

巨型星座云网融合发展探析

张丹¹, 李晶晶², 刘田¹, 陶孙杰¹, 吕子平³

(1. 中国电子科技集团有限公司第十研究所, 四川 成都 610036;

2. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731;

3. 中国航天基金会, 北京 100039)

摘 要: 得益于航天航空技术的发展和云计算、边缘计算等概念的兴起, 基于巨型星座的云网融合网络有望成为星地一体化建设和 6G 的重要组成部分。不同于地面通信网络, 星座网络拓扑高动态时变、资源和链路异构性强等特性为云网融合带来挑战。总结巨型星座的特点和地面云网融合的发展现状, 分析巨型星座中云网融合的迫切需求和面临的挑战, 并进一步指出卫星互联网云网融合架构的创新、资源虚拟化技术的运用、基于人工智能算法的信息感知和路由路径规划、云计算与边缘协同计算等方向是未来星载云网融合技术的潜在发展方向。

关键词: 巨型星座; 卫星互联网; 云网融合; 星地一体化

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023021

Survey on Giant Constellation Cloud Network Integration

ZHANG Dan¹, LI Jingjing², LIU Tian¹, TAO Sunjie¹, LYU Ziping³

1. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China

2. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

3. China Space Fundation, Beijing 100039, China

Abstract: Thanks to the development of aerospace technology and the rise of concepts such as cloud computing and edge computing, cloud network convergence networks based on giant constellations are expected to become an important part of the integrated construction of star-ground and 6G global communication networks. Unlike terrestrial communication networks, constellation network topology is highly dynamic and time-varying, with strong resource and link heterogeneity, and other characteristics that pose challenges for cloud network convergence. The characteristics of giant constellations and the development status of terrestrial cloud network convergence was summarized, the urgent needs and challenges of cloud network convergence in giant constellations were analyzed, and the innovation of satellite internet cloud network convergence architecture, the use of resource virtualization technology, information sensing and routing path planning based on artificial intelligence algorithms, and cloud computing and edge collaborative computing were potential directions for future satellite-based cloud network convergence technology development direction were further pointed out.

Keywords: giant constellation, satellite internet, cloud network integration, integration of satellite and ground

0 引言

随着新一代低轨卫星星座的兴起和 6G 网络的推进, 未来星地一体化网络有望通过低轨卫星互联网星座实现全球覆盖, 并通过通感算一体化部署实现计算资源的星载边缘扩展, 以满足海量连接和低时延数据处理的需求^[1]。

卫星互联网星座可由几百颗甚至上千颗卫星组成, 采用多轨道面、低轨部署, 实现面向全球业务区域的高密度覆盖。但受全球人口分布、经济发展、通信设施普及率、卫星通信渗透率等因素影响, 低轨星座卫星多数时间运行在广袤的海洋或人口稀少地区, 同时卫星服务请求偏少, 大量卫星资源处于闲置或低负荷运行状态, 难以发挥整网效能。随着星上处理能力的不断增强以及卫星的大规模部

署,星座具备数量可观的计算存储资源。这些空闲资源有望用于处理星座中其他卫星以及其他星座卫星获取的数据,空闲链路资源可提供星地、星间接入能力,实现数据存储转发及共享,提高卫星互联网星座通算资源利用率,充分发挥星座整体效能^[2]。

在传统架构体系下,受现有网络架构和地面站部署的影响,星座海量数据需回传至云中心进行统一计算处理,频繁数据回传带来了大量的链路带宽开销并导致更高的传输时延。通过统一的云中心对时敏性计算服务进行处理时,不能满足时效性要求,因此依赖云中心进行统一计算的方式较难支撑时敏性任务实时响应处理、海量数据实时分发等需求^[3]。为应对卫星互联网高速率、高容量、高 QoS、大密度连接、低时延等挑战,可供选择的解决方案是将部分计算任务卸载至网络边缘侧,构建边缘云环境,充分利用星座闲置的计算存储资源延伸中心云处理能力,提升服务效能,提高系统鲁棒性,同时减少数据泄露风险,为低轨卫星网络多域智联赋能。

