

星载核心网研究综述

张成晨^{1,2,3}, 陈 希^{1,2,3}, 陆 珊^{1,2,3}, 杜 平^{1,2,3}, 权洪波^{1,2,3}

(1.上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 201210;

2.上海市卫星互联网重点实验室, 上海 201210;

3.卫星互联网全国重点实验室, 上海 201210)

摘要: 随着6G通信技术与空天地一体化网络的迅猛演进, 星载核心网作为实现全球无缝覆盖、提升网络服务质量的关键支撑技术, 已成为学术界与工业界共同聚焦的研究热点。系统梳理星载核心网的研究进展, 首先阐述3GPP、ITU等标准化组织在该领域的标准演进路径; 其次从应对地面通信局限、提升网络性能的维度分析其技术必要性, 结合卫星技术革新与工程实践论证其可行性, 随后深入探讨星地分布式网络架构、轻量化、切换优化、动态部署、边缘计算与缓存等关键技术; 最后基于现有研究瓶颈, 展望其在智能化、抗毁性增强、新型业务适配、安全隐私保护等方向的研究趋势, 为星载核心网的进一步研究与应用提供理论参考。

关键词: 星载核心网; 非地面网络; 网络架构; 切换优化; 轻量化; 边缘计算

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2025075

Research review on spaceborne core network

Zhang Chengchen^{1,2,3}, Chen Xi^{1,2,3}, Lu Shan^{1,2,3}, Du Ping^{1,2,3}, Quan Hongbo^{1,2,3}

1. Shanghai Satellite Internet Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201210, China

2. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201210, China

3. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201210, China

Abstract: With the rapid evolution of 6G communication technology and space-air-ground integrated networks, the spaceborne core network, as a key supporting technology to achieve global seamless coverage and improve network service quality, has become a research focus jointly concerned by the academic and industrial communities. This paper systematically sorts out the research progress of the spaceborne core network. Firstly, it expounds the standard evolution path of 3GPP, ITU, and other standardization organizations in this field. Secondly, it analyzes its technical necessity from the perspectives of addressing the limitations of terrestrial communication and improving network performance, and demonstrates its implementation feasibility by combining satellite technology innovation and engineering practice verification. Subsequently, it deeply discusses key technologies including satellite-terrestrial distributed network architecture, lightweight onboard core network, handover optimization, dynamic deployment, edge computing and caching. Finally, based on the existing research bottlenecks, it looks forward to the future research trends in directions such as intellectualization, anti-destruction enhancement, new service adaptation, and security and privacy protection, providing theoretical references for further research and application of the spaceborne core network.

Key words: spaceborne core network, non-terrestrial network, network architecture, handover optimization, lightweight, edge computing

0 引言

移动通信技术正从5G向6G迭代演进, 核心目标已

由“万物互联”升级为“全域智联”, 旨在构建“空一天一地一海”一体化无缝覆盖网络, 实现极致性能支撑^[1]。

收稿日期: 2025-12-17; 修回日期: 2026-05-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2023YFB2904700)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB2904700)

地面通信网络受地理条件（如山脉、海洋）与部署成本的双重限制，仅能覆盖地球表面面积的约 6%^[2]，难以满足偏远地区通信、远洋航行及极地科考等特殊场景的接入需求。同时，地面网络设备在地震、海啸等自然灾害中易发生物理损毁，导致应急通信链路中断^[3]。在此背景下，非地面网络（non-terrestrial network, NTN）尤其是低地球轨道（low earth orbit, LEO）卫星星座，凭借广域覆盖与快速部署的技术优势，成为弥补地面网络覆盖短板的关键支撑^[3-4]。

星载核心网作为 NTN 的“控制中枢”，通过在卫星平台部署接入和移动性管理功能（access and mobility management function, AMF）、会话管理功能（session management function, SMF）及用户面功能（user plane function, UPF）等核心网网元，实现信令与数据的本地化处理。相较于传统“地面核心网+卫星接入”的架构模式，该技术可显著降低端到端通信时延^[5-6]。近年来，星载核心网研究已从概念验证阶段迈向工程实践阶段，天算星座 TY20 卫星、宝酝号卫星及中国移动“星核”验证星等平台，分别搭载 5G、5G-Advanced 与 6G 核心网网元，通过在轨部署与在轨运行验证，证实在卫星平台部署核心网网元的技术可行性^[7-9]。

当前星载核心网的规模化应用仍面临多重技术挑战。卫星平台在功耗与算力方面存在严格的物理约束，需通过网元精简、功能裁剪、协议优化等技术路径实现核心网轻量化，进而适配有限的星上资源^[10-13]。LEO 卫星的高速运动特性导致用户与卫星间通信链路频繁切换，传统地面移动性管理机制难以适配高动态场景，需依托轨迹预测、集群协同或无状态架构优化切换流程^[14-17]。星上业务处理需求与卫星间歇覆盖特性对技术方案提出特殊要求，需结合边缘计算实现业务本地化处理，并通过缓存技术适配覆盖间隙，方可保障服务连续性与质量^[18-24]。传统集中式核心网架构难以适配卫星广域覆盖与高动态特性，星载核心网需设计分布式网络架构，通过星间协同机制并具备故障容错能力提升网络整体可靠性^[5,25-26]。

为系统厘清星载核心网的研究脉络与技术方向，本文按如下逻辑展开：第 1 节梳理星载核心网的标准化进展，明确技术落地的规范框架；第 2 节从覆盖突破与性能提升维度论证星载核心网的必要性，结合卫星技术革新与工程实践验证其可行性；第 3 节聚焦星地分布式网络架构、星载核心网轻量化、切换优化、星载核心网动态部署及边缘计算与缓存五大关键技术，剖析技术原理与优化路径；第 4 节针对现有技术瓶颈，从智能核心网、抗毁性与容灾能力增强、新型业务适配与能力拓展、安全与隐私保护，以及标准化与互操作提升等方面展望未来研究趋势；第 5 节总结全文核心结论，指出星载核心网的规模化部署路径与产业价值，为后续研究提供参考。

1 星载核心网的标准化进展

3GPP、国际电信联盟（international telecommunication union, ITU）等国际标准化组织从架构定义、功能集成及协议优化等维度推进星载核心网标准化工作，为技术落地提供统一的规范支撑。

1.1 3GPP 标准演进

3GPP 在星载核心网领域呈现“从接入支持到核心部署”的清晰演进路径，具体地，3GPP 各版本在星载核心网领域的关键进展与核心贡献见表 1。

在 R15 版本中，无线接入网（radio access network, RAN）工作组启动非地面网络研究^[27]，提出弯管与再生两种载荷配置，其中再生载荷明确需兼容 3GPP 定义的无线接口协议，可将基站物理层与数据链路层功能部署于卫星或航空器，为后续星载网络功能的标准化奠定架构基础。在 R16 阶段，3GPP SA1 单独立项开展卫星接入研究，明确相关用例与需求^[28]，涵盖星地网络漫游、卫星网络的广播与组播、卫星物联网、临时使用卫星组件及通过 5G 卫星接入网进行间接连接等具体用例，并界定端到端时延、上下行速率等关键性能指标，为卫星接入场景的方案设计提供依据。

