

面向6G的天地一体化去中心化网络架构

章谦骅^{1,2}

(1.浙江大学, 浙江 杭州 310058;

2.之江实验室, 浙江 杭州 311121)

摘要: 随着5G技术的广泛应用, 6G技术的研究与发展已成为全球通信领域的热点。6G网络不仅要求更高的数据传输速率和更低的时延, 还需要解决5G未能彻底解决的全域覆盖问题。天地一体化网络通过卫星通信与地面移动通信的深度结合, 有望实现全球无缝覆盖。结合目前天地一体化组网项目中的实际应用需求, 提出一种面向6G的天地一体化去中心化网络架构, 分析其关键技术挑战和解决方案, 并对该架构的应用场景进行分析和总结。

关键词: 卫星通信; 6G技术; 天地一体化去中心化网络架构

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025018

Decentralized Architecture for 6G Space-Integrated-Ground Network

ZHANG Qianhua^{1,2}

1. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China

Abstract: With the widespread application of 5G technology, the research and development of 6G technology has become a hot topic in the global communication field. 6G networks not only require higher data transmission rates and lower latency, but also need to solve the global coverage problem that 5G has not completely solved. The space-integrated-ground network is expected to achieve seamless global coverage through the deep integration of satellite communication and ground mobile communication. This article proposes a decentralized architecture for 6G space-integrated-ground network based on the practical application needs of the space-integrated-ground network project, analyze its key technical challenges and solutions, and summarize the future application scenarios of this architecture.

Keywords: satellite communication, 6G technology, decentralized space-integrated-ground network

0 引言

6G网络的发展不仅需要解决数据传输速度和时延的问题, 还需要满足未来物联网、智慧城市、自动驾驶等应用对全域覆盖和高效计算能力的需求。传统的地面移动通信网络在偏远地区、海洋、高空等区域存在覆盖盲区, 而卫星通信虽然能够提供全球覆盖, 但存在成本高、传输效率低等问题。因此, 6G天地一体化网络成为解决这些问题的有效途径。

面向6G的天地一体化网络架构是指通过卫星(涵盖高轨卫星、中低轨卫星等)与地面通信系统实现直接连接的网络架构, 未来可实现全球范围内的无缝覆盖和高效数据传输, 得到了产业界和学术界的广泛关注^[1]。这一网络架构融合了天基网络和地面网络, 旨在构建一个覆盖广泛、高效通信的多层异构网络体系, 以满足未来全球通信需求。

然而, 6G天地一体化网络目前仍存在一些不足。首先, 网络架构的复杂性导致资源难以整合, 通信协议的

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2025-02-11

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(No.LZ23F010001)

Foundation Item: Key Program of Zhejiang Provincial Natural Science Foundation(No.LZ23F010001)

不统一也增加了信息传输时的开销^[2],网络拓扑的高动态性、传输时延的差异以及路由转发的复杂性等,都给网络通信带来了困难^[3-4]。其次,智能卫星的概念被提出,随着AI技术的不断发展,如何快速将诸如DeepSeek-R1这样低成本、高性能的大模型部署到卫星上,使突破性的AI技术快速上天,也成为6G星地直连网络关注的焦点^[5]。最后,典型应用场景的落地实施,目前最核心的应用就是手机直连通信业务,如何根据需求提供匹配的网络服务能力,以及保障服务质量,同时降低网络建设和维护成本,也是当前面临的问题之一^[6]。

1 研究进展及挑战

1.1 6G网络架构研究

目前在6G网络架构方面的研究取得了重要进展,包括关键技术、解决方案与系统组网试验等。网络规模向巨型星座发展,对6G卫星网络带来的挑战体现在:节点规模大幅增加,提高了星地链路切换频率,增加了星间转发跳数和路由传输复杂度^[7]。

针对6G网络模型复杂、网络拓扑先验知识获得困难的特点,西安电子科技大学的研究团队基于深度强化学习的垂直切换策略,获得了更低的切换频率和更高的平均吞吐量^[8]。中国科学院等团队研究了水平与垂直面解耦的活动基站选址和端到端的空天地一体化网络切片技术,降低了活动基站选址难度,并提升了多样化业务保障性^[9]。北京空间信息传输中心研究团队基于低轨星座“天基基站+地面核心网”的典型布局,提出了一种多节点分布的地面核心网架构,该架构具备业务分担和备份接替的能力,缓解了单节点核心网的承载压力,提高了系统可靠性和整体性能^[10]。大唐移动通信团队研究了面向星地融合的高动态网络切片技术,通过自研的移动通信网络平台验证了星地融合组网下的多业务网络切片共存以及轻量化核心网上星的可行性^[11]。

