法收敛和通信效率证据, 对跨窗口版本冲突、真实星载处理时间和更新失败后的恢复过程仍缺少充分验证.

协同推理应与本星独立推理、原始数据下传后地面推理和固定模型切分进行比较, 报告任务精度、结果可用时间、中间数据传输量、截止期满足率和能源热控开销. 分布式模型更新则应与地面集中训练和固定参与节点的同步联邦学习比较, 报告达到目标性能所需的实际时间、累计通信量、模型陈旧度、节点退出后的性能变化和跨节点版本一致性. 增加协作节点未必提高推理或训练收益: 协同推理可能受串行等待和中间激活传输限制, 分布式更新则可能受慢节点、数据偏差和陈旧参数影响. 只有当动态节点选择与模型组织在相同任务窗口和资源预算下改善最终模型性能或结果时效时, 才能将收益归因于星群重构.

6.4　卫星边缘计算中的任务放置、状态迁移与负载均衡

卫星边缘计算研究最初主要讨论任务在终端、卫星和地面之间的卸载与资源分配, 以降低处理时延、通信开销和能源消耗 [168, 169]; 随后进一步考虑卫星移动性、星间协作和边缘计算原型 [74, 170]. 与一次性卸载不同, 可重构星群需要在多个接触窗口内动态确定任务执行位置, 并在执行节点、星间路径或对地出口变化时保持必要状态. 因此, 其核心问题不是当前任务由哪颗卫星执行, 而是任务及其状态能否沿未来可用窗口持续推进, 并在截止期前形成可交付结果.

任务迁移的代价取决于需要随执行位置转移的状态. 可独立重启的任务通常只需模型、输入数据和运行参数, 能够在节点变化后重新执行; 依赖有限中间结果的任务还需保存缓存和检查点; 持续融合、迭代优化或在线学习任务则可能要求较大状态量和更严格的一致性. 对于后一类任务, 将计算转移到当前空闲节点并不一定有利, 因为状态传输、任务初始化和结果回传可能占用大部分剩余窗口. 只有当目标节点的未来可达时间足以覆盖状态迁移、剩余计算和结果传输, 并且节省的等待或处理时间超过迁移代价时, 任务迁移才具有实际意义. 卫星边缘计算原型和空天地任务调度研究为动态执行提供了系统级探索 [170, 171], 但尚未充分证明复杂任务状态能够在真实星间窗口下稳定迁移.

任务放置与迁移具有明显的多时间尺度特征. 模型参数、执行环境和长期缓存的数据量较大, 适合依据轨道周期、区域业务分布和对地窗口进行较慢调整; 模型副本、任务检查点和聚合节点可根据未来若干接触窗口更新; 任务队列、链路带宽和计算资源则需要随短时负载变化快速分配. 服务部署与任务调度、缓存与资源分配的双时间尺度研究已经体现了这种差异 [21, 102]. 若只根据当前时隙优化, 容易选择短期算力充足但后续不可达的节点, 造成状态重复迁移、任务队列阻塞或结果错失对地窗口. 因此, 慢时间尺度决策应提供相对稳定的模型与状态分布, 快时间尺度决策则在该基础上调整任务执行和数据路径.

星间负载均衡也不应以处理器利用率或队列长度趋于一致为唯一目标. 某颗卫星当前负载较低, 可能是因为其即将失去星间连接或对地窗口; 将任务迁移到该节点虽然改善了瞬时负载分布, 却可能增加状态传输、后续等待和结果回传时延. 负载转移需要联合考虑任务截止期、剩余计算量、待迁移状态规模、链路保持时间、后续转发路径、能源热余量和对地可达性 [74, 172]. 因此, 更有意义的评价对象是各节点在未来窗口内能够完成并交付的任务量, 而非某一时刻的计算占用. 对于高优先级任务, 系统还应保留本星继续执行、任务复制或地面接管等降级方式, 避免负载均衡操作本身增加任务失败风险.

现有卫星边缘计算原型 [170]、低轨无服务器计算平台 [135]、计算结果复用机制 [173] 和空天地任务调度研究 [171] 分别在原型、测试数据或仿真环境中探索了任务部署、调度与复用的部分环节, 尚不足以证明跨星状态迁移和长期负载均衡的在轨可靠性. 相关验证应显式给出接触窗口、任务截止期、状态规模、初始化时间、节点队列、能源热状态和链路中断条件, 并与固定计算节点、仅依据队列的负载均衡以及不迁移状态的动态卸载进

表 13　可重构星群计算代表性问题的验证要素与关键验证问题.

Table 13 Validation elements and key validation questions for representative computing problems in reconfigurable satellite swarms.

Representative problem	Required modeling elements	Comparison baselines	Task-level metrics	Key validation question
Cross-satellite task-graph mapping [21, 78]	Task-dependency graph, time-expanded graph, per-stage computation, intermediate-data size, state size, and deadlines	Local processing; ground processing after full-data downlink; fixed computing nodes	Time to result availability, deadline satisfaction rate, inter-satellite traffic, and energy/thermal overhead	Under what contact-window and intermediate-data-size conditions are remote-computing gains offset by waiting and transmission costs?
On-orbit event screening [90, 161]	Event priors, detection-score distributions, error costs, processing delay, downlink windows, and data-distribution shifts	Full-data downlink; fixed screening threshold; fixed retention ratio	High-value-event recall, miss rate, downlink data volume, and time to result availability	Under what event-miss cost and future-window conditions should the screening strategy approach full retention?
Collaborative inference [78, 79]	Per-stage computation and memory, intermediate-activation size, model-accuracy loss, contact windows, and node failures	An onboard lightweight model; ground-based deep inference; fixed model splitting	Task accuracy, time to result availability, activation traffic, deadline satisfaction rate, and degradation loss	At what intermediate-activation size or link-interruption risk does multi-satellite model splitting cease to yield a net benefit?
Distributed model updating [82, 163]	Non-IID data, participation windows, local computation, update size, parameter staleness, and node dropout	Centralized ground training; synchronous federated learning with fixed participants; independent per-satellite updates	Elapsed time to reach the target accuracy, cumulative communication volume, worst-node performance, and model staleness	At what degree of data heterogeneity or parameter staleness does adding participating nodes slow model improvement?
State migration and load balancing [21, 74]	Task queues, state and checkpoint sizes, re-execution costs, future contacts, energy/thermal states, and fault conditions	Fixed execution nodes; queue-only migration; re-execution after failure	Deadline satisfaction rate, time to result availability, migrated-state volume, duplicate computation, and loss due to migration failure	Is the future reachability of the target node sufficient to cover state migration, remaining computation, and result transmission?