自 R17 起，多个工作组按技术维度协同推进卫星接

表 1 3GPP 各版本在星载核心网领域的关键进展与核心贡献

版本	关键进展	核心贡献
R15	RAN 工作组启动 NTN 研究,提出弯管与再生两种载荷配置 ^[27]	为卫星接入奠定架构基础
R16	SA1 单独立项卫星接入研究,明确用例与需求 ^[28]	确立卫星接入研究范围
R17	多工作组(RAN、SA1/2/3、CT)协同推进卫星接入标准化 ^[29-38]	细化星地接口与协议适配
R18	首次将核心网部署于卫星写入标准,支持星载 UPF 实现本地数据交换与边缘计算 ^[39]	突破“数据不落地”技术瓶颈
R19	研究星载核心网网元与 IMS 组件部署,支持终端—卫星—终端通信 ^[40]	增强实时业务支持能力
R20	推进低轨卫星 UPF 支持非 IMS 业务的端到端通信,同步启动 6G 星载核心网需求研究 ^[41-42]	衔接 5G 与 6G 技术演进

入标准化。SA2工作组研究卫星接入系统架构,包括大范围移动卫星场景下的移动性管理、长时延处理及卫星接入/回传场景的服务质量(quality of service, QoS)提升等关键问题^[29]。RAN1工作组研究窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)或增强机器类通信(enhanced machine-type communication, eMTC)对非地面网络的支持^[30], SA5工作组聚焦集成卫星组件的管理与编排技术研究^[31], CT1工作组分析卫星接入对非接入层(non-access stratum, NAS)协议的影响^[32-35], CT3工作组探讨卫星接入对会话管理策略的控制作用^[36], CT4工作组研究卫星接入对核心网网元间交互的影响^[37], CT6工作组梳理卫星接入对全球用户识别卡(universal subscriber identity module, USIM)的规范要求^[38]。上述研究共同完善了R17阶段卫星接入的标准化体系,为后续核心网“上星”奠定协议与接口基础。

R18阶段首次实现核心网“上星”突破,明确星载UPF的部署方案,支持通过星载UPF实现边缘服务与本地数据交换,达成“数据不落地”效果,显著提升星地数据传输效率^[39]。R19阶段进一步扩展星载核心网网元类型,研究AMF、SMF与IP多媒体子系统(IP multimedia subsystem, IMS)组件的协同部署,其中IMS组件需支持会话初始协议(session initialization protocol, SIP)的星上适配,以实现终端—卫星—终端的直接通信,增强语音、视频等实时业务的星上支持能力^[40]。本地数据交换示意^[39]如图1所示,N3、N9分别为无线接入网与用户面功能之间的参考点以及用户面功能与用户面功能之间的参考点。

当前3GPP处于5G标准收尾向6G起步的过渡阶段。R20阶段同时涵盖5G与6G课题,其中5G部分重点研究低轨卫星搭载UPF支持非IMS业务的端到端通信流程优化^[41],6G部分则提出新型再生卫星用例与技术需求^[42],推动星载核心网向多场景、多业务适配方向演进。

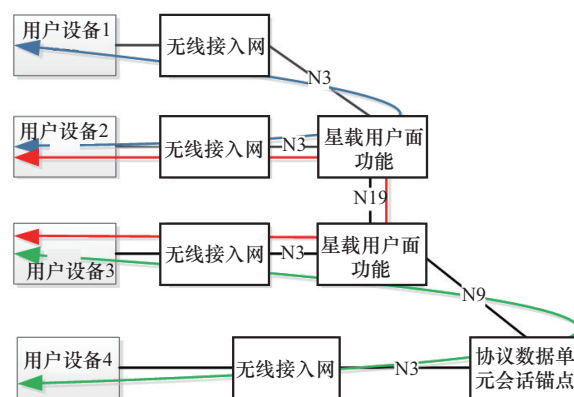
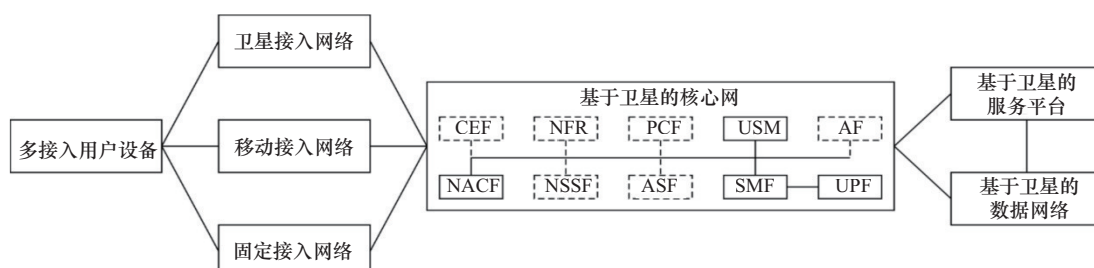


图1 本地数据交换示意

1.2 其他标准进展

ITU-T于2023年发布建议Y.3201,提出基于卫星的融合网络架构^[43],如图2所示。该架构中,星基核心网连接固定、移动与卫星接入网,提供简化的IMT-2020功能集,其中网络接入控制功能(network access control function, NACF)、SMF、统一订阅管理功能(unified subscription management function, USM)与UPF为必需功能,其余为可选功能。星基核心网需针对非静止轨道(non-geostationary orbit, NGSO)或同步地球轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星的资源特性,进行功能、接口与协议的定制化设计,例如针对GEO卫星的长时延特性,优化会话超时重连机制的参数配置。此外,星基核心网可与星基服务平台及数据网络互联,实现融合服务与应用,并支持与地面核心网互通,在特定区域内实现负载均衡。

中国通信标准化协会亦开展星载核心网本土化研究,例如“支持窄带物联网高轨卫星IMS语音通话的移动核心网增强技术研究”项目,通过增强服务质量机制、优化SIP信令,解决静止轨道卫星链路长时延、高误码率下的语音业务适配问题^[44],其优化后的SIP信令重传间隔可根据链路误码率动态调整,以适配不同链路质量场景。



注: CEF代表能力开放功能; NFR代表网络功能注册; PCF代表策略控制功能; AF代表应用功能; NSSF代表网络切片选择功能; ASF代表认证服务器功能

图2 基于卫星的融合网络架构

2 星载核心网的必要性和可行性

2.1 必要性分析

地面通信网络在覆盖范围与抗毁性方面存在固有局限。现有地面网络仅覆盖约20%的陆地区域,占地球总表面积不足6%^[4],且在灾害中易受损导致通信中断。卫星通信网络凭借卫星平台的抗毁性优势,可快速恢复应急通信,支撑救援指挥与灾情上报等关键业务。

根据卫星功能定位,卫星通信网络大致可分为3类:透明管道卫星(又称弯管卫星)网络、星载无线接入网卫星网络、星载核心网卫星网络。其中,弯管卫星负责提供终端设备与地面站之间的中继信号,是目前大多数通信卫星采用的主流工作模式^[45-48]。卫星仅作为透明链路存在,所有数据与信令均需转发至地面站进行后续处理,而地面站数量远少于卫星,且星地链路质量存在动态波动,这就导致地面站成为通信瓶颈^[14,49-50]。在数据面与控制面,地面站容量限制了整个低地球轨道网络的总吞吐量,同时地面站需处理太字节级信令与每秒万级的切换请求^[51-53]。星地不对称带来的瓶颈^[14]如图3所示。