在星地一体化网络架构下,云网融合网络预期能够满足高带宽、全球覆盖、全天候通信诉求,并有望实现包括低时延、弹性、确定性和极高的 QoS 性能指标,巨型星座与云网融合有望成为上述需求的解决方案。然而卫星网络与地面网络在网元能力、链路特性、业务需求等方面存在差异,卫星网络拓扑高度动态、移动速度快、业务多样化等特点为云网融合带来了挑战^[4]。在巨型星座场景下,用户时空分布非均衡性、星间链路动态时变性、多星间任务卸载分配与调度复杂性为边缘算力的统筹、计算与通信资源的分配等带来了挑战。巨型星座中的云网融合、通算融合、资源虚拟化与智能感知、智能化资源分配调度与星间路由路径规划等是需要进一步研究的内容。

1 巨型星座与云网融合研究现状

巨型星座凭借全球覆盖的独特优势,具备提供全球智联的潜力^[5]。而星载云网融合可以在提升通信质量的同时,赋予网络智能感知和提供计算服务的能力。因此,本节主要分析现有的巨型星座和云网融合技术,从典型巨型星座、巨型星座通信与资源管理技术、地面云网融合技术和星载云网融合技术 4 个方面展开。

1.1 典型巨型星座

地球卫星星座指由多颗部署在空间轨道上的人造地球卫星组成的,具有特定空间几何构型与规律性时空位置

关系的多卫星一体化系统。利用大量低成本微小卫星组建的卫星星座统称为巨型星座,考虑部署成本、大批量卫星的寿命和离轨问题与数据和信号传输时延等因素,低轨巨型星座是主流选择,因而本文也将主要考虑低轨巨型星座。这里介绍 3 种典型卫星通信星座: Iridium-NEXT、Starlink 和 O3b。

Iridium-NEXT 是一种由 66 颗活动卫星和 9 颗备用卫星组成的星座,其 L 频段和卫星-地面链接可提供 128 kbit/s 和 1.5 Mbit/s 的数据速率。对于固定和可移动终端,服务速度更高,可达 8 Mbit/s。每个 Iridium-NEXT 卫星在 23.18~23.38 GHz 的频段上与 4 颗卫星建立卫星间链接,数据速率为 12.5 Mbit/s^[6]。Starlink 是 SpaceX 提出的一个大型星座,由 4 409 颗高度为 1 150 km 的卫星和 7 518 颗高度为 335~346 km 的卫星组成。该星座计划为地球上的每个用户提供 10 Gbit/s 的带宽,并减少对陆基网络的需求^[7]。O3b 则是一种由 20 颗中地球轨道通信卫星组成的星座,使用 Ka 波束天线技术为卫星通信骨干网提供光纤传输速度^[8]。每颗卫星配备 12 副完全可控的 Ka 频段天线,每副天线提供 1.25 Gbit/s 的数据吞吐量,上行链路和下行链路的数据吞吐量为 600 Mbit/s,因此每颗卫星的总容量为 12.5 Gbit/s^[9]。

卫星通信技术在现代社会中具有重要作用,为全球用户提供了可靠的通信服务。不同的卫星通信星座具有不同的技术特点和服务能力,如 Iridium-NEXT、Starlink 和 O3b 等。随着技术的不断进步和需求的增加,卫星通信技术将继续得到发展和应用,为人类带来更加便捷和高效的通信体验。现有的典型巨型星座在数量规模、轨道空间、系统复杂性等方面存在较大差异,尚缺乏对巨型星座的统一界定标准,且现有巨型星座大多提供特定服务,以组网通信、互联网接入为主,缺乏对通信计算等多类型服务交叉融合的支持。本文聚焦利用大规模低轨卫星构成的低轨巨型星座实现边缘云计算与信息通信相融合的多类型服务研究,分析星载云网融合的应用需求、主要挑战和关键技术研究方向,为低轨巨型星座的广泛应用奠定基础。

1.2 巨型星座通信与资源管理技术

在研究巨型星座通信系统时,卫星之间的高效通信是一个关键问题。由于卫星数量庞大,保证卫星之间的高质量通信变得更加困难。参考文献[10]提出一个基于 LTE 的卫星通信系统,采用低轨巨型星座,并提出了两种不同的架构: Sat-RN 架构,其中 LTE 地面小区是通过卫星支持的 RN 实现的; Sat-eNB 架构,其中地面卫星支持的实体