行比较. 评价指标应包括截止期满足率、结果可用时间、状态迁移量、重复计算量、迁移失败后的任务损失以及能源热控开销. 只有当负载转移提高了任务完成与结果交付能力, 而非仅使计算资源占用更加均匀时, 才能认为星间负载均衡产生了有效收益. 表 13 给出了相应的验证要素与关键验证问题.

7　总结与展望

本文围绕可重构星群中的通信、感知与计算, 讨论了概念边界、四个耦合重构维度、运行架构、共性技术基础及三类任务中的作用机制. 可重构星群把多星几何构型、星间链路、功能角色和多域资源纳入任务决策, 并对调整代价、风险与任务收益进行闭环比较. 构型重构影响真实相对位置、观测基线和物理相位中心; 链路重构影响服务节点连接、星间与星地链路、路由和网关接续; 功能重构改变节点在观测、接入、中继、计算、聚合、控制和备份中的职责; 资源重构调整频谱、功率、波束、时隙、缓存、计算资源、模型副本、能源、热余量和机动预算. 四者相互耦合, 共同塑造星群在有限任务窗口内形成所需能力的边界.

从通信角度看, 可重构星群将低轨卫星通信问题从给定星座上的资源分配, 扩展为面向用户、区域和任务的多星通信组织问题. 多星几何影响传播距离、仰角、多普勒、波束驻留时间和可见窗口, 服务星簇影响覆盖弹

性、接入保持时间和热点区域容量, 协同孔径影响空间自由度、用户分离能力和分布式 MIMO 潜力, 干扰图与链路图重构则约束频谱复用、端到端时延、网关拥塞和服务连续性. 未来可重构星群通信应从理想全网强协作转向几何约束下的分级局部协作, 在单星服务、选择/切换协作、非相干多点协作、半相干协作和强相干分布式 MIMO 之间建立清晰的任务适配关系. 尤其在手机直连、卫星物联网、区域热点增强、应急通信和星间骨干路由等场景中, 系统设计应同时评价覆盖、容量、接入成功率、切换中断、端到端时延、星间带宽占用、同步开销和协同净收益.

从感知角度看, 可重构星群将天基感知从单次观测优化推向跨窗口、跨节点、跨模态的信息获取链优化. 观测几何影响干涉基线、视角分布、几何精度因子和目标可辨识性; 多视角、多基线和多模态观测可以提高信息互补性与不确定度压缩能力; 重访序列和接续观测影响动态事件、灾害演化、海事目标、空间目标和电磁异常的有效信息形成速度; 数据关联、在轨处理和特征共享进一步影响观测结果能否转化为 DEM、形变场、定位结果、目标轨迹和态势告警等输出. 未来可重构星群感知应围绕 “几何、测量、处理、结果” 闭环展开, 重点发展任务驱动基线设计、动态几何选择、协同标定、提示与引导式观测、多源融合、在轨初筛和结果级验证机制. 对于分布式 SAR/InSAR、LEO 机会信号定位、辐射源定位、事件驱动敏捷观测和空间态势感知等任务, 评价指标应从单幅图像质量或单次定位误差扩展到信息新鲜度、连续可用性、重访价值、轨迹不确定度、告警时效和任务窗口内有效信息增益.

从计算角度看, 可重构星群把天基计算由单次任务分配扩展到数据流、模型流与任务状态的跨窗口组织. 数据采集几何影响输入数据的冗余度、互补性和边际信息价值; 通信图与数据路径约束原始数据、中间特征、模型参数和结果能否在截止期内到达所需节点; 分布式计算资源与功能角色影响预处理、主计算、聚合、备份和回传的执行位置; 任务状态迁移影响模型版本、缓存、依赖项、队列和运行状态能否在断续链路下保持可用. 近期在轨验证应优先面向云检测、质量评估、目标候选生成、变化发现、异常筛选、任务导向信息摘要和事件触发下传等高时效、高链路代价、强数据位置依赖任务. 协同推理、模型切分、分布式训练和在轨联邦学习则需要重点处理模型版本一致性与可信更新、中间激活传输、异步聚合、模型陈旧度、异常更新检测和安全恢复. 其合理定位是补充地面处理, 为高价值、强时效任务提供新的执行位置与组织方式.

面向未来, 可重构星群仍需在理论、实现与验证三个层面推进. 理论层面, 需要建立能够同时表达连续轨道动力学、离散链路图、任务依赖图、资源状态图和任务运行状态的统一表征. 实现层面, 需要发展高精度相对导航、跨星授时同步、协同标定、星间高速互联、光链路指向捕获跟踪、可编程再生载荷、星群任务运行机制、任务状态迁移、模型版本一致性与可信更新、能源热控、安全韧性和可信恢复等共性能力, 其中星群操作系统可以作为任务运行机制的一种实现形式. 验证层面, 需要构建覆盖轨道、链路、载荷、任务状态、能源、热控、安全和任务质量的开放基准、数字孪生环境、半实物试验和小规模在轨验证. 近期可优先选择多星 InSAR、小规模协同传输、手机直连增强、灾害应急提示与引导观测、海事或空间目标接力跟踪、在轨事件筛选、局部协同推理和轨道内模型更新等目标清晰、重构范围可控的代表性验证任务, 逐步形成同步标定、星间网络、任务描述、轻量任务运行、模型版本存储与分发、策略恢复、数字孪生和开放基准等共性支撑机制, 再向跨轨协同、跨模态融合、星地协同、多任务并发与有限自治重构扩展.