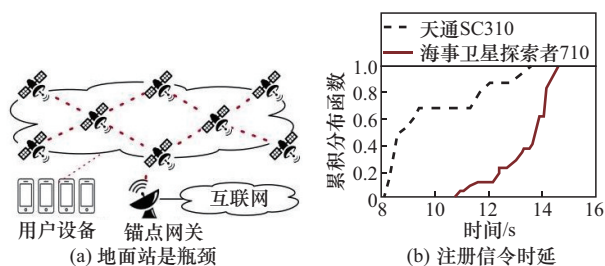


图3 星地不对称带来的瓶颈

为解决地面站通信技术瓶颈,业界尝试将无线接入网的部分或全部功能部署至卫星。例如 Lockheed Martin^[54]、Lynk^[55]、AST SpaceMobile^[56]等机构已推出具备该功能的卫星,可像地面基站一样为手机提供服务^[57-58]。该模式通过无线信号处理本地化有效降低信令时延,缓解地面站压力,但仍无法完全消除上述瓶颈——卫星接收的所有用户流量与核心网相关信令仍需转发至地面站处理。此外,将无线接入网与核心网分别部署于卫星与地面,还会引发新的信令风暴^[14,59-60]。

除此之外,无论是弯管模式还是基站上星模式,由于数据和部分信令均需回传至地面,因此控制面信令与用户面数据传输时延会增加^[4,12,17,61]。同时,核心网部署在地面无法充分发挥卫星边缘计算的技术优势^[61,63]。针对上述问题,核心网部署上星被认为是未来移动网络组网的重要趋势^[62,64-65]。

2.2 可行性分析

卫星技术与虚拟化技术的发展^[66-68]为核心网“上星”提供了坚实技术基础。火箭回收技术和一箭多星等发射技术的成熟使得卫星发射成本显著降低^[70],同时卫星呈现小体积、轻重量、低成本、低功耗、高算力的发展趋势^[71],20千克级整星已可满足核心网网元的运行需求^[7]。网络功能虚拟化技术则使核心网网元能够通过软件形式部署于通用硬件,降低部署成本与技术复杂度^[9]。

工程实践进一步验证了星载核心网的可行性。我国天算星座TY20卫星搭载5G核心网网元AMF、SMF与UPF,完成全球首次星载5G核心网在轨部署与运行验证,证实低轨卫星星载计算机可部署并运行核心网基础功能^[7,9,69]。天算星座宝酝号卫星搭载5G-Advanced UPF、数据对象接口协议(data object interface protocol, DOIP)等核心网相关软件,验证5G-Advanced核心网在轨运行、星载边缘计算、数联网等技术^[9,69]。中国移动“星核”验证星搭载面向6G分布式自治架构的星载核心网系统,支持在轨软件重构、核心网网元柔性部署与自治管理,进一步提升星载核心网在轨运行的效率与可靠性^[8]。星载核心网部署示意^[7]如图4所示。

部署星载核心网与边缘计算服务,可大幅减少流量转发、实现信令本地化处理,从而基本消除地面站瓶颈。此外,在卫星平台部署无线接入网与核心网,还可支撑全球服务拓展^[72]、泛在物联网连接^[41]、卫星边缘计算^[9,73]、应急通信^[74]等各类应用场景。

3 星载核心网关键技术

3.1 星地分布式网络架构

分布式架构可适配卫星高动态特性与广域覆盖需求,通过多卫星协同实现核心网网元的可靠运行。其核心设计思路为:多颗卫星通过星间链路组网,与地面核心网协同构成分布式系统,借助星间、星地协同实现全网功能闭环。为避免单星资源耗尽,通常不会在单颗卫星部署过多核心网网元^[14]。

文献[5,25,77]提出了星载6G核心网“云一边”分布式架构,将核心网分为地面云核心网(负责全局资源调度、用户签约管理)与星载边缘核心网(负责本地业务处理、移动性管理)。该架构具备高容错性,当单颗卫星发生故障时,其承载的核心网网元可通过星间链路迁移至相邻卫星,从而保障业务连续性;还可降低对地面核心网的依赖,在地面设施受损时,可通过星间协同维持基本通信服务。此外,分布式架构可提升信令处理效率,文献[5]

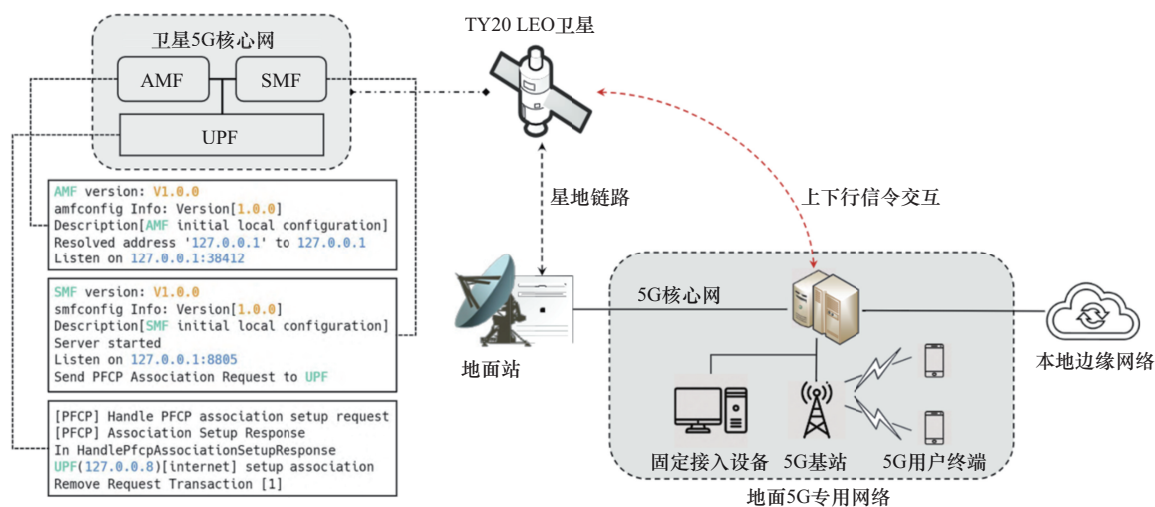
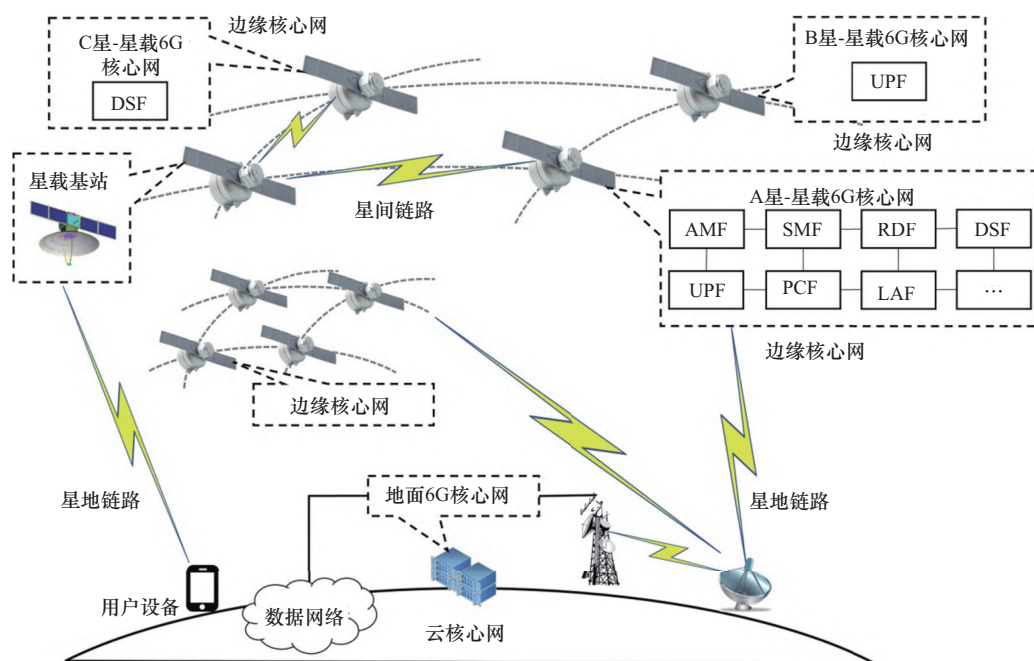