这些工作涉及多个方面,包括通信切换、网络架构、网络切片等,但复杂且相互独立的网络架构和通信系统,使得目前的卫星网络无法实现互联互通和标准统一。

1.2 天基智能算力研究

6G技术在天基算力领域有较多技术创新,如天基智能计算系统、人工智能网络、卫星边缘计算等技术。这些技术在过去多年间不断迭代发展,尝试用更低的成本来实现更强的太空算力。

北京工业大学的研究团队开展了针对6G网络边缘计算性能的研究,设计了聚合与组合两种天基计算资源的

融合模式,验证了该架构在资源优化配置、迭代收敛速度方面的优势^[12]。针对全球用户非均匀分布和卫星资源受限的问题,西安电子科技大学的研究团队提出了一种动态星地综合移动性管理策略,以应对用户、地面站和卫星之间的相对移动性,获得了最小的切换代价和最低的迁移时延^[13]。南京大学的研究团队在动态低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)星座边缘计算网络的系统模型下,提出了一种基于随机博弈的多用户计算卸载策略,基于随机学习设计了一种智能随机学习算法,能够显著降低同信道干扰和系统开销^[14]。北京大学的研究团队围绕卫星天地算力网络中计算/频谱资源管理问题,设计了一种天地异构资源协同博弈机制,通过竞争网络中的计算/频谱资源实现了数据卸载与计算,获得了更低的系统时延^[15]。

在天基算力系统方面,我国近几年成功发射了多颗用于验证星地直连通信、太空激光组网、太空算力组网的卫星,并开展了相关试验。这些卫星搭载了激光通信设备、基础算力资源和算法模型,能够支持高带宽、低时延、智能化的星地通信^[16-17],为智能化的算力网络在卫星上部署提供了可能。

1.3 手机直连应用研究

手机直连卫星作为未来实现天地一体化融合的一种技术手段,得到了产业界和学术界的广泛关注,需要快速迭代的消费电子产品使得该项技术的演进更加快速。

中国人民解放军军事科学院等研究团队针对基于同步轨道卫星和非同步轨道卫星的两种手机直连技术路线,从空中接口侧、卫星侧、网络侧和终端侧梳理技术挑战,提出了星地同步、星载超大阵面天线、星地异构网络漫游等若干解决方案,为手机直连卫星技术的发展提供了技术支撑^[18]。中国空间技术研究院等研究团队提出了基于高轨卫星和低轨卫星星座的卫星移动通信系统网络架构,分析了网络特性及卫星技术挑战,研究了网络通信体制及相关关键问题^[19]。

目前诸如小米、华为等手机终端厂商均联合运营商推出了具备直连卫星功能的手机,但其功能和使用场景依然受到较大限制。当前阶段,手机直连卫星在技术上仍面临诸多挑战,距全面商业化应用还有一定的距离。

1.4 关键技术挑战

(1) 星间/星地网络连续可靠传输

星间/星地网络连续可靠传输所面临的挑战如下:星间链路受空间环境(如电离层扰动、宇宙辐射)及卫星高速运动影响,易出现信号衰减、链路频繁中断(如低

轨卫星链路切换周期短至数分钟)的情况,需设计高鲁棒性动态路由与快速重连机制;星地网络因大气层干扰(雨衰、多普勒频移)及地面遮挡(建筑物、特殊地形)易引发通信质量波动,需优化抗干扰编码与自适应传输技术;异构协议融合(如卫星专用协议与地面5G/6G兼容性不足)及跨域安全威胁(开放信道易受攻击)进一步加剧端到端可靠保障难度。

(2) 网络通信协议的优化

天地一体化网络面临异构网络融合、高动态拓扑适应、资源约束优化及协议兼容性协调等方面的挑战。首先,地面有线/无线网络、卫星星座及高空平台等异构网络在传输时延(如星间链路传输时延高达百毫秒级)、带宽差异(低轨卫星动态信道波动)、移动性(卫星节点高速运动)等方面存在显著差异,导致传统TCP/IP协议栈难以有效应对频繁的链路切换与拓扑重构;其次,现有网络协议在跨域路由(需兼顾星地时变路径与QoS保障)、流量调度(混合业务优先级与时延敏感型服务协调)、安全机制(开放空间信道防护与跨域认证)等方面缺乏统一标准。

