



面向 5GA 和 6G 网络的分布式卫星系统 专题简介

焦健^{1,2*}, 张钦宇^{1,2}, 王野², 何熊文³, 李永会⁴

1. 哈尔滨工业大学 (深圳), 深圳 518055, 中国

2. 鹏城实验室, 深圳 518055, 中国

3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094, 中国

4. The University of Sydney, Sydney NSW 2006, Australia

* 通信作者. E-mail: jiaojian@hit.edu.cn

分布式卫星 (cohesive clustered satellites, CCS) 系统作为一种新型的空间基础设施, 正在成为现代空间技术研究的重要方向. 该系统通过异构卫星载荷的泛在协同与高效集成, 能够显著提升 5GA 和 6G 网络的海量数据高效处理、全球泛在高速通信和精确定位能力, 增强空天信息网络系统的容错能力和适应性, 在低空智联、地球观测、卫星通信、气象监测等领域具有广泛的应用前景.

为了展示 CCS 的最新研究进展, *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2025 年 68 卷第 9 期组织并出版了“面向 5GA 和 6G 网络的分布式卫星系统专题” (Special Topic: Cohesive Clustered Satellites System for 5GA and 6G Networks), 深入探讨了该领域的基础理论、技术方法与应用发展. 经严格评审, 专题共收录了 11 篇文章, 涵盖了多项关键设计方向.

哈尔滨工业大学 (深圳) 张钦宇和焦健团队联合专题特约编辑王野、李永会、何熊文教授, 组织了鹏城实验室、东南大学、中兴通讯等 13 家单位的 27 位专家, 撰写了综述 “Distributed satellite information networks:

architecture, enabling technologies, and trends”, 重点探讨了分布式卫星信息网络的新型网络架构、通信计算融合网络架构以及可重构卫星编队构型等关键技术, 使其能够高效融合通信、导航、遥感等多种卫星系统载荷, 建立统一、开放的分布式卫星信息网络服务范式, 提升 CCS 系统整体效能与弹性服务能力. 针对分布式卫星信息网络面临网络异质性、强动态信道、资源弱耦合带来的卫星协同难度大、协作效率低的挑战难题, 该综述对涵盖信道建模、云原生分布式 MIMO 协作、大规模接入、非正交多播、分布式相控阵天线以及高速星间通信等关键技术的现状、最新进展与发展趋势进行了系统归纳和总结分析, 并指出了未来若干潜在研究方向.

综述 “A survey on communication and computing resources allocation and management for cohesive clustered satellites systems” 综合学界与业界观点, 系统梳理了 CCS 系统的通信与计算资源管理研究进展. 首先阐述了 CCS 系统的演进历程与组成架构, 并提出基于原生人工智能的分层资源管理架构; 继而分析由 CCS 催生的新兴技

引用格式: 焦健, 张钦宇, 王野, 等. 面向 5GA 和 6G 网络的分布式卫星系统专题简介. 中国科学: 信息科学, 2025, 55: 2397–2399, doi: 10.1360/SSI-2025-0357

Jiao J, Zhang Q Y, Wang Y, et al. Special topic: cohesive clustered satellites system for 5GA and 6G networks. *Sci Sin Inform*, 2025, 55: 2397–2399, doi: 10.1360/SSI-2025-0357

术及应用场景,并建立相应的通算资源管理模型与评估指标体系;在此基础上,系统介绍了传统优化方法与人工智能方法在CCS系统通算资源管理中的应用,并重点阐述了基于知识驱动的资源调度策略;最后展望了CCS系统潜在发展方向。

论文“Federated learning-based ISAC network in cohesive clustered satellite: resource optimization in heterogeneous datasets and systems”针对CCS系统中数据异构性导致的联邦学习(FL)效率低下问题,提出基于深度强化学习的CCSFL-ISAC优化框架。通过领导者-跟随者分层架构,结合星内多跳路由和梯度压缩技术提升通信效率;设计基于双深度Q网络(DDQN)的客户端选择算法,利用感知信噪比构建动态奖励机制优化非独立同分布数据下的节点选择;采用深度确定性策略梯度(DDPG)算法联合优化计算频率与传输功率,在保证时延约束下实现能耗最小化。该框架显著提升了卫星网络的联邦学习收敛速度和资源利用效率。