图4 星载核心网部署示意

中服务注册与发现采用分布式哈希算法，平均时延降低约13%；文献[25]中边缘核心网通过本地知识图谱简化会话建立流程，相较于非分布式5G架构，会话建立时间节省超55%；文献[77]将非结构化数据存储功能（unstructured data storage function, UDSF）部署在低轨卫星上，UDSF在卫星侧存储用户动态状态数据，同时通过地面网关与地面核心网的UDSF实现数据协同，避免出现状态数据集中存储于地面的风险，且支持跨卫星核心网的状态同步，提升分布式网络的协同效率。

除低轨卫星外，亦有研究者研究在高轨卫星部署核心网网元以减少卫星移动性带来的影响。文献[78]提出灵活分布式移动管理架构，引入可重构非低轨卫星至管理平面，将核心网的关键移动管理功能在高轨道卫星端灵活重构，形成“地面核心网为基础、卫星端功能为补充”的空一地协同模式，既保障核心网的稳定性，又提升移动管理的灵活性与时效性。仿真验证结果表明，该架构在切换时延、信令开销上表现更优。星载核心网示意^[5]如图5所示。



注：DSF代表数据存储功能；RDF代表服务注册与发现功能；PCF代表策略控制功能；LAF代表智能分析功能

图5 星载核心网示意

3.2 星载核心网轻量化

针对卫星平台资源约束,星载核心网需通过多维度策略实现轻量化,在满足业务需求的同时降低资源占用率与信令开销。轻量化设计通常采用网元最小集部署、网元功能裁剪、协议简化及网元融合重构等策略^[11-13,18,77]。

网元最小集部署是保留支持卫星独立组网的常用网元,如AMF、SMF、UPF和统一数据管理(unified data management, UDM)功能^[12,18],这些网元的组合可满足多数卫星通信场景的基础业务需求;在资源充足且业务需要时,可考虑保留网络存储功能(network repository function, NRF)、鉴权服务器功能(authentication server function, AUSF)、应用功能(application function, AF)、网络开放功能(network exposure function, NEF)、策略控制功能(policy control function, PCF)等其他网元^[11],例如在需精细化策略控制的场景中,可部署PCF网元以实现QoS动态调整。文献[77]将UDSF部署在卫星上,基于UDSF实现故障快速恢复,提升网络鲁棒性。

网元功能裁剪是对保留网元进行功能精简,例如星载UPF仅保留会话管理、数据报文转发、隧道管理、服务质量控制等核心功能,裁剪计费、后置路由等非必需功能^[18];UDM仅保留用户签约与认证的核心数据,不再存储用于用户行为分析的冗余数据^[12]。文献[13]进一步讨论不同场景下的功能裁剪程度:在卫星独立组网场景下,UPF需保留基本数据处理、协议数据单元(protocol data unit, PDU)会话锚点等约11个核心功能模块;而在单点卫星增强接入场景下,仅需保留7个基本数据处理功能,功能裁剪比例约36%,有效降低星上资源占用。

协议简化是优化网元间交互协议,精简协议栈层级的轻量化手段,例如部署于同一卫星的网元(星载核心网网元之间、星载核心网网元与星载无线接入网或承载

网网元之间)可简化信令交互流程^[11]或减少星地间交互次数^[12,18],降低星地链路带宽占用。

网元融合重构是对功能关联度高的网元进行融合重构,例如,不同星载核心网网元共用相同平台组件,可整合为单一逻辑网元以减少资源占用^[11]。融合重构后的网元可通过内部组件进行通信^[79],从而减少传输时延、降低处理复杂度。除核心网网元之间的融合外,还可将核心网与接入网等其他类型的网络设备融合,进一步降低性能消耗^[4,13]。星载核心网轻量化示例^[11]如图6所示。

3.3 切换优化

卫星高速运动导致用户与卫星间通信链路频繁切换,传统地面移动性管理机制无法适配该场景,需通过优化以降低时延与信令开销,保障业务连续性。学术界提出多种切换优化方案,当前主流优化方向包括无状态架构设计、轨迹预测优化及集群管理协同等。

文献[14]提出无状态星载核心网架构SpaceCore,通过解耦上下文状态与星载核心网网元,以用户设备作为分布式状态仓库。为用户提供服务的新卫星直接从用户终端获取用户上下文,从而避免长距离的用户上下文传输,提升系统性能与稳定性。文献[59]设计的分布式无状态架构通过星载UDSF统一管理上下文,切换时延降低37%。文献[77]通过重构流程减少了信令向地面核心网的回传,降低时延;星载核心网区间切换时,星载AMF调用星载UDSF同步UE状态数据,在目标星载核心网侧重建会话,仿真结果表明,星载核心网区间切换时延降幅达28.2%,有效优化了切换性能。

文献[15]利用卫星轨迹可预测性与空间分布特性,减少接入网与核心网的交互频次,同时设计细粒度同步算法、降低核心网计算复杂度,并基于修改的Open5GS与UERANSIM搭建原型,实验结果表明其切换时延降低为