(3) 卫星计算能力不足

卫星计算能力不足主要体现在:卫星平台受限于严苛的太空环境(如极端温度、高能粒子辐射)及严格的功耗、重量与体积约束,需采用抗辐射加固芯片与低功耗异构计算架构(如CPU+FPGA/ASIC),但其算力密度与地面数据中心相比仍存在数量级上的差距;星上实时任务(如遥感数据在轨处理、星间路由智能决策)对计算实时性要求高,而星载处理器性能有限与星间通信时延(百毫秒级)叠加,难以支撑复杂算法(如深度学习模型)的高效部署;星群协同计算需解决异构节点(不同轨道/型号卫星)间的资源动态分配、任务迁移同步及容错问题。

(4) 边缘算力资源分配

边缘算力资源分配所面临的挑战如下:网络边缘节点(如卫星、高空平台、地面边缘服务器)在计算能力、存储容量及能源供给上呈现显著异构性,需设计跨域资源统一抽象模型与动态适配机制;星地链路高动态性(卫星过顶时间短至数分钟)与网络拓扑频繁重构,导致任务卸载时延敏感性与资源状态感知滞后矛盾突出,传统静态分配策略难以实现实时最优调度;多类型业务(遥感处理、星间路由、应急通信)对算力需求差异大(如AI推理需TOPS级算力,而数据传输仅需基础处理),需构建智能化的优先级驱动与QoS保障机制,但星上轻

量化AI模型训练与推理能力不足,加剧了动态负载均衡难度。

(5) 手机直连应用落地

手机星地直连网络需要提供全场景服务,根据不同业务需求提供匹配的网络及算力服务能力。然而,卫星距离远、信号衰减严重且传播时延高,影响通信质量和实时性。手机天线需支持卫星频段,设计复杂且功耗高,影响电池续航。链路时延抖动大、用户和馈电路径切换频繁、星间/星地网络拓扑动态变化等因素不利于服务质量保障。目前的挑战是如何使每台接入直连网络的手机获得所需的网络及计算资源,并在使用后及时释放占用的资源,实现整个网络的动态开销最小,并提升用户体验。

2 6G天地一体去中心化网络架构

6G天地一体去中心化网络架构是指将天基多层次子网(包括高轨卫星、中低轨卫星及监控设备)和地面蜂窝多层次子网(包括宏蜂窝、微蜂窝和皮蜂窝)进行一体化融合,形成统一的智能网络。该架构通过星地协同,实现网络资源和计算资源的统一调度,满足多样化业务需求。

在卫星通信层面,目前及未来均存在多星座共存的情况,国内就包括GW星座千帆星座以及之江实验室提出的“三体”计算星座等。这些制式不同的卫星、调度方式不同的星座体系,需要在太空中进行互联互通,采用原先依靠核心总控进行管理的通信方式已无法进行控制和调度。因此,本文提出了一种去中心化的网络架构,在不同星座之间,通过分布式节点布局以及多个节点之间的直接通信,实现信息的快速传递和高效处理。这种架构避免了中心节点的瓶颈和单点故障问题,提高了网络的可靠性和稳定性,网络整体架构如图1所示。

2.1 去中心化网络架构设计

针对星间/星地网络连续可靠传输的问题,去中心化网络架构布局通过将通信节点分布到包括高中低轨卫星、无人机、地面基站等在内的多个层次和位置,实现全球范围的无死角覆盖和高效数据传输,同时去除传统通信网络中的中心节点,提高网络的健壮性、灵活性和可扩展性,确保在任何情况下都能提供稳定、可靠的通信服务。如图1所示,当处在不同星座下的手持终端需要进行通信时,并没有一个中心节点对业务进行统一处理,而是找到对应的接入卫星,快速部署资源进行通信并在结束后快速释放。当终端请求在轨计算资源时,低轨通信卫星将按需在高轨计算卫星上请求计算资源并在结束后释放。去