是传统的 LTE eNB, 具有通过卫星连接进行通信的额外能力。参考文献[11]从低轨巨型星座互联网的角度出发, 分析多个现有巨型星座的特征与组网技术难点, 并提出人工智能、软件定义网络等技术将是未来巨型星座互联网系统的关键。然而, 在低轨巨型星座网络中, 由于星间路由的复杂性和星间链路 (ISL) 路径所需跳数较高, 因此仍需要进一步解决这些问题。为此, 参考文献[12]提出一种理论模型来估计倾斜轨道中地面用户之间的 ISL 跳数, 并根据提出的方法对跳数的空间分布特征进行了分析, 在 Starlink 上首次说明跳数的全球分布模式和不同接入卫星造成的路径差异。上述文献分析现有典型巨型星座中通信系统的架构、特征和不足之处, 提出针对组网难点和星间链路多跳问题的解决方案, 但现有方案主要集中在对单一问题的分析上, 缺乏对巨型星座通信系统的整体性研究及多个问题间的协同解决方案研究。开展针对巨型星座的端到端一体化通信网络系统模型研究是未来可行的应对途径。

另一个重要的问题是如何实现对巨型星座通信系统的资源管理。巨型星座通信系统中的资源包括通信、感知、计算等方面, 这些资源的管理将对巨型星座通信系统的性能和运营效率产生重大影响。参考文献[13]设计一种星地一体化的资源管理架构, 通过对星上分系统、地面分系统、星地交互系统几个子系统的联合设计, 实现巨型星座资源的智能化管理。参考文献[14]提出一种容量分析框架以分析低轨巨型星座的容量特性, 如星座大小和容量之间的关系、网络容量瓶颈以及任务分布的影响等, 同时在时变网络拓扑模型和任务分布模型的支持下, 提出一个考虑链路丢包率的网络容量估计解决方案。具体来说, 首先在不考虑链路丢包率的情况下, 提出一种改进的全多项式时间近似 (IFPTA) 算法, 以提供多物品流 (MCF) 问题的次优解, 其中给出一个更简单的物品定义, 并证明其与原问题等价。其次, 提出一种基于杰克逊网络的容量回落方法, 以控制链路丢包率低于给定的阈值。在资源管理方面, 上述文献分析了低轨巨型星座的容量特性, 构建资源智能化管理架构, 但现有研究主要考虑星座大小及资源容量、网络容量因素, 没有进一步考虑用户时空分布不均导致的资源分配不均问题, 缺乏对计算通信任务卸载策略与调度策略的研究。

综上所述, 巨型星座通信系统是一项复杂而重要的技术, 对于未来的通信和互联网发展具有重要意义。在卫星通信、网络拓扑、资源管理等方面的研究, 不断推动这一技术的发展和完善。随着人工智能、软件定义网络等技术

的逐步应用, 巨型星座通信系统的性能和运营效率将得到进一步提升。

1.3 地面云网融合技术

云网络技术近年来发展迅速, 成为信息化领域的重要趋势。在此背景下, 云网融合技术被提出, 旨在将网络、计算、存储等云服务融合, 以提升通信服务质量和云服务体验。目前, 云网络可以分为基础网络层、业务网络层和网络导航层, 同时还包括光传输和 IP 网络的协同、快速 UDP 互联网连接 (QUIC) 协议、软件定义网络 (SDN)、Telemetry 与人工智能等技术的融合^[15]。

现有的地面云网融合技术主要指将网络、计算、存储等云服务相互融合, 旨在提升通信服务质量和云服务的体验。云网融合技术包括设计云网组合模型、优化路由由服务算法和提升分布式能力等方面。为提高云网络的服务质量 (QoS), 参考文献[16]首先提出网络-云服务组合的系统模型, 如图 1 所示, 并将服务组合问题表述为多约束最优路径 (MCOP) 问题的变体。参考文献[16]随后提出一种算法来解决该问题, 并通过理论分析和仿真实验验证了该算法的高效性。分布式云网络支持以互联虚拟网络功能的形式部署网络服务, 这些功能在跨网络分布的多个云位置的通用硬件上实例化, 因此在地面应用中也备受欢迎^[17]。参考文献[18]定义了云网络容量区域, 并设计一系列动态云网络控制 (DCNC) 算法, 可以稳定容量区域内的任何服务输入速率。