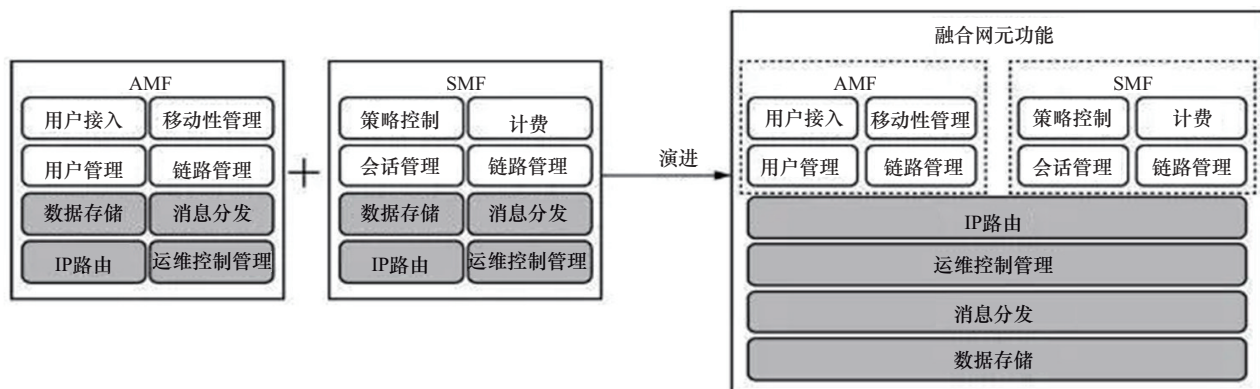
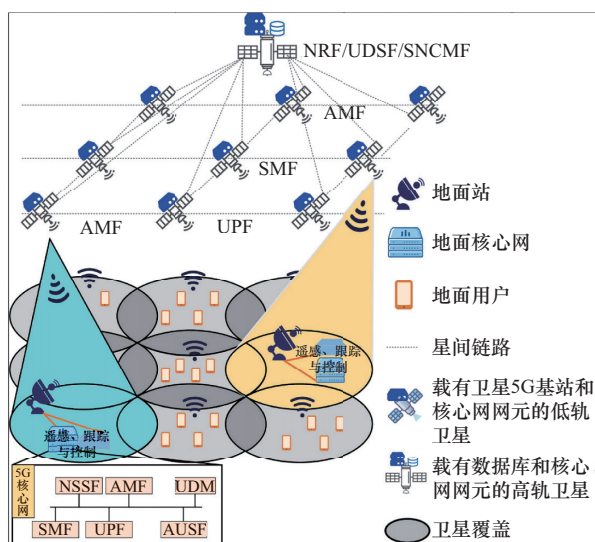


图6 星载核心网轻量化示例

3GPP NTN 等方案的十分之一。文献[24]提出基于深度强化学习的网络功能迁移算法,通过优化迁移时机与目标选择进一步提升切换稳定性。

文献[17]将覆盖区域重叠的多颗卫星划分为集群,指定集群控制器统一管理切换请求;用户在集群内切换时,无须向地面核心网更新位置,跨集群切换时仅需同步集群信息即可。文献[78]提出轻量智能切换决策框架,针对“海量用户切换需求”与“多接入点选择复杂”的矛盾,通过“聚类降维+分场景博弈决策”实现切换决策的快速性与统一性,仿真结果表明,该优化框架在切换时延、信令开销、收敛性上均显著优于传统架构。无状态卫星核心网架构^[59]如图7所示。



注：SNCF代表卫星网络控制和管理功能；NSSF代表网络切片选择功能

图7 无状态卫星核心网架构

3.4 星载核心网动态部署

在卫星平台部署核心网时,部署不当易导致星载核心网总体使用效率低下,进而引起控制面或用户面时延增加,因此需同时考虑用户分布与卫星动态异构资源分布。为此,研究者们提出多种星载核心网部署或迁移算法,以降低控制面与用户面时延^[75-76]。

文献[75]将低轨星座中AMF、SMF与UPF的部署问题转化为多目标优化问题,并证实其为NP-Hard问题。在此基础上,综合考虑部署成本、信令完成时间及转发时间,基于遗传算法NSGA-II提出了星载核心网控制面网元部署算法,该算法使用快速非支配排序方法对每个个体的适应度值进行排序,并计算拥挤距离,在每一代种群中根据帕累托级别和拥挤距离挑选个体组成新种群,

迭代结束后获得帕累托前沿,最后根据不同优化目标的各自权重形成最终部署方案。该算法在切换流程与服务请求流程中显著减少了信令流程完成时间与转发开销,同时保持所有信令流程的高可靠性。此外,通过构建迁移图设计星载UPF迁移算法,使星载UPF能够根据卫星网络的动态拓扑优化部署位置,降低用户面时延与迁移开销。

文献[76]针对低轨卫星星座覆盖区域内的用户业务需求非均匀分布特性,通过构建包含业务需求、卫星资源和核心网分布的系统模型,定义了综合考虑业务时延和核心网分布式部署密度的目标函数,并提出一种基于业务需求的星载核心网动态部署算法,实现了星载核心网的按需部署。仿真结果表明,该算法在保证业务时延较低的同时提升了星载资源利用率,有效解决了非均匀业务需求分布下的星载核心网部署问题。

3.5 边缘计算与缓存

卫星边缘计算与缓存技术将存储与算力资源延伸至卫星平台,可降低回传时延、减轻星地链路压力与地面处理成本,同时通过“数据不落地”处理机制,提升数据安全性,其实现的核心前提是核心网网元UPF部署上星。

卫星部署边缘计算可实现业务本地化处理,通过在轨筛选高价值数据,无须回传完整数据或仅传输少量关键信息,从而节约资源、提升效率^[9,19,22]。星上处理还可避免数据传输过程中的泄露风险,提升业务安全性^[18,21]。对于时延容忍型业务,星载UPF通过数据缓存适配卫星间歇覆盖特性,保障业务连续性^[40]。针对单颗卫星资源受限的问题,文献[80-81]通过星间链路协作形成资源丰富的边缘云,在其中进行任务分配,提升计算、缓存与通信资源的利用率,减轻单颗卫星的资源压力。

文献[23]提出3层分布式网络缓存管理架构,将缓存放置问题转化为马尔可夫决策过程,引入基于图卷积网络的多智能体优势“演员—评论员”算法优化决策,同时提出内容交付成本指标。仿真验证结果表明,该架构较传统集中式缓存方案,内容交付成本降低40%,且在卫星覆盖区域切换时,缓存命中率保持稳定。文献[20]结合用户需求预测与卫星轨道参数优化缓存推送策略,通过分析卫星轨道数据预判用户请求热点区域,缓存命中率提升约25%,有效减少重复数据传输^[20]次数。卫星边缘计算示例^[9]如图8所示。