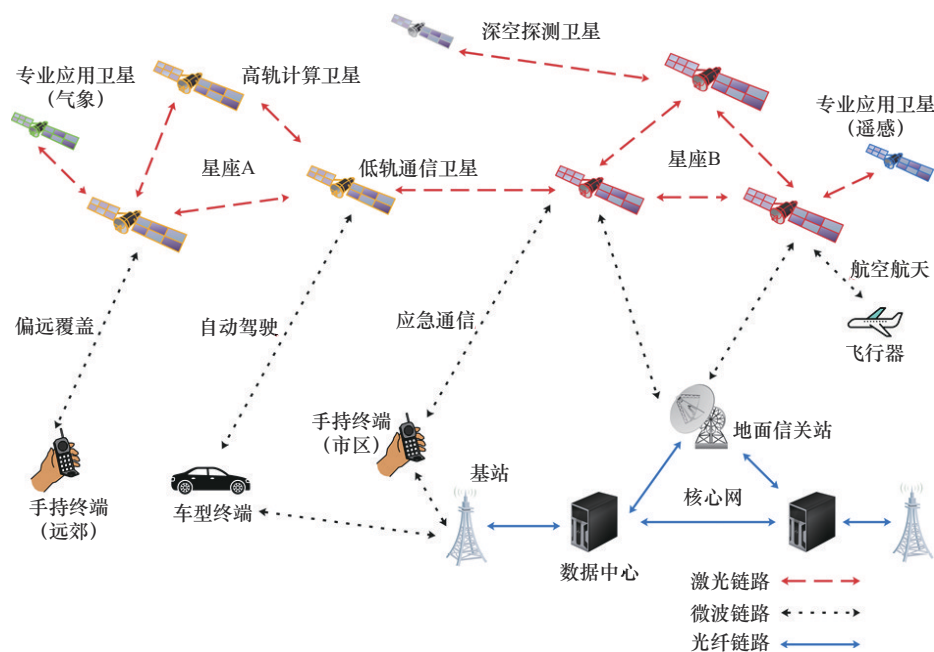


图1 6G天地一体去中心化网络架构

中心化网络与常规网络性能对比见表1。

去中心化网络采用点对点透传，在跨星座时不进行数据解包，降低了数据泄露的风险。数据传输采用加密技术，提高数据传输的安全性，有效防止未经授权访问和窃听。

2.2 自适应通信协议

由于卫星节点的不可修复性，一旦单节点失效将彻底改变原有的网络架构。同时，低轨卫星的网络拓扑本身就具有时变特性，异轨卫星之间还存在随周期变化的网络拓扑架构。天地一体去中心化网络可依据实时信道状况、环境干扰程度及业务需求，快速智能选择最优通信方式，不再通过中心节点去调度资源。当节点面临复杂电磁环境干扰，微波信号中断时，可通过自适应技术迅

速切换微波通信，凭借其绕射能力强、覆盖范围广的特点，保障信号稳定传输；而在对传输速率和容量要求较高，卫星姿态稳定时，则启用激光通信，利用激光光束方向性好、带宽大的优势，实现海量数据的高速传输，从而动态满足多样化的自适应通信需求。

2.3 智能卫星算力提升

针对卫星计算能力不足的问题，6G天地一体去中心化网络将计算基础设施虚拟化，将物理资源抽象为虚拟资源，实现计算功能的按需分配和动态调整，提高资源的灵活性和利用率。如图1所示，低轨卫星可以满足星地直连用户的一般计算请求，当需求更大算力时，可动态请求高轨算力资源，并于使用完后及时释放资源，实现动态资源共享，为6G星地直连通信提供更加高效、灵活

表1 去中心化网络与常规网络性能对比

网络性能	常规网络	去中心化网络
网络路由管理	由中心控制节点确定路由信息，节点数量较少时具备一定优势，无法管理跨星座路由信息	在传统路由基础上，去中心化网络可根据实际网络业务需求及网络资源使用情况，按协议快速部署链路资源，并在结束后释放
网络可扩展性	统一管理边缘计算资源，每次资源的部署与释放都需要经过中心节点决策	实现资源优化分配，降低网络复杂度，增加了网络的可扩展性，适应未来巨型星座需求
网络信息时延	中心节点统一进行资源调度，在节点较多时大幅增加网络时延	通过节点之间的快速组网，结束后的资源快速释放，保证服务质量最优及时延较小
跨星座通信	不支持跨星座信息透传	星座间采用自适应通信协议，在卫星间完成信息的透传
人工智能	不支持人工智能算法	通过人工智能和机器学习，长期分析业务流及网络传输瓶颈，提出节点部署优化建议，提升网络性能
		通过部署高算力节点服务专业应用卫星，将数据采用人工智能算法压缩后传输，大幅降低对网络带宽的需求

和可扩展的基础设施。针对传统的专业应用卫星（如遥感、气象卫星）星上资源受限的问题，采用智能计算进行星座布局。

2.4 边缘计算节点部署

针对边缘算力资源分配的问题，6G天地一体去中心化网络依靠分布式节点，部署了一种由高轨卫星、中低轨卫星及地面通信系统组成的多层异构网络结构，通过在高空轨道和低空轨道合理部署卫星节点，并与地面通信系统形成互补，实现全球范围内的广泛覆盖和高效连接。这种布局提高了网络的可靠性和灵活性，能够为用户提供无缝、高速和低时延的通信和计算服务。如图1所示，当专业应用卫星的计算资源无法满足其应用需求时，可以在星座内请求计算资源，也可在其他性能更好或处于空闲状态的星座中请求资源，实现卫星计算资源池共享。还可将分布式节点部署在地球同步轨道、月球轨道等关键位置，按需实现地球与深空之间的通信，为未来网络扩展提供技术储备。分布式节点选择遵循科学合理的布局原则，确保通信链网的全覆盖和高效性，并且考虑卫星寿命影响，网络整体需要长期演进和更新。