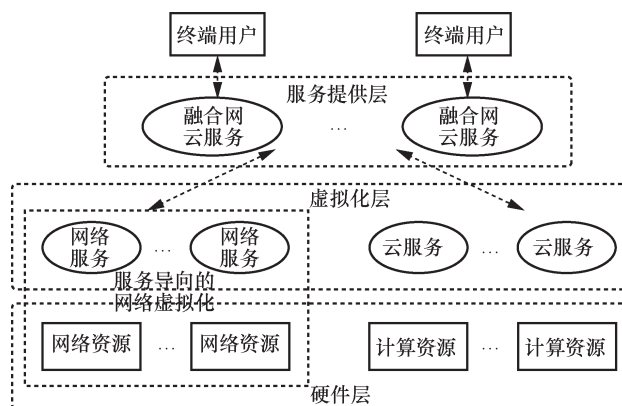


图1 面向服务框架的分层结构示意图

云网融合技术在智能交通、智慧城市、虚拟现实等现实服务智能化方向得到广泛应用。例如, 参考文献[19]提出一种基于云网融合的智能斑马线建设方案。当系统检测到行人穿越斑马线时, 根据预设的操作策略, 激活斑马线警示灯并发出警告, 以减少车祸的发生。此外, 实时监控通过运营商网络接入政府云平台, 检测和维护可能出现的

异常情况,确保设施持续正常运行。另一个应用案例来自增强信息服务,即基于高度分布式的云/边缘计算网络的工业自动化和增强现实。参考文献[20]设计一种新颖的排队系统,能够跟踪数据包的生命周期,并将受时延约束的最低成本动态网络控制问题进行形式化。具体而言,参考文献[20]首先研究了具有平均容量(或资源预算)约束的设置,并开发可靠的云网络控制(RCNC)算法来解决峰值容量受限的场景。实验证明,上述控制策略具有优越的性能,并保证为下一代增强信息服务(Agl)的交付提供了严格的端到端期限。

通过对多个云网络服务的融合和优化,可以提高通信服务质量和云服务体验,从而满足不断增长的信息化需求。同时,随着智能化技术的不断发展,云网融合技术也将各个领域得到更广泛的应用。然而,将卫星数据卸载至地面云计算服务中心进行集中处理为网络带宽带来了较大压力,不能满足低时延快速响应需求,且容易造成星载计算与通信资源的闲置浪费,因而借鉴地面云网融合技术开发基于低轨巨型星座的云网融合架构是未来研究的新兴方向。

1.4 星载云网融合技术

相比地面云网融合技术,星载云网融合技术起步更晚,现有的研究也较少,巨型星座互联网和星地联合一体化互联网是未来通信模式的发展趋势。

随着星地一体化网络受到越来越多的关注,它需要足够的灵活性,以部署定制的服务功能链(SFC),满足不断变化的用户需求。然而,实现这一愿景仍然存在挑战,例如框架设计、通信过程和资源优化等关键问题尚未全面解决^[21]。为了解决这些问题,参考文献[22]首先提出一种用于云SFC部署的弹性框架,并提出一种有效的SFC映射方法,以提高系统资源利用率。最后,通过大量用例在

概念原型上验证了所提出的框架,并通过基于真实世界拓扑的广泛模拟来评估所提出的映射方法,结果证明了算法的可行性和优势。

参考文献[23]提出一种星云协作框架,它能够自适应地选择卫星和云站点上的中继服务器来构建覆盖网络,从而实现多样化地接近最佳路径。然后,它会在网络上明智地分配广域实时通信(RTC)流以促进低时延交互。如图2所示,对于一些紧急情况,当移动自组织网络(MANET)与地面网络断开连接时,就需要融合卫星云网络的协助。在这种情况下,卫星实现了灾区自组网与总部之间的通信,而云端则提供了强大的计算资源和网络的集中管理^[24]。为了满足以上需求,参考文献[24]提出一种使用网络编码函数(NCF)提供的每流网络编码(NC)的方法,在5G设备到设备交互假设下可用输出的NCF,输出是平衡每个节点计算资源和结果覆盖率的最佳编码率。

综上所述,随着卫星技术和云计算技术的不断发展,星载云网融合将成为未来通信和计算的重要方向。在面对紧急情况或者偏远地区和海洋等无法覆盖的地区时,星载云网融合可以提供灵活的通信和计算支持,为各种应用场景提供解决方案。