4 星载核心网未来研究方向

4.1 智能核心网

人工智能技术将深度融入星载核心网设计、部署、

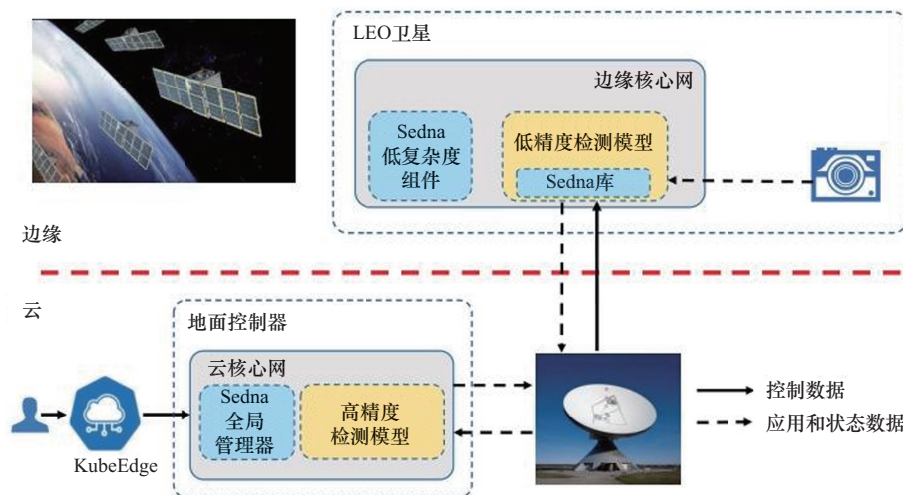


图8 卫星边缘计算示例

运维全生命周期，实现从静态配置到动态认知的根本性转变，成为提升网络自适应能力的核心抓手。在信令优化层面，依托智能体通信技术构建分布式信令交互体系，基于多智能体协同通信架构^[82]，在星上构建分布式智能决策节点，实现信令交互的局部优化与全局协调，智能识别并削减冗余信令开销。针对高动态业务场景，引入深度强化学习等算法构建网络状态预测模型，让网络自主感知业务需求、卫星轨道变化、星间链路质量等动态因素，实现无线、计算和存储资源的联合动态调配，保障极端负载条件下的服务质量，并动态调整网元部署与组网策略，实现“无人干预”的在轨自演进^[83]。同时，可进一步引入知识图谱构建“业务意图—网络策略—资源实体”3层语义映射体系，实现星载核心网对差异化业务需求的精准理解与资源预调度，显著降低会话建立时延，推动星载核心网向具备在线学习与自主演进能力的“认知型网络”方向发展。

4.2 抗毁性与容灾能力增强

针对空间电磁辐射、太空垃圾等导致的卫星硬件故障、软件服务中断问题^[84-85]（如单粒子翻转导致逻辑错乱、卫星失效导致软件停止服务），未来星载核心网需构建软硬协同的多维韧性防护体系。在硬件层面，重点发展面向空间辐射环境的异构加固技术，集成抗辐射芯片、可重构逻辑单元与容错存储系统，提升单机在轨可靠性。在系统机制层面，应设计具备快速接管能力的“星—星—地”3级容灾体系，通过轻量级数据同步协议与状态镜像技术，实现故障卫星业务在备份节点间的无缝迁移。同时，利用软件定义网络与星间链路构建分布式冗余拓扑，支持多星协同的“虚拟核心网池”，确保单星或多星

故障时仍可维持网络服务不中断，显著提升系统在极端条件下的业务连续性。

4.3 新型业务适配与能力拓展

面向6G AI原生服务、“通导感算”一体化服务等新兴业务需求，需突破星载核心网业务适配范式^[9]。针对AI与感知服务等产生的海量数据，需研发星上轻量化边缘计算框架，在星上完成数据预处理以减少星地传输量，同时优化星间链路协议适配链路时变特性；针对星上AI推理与遥感数据处理等高计算负载任务，需研究星地协同的增量学习与模型分割机制，实现数据在轨预处理与分级聚合，缓解星地传输瓶颈。此外，面对“通导感算”一体化需求，需研究核心网与遥感、导航、计算系统的协同机制，制定多系统数据融合标准，实现通信、遥感、导航多源数据一体化处理，拓展星载核心网作为空间信息枢纽的服务边界。

4.4 安全与隐私保护

针对星载核心网的链路窃听、认证漏洞、数据泄露等高安全风险^[86-87]，需构建“去中心化—零信任—本地化处理”防护体系。探索基于区块链的轻量级共识机制，依托区块链分布式账本实现信令与数据的不可篡改存储。结合量子加密技术强化链路传输安全，通过去中心化身份管理系统完成设备与用户的跨域身份验证^[88]。引入零信任架构，融合星上轻量级密码学原语、可信执行环境及智能体攻防技术，对关键操作开展实时身份认证、权限校验与环境隔离，建立以“业务会话”为粒度的动态访问控制策略。同时，发展联邦学习等隐私计算技术在星载场景的适用性，推动用户数据在不出星、不落地的前提下完成价值提取，从架构层面平衡用户隐私与数据

效用。

4.5 标准化与互操作提升

当前卫星网络与地面网络接口协议类型繁杂、碎片化问题突出,跨系统兼容性差,亟须构建开放、统一的星载核心网标准化体系。需重点围绕星载与地面核心网交互、星间/星地链路传输场景,针对性制定统一接口协议规范,优化星地协同调度机制^[89-90]。研发异构网络适配方案,实现非3GPP制式与3GPP制式卫星网络的互联互通,提升跨系统通信能力与效率。同时,兼顾代际兼容需求,保障前期部署的4G、5G卫星网络与6G卫星网络的兼容性,设计可平滑升级的网元模块与协议栈,支持用户在不同代际、制式网络间无感知切换。

5 结束语

星载核心网作为实现全球无缝通信与6G空天地一体化网络的核心技术,已从概念验证阶段迈向工程实践阶段。本文综述了其标准化进展、关键技术与未来研究趋势,可以预见,随着卫星制造、虚拟化与人工智能等技术的发展,星载核心网有望在未来实现规模化部署,成为连接天地、服务全球的关键基础设施,为偏远地区通信、应急救援、远洋航行等场景提供稳定可靠的通信支撑。