参考文献

1 Zhang Q, Xu L, Huang J, et al. Distributed satellite information networks: architecture, enabling technologies, and trends. Sci China Inf Sci, 2025, 68: 190301

2 Hu H, Lyu Y, Song K, et al. An efficient two-stage networking topology design for mega-constellation of low earth orbit satellites. IEEE Trans Mobile Comput, 2025, 24: 6333–6347

3 Chen S Z, Sun S H, Kang S L, et al. Key technologies of 6G space-ground integrated mobile communication. Sci Sin Inform, 2024, 54: 1177–1214 [陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G 星地融合移动通信关键技术. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 1177–1214]

4 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (release 16). Technical Report TR 38.811, 3GPP, 2020

5 Kandepi R, Saini H, George R K, et al. Agile earth observation satellite constellations scheduling for large area target imaging using heuristic search. Acta Astronaut, 2024, 219: 670–677

6 Nag S, Moghaddam M, Selva D, et al. Soil moisture monitoring using autonomous and distributed spacecraft (d-shield). In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, 2021. 1474–1475
7 Nag S, Moghaddam M, Selva D, et al. D-SHIELD: distributed spacecraft with heuristic intelligence to enable logistical decisions. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, 2020. 3841–3844
8 Yin Z, Wu C, Guo C, et al. A comprehensive survey of orbital edge computing: systems, applications, and algorithms. Chin J Aeronautics, 2025, 38: 103316
9 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. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2022, 60: 1–14
10 Tuzi D, Delamotte T, Knopp A. Satellite swarm-based antenna arrays for 6G direct-to-cell connectivity. IEEE Access, 2023, 11: 36907–36928
11 Centenaro M, Costa C E, Granelli F, et al. A survey on technologies, standards and open challenges in satellite IoT. IEEE Commun Surv Tutorials, 2021, 23: 1693–1720
12 Hussain K F, Thangavel K, Gardi A, et al. Passive electro-optical tracking of resident space objects for distributed satellite systems autonomous navigation. Remote Sens, 2023, 15: 1714
13 Wang S, Li Q. Satellite computing: vision and challenges. IEEE Internet Things J, 2023, 10: 22514–22529
14 Ruan N, Li K, Zhang Q, et al. Edge AI for Earth observation. IEEE Internet Comput, 2025, 29: 31–40
15 Jung D H, Im G, Ryu J G, et al. Satellite clustering for non-terrestrial networks: concept, architectures, and applications. IEEE Veh Technol Mag, 2023, 18: 29–37
16 Lin Z, Ni Z, Kuang L, et al. Multi-satellite beam hopping based on load balancing and interference avoidance for NGSO satellite communication systems. IEEE Trans Commun, 2023, 71: 282–295
17 Kim S, Choi I, Lee Y, et al. Multi-gateway feeder link switching optimization in multi-shell LEO mega-constellations. IEEE Trans Commun, 2026, 74: 2857–2873
18 Gao G, Yao L, Li W, et al. Onboard information fusion for multisatellite collaborative observation: summary, challenges, and perspectives. IEEE Geosci Remote Sens Mag, 2023, 11: 40–59
19 Xu Z, Xu G, Wang H, et al. Enabling streaming analytics in satellite edge computing via timely evaluation of big data queries. IEEE Trans Parallel Distrib Syst, 2024, 35: 105–122
20 Bhandari S, Vu T X, Chatzinotas S. User-centric flexible resource management framework for LEO satellites with fully regenerative payload. IEEE J Sel Areas Commun, 2024, 42: 1246–1261
21 Tang Q, Xie R, Fang Z, et al. Joint service deployment and task scheduling for satellite edge computing: a two-timescale hierarchical approach. IEEE J Sel Areas Commun, 2024, 42: 1063–1079
22 Chen Q, Guo Z, Meng W, et al. A survey on resource management in joint communication and computing-embedded SAGIN. IEEE Commun Surv Tutorials, 2025, 27: 1911–1954
23 Liu G P, Zhang S. A survey on formation control of small satellites. Proc IEEE, 2018, 106: 440–457
24 Lei C, Feng W, Wei P, et al. Edge information hub: orchestrating satellites, UAVs, MEC, sensing and communications for 6G closed-loop controls. IEEE J Sel Areas Commun, 2025, 43: 5–20
25 Wen D, Zhou Y, Li X, et al. A survey on integrated sensing, communication, and computation. IEEE Commun Surv Tutorials, 2025, 27: 3058–3098
26 Zuo Y, Yue M, Yang H, et al. Integrating communication, sensing and computing in satellite internet of things: challenges and opportunities. IEEE Wireless Commun, 2024, 31: 332–338
27 Golkar A, Lluch i Cruz I. The federated satellite systems paradigm: concept and business case evaluation. Acta Astronaut, 2015, 111: 230–248
28 Farrag A, Othman S, Mahmoud T, et al. Satellite swarm survey and new conceptual design for Earth observation applications. Egypt J Remote Sens Space Sci, 2021, 24: 47–54
29 Higashimori K, Inoue T. Dynamic topology control of LEO satellite networks for non-uniformly distributed traffic. In: Proceedings of IEEE Global Communications Conference, Cape Town, 2024. 3027–3032
30 Kristiansen R, Nicklasson P J. Spacecraft formation flying: a review and new results on state feedback control. Acta Astronaut, 2009, 65: 1537–1552
31 He Y, Yang P, Man Y, et al. Spatial ultra-sparse array formation on LEO distributed satellite cluster: an enhanced hybrid particle swarm method. IEEE J Sel Top Signal Process, 2025, 19: 447–460
32 Krieger G, Hajnsek I, Papathanassiou K P, et al. Interferometric synthetic aperture radar (SAR) missions employing formation flying. Proc IEEE, 2010, 98: 816–843
33 Yahia O B, Garroussi Z, Bélanger O, et al. Evolution of high-throughput satellite systems: a vision of programmable regenerative payload. IEEE Commun Surv Tutorials, 2025, 27: 1565–1597
34 Yu D Y, Li Z L, Song G P, et al. Development of mega-constellation operating systems in China. Sci Sin Inform, 2024, 54:

449–460 [于登云, 李宗凌, 宋桂萍, 等. 我国巨型星座操作系统发展研究. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 449–460]
35 Hua M, Wu Q, Chen W, et al. Integrated sensing and communication: joint pilot and transmission design. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 16017–16032
36 Schlanbusch R, Kristiansen R, Nicklasson P J. Spacecraft formation reconfiguration with collision avoidance. Automatica, 2011, 47: 1443–1449
37 Ron D, Yusufzai F A, Kwakye S, et al. Time-dependent network topology optimization for LEO satellite constellations. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications, London, 2025. 1–10
38 Shen B, Wu Y, Gong S, et al. Massive MIMO-OTFS-based random access for cooperative LEO satellite constellations. IEEE J Sel Areas Commun, 2025, 43: 90–106
39 Shen B, Wu Y, Zhang W, et al. LEO satellite-enabled random access with large differential delay and Doppler shift. IEEE Trans Wireless Commun, 2025, 24: 2876–2893
40 Zhang Y, Wu Y, Liu A, et al. Deep learning-based channel prediction for LEO satellite massive MIMO communication system. IEEE Wireless Commun Lett, 2021, 10: 1835–1839
41 Bhattacharjee D, Chaudhry A U, Yanikomeroglu H, et al. Laser inter-satellite link setup delay: quantification, impact, and tolerable value. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Glasgow, 2023. 1–6
42 He Y, Wang C, Qi C, et al. Spatial ultra-sparse distributed antenna satellite-ground cooperative transmission architecture: challenges, key technologies, and trends. IEEE Commun Mag, 2024, 62: 136–143
43 Bacci G, Gaudenzi R D, Luise M, et al. Formation-of-arrays antenna technology for high-throughput mobile nonterrestrial networks. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2023, 59: 4919–4935
44 Zheng Z, Jing W, Lu Z, et al. Cooperative multi-satellite and multi-RIS beamforming: enhancing LEO SatCom and mitigating LEO-GEO intersystem interference. IEEE J Sel Areas Commun, 2025, 43: 279–296
45 Chen X, Luo Z. Asynchronous interference mitigation for LEO multi-satellite cooperative systems. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 14956–14971
46 Zhang P, Xian Z, Liao M, et al. Adaptive routing mechanism for LEO satellite network based on control domain partition. IEEE Trans Green Commun Netw, 2025, 9: 70–82
47 Wang R, Kishk M A, Alouini M S. Ultra reliable low latency routing in LEO satellite constellations: a stochastic geometry approach. IEEE J Sel Areas Commun, 2024, 42: 1231–1245
48 Qin X, Ma T, Tang Z, et al. Service-aware resource orchestration in ultra-dense LEO satellite-terrestrial integrated 6G: a service function chain approach. IEEE Trans Wireless Commun, 2023, 22: 6003–6017
49 Zhang Z, Wu Y, Ma Z, et al. Coordinated multi-satellite transmission for OTFS-based 6G LEO satellite communication systems. IEEE J Sel Areas Commun, 2025, 43: 156–170
50 Bakhsh Z M, Omid Y, Chen G, et al. Multi-satellite MIMO systems for direct satellite-to-device communications: a survey. IEEE Commun Surv Tutorials, 2025, 27: 1536–1564
51 R?per M, Matthiesen B, Wübben D, et al. Distributed downlink precoding and equalization in satellite swarms. 2022. ArXiv:2205.11180
52 Sun Y H, Peng M G. Low-earth-orbit satellite communications for direct-to-smartphone: key technologies, development status, and future prospects. Telecommun Sci, 2023, 39: 25–36 [孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望. 电信科学, 2023, 39: 25–36]
53 He Y, Xiao Y, Zhang S, et al. Direct-to-smartphone for 6G NTN: technical routes, challenges, and key technologies. IEEE Netw, 2024, 38: 128–135
54 Ren Q, Li Y, Zhang Z, et al. OTFS-SDMA for massive grant-free random access in LEO satellite Internet of Things. IEEE Trans Wireless Commun, 2025, 24: 6902–6916
55 Zhang Y, Lagunas E, Chatzinotas S, et al. Handover-aware power minimization for networked LEO satellite communications: joint cooperative beamforming and scheduling. 2026. ArXiv:2603.07434
56 Kim S, Wu J, Shim B, et al. Cell-free massive non-terrestrial networks. IEEE J Sel Areas Commun, 2025, 43: 201–217
57 Younus O I, Riaz A, Binns R, et al. Overview of space-based laser communication missions and payloads: insights from the autonomous laser inter-satellite gigabit network (ALIGN). Aerospace, 2024, 11: 907
58 Krieger G, Moreira A, Fiedler H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007, 45: 3317–3341
59 Jiang Y, Zhang Y. An optimal baseline design and performance analysis in distributed spaceborne SAR system. In: Proceedings of Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, Waltham, 2006. 308–312
60 Rodrigues-Silva E, Rodriguez-Cassola M, Moreira A, et al. Experimental validation and calibration of GNSS-based phase synchronization for bistatic and multistatic SAR missions. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2025, 63: 1–13
61 He J, Ni S, Lin H, et al. Survey on positioning technology based on signal of opportunity from low earth orbit. Front Phys, 2025,