2 未来巨型星座云网融合需求

随着航天技术的发展,低轨卫星的制造和发射成本大幅降低,第二次低轨卫星星座建设浪潮已经到来^[25],构建全球覆盖的低轨卫星-地面融合网络已成为可能。随着5G网络的发展和普及,卫星互联网正在成为全球科技热点,5G和卫星网络的集成有望重构下一代移动网络,以适应未来人工智能、无人机集群与实时感知^[26]等广泛应用需求。6G技术将新型低轨巨型星座整合到

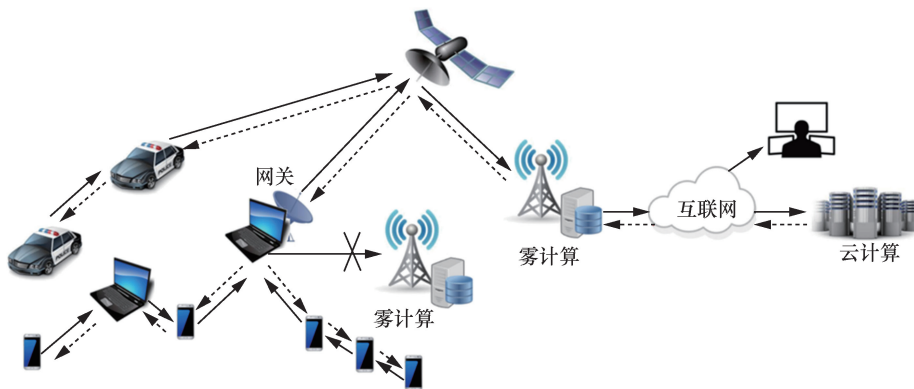


图2 星载云网融合技术在应急通信场景下的应用

地面网络中，有望在全球范围内提供按需供给、低时延、高通量的网络服务，卫星网络正朝着高吞吐量、多波束、密集部署的方向发展，单一卫星能力和网络容量有限促使巨型星座云网融合成为一个很有前景的体系结构。

2.1 巨型星座发展趋势与应用需求

自2014年SpaceX计划建立Starlink巨型星座卫星互联网以来，截至2023年2月已发射近4000颗卫星^[27]。OneWeb计划发射一个LEO星座，为全球地区提供高速互联网^[28]。亚马逊推出了“Kuiper Project”计划，拟基于3236颗卫星建立提供全球高速互联的网络^[29]。上述计划和实际部署验证了巨型星座卫星互联网的可行性。

近年来，航天工业的发展大大降低向太空发射卫星的成本，并刺激巨型星座的指数级增长。一方面，由于距离地球表面较近，近地轨道卫星可以实现与地面网络相当的非常低的时延（低至数毫秒），因而具有提供宽带互联网服务、在轨边缘计算服务等新服务的内在潜力，巨型星座呈现出多功能、大容量发展趋势；另一方面，新型低轨卫星能够配备高分辨率传感器、空间级多核处理器、高速通信链路和多功能空间软件，有望进一步提升星载核算资源量并为面向6G通信的4K/8K高清视频、VR/AR游戏、全息影像等计算敏感型任务的星上处理提供可能。然而单一卫星能力有限、高动态性和远距离传输的挑战始终存在，阻碍了巨型星座卫星互联网的进一步发展^[30]。由于高动态性，大多数节点在大多数时间内无法有效覆盖陆地用户，造成卫星资源和能源的浪费^[31]，与此同时用户产生的日益增长的数据流量迫切需要高效的卫星处理和大容量的星间链路支撑。为了充分利用新兴巨型星座的优势，调和星载资源的时空不均衡性，巨型星座云网融合架构是一种具有前景的技术。

从巨型星座发展趋势来看，星载计算、通信和存储资源随近地轨道星座的指数级扩张而呈现增长趋势，在此基础上，在卫星上部署云网融合核心架构有望成为现实。受益于低轨卫星的低时延和宽覆盖链路特征，星载网络有望实现比地面光纤通信更低的时延。此外，星载网络预期能够消除占用大量网络时延的不必要的回溯，从而加快用户访问过程，推动卫星通信服务向低传输时延、高体验质量方向发展。