参考文献

- [1] Xia X. 6G satellite communication: key technologies, challenges and trends[C]//Proceedings of the 2024 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2024.
- [2] 中移智库. 面向6G的天地一体融合网络技术白皮书[R]. 北京: 中移智库, 2024.
China Mobile Think Tank. White paper on 6G-oriented integrated terrestrial and non-terrestrial network technologies[R]. Beijing: China Mobile Think Tank, 2024.
- [3] Sun Y H, Peng M G, Zhang S J, et al. Integrated satellite-terrestrial networks: architectures, key techniques, and experimental progress[J]. IEEE Network, 2022, 36(6): 191-198.
- [4] Cui H X, Zhang J, Geng Y H, et al. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: Requirements, architecture and challenges[J]. China Communications, 2022, 19(2): 90-108.
- [5] 王尚广, 王超, 马晓, 等. 星载6G核心网架构与网元功能设计及验证[J]. 电信科学, 2024, 40(9): 28-43.
Wang S G, Wang C, Ma X, et al. Spaceborne 6g core network architecture, network element function design and verification[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(9): 28-43.
- [6] 尼凌飞, 胡博, 王辰, 等. 5G与卫星网络融合演进研究[J]. 移动通信, 2022, 46(1): 51-57.
Ni L F, Hu B, Wang C, et al. Research on evolution of integration between 5g and satellite network[J]. Mobile Communications, 2022, 46(1): 51-57.
- [7] Xing R L, Ma X, Zhou A, et al. From earth to space: a first deployment of 5G core network on satellite[J]. China Communications, 2023, 20(4): 315-325.
- [8] 中国移动. 发射成功!“中国移动01星”“星核”验证星顺利入轨[EB]. 2024.
China Mobile. Launch successful! "China Mobile 01 Satellite" and "Star Core Verification Satellite" successfully inserted into orbit [EB]. 2024.
- [9] Wang S G, Li Q. Satellite computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(24): 22514-22529.
- [10] Liang C C, Guo Y H, Wu Z X. A lightweight core network function deployment strategy for LEO satellites[C]//Proceedings of the 2025 IEEE 6th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT). Piscataway: IEEE Press, 2025.
- [11] 陈希, 赵逸群, 张铭喆, 等. 星载核心网轻量化设计策略及其性能优化[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(4): 71-78.
Chen X, Zhao Y Q, Zhang M H, et al. Spaceborne core network lightweight design strategy and its performance optimization[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(4): 71-78.
- [12] Han Z Z, Xu C, Liu K, et al. A novel mobile core network architecture for satellite-terrestrial integrated network[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [13] Yang J Y, Geng Y H, Mao H B, et al. Satellite-terrestrial integrated network architecture towards 6G with user plane function trimming [C]//Proceedings of the 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2023.
- [14] Li Y J, Li H W, Liu W, et al. A case for stateless mobile core network functions in space[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. New York: ACM, 2022.
- [15] Wu J S, Su S J, Wang X, et al. Accelerating handover in mobile satellite network[PP]. arXiv PrePrint, 2025, arXiv: 25.12389.
- [16] 王胡成, 徐晖, 孙韶辉. 融合卫星通信的5G网络技术研究[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 535-542.
Wang H C, Xu H, Sun S H, et al. Research on 5g network technology integrated with satellite communication[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 535-542.
- [17] Kim J, Lee J, Ko H, et al. Space mobile networks: satellite as core and access networks for B5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(4): 58-64.
- [18] 潘筱涵, 陆璐, 邓平科, 等. 基于天基极简核心网的星地协同组网

- 架构、技术及试验[J]. 电信科学, 2024 (6).
- Pan X H, Lu L, Deng P K, et al. Space-ground collaborative networking architecture, technologies and experiments based on spaceborne lightweight core network[J]. Telecommunications Science, 2024(6).
- [19] 牛娇红, 方琰崑, 章璐. 5G-A 空天地融合核心网方案及关键技术[J]. 移动通信, 2022, 46 (10): 12-19.
- Niu J H, Fang Y W, Zhang L. 5G-A space-air-ground integrated core network scheme and key technologies[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 12-19.
- [20] Wang C, Ma X, Xing R L, et al. Delay and resource-aware satellite UPF service optimization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(4): 2564-2579.
- [21] 邓平科, 张同须, 施南翔, 等. 星算网络——空天地一体化算力融合网络新发展[J]. 电信科学, 2022, 38 (6): 71-81.
- Deng P K, Zhang T X, Shi N X, et al. Satellite computing network: new development of space-air-ground integrated computing power convergence network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38 (6): 71-81.
- [22] Xie R C, Tang Q Q, Wang Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues [J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [23] Yang J, He J C, Cheng N, et al. Multilayer satellite network collaborative mobile edge caching: a GCN-based multi-agent approach[J]. China Communications, 2024, 21(11): 56-74.
- [24] Liu Y, Wang L H, Liu A, et al. Efficient onboard signaling processing for satellite-terrestrial integrated core networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(24): 39865-39879.
- [25] Li Y Z, Huang J, Sun Q B, et al. Cognitive service architecture for 6G core network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(10): 7193-7203.
- [26] 3GPP. Study on integration of satellite components in the 5G architecture (Release 19): TR 23.700-29 [S]. 2024.
- [27] 3GPP. Study on NR to support non-terrestrial networks (Release 15): TR 38.811 [S]. 2020.
- [28] 3GPP. Study on using satellite access in 5G (Release 16): TR 22.822 [S]. 2018.
- [29] 3GPP. Study on architecture aspects for using satellite access in 5G (Release 17): TR 23.737 [S]. 2021.
- [30] 3GPP. Study on Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT)/enhanced Machine Type Communication (eMTC) support for Non-Terrestrial Networks (NTN) (Release 17): TR 36.763 [S]. 2021.
- [31] 3GPP. Study on management and orchestration aspects of integrated satellite components in a 5G network (Release 17): TR 28.808 [S]. 2021.
- [32] 3GPP. Non-Access-Stratum (NAS) functions related to Mobile Station (MS) in idle mode (Release 17): TS 23.122 [S]. 2025.
- [33] 3GPP. Non-Access-Stratum (NAS) protocol for 5G System (5GS); Stage 3 (Release 17): TS 24.501 [S]. 2025.
- [34] 3GPP. Mobile radio interface Layer 3 specification; Core network protocols; Stage 3 (Release 17): TS 24.008 [S]. 2023.
- [35] 3GPP. Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3 (Release 17): TS 24.301 [S]. 2024.
- [36] 3GPP. 5G System; Session Management Policy Control Service; Stage 3 (Release 17): TS 29.512 [S]. 2025.
- [37] 3GPP. 5G System; Common Data Types for Service Based Interfaces; Stage 3: TS 29.571 [S]. 2025.
- [38] 3GPP. Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) application: TS 31.102 [S]. 2025.
- [39] 3GPP. Study on 5G System with Satellite Backhaul (Release 18): TR 23.700-27 [S]. 2022.
- [40] 3GPP. Study on integration of satellite components in the 5G architecture (Release 19): TR 23.700-29 [S]. 2024.
- [41] 3GPP. Study on Integration of satellite components in the 5G architecture (Release 20): TR 23.700-19 [S]. 2025.
- [42] 3GPP. Study on 6G Use Cases and Service Requirements (Release 20): TR 22.870 [S]. 2025.
- [43] ITU-T. FMSC-Framework for IMT-2020 networks and beyond: Y.3201 [S]. 2023.
- [44] 中国通信标准化协会. 支持窄带物联网(NB-IoT)高轨卫星 IMS 语音通话的移动核心网增强技术研究[R]. 2025.
- China Communications Standards Association. Research on mobile core network enhancement technology for NB-IoT high orbit satellite IMS voice call[R]. 2025.
- [45] ETSI. GEO-mobile radio interface specifications; part 1: general specifications; sub-part 3: general system description: TS 101 376-1-3[S]. 2009.
- [46] Broadband global area network (BGAN)[EB]. 2021.
- [47] ETSI. Satellite earth stations and systems (SES); part 3: control plane and user plane specifications; sub-part 6: adaptation layer operation: TS 102 744-3-6[S]. 2015.
- [48] 3GPP. Solutions for nr to support non-terrestrial networks(ntn): TR 38.821[S]. 2020.
- [49] Vasisht D, Shenoy J, Chandra R. L2D2: low latency distributed downlink for LEO satellites[C]//Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference. New York: ACM, 2021: 151-164.
- [50] Li Y J, Li H W, Liu L X, et al. "Internet in space" for terrestrial users via cyber-physical convergence[C]//Proceedings of the Twentieth ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM, 2021.
- [51] Del portillo I, Cameron B G, Crawley E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [52] Hughes. OneWeb gateways require complex hughes engineering