13: 1592447
62 Kassas Z M, Kozhaya S, Kanj H, et al. Navigation with multi-constellation LEO satellite signals of opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium. In: Proceedings of IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, 2023. 338–343
63 Emenonye D R, Dhillon H S, Michael Buehrer R. Fundamentals of LEO-based localization. IEEE Trans Inform Theor, 2025, 71: 5277–5311
64 Mestas D, Delamotte T, Legay H, et al. Distributing the aperture: signal localization with a space-based extremely large array. In: Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Fukuoka, 2025. 1–2
65 Shao Y, Zhang T, Yue P, et al. Direct joint detection and localization of weak DSSS signals via cooperative LEO satellites. IEEE Trans Commun, 2026, 74: 6571–6583
66 Liu Y, Wen Z, Zhang S, et al. Learning-based constellation scheduling for time-sensitive space multi-target collaborative observation. Adv Space Res, 2024, 73: 4751–4766
67 Fang Z, Cai Y, Huang P, et al. Constellation reconfiguration strategy for emergency multitarget continuous coverage using low thrust. J Guidance Control Dyn, 2026, 49: 726–742
68 Lee H W, Ho K. Regional constellation reconfiguration problem: integer linear programming formulation and Lagrangian heuristic method. J Spacecraft Rockets, 2023, 60: 1828–1845
69 Sarno S, D'Errico M, Guo J, et al. Autonomous reconfiguration of a distributed synthetic aperture radar driven by mission requirements. CEAS Space J, 2020, 12: 527–537
70 Li C, Tan X, Chen C. Deep reinforcement learning-driven multi-satellite collaborative observation planning for emergency and disaster monitoring. Int J Digital Earth, 2025, 18: 2554310
71 Guimarães C, Netti A, Sauer M, et al. A survey on satellite computing: connecting the dots between networks and applications. IEEE Commun Surv Tutorials, 2026, 28: 567–592
72 Wu J, Jia M, Zhang N, et al. Multi-agent deep reinforcement learning-based computation offloading in LEO satellite edge computing system. IEEE Commun Lett, 2024, 28: 2352–2356
73 Liu S, Zhang Z, Zeadally S. Device-satellite-satellite collaborative task offloading computing and resource allocation in 6G satellite-ground edge computing network. Comput Netws, 2026, 274: 111871
74 Zhou J, Yang Q, Zhao L, et al. Mobility-aware computation offloading in satellite edge computing networks. IEEE Trans Mobile Comput, 2024, 23: 9135–9149
75 Liu X, Ji S, Sun M, et al. On-orbit image processing technology for intelligent remote sensing satellites: progress, challenges, and opportunities. Aerospace Sci Tech, 2026, 174: 111859
76 Zheng G, Ni Q, Navaie K, et al. Semantic communication in satellite-borne edge cloud network for computation offloading. IEEE J Sel Areas Commun, 2024, 42: 1145–1158
77 Zhang S, Liu X, Wang H, et al. Communication-efficient collaborative LLM inference over LEO satellite networks. 2026. ArXiv:2604.04654
78 Guan J, Zhang Q, Murturi I, et al. Collaborative inference in DNN-based satellite systems with dynamic task streams. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Denver, 2024. 3803–3808
79 Song Z, Popovski P. Neuromorphic split computing via optical inter-satellite links. 2025. ArXiv:2507.08490
80 Yang C, Yuan J, Wu Y, et al. Communication-efficient satellite-ground federated learning through progressive weight quantization. IEEE Trans Mobile Comput, 2024, 23: 8999–9011
81 Matthiesen B, Razmi N, Leyva-Mayorga I, et al. Federated learning in satellite constellations. IEEE Netw, 2024, 38: 232–239
82 Razmi N, Matthiesen B, Dekorsy A, et al. On-board federated learning for satellite clusters with inter-satellite links. IEEE Trans Commun, 2024, 72: 3408–3424
83 Yu Z, Jiang Y, Liu X, et al. Microservice deployment in space computing power networks via robust reinforcement learning. IEEE Trans Mobile Comput, 2026, 25: 2382–2398
84 Marrero L M, Merlano-Duncan J C, Querol J, et al. Architectures and synchronization techniques for distributed satellite systems: a survey. IEEE Access, 2022, 10: 45375–45409
85 Guo J, Maessen D C, Gill E. Fractionated spacecraft: the new sprout in distributed space systems. In: Proceedings of the 60th International Astronautical Congress, Daejeon, 2009
86 Scharnagl J, Haber R, Dombrovski V, et al. NetSat-challenges and lessons learned of a formation of 4 nano-satellites. Acta Astronaut, 2022, 201: 580–591
87 Meoni G, Märtens M, Derksen D, et al. The OPS-SAT case: a data-centric competition for onboard satellite image classification. Astrodynamics, 2024, 8: 507–528
88 European Space Agency. PhiSat-2 begins science phase for AI earth images. European Space Agency, 2025. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Phsat-2/Phsat-2_begins_science_phase_for_AI_Earth_images

89 Zhang Z, Deng L, Feng J, et al. A survey of precision formation relative state measurement technology for distributed spacecraft. Aerospace, 2022, 9: 362

90 Giuffrida G, Diana L, de Gioia F, et al. CloudScout: a deep neural network for on-board cloud detection on hyperspectral images. Remote Sens, 2020, 12: 2205

91 Scharf D P, Hadaegh F Y, Ploen S R. A survey of spacecraft formation flying guidance and control (part 1): guidance. In: Proceedings of the 2003 American Control Conference, Denver, 2003. 1733–1739