从应用需求来看，传统的遥感、导航、通信等卫星业务对计算能力有较大需求，推动了在轨计算卫星服务的部署。近地轨道卫星的边缘计算也越来越受欢迎，不同于传统卫星单一的数据传输与通信功能，新兴的潜在需求是利用星载有效载荷完成诸如遥感、在轨人工智能推理和空间存储等特定处理任务，边远移动用户在轨边缘计算服务的实现同样依赖于星载网络的部署。此外，巨型星座与星载云网融合有望为应急通信提供新的范式。一方面，卫星通信可以解决地面基础设施受到破坏时的紧急通信问题；另一方面，在专用卫星上部署轻量级星载网络可以看作卫星通信能力的升级，有望将原有的遥感和实验卫星转变为具有应急服务能力的卫星。

综上所述，在发展趋势和应用需求的共同推动下，巨型星座云网融合的研究将带来巨大的经济效益和社会效益，有望成为6G星地综合通信网的关键组成部分。

2.2 星载云网融合基座的需求与挑战

随着云计算、物联网、移动边缘计算等技术的出现，传统的地面集中式数据中心由于接入时延大、扩展难度大、鲁棒性差、资源效率低等问题，难以适应新型应用的服务质量需求^[32]。图3分析了地面云网融合架构及其存在的局限性。构建星载云网融合架构，将数据中心集成到巨型星座卫星互联网中，可以带来低时延、灵活组网和高效

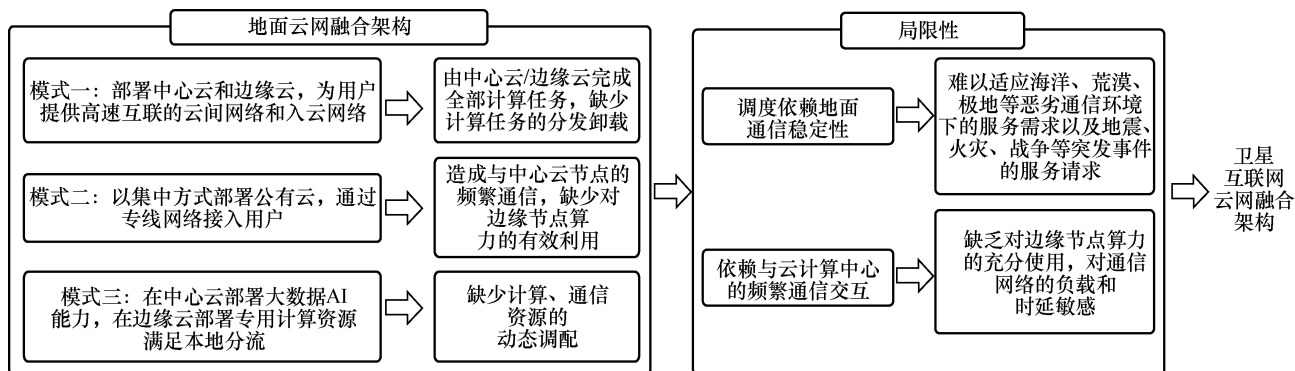


图3 地面云网融合架构及其存在的局限性

资源利用的优势,以帮助解决上述问题。

星载云网融合指在同一轨道或者相邻轨道部署多颗卫星,通过有序协同和集中调度完成各类空间任务。星载云网融合考虑采用多星协同控制、高速星间通信、精确天基感知和分布式信息处理等技术,拥有灵活性、可扩展性和鲁棒性等优点,从而有望适用于大区域远程连接备用备份,通过数据卸载减轻地面蜂窝移动网络负担,为远洋航行和紧急救援提供中继等各类应用场景。图4展示了面向不同应用场景的分布式星座互联网基本架构。与地面云网融合相比,星载云网融合有望通过分布式控制显著降低时延,可使用户到卫星的访问时延减少到毫秒级,同时灵活组网特点预计能够克服单点故障、网络拥塞、星间链路中断等故障,从而显著提升系统鲁棒性。此外,进一步考虑引入软件定义网络和网络功能虚拟化(NFV)技术以实现资源池化和统一调度,引入实时感知与实时预测技术进而实现虚拟资源的快速迁移,有望提高整体资源利用效率。基于以上优势,星载云网融合技术预期能够为多元化应用场景提供支撑基座作用,为6G通信和空天地一体化网络建设提供天基基础。

不同于地面网络,星载云网融合技术面临一系列挑战。具体来讲,星载云网融合将面临网络异构性和动态变化以及资源受限等问题。网络异构性体现在链路异构、节点异构和协议异构3方面。动态变化指卫星平台处于高速运动状态,快速相对运动可能会导致链路中断,此外卫星分布在较大的区域内,多域协调存在较大困难。同时,在