2.5 星地直连等应用接入

针对手机直连应用落地的问题，在6G天地一体去中心化网络中，当星座A内部的单颗卫星故障无法为用户提供接入服务时，业务可快速切换至星座内的另一颗卫星，从而保障整个星座内部业务不中断；当星座A核心节点出现故障无法为用户提供接入服务时，业务将快速切换至星座B，通过物理隔离保证业务继续进行。整个网络架构在卫星之间采用高速激光通信链路，确保信息的高速传输及安全性；在星地通信中采用微波链路，可以减少大气湍流及低轨卫星频繁切换对网络性能带来的影响，相对于传统的地面侧需要地面站光纤链路完成到基站的通信，支持星地直连的手持终端可以获得更低的系统复杂度及时延。

3 6G天地一体去中心化网络的关键技术

3.1 智能化网络管理技术

天地一体去中心化的网络管理和控制技术是实现高效、可靠通信的关键，这一技术通过智能网络管理和控制系统实现对网络资源的动态规划和调度。智能网络管理和控制系统使得网络管理和控制更加灵活和高效，各个节点之间可以相互协作，共同完成任务，从而可实现对网络资源的优化利用。此外，该系统还能够根据业务需求和网络资源情况，动态地规划网络路由和重构网络

功能，以满足不同场景下的通信需求。通过引入人工智能和机器学习算法，系统能够自动识别和解决网络中的问题，从而提高网络的稳定性和可靠性。这种智能化的管理方式采用统一的用户管理和安全机制，实现全网统一网络管理，并通过智能化的网络管理和控制功能提高网络管理效率和降低复杂度，不仅降低了运营成本，还提升了用户体验。

3.2 网络通信协议优化设计

天地一体化网络需设计兼顾动态性、异构性与资源约束的新型通信协议，其核心在于构建“智能融合、跨层优化、轻量化协同”的协议架构。突破传统分层协议栈限制，采用联邦式协议框架（如DTN/CCSDS）与5G/6G协议自适应适配；通过星地协同的拓扑感知与预测机制（嵌入AI驱动的动态路由算法）应对高动态链路切换；设计轻量化协议头部（如压缩编码与语义通信技术）降低传输开销，并引入容断传输机制（如，Licklider传输协议（Licklider Transmission Protocol, LTP）扩展）与网络编码技术增强链路可靠性；针对星地异构资源，实施跨层联合优化（如MAC层与网络层联合调度），结合计算优先路由策略（如，接触图路由（Contact Graph Routing, CGR））与边缘计算任务卸载，实现“传输-计算-存储”资源动态匹配；同时，需嵌入轻量级内生安全机制（如量子加密与可信认证），并构建时空分片的频谱共享模型，支持星间/星地频谱智能分配。

3.3 边缘智能计算技术

去中心化网络边缘计算技术将计算任务从原本的中心节点下沉到更接近数据源的边缘设备上执行，且无须再依靠中心节点进行任务调度。这一技术不仅优化了数据处理流程，还显著提升了通信效率和用户体验。边缘计算技术使得卫星和地面通信系统能够更快速地处理和分析数据，其通过在网络边缘部署计算节点，减少了数据传输到中心节点的时延，从而实现了实时数据处理和响应。该技术对于实现全球无缝覆盖和提供高质量通信服务具有重要意义。

3.4 高效数据传输与业务支撑技术

6G天地一体去中心化网络高效数据传输技术通过构建分布式网络架构，实现了卫星网络与地面网络的深度融合与高效协同。通过分布式的节点和链路，实现数据的直接传输和处理，不再依赖单一的中央节点传输和处理数据，而是由多个分布式节点共同实现传输和处理，降低了中心节点的负载，提高了网络的健壮性和可扩展性。这在未来的卫星网络中非常重要：由于卫星有固有

寿命和故障不可维修的特性,因此,地面带中心节点的网络不适合在卫星通信中使用。这种技术不仅为用户提供了更加泛在、智能、安全、可信的通信服务,还有效降低了运营成本,推动了网络的开放与业务创新。此外,面向6G的天地一体去中心化网络能够应对各种复杂场景和突发情况,确保数据的高效、可靠传输。