92 Scharf D P, Hadaegh F Y, Ploen S R. A survey of spacecraft formation flying guidance and control. part ii: control. In: Proceedings of the 2004 American Control Conference, Boston, 2004. 2976–2985

93 Yang S, Lyu W, Ning B, et al. Flexible precoding for multi-user movable antenna communications. IEEE Wireless Commun Lett, 2024, 13: 1404–1408

94 Ma W, Zhu L, Zhang R. MIMO capacity characterization for movable antenna systems. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 3392–3407

95 Dicandia F A, Genovesi S. Satellite massive array with reconfigurable antenna units for long-life and energy saving satellites. IEEE Access, 2025, 13: 74876–74886

96 Peng C, He Y, Zhao S, et al. Integration of data center into the distributed satellite cluster networks: challenges, techniques, and trends. IEEE Netw, 2023, 37: 52–58

97 Erol A K, Lee S, Mahajan D. Earthsight: a distributed framework for low-latency satellite intelligence. In: Proceedings of the 9th Conference on Machine Learning and Systems, 2026

98 Xu L, Jiao J, Jiang S, et al. Semantic-aware coordinated transmission in cohesive clustered satellites: utility of information perspective. Sci China Inf Sci, 2024, 67: 199301

99 Frederiksen R S, Mulvad T G, Leyva-Mayorga I, et al. End-to-end delivery in LEO mega-constellations and the reordering problem. In: Proceedings of IEEE 35th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, 2024. 1–6

100 Radhakrishnan R, Edmonson W W, Afghah F, et al. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: physical layer to network layer view. IEEE Commun Surv Tutorials, 2016, 18: 2442–2473

101 Yang H, Guo B, Xue X, et al. Interruption tolerance strategy for LEO constellation with optical inter-satellite link. IEEE Trans Netw Serv Manage, 2023, 20: 4815–4830

102 Hu H, Song K, Zhan C, et al. Joint service caching and resource allocation over different timescales in satellite edge computing networks. IEEE Trans Mobile Comput, 2025, 24: 5649–5664

103 Thangavel K, Sabatini R, Gardi A, et al. Artificial intelligence for trusted autonomous satellite operations. Prog Aerospace Sci, 2023, 144: 100960

104 Zilberstein I, Chien S. Large-scale continual scheduling and execution for dynamic distributed satellite constellation observation allocation. 2026. ArXiv:2601.06188

105 Cao J, Sun Y, Zhang Y Y, et al. A survey of satellite internet security. Sci Sin Inform, 2026, 56: 491–522 [曹进, 孙钰, 张元玉, 等. 卫星互联网安全综述. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 491–522]

106 Venkatesh S M, Macaluso A, Nuske M, et al. Quantum annealing-based algorithm for efficient coalition formation among LEO satellites. In: Proceedings of IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Montreal, 2024. 205–210

107 Feng Y, Zhang R, Ren S, et al. A distributed approach for time-dependent observation scheduling problem in the agile earth observation satellite constellation. Remote Sens, 2023, 15: 1761

108 Xu H, Sun Y, Zhao Y, et al. Joint beam scheduling and beamforming design for cooperative positioning in multi-beam LEO satellite networks. IEEE Trans Veh Technol, 2024, 73: 5276–5287

109 Song Y, Zhou Q, Chen Q, et al. Optimal reconfiguration control of electromagnetic satellite formation. In: Proceedings of 41st Chinese Control Conference (CCC), Hefei, 2022. 1809–1814

110 Silva Filho E R, et al. Fuel-efficient formation strategies for cross-track multistatic SAR constellations. In: Proceedings of 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, 2023. 4556–4559

111 Soleymani M, Fakoor M, Bakhtiari M. Optimal mission planning of the reconfiguration process of satellite constellations through orbital maneuvers: a novel technical framework. Adv Space Res, 2019, 63: 3369–3384

112 Wang P K C, Hadaegh F Y. Minimum-fuel formation reconfiguration of multiple free-flying spacecraft. J Astronaut Sci, 1999, 47: 77–102

113 Scala F, Gaias G, Colombo C, et al. Design of optimal low-thrust manoeuvres for remote sensing multi-satellite formation flying in low Earth orbit. Adv Space Res, 2021, 68: 4359–4378

114 Sun Y, Wu X, Park H, et al. Orbit maneuver planning of earth observation satellite swarm for unreachable targets. Acta Astronaut, 2026, 241: 620–636

115 Thangavel K, Servidia P, Sabatini R, et al. A distributed satellite system for multibaseline AT-InSAR: constellation of formations for maritime domain awareness using autonomous orbit control. Aerospace, 2023, 10: 176

116 Zhang Y, Zheng P, Ma J, et al. Positioning-aided channel estimation for multi-LEO satellite cooperative beamforming. 2025. ArXiv:2502.05808

117 Peng D, Guo S, Gu D, et al. Precise baseline determination for the four-satellite InSAR constellation HT-01 with ambiguity resolution constraints. Adv Space Res, 2025, 75: 7917–7931

118 Jäggi A, Montenbruck O, Moon Y, et al. Inter-agency comparison of TanDEM-X baseline solutions. Adv Space Res, 2012, 50: 260–271

119 Wu X, Wang C, Wang Z, et al. An adaptive high-accuracy terrain phase error compensation algorithm in GNSS-based inbsar via multisatellite collaborative observations. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2025, 63: 1–19

120 Xu Z, Chen G, Fernandez R, et al. Enhancement of direct LEO satellite-to-smartphone communications by distributed beamforming. IEEE Trans Veh Technol, 2024, 73: 11543–11555

121 Yang Y, et al. Development of a compact laser communication terminal for LEO satellite constellations. In: Proceedings of SPIE, 2025. 133552F

122 Carrizo C, Knapek M, Horwath J, et al. Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations. In: Proceedings of SPIE, 2020. 1127203