论文“Game-theoretic clustering and scalable beamforming for multi-RIS-assisted cohesive satellite anti-jamming systems”针对分布式卫星系统面临组簇设计、波束成形复杂度与敌方恶意干扰攻击等问题,设计了一种分布式智能超表面卫星抗干扰系统,通过引入高谱效、低成本的分分布式智能超表面,提出基于联盟博弈和循环梯度下降的组簇设计和波束成形低复杂度算法,实现通信链路、网络拓扑以及卫星资源的再部署,从而灵活有效躲避干扰,显著提升了分布式卫星系统在恶意干扰下的抗毁能力和数据传输效率。

论文“Split-LEO: efficient AI model training over LEO satellite networks”提出了一种名为Split-LEO的新型分裂联邦学习方案,旨在加速低轨卫星网络中的人工智能(AI)模型训练。该方案的核心设计是将完整的AI模型分割为两部分:(1)卫星端模型部署于低轨卫星;(2)地面端模型部署于地面站。通过卫星与对应地面模型的协同训练,各卫星并行执行模型更新,最终将卫星端与地

面端模型聚合为全局模型,显著降低训练延迟。进一步,联合优化分割点选择和星地计算资源分配,在保持模型精度的同时实现效率提升。

论文“Modeling and analysis of satellite-terrestrial covert communications”研究如何利用干扰和信道不确定性提升低轨卫星星地隐蔽通信的性能。首先,构建了3种典型的网络模型:卫星静止、卫星沿轨运动以及卫星在可见轨道内随机分布。针对这3种模型,利用服从泊松点过程分布的地面干扰节点提升隐蔽性能,并系统分析了各模型下隐蔽概率和连接概率的理论表达式。为全面评估不同模型的隐蔽性和可靠性,本文采用隐蔽吞吐量作为性能指标,通过一维搜索获得最优隐蔽吞吐量。该研究为低轨卫星星地隐蔽通信系统的性能评估与设计提供了理论依据和方法指导。

快报“Waveform cooperative communication for cohesive clustered satellites systems”提出了多星协作通信的波形辅助方法,借助新体制波形获取传统波形难以取得的低轨卫星通信时变信道分集增益,降低单星能力要求、提升终端通信质量。基于对衰落参数的时变特性研究,证明了星地信道在帧内的准静态特性,以及系统分集增益对容限内的星间时频同步误差的鲁棒性,仿真结果验证了所提方法在获取功率增益和分集增益方面的显著效果。

快报“Improving connectivity in LEO clustered satellite systems: identify optimal interconnection points”提出了一种基于坐标变换与连通性评估的低轨卫星系统互联优化方法。结果表明,原始卫星簇无法形成高连通网络,加入最优互联点后,卫星系统的互联性得到显著提升。

快报“Joint semi-grant-free NOMA for dual-layer LEO cohesive clustered satellite systems”提出了一种联合半免授权非正交多址接入(joint semi-grant-free NOMA)方案。与现有的非正交多址接入技术相比,该方案引入实时计算的信号强度阈值,有效确保GFU的信号不会干扰GBU的服务质量,从而使其服务质量达到与正交多址接入方案相当的水平。此外,考虑到分布式卫星的高度

协同特性, GBU 通过动态估算可达速率预测中断并实现灵活卫星切换, 从而显著降低用户中断概率和提升系统吞吐量.

快报 “A sparrow search-based energy-adaptive routing scheme for satellite internet” 提出一种基于麻雀搜索算法的自适应多目标路由优化方案, 以解决卫星互联网中链路频繁中断和资源分配不合理的问题. 实验结果表明, 相较于传统路由算法, 所提方案在提供可靠的数据传输路径的同时, 实现卫星剩余能量提升 3.22%, 显著提高网络资源的整体利用效率.

快报 “Self-evolving detection of uncovered protocol attacks in 5GA and 6G NTN” 针对 5GA 和 6G 非地面网络 (NTNs) 中零日协议攻击检测的挑战, 提出了一种自进化检测 (SED) 方法. SED 通过深度融合基于规则和基于基线的检测策略, 实现了对未知攻击的高效识别与分类. 该方法为 5GA 和 6G NTN 的安全防护提供了创新且高效的解决方案, 具有广泛的应用前景.

衷心感谢所有为本专题撰写稿件的作者和严谨高效的审稿专家, 也感谢广大读者长期以来的关注与支持.