4 6G天地一体去中心化网络性能分析

4.1 网络时延性能分析

6G天地一体去中心化网络架构通过节点之间的快速组网,以及结束后的资源快速释放,保证服务质量最优及时延最低。这里对常规架构网络及去中心化架构网络端到端时延性能进行了对比,在其他条件相同的情况下,分析了不同网络节点数量与端到端时延之间的关系,结果如图2所示。

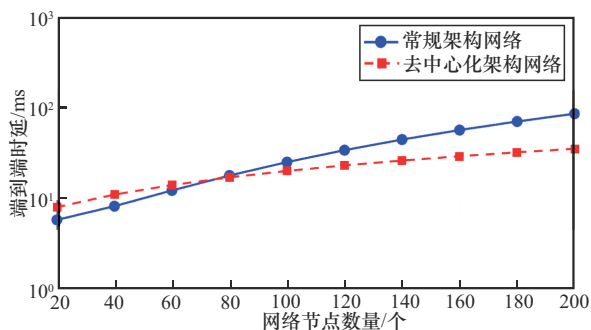


图2 常规架构网络与去中心化架构网络端到端时延性能对比

可以看出,随着网络节点数量的增加,去中心化架构网络的优势逐步显现。更低的网络时延使得用户能够随时获得低时延的网络性能,确保了通信的高效性。

4.2 资源分配效率分析

6G天地一体去中心化网络架构能够根据不同的应用场景和业务需求灵活调整网络资源和拓扑结构。这里对常规架构网络及去中心化架构网络性能进行了对比,在其他条件相同的情况下,分析了不同网络节点数量与资源分配效率之间的关系,结果如图3所示。

可以看出,随着网络节点数量的增加,去中心化架构网络在资源分配效率上具备明显的优势。去中心化架构网络使得边缘计算资源的分配效率随着节点的增加不断提高;而常规架构网络随着资源不断增加分配效率不断降低。去中心化架构网络的边缘能力不断增强,任意节点都能够快速完成计算资源的分配,让业务分配的效率不断提升。

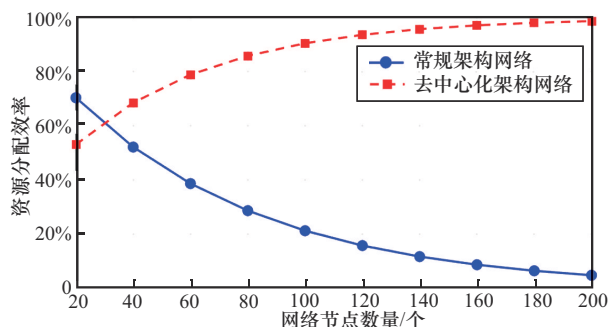


图3 常规架构网络与去中心化架构网络边缘计算资源分配效率对比

4.3 网络可靠性分析

6G天地一体去中心化架构网络使得各个节点之间可以相互协作,共同完成任务,即使部分节点出现故障或受到攻击,其他节点仍能继续工作,确保通信的连续性和稳定性,从而增强了网络的健壮性和容错能力。这里对常规架构网络及去中心化架构网络的可靠性进行了对比,在其他条件相同的情况下,对比了不同节点失效比例与网络连通率、网络吞吐量之间的关系,默认网络节点数为50个,且常规架构网络的中心节点不受到破坏,结果如图4所示。

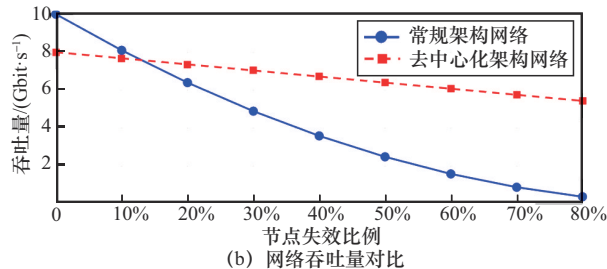
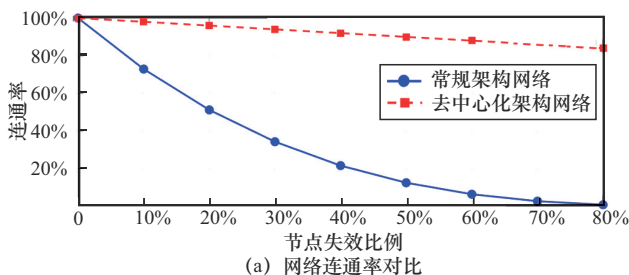


图4 常规架构网络与去中心化架构网络可靠性对比

可以看出,随着网络节点失效比例的增加,去中心化架构网络在网络连通率、网络吞吐量方面,都具备明显优势。去中心化使得网络能够迅速适应各种复杂环境,确保通信的稳定性和高效性。