123 Kim G N, Park S Y, Seong S, et al. The VISION—concept of laser crosslink systems using nanosatellites in formation flying. Acta Astronaut, 2023, 211: 877–897

124 Sun X, Cao S. A routing and wavelength assignment algorithm based on two types of LEO constellations in optical satellite networks. J Lightwave Technol, 2020, 38: 2106–2113

125 Dabiri M T, Ammuri R, Hasna M, et al. QoS- and physics-aware routing in optical LEO satellite networks via deep reinforcement learning. 2025. ArXiv:2512.20835

126 Zhang C, Chen Q, Tang Z, et al. Pre-coded inter-satellite routing algorithm with load balancing for mega-constellation networks. Space Sci Technol, 2024, 4: 0103

127 Wang S Q, Sun F C, Zhao Y J. Active fault tolerance method for LEO mega-constellations based on traffic engineering. Sci Sin Inform, 2021, 51: 1840–1852 [王少清, 孙富春, 赵有健. 基于流量工程的 LEO 巨型星座主动容错方法. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 1840–1852]

128 Kempton B S, A Simulation Tool to Study Routing in Large Broadband Satellite Networks. Newport News: Christopher Newport University, 2020

129 Gu Z, Park J, Choi J. Joint laser inter-satellite link matching and traffic flow routing in LEO mega-constellations via Lagrangian duality. 2026. ArXiv:2601.21914

130 Yan F, Wang Z, Zhang S, et al. Load-aware hierarchical information-centric routing for large-scale LEO satellite networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Dubai, 2024. 1–6

131 Arnas D, Linares R. Uniform satellite constellation reconfiguration. J Guidance Control Dyn, 2022, 45: 1241–1254

132 Ha V N, et al. User-centric beam selection and precoding design for coordinated multiple-satellite systems. In: Proceedings of IEEE 35th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, 2024. 1–6

133 Wu X, Yang Y, Xie Y, et al. Multiregion mission planning by satellite swarm using simulated annealing and neighborhood search. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2024, 60: 1416–1439

134 Liu D, Chang S, Deng Y, et al. A novel spaceborne SAR constellation scheduling algorithm for sea surface moving target search tasks. IEEE J Sel Top Appl Earth Observations Remote Sens, 2024, 17: 3715–3726

135 Pfandzelter T, Bermbach D. Komet: a serverless platform for low-earth orbit edge services. In: Proceedings of the 2024 ACM Symp Cloud Comput, New York, 2024. 866–882

136 Wang Q, Chen X, Qi Q, et al. Multiple-satellite cooperative information communication and location sensing in LEO satellite constellations. IEEE Trans Wireless Commun, 2025, 24: 3346–3361

137 Deng R, Di B, Song L. Ultra-dense LEO satellite based formation flying. IEEE Trans Commun, 2021, 69: 3091–3105

138 R?per M, Matthiesen B, Wübben D, et al. Beamspace MIMO for satellite swarms. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, 2022. 1307–1312

139 Li K X, Gao X, Xia X G. Channel estimation for LEO satellite massive MIMO OFDM communications. IEEE Trans Wireless Commun, 2023, 22: 7537–7550

140 Jo S, Park S H. Multi-satellite cooperative MIMO transmission: statistical CSI-aware RSMA precoding design. IEEE Wireless Commun Lett, 2025, 14: 3590–3594

141 Capez G M, Henn S, Fraire J A, et al. Sparse satellite constellation design for global and regional direct-to-satellite IoT services. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2022, 58: 3786–3801