- [EB]. 2021.
- [53] Reddit. Online discussion with Starlink engineers about satellites' capability[EB]. 2021.
- [54] FierceWireless. Lockheed Martin teams up with Omnispace on hybrid 5G space network[EB]. 2021.
- [55] SatelliteToday. Lynk co-founder says satellite-to-cell tech will be "bigger than 5G"[EB]. 2021.
- [56] AST SpaceMobile[EB]. 2021.
- [57] Avellan A, Jayasimha S. System and method for high throughput fractionated satellites (HTFS) for direct connectivity to and from end user devices and terminals using flight formations of small or very small satellites: US9973266[P]. 2018-05-15.
- [58] Speidel T R, Gerber A J. Method and apparatus for handling communications between spacecraft operating in an orbital environment and terrestrial telecommunications devices that use terrestrial base station communications: US12244401[P]. 2025-03-04.
- [59] Liu Y, Wang L H, Lu Z M, et al. A stateless design of satellite-terrestrial integrated core network and its deployment strategy[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(1): 953-966.
- [60] Liu L X, Li Y J, Li H W, et al. Democratizing direct-to-cell low earth orbit satellite networks[J]. GetMobile: Mobile Computing and Communications, 2024, 28(2): 5-10.
- [61] Mohammadkhan A, Ramakrishnan K K, Jain V A. CleanG: improving the architecture and protocols for future cellular networks with NFV[J]. ACM Transactions on Networking, 2020, 28(6): 2559-2572.
- [62] 王胡成, 徐晖, 孙韶辉. 星地融合 5G 网络架构增强技术研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(6): 1-4+9.
- Wang H C, Xu H, Sun S H. Research on enhanced technology of space-ground integrated 5g network architecture[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(6): 1-4+9.
- [63] Zhu X M, Jiang C X, Kuang L L, et al. Cooperative multilayer edge caching in integrated satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 2924-2937.
- [64] Chen S Z, Sun S H, Kang S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication: the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [65] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
- Sun S H, Dai C Q, Xu H, et al. Research on space-ground integrated networking for 6g[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (natural science edition), 2021, 33(6): 891-901.
- [66] Shi H Y, Zhang X, Wu P X, et al. ComEdge: cloud-native platform for integrated computing and communication in satellite-terrestrial network[J]. Electronics, 2023, 12(20): 4252.
- [67] Wang C, Zhang Y R, Li Q, et al. Satellite computing: a case study of cloud-native satellites[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Edge Computing and Communications (EDGE). Piscataway: IEEE Press, 2023.
- [68] Li Q, Wang S G, Ma X, et al. Towards sustainable satellite edge computing[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE). Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [69] Wang S G, Li Q, Xu M W, et al. Tiansuan constellation: an open research platform[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE). Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [70] Xu Z A, Chen G J, Fernandez R, et al. Enhancement of direct LEO satellite-to-smartphone communications by distributed beamforming[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(8): 11543-11555.
- [71] Li Q, Wang S G, Ma X, et al. Service coverage for satellite edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 695-705.
- [72] Luo Z H, Fu S, Theis M, et al. Democratizing cellular access with CellBricks[C]//Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference. New York: ACM, 2021.
- [73] Bhattacharjee D, Kassing S, Licciardello M, et al. In-orbit computing: an outlandish thought experiment? [C]//Proceedings of the 19th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM, 2020:197-204.
- [74] Moradi M, Sundaresan K, Chai E, et al. SkyCore: moving core to the edge for untethered and reliable UAV-based LTE networks[C]//Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2018: 35-49.
- [75] 刘宇. 服务化星载核心网关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2025.
- Liu Y. Research on key technologies of service-oriented spaceborne core network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2025.
- [76] 张成晨, 王若琳, 张爽, 等. 面向低轨卫星通信的星载核心网部署方法[J]. 移动通信, 2025, 49(6): 142-146.
- Zhang C C, Wang R L, Zhang S, et al. Deployment method of spaceborne core network for low earth orbit satellite communication[J]. Mobile Communications, 2025, 49(6): 142-146.
- [77] Huang S X, Wang L H, Wen X M, et al. A satellite-terrestrial integrated network architecture based on stateless core network[C]//Proceedings of the 2023 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 390-395.
- [78] Ji S J, Sheng M, Zhou D, et al. Flexible and distributed mobility

management for integrated terrestrial-satellite networks: challenges, architectures, and approaches[J]. IEEE Network, 2021, 35(4): 73-81.

- [79] Jain V, Chu H T, Qi S X, et al. L²5GC: a low latency 5G core network based on high-performance NFV platforms[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. New York: ACM, 2022: 143-157.
- [80] Li C C, Zhang Y S, Hao X K, et al. Jointly optimized request dispatching and service placement for MEC in LEO network[J]. China Communications, 2020, 17(8): 199-208.
- [81] Cui G F, Duan P F, Xu L X, et al. Latency optimization for hybrid GEO-LEO satellite-assisted IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(7): 6286-6297.
- [82] Yang Y X, Chai H C, Song Y Y, et al. A survey of AI agent protocols[PP]. arXiv preprint, 2025, arXiv: 25.12389.
- [83] Lu L, Liu C, Zhang C H, et al. Architecture for self-evolution of 6G core network based on intelligent decision making[J]. Electronics, 2023, 12(15): 3255.
- [84] Mcfall-Johnsen M. About 1 in 40 of SpaceX's Starlink satellites may have failed[J]. Business Insider, 2020, 3.
- [85] Tariq M. SpaceX says a geomagnetic storm just doomed 40 Starlink internet satellites[EB]. 2022.
- [86] Oakley J G. Cybersecurity for space: protecting the final frontier[M]. Berkeley: Apress, 2020.
- [87] Jiang C X, Wang X X, Wang J, et al. Security in space information networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 82-88.
- [88] Liu H M, Liu Z, Zhao M, et al. Evaluation of blockchain-enabled mobile core network control plane for satellite-terrestrial integrated networks[C]//Proceedings of the ICC 2022-IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022.
- [89] Han L, Dong L J, Retana A, et al. Evolution to 6G for satellite NTN integration: from networking perspective[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 31st International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2023.
- [90] Lin P P. Technical analysis of non-terrestrial networks[C]//Proceedings of the 2024 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2024.

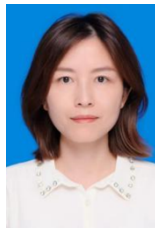
[作者简介]



张成晨 (1990-), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司网络技术研究员, 主要研究方向为卫星互联网网络架构、6G 系统、天地一体化信息网络等。



陈希 (1988-), 男, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司网络技术研究员, 主要研究方向为卫星互联网网络架构、5G/6G 移动通信和星载轻量化核心网技术等。



陆珊 (1985-), 女, 上海卫星互联网研究院有限公司网络技术研究员, 主要研究方向为移动核心网演进、标准和技术, 5G、虚拟化、未来天地融合网络架构等。



杜平 (1978-), 男, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司高级专家, 主要研究方向为卫星互联网网络架构、承载网和核心网技术体制标准。



权洪波 (1981-), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司网络技术研究员, 主要研究方向为5G/6G 核心网、星地一体化网络资源管理等。