5 应用场景

6G天地一体去中心化网络架构具有广泛的应用场景

和深远的意义，其应用场景主要有以下几个。

(1) 偏远地区通信覆盖

在偏远地区，如高山、孤岛、沙漠、海洋等，地面通信网络往往难以实现全面覆盖或成本高昂，去中心化网络架构可以利用卫星网络作为中继，实现对这些地区的通信覆盖。在去中心化的网络设计方案中，每个节点都具有独立的功能，即使部分节点出现故障，也能通过其他节点保持通信的连续性，从而提高了通信的可靠性。

(2) 应急通信保障

在自然灾害、突发事件等紧急情况下，地面通信网络可能会受到破坏。此时，去中心化网络架构可以作为应急通信手段，提供稳定可靠的通信服务。由于去中心化的设计，网络中的节点可以灵活调整，以适应不同场景下的通信需求，还可以提供跨地域的通信能力，使得救援人员可以实时获取现场信息，提高救援效率。

(3) 航空航天通信

随着人类对宇宙探索的不断深入，航空航天通信的需求也越来越迫切，因此，在航空航天领域，天地一体去中心化网络架构也具有广泛的应用前景：可以提供高速、稳定的通信服务，支持飞行器的数据传输、遥测遥控等功能。去中心化的设计可以提高网络的抗干扰能力和安全性，确保航天通信的可靠性和稳定性。

(4) 物联网应用

在物联网领域，去中心化网络架构可以支持大规模物联网设备的连接和管理。由于物联网设备数量庞大且分布广泛，传统的地面通信网络难以满足其通信需求；而天地一体去中心化网络可以提供更广泛的覆盖范围和更高的连接密度，支持物联网设备之间的实时通信和数据传输。去中心化的设计可以提高网络的灵活性和可扩展性，适应物联网应用的快速发展。

(5) 智能交通与自动驾驶

在智能交通和自动驾驶领域，天地一体去中心化网络架构可以提供高精度、低时延的通信服务。自动驾驶汽车需要实时获取周围环境的信息，以便做出正确的驾驶决策，可以提供高精度的定位和导航服务，还可实现实时的交通信息更新。去中心化的设计可以提高网络的抗干扰能力和稳定性，确保自动驾驶汽车在各种复杂环境下的安全行驶。

6 结束语

在面向6G的天地一体去中心化网络中，高轨卫星、低轨卫星及中继飞行器等网络节点都具备数据处理和传

输的能力，它们通过先进的通信技术和协议相互连接，形成一个高度协同、灵活可变的通信网络架构。这种网络架构不仅降低了网络传输的时延，提升了资源的分配效率，还提高了网络传输的可靠性，为用户提供了更加优质、高效的通信服务。与传统的中心化网络架构相比，天地一体去中心化网络架构具有更高的灵活性和可扩展性。这是因为网络节点可以灵活地加入或离开网络，使得该架构能够快速适应不同场景和业务需求的变化；同时，由于去除了中心节点，该架构也提高了网络的安全性，使得网络能够更好地应对各种突发事件和攻击。

此外，天地一体去中心化网络还具备智能化的特点。通过引入人工智能和机器学习等技术，该网络能够实时地监测和分析网络状态，预测和优化网络资源分配，提高网络的性能和可靠性。这种智能化的特点使得天地一体去中心化网络能够更好地满足未来物联网、工业互联网等对通信网络的需求。

随着技术的不断进步和应用需求的不断增长，天地一体去中心化网络架构将在未来发挥更加重要的作用，未来发展方向可能包括以下几点。

(1) 技术优化：进一步优化通信协议和数据处理算法，提高通信效率和数据处理能力。

(2) 扩展应用：拓展更多应用场景，如智能交通、智慧城市等。

(3) 标准化：推动相关标准的制定和完善，促进技术的普及和应用。

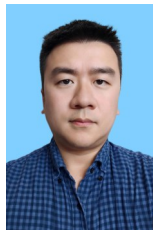
综上所述，6G天地一体去中心化网络架构具有诸多优势，将在未来发挥重要作用。随着技术的不断进步和应用需求的不断增长，该架构将不断完善和发展，以提供更加高效、安全和可靠的通信服务。

参考文献：

- [1] 何元智, 杨岭才, 肖永伟, 等. 天地一体化新路径: 手机直连卫星发展热点、挑战与关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 1-11.
HE Y Z, YANG L C, XIAO Y W, et al. New approach of integration space-ground: hotspots, challenges, and key technologies of direct-to-smartphone[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 1-11.
- [2] 虞志刚, 冯旭, 黄照祥, 等. 通信、网络、计算融合的天地一体化信息网络体系架构研究[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 11-29.
YU Z G, FENG X, HUANG Z X, et al. Research on the architecture of space-ground integrated information network: integration of