142 Zuo S, Jing W, Lu Z, et al. Movable antenna-aided interference mitigation for LEO-GEO spectrum-sharing system. In:

Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Milan, 2025. 1–6
143 Deng H, Ying K, Feng D, et al. Satellites beam hopping scheduling for interference avoidance. IEEE J Sel Areas Commun, 2024, 42: 3647–3658
144 Wang J, Zhou L, Yang K, et al. Multicast precoding for multigateway multibeam satellite systems with feeder link interference. IEEE Trans Wireless Commun, 2019, 18: 1637–1650
145 Hu H, Lv S, He J, et al. A distributed on-demand routing algorithm for large-scale low Earth orbit constellation. In: Proceedings of the Third International Conference on Algorithms, Microchips, and Network Applications, 2024. 131710C
146 Zhang C, Chen J, Li Y, et al. Satellite group autonomous operation mechanism and planning algorithm for marine target surveillance. Chin J Aeronautics, 2019, 32: 991–998
147 Li D X, Xie W, Li Y, et al. Fedfusion: manifold-driven federated learning for multi-satellite and multi-modality fusion. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2024, 62: 1–13
148 Lee S S. Target-oriented satellite constellation method for revisit performance. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2023, 61: 1–11
149 Reid T G R, Neish A M, Walter T, et al. Broadband LEO constellations for navigation. Navigation, 2018, 65: 205–220
150 Kassas Z M, Khairallah N, Kozhaya S. Ad astra: simultaneous tracking and navigation with megaconstellation LEO satellites. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2024, 39: 46–71
151 Wang M, Nardin A, Ma R, et al. Integrated communication and navigation based on LEO satellite networks: a survey. IEEE Internet Things J, 2025, 12: 46244–46268
152 Sheng M, Guo C, Huang L. Integrated communication, navigation, and remote sensing in leo networks with vehicular applications. IEEE Wireless Commun, 2025, 32: 140–147
153 You L, Qiang X, Zhu Y, et al. Integrated communications and localization for massive MIMO LEO satellite systems. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 11061–11075
154 Zhang Y, Soualle F, Keskin M F, et al. Distributed Integrated Sensing, Localization, and Communications Over LEO Satellite Constellations. IEEE Wireless Commun, 2026, 33: 57–65
155 Sun Y, Zhang B, Wu S, et al. A satellite formation design for dynamic MIMO-SAR system. In: Proceedings of the 4th China International SAR Symposium (CISS), Xi'an, 2023. 1–5
156 Kleinherenbrink M, López-Dekker P, Nouguier F, et al. Bistatic SAR mapping of ocean-wave spectra. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2024, 62: 1–12
157 Yao F, Li J, Chen Y, et al. Task allocation strategies for cooperative task planning of multi-autonomous satellite constellation. Adv Space Res, 2019, 63: 1073–1084
158 Kim H, Chang Y K. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time. Aerospace Sci Tech, 2015, 40: 17–32
159 Mercado-Martínez A M, Soret B, Jurado-Navas A. Scheduling agile earth observation satellites with onboard processing and real-time monitoring. In: Proceedings of IEEE Global Communications Conference, Taipei, 2025. 2023–2029
160 Denby B, Lucia B. Orbital edge computing: nanosatellite constellations as a new class of computer system. In: Proceedings of the 25th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, New York, 2020. 939–954
161 Li Z, Yang Z, Gu H, et al. OrbitChain: orchestrating in-orbit real-time analytics of Earth observation data. 2025. ArXiv:2508.13374
162 Guerrisi G, Frate F D, Schiavon G. Artificial intelligence based on-board image compression for the Φ-Sat-2 mission. IEEE J Sel Top Appl Earth Observations Remote Sens, 2023, 16: 8063–8075
163 Lin Z, Chen Z, Fang Z, et al. FedSN: a federated learning framework over heterogeneous LEO satellite networks. IEEE Trans Mobile Comput, 2025, 24: 1293–1307
164 Duggan A, Andrade B, Afli H. Advancing earth observation: a survey on AI-powered image processing in satellites. Eur J Remote Sens, 2025, doi: 10.1080/22797254.2025.2567921
165 Sang H, Zhang L, Chen T, et al. Onboard deployment of remote sensing foundation models: a comprehensive review of architecture, optimization, and hardware. Remote Sens, 2026, 18: 298
166 Du A, Del Prete R, Mousist A, et al. First on-orbit demonstration of a geospatial foundation model. 2025. ArXiv:2512.01181
167 Han D J, Hosseinalipour S, Love D J, et al. Cooperative federated learning over ground-to-satellite integrated networks: joint local computation and data offloading. IEEE J Sel Areas Commun, 2024, 42: 1080–1096
168 Liao Y, Cheng K, Jin H. Towards routing and edge computing in satellite-terrestrial networks: a column generation approach. 2025. ArXiv:2502.14422
169 Pfandzelter T, Bermbach D. QoS-aware resource placement for LEO satellite edge computing. In: Proceedings of the 2022 IEEE 6th International Conference on Fog and Edge Computing, Messina, 2022. 66–72
170 Li C, Zhang Y, Xie R, et al. Integrating edge computing into low earth orbit satellite networks: architecture and prototype.

IEEE Access, 2021, 9: 39126–39137
171 Pusztai T, Marcelino C, Nastic S. HyperDrive: scheduling serverless functions in the edge-cloud-space 3d continuum. In: Proceedings of IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC), Rome, 2024. 265–278
172 Li C, Zheng M, Wen G, et al. Collaborative computation offloading in satellite-terrestrial networks enabled by satellite edge computing: an intelligent multi-agent approach. Comput Netws, 2025, 272: 111617
173 Zhang Y, Shen Z, Jiang D, et al. CCRSat: a collaborative computation reuse framework for satellite edge computing networks. 2025. ArXiv:2503.11946

Reconfigurable satellite swarms for communication, sensing, and computing: concepts, key technologies, and applications

Ziyuan ZHENG[1], Qingqing WU[1*], Haiying HU[2], Wen CHEN[1], Xin LIN[3] & Wenpeng JING[4]

1. *School of Information Science and Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*
2. *Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China*
3. *Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China*
4. *School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*
* Corresponding author. E-mail: qingqingwu@sjtu.edu.cn

Abstract Satellite systems supporting low-Earth-orbit networking, distributed Earth observation, and onboard intelligence are evolving from fixed configurations and predefined functional assignments toward task-driven multi-satellite cooperation. This survey develops a system-level framework for communication, sensing, and computing in reconfigurable satellite swarms. It first distinguishes reconfigurable swarms from fixed constellations, formation flying, fractionated spacecraft, software-defined satellites, and reconfigurable antennas. Directly adjustable system objects are organized into four coupled dimensions: formation, link, function, and resource reconfiguration. A four-layer operating architecture then connects state awareness, network organization, task execution, and reconfiguration decisions. For finite task windows, the survey introduces a net-benefit evaluation principle based on predeclared and well-tuned baselines, separate cost budgets, hard feasibility constraints, risk bounds, and task-level outcomes. Common technical foundations include task-driven formation selection and control, cross-satellite synchronization and cooperative calibration, dynamic inter-satellite networking and task-aware routing, multi-timescale resource coordination, programmable payloads, and swarm task-runtime mechanisms. Representative applications are reviewed for communications, sensing, and computing, ranging from distributed MIMO, direct-to-device access, hotspot enhancement, and service-aware routing to signals-of-opportunity positioning, non-cooperative emitter localization, distributed SAR, event-driven observation, onboard screening, collaborative inference, and state migration. Across these problem families, the model-baseline-metric-evidence template is used to identify minimum modeling assumptions, fair comparisons, task-level metrics, and falsifiable validation questions. The resulting synthesis clarifies when reconfiguration is worthwhile, which system objects should be adjusted, and how its performance boundaries can be established using reproducible evidence.

Keywords reconfigurable satellite swarms, multi-satellite cooperation, distributed satellite systems, satellite communications, satellite sensing, satellite computing, onboard processing, communication-sensing-computing coordination