- communication, networking and computing[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 11-29.
- [3] 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[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [4] WANG J, ZHOU Y T, WANG B X. Design of 6G space-ground integrated network architecture based on ground core network[C]// Proceedings of the 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1250-1255.
- [5] 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.
- [6] 苏文博, 张驰, 王妮炜, 等. 天地一体通遥融合架构及其应用设想[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 77-84.
SU W B, ZHANG C, WANG N W, et al. Integrated architecture and application assumption of earth-space communication and remote sensing combination[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 77-84.
- [7] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 177-189.
CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 177-189.
- [8] 武艳, 潘广川, 姚明旻, 等. 基于深度强化学习的空天地一体化网络信息物理系统垂直切换策略[J]. 通信学报, 2024, 45(8): 180-191.
WU Y, PAN G C, YAO M W, et al. Vertical handover policy for cyber-physical systems aided by SAGIN based on deep reinforcement learning[J]. Journal on Communications, 2024, 45(8): 180-191.
- [9] 崔新雨, 伍杰, 周一青, 等. 空天地一体化融合组网的挑战与关键技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(1): 1-11.
CUI X Y, WU J, ZHOU Y Q, et al. Challenges of and key technologies for the air-space-ground integrated network[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(1): 1-11.
- [10] 尹曙明, 郝利云, 郭浩然, 等. 大型低轨通信星座的地面分布式核心网架构设计[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(3): 21-27.
YIN S M, HAO L Y, GUO H R, et al. Design of ground distributed core network architecture for large low earth orbit communication constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(3): 21-27.
- [11] 宋雅琴, 徐晖, 刘险峰, 等. 星地融合网络的组网关键技术探讨[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(3): 68-77.
SONG Y Q, XU H, LIU X F, et al. Exploration and discussion on key technologies for satellite-terrestrial integration networking[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(3): 68-77.
- [12] 徐晓斌, 王琪, 范存群, 等. 面向空天地一体化信息网络的边缘计算资源融合管理方法[J]. 计算机学报, 2023, 46(4): 690-710.
XU X B, WANG Q, FAN C Q, et al. An aggregated edge computing resource management method for space-air-ground integrated information networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2023, 46(4): 690-710.
- [13] JI S J, ZHOU D, SHENG M, et al. Dynamic space-ground integrated mobility management strategy for mega LEO satellite constellations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11043-11060.
- [14] 高玉芳, 姬智, 赵康健, 等. LEO 星座边缘计算网络中的动态计算卸载策略[J]. 通信学报, 2024, 45(7): 61-69.
GAO Y F, JI Z, ZHAO K L, et al. Dynamic computing offloading strategy in LEO constellation edge computing network[J]. Journal on Communications, 2024, 45(7): 61-69.
- [15] 张雨童, 彭煜明, 邸博雅, 等. 天地算力网络中的异构资源协同博弈[J]. 通信学报, 2023, 44(12): 15-27.
ZHANG Y T, PENG Y M, DI B Y, et al. Heterogeneous resource cooperative game in space-ground computing power network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(12): 15-27.
- [16] 张婷婷, 武楠, 姚海鹏. 天地融合网络智能组网体系架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 47-55.
ZHANG T T, WU N, YAO H P. Research on intelligent networking architecture for the integrated space-terrestrial networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 47-55.
- [17] 夏玮玮, 胡静, 宋铁成. 低地球轨道卫星边缘计算场景中任务卸载与资源分配联合优化算法[J]. 通信学报, 2024, 45(7): 48-60.
XIA W W, HU J, SONG T C. Joint optimization algorithm for task offloading and resource allocation in low earth orbit satellites edge computing scenario[J]. Journal on Communications, 2024, 45(7): 48-60.
- [18] 何元智, 杨岭才, 肖永伟, 等. 天地一体化新路径: 手机直连卫星发展热点、挑战与关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 1-11.
HE Y Z, YANG L C, XIAO Y W, et al. New approach of integration space-ground: hotspots, challenges, and key technologies of direct-to-smartphone[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 1-11.
- [19] 陈东, 张千, 秦兆涛, 等. 面向手机直连的卫星移动通信系统架构与特性[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(4): 11-18.
CHEN D, ZHANG Q, QIN Z T, et al. Architecture and features of mobile communication satellite system for mobile phone[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(4): 11-18.

[作者简介]



章谦骅 (1990-), 男, 博士, 主要研究方向为天基计算、激光通信、计算卸载等。