星载云网融合架构中,核心网络基础设施面临动态性挑战。传统移动网络只有终端用户是移动的(如蜂窝网络),动态仅限于局部区域,与传统移动网络不同,低轨卫星的高速运行导致核心网络基础设施在全球范围内具有高动态性。这种高动态性会导致频繁的地址更新和连接中断等问题,对智能化资源感知与动态路由以及模型抗损毁能力、高鲁棒性提出了全新的挑战。相比于地面通信网络,资源受限体现在卫星有效载荷有限和波束资源的稀缺性,此外低轨卫星的轨道周期有30%以上是在日食期间运行的,在此期间需要使用充电电池,因而也带来能量受限问题。资源稀缺和电源能量受限对智能高效的感知与资源分配策略提出更高的要求。针对上述挑战,为了充分发挥卫星的能力,需要着重解决星载云网融合体系结构研究和空间边缘计算范式研究的关键技术问题,具体包括拓扑控制、波长分配、动态路由、资源虚拟化、分布式控制器部署等潜在解决方案的研究。

2.3 星载云网融合应用场景

在低轨卫星广泛布局下,星载云网融合呈现出乐观的应用前景,蕴含着多场景的广泛需求和巨大的经济应用价值。下面将从整体服务和具体应用两个方面对云网融合典型场景进行探析。

从整体服务来看,单星的计算和处理能力有限,面向海量高并发用户接入,云网融合技术可以将单星的部分用户波束信号处理卸载迁移至就近卫星,实现大规模数据处理,提升基站并发用户数,减轻单个计算节点负

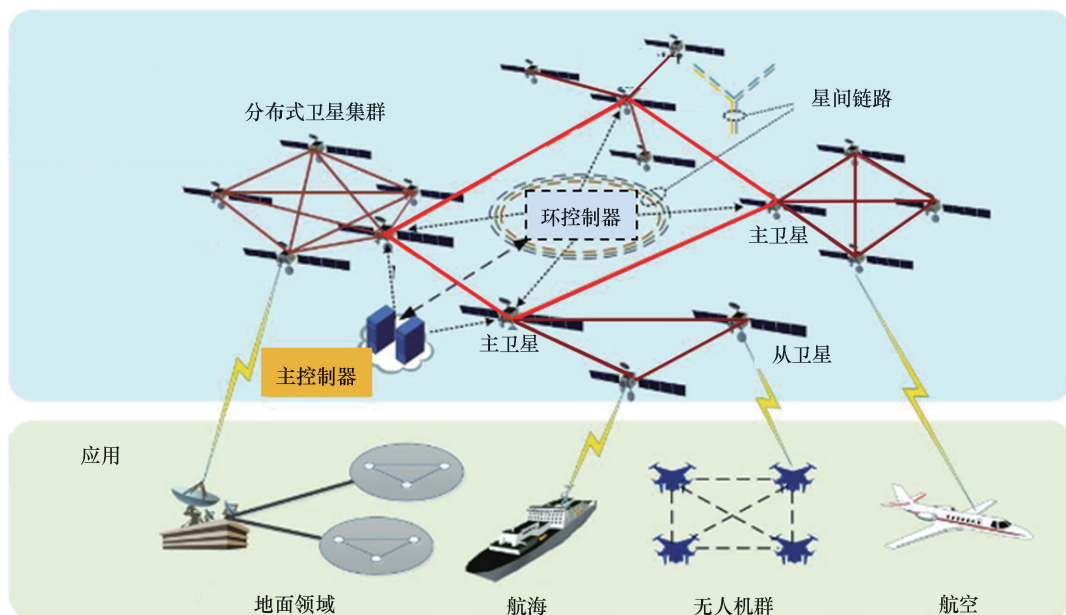


图4 面向不同应用场景的分布式星座互联网基本架构

荷,降低处理时延,同时提升用户体验;面向应急保障服务、全球时空电磁频谱获取、遥感图像处理等业务,借助卫星互联网接入各类遥感星座获取的实时数据,在数据回传之前利用星座空闲计算资源进行星上预处理,减少回传的数据量,降低链路带宽消耗,提高系统的实时性和可伸缩性。星载云网融合应用于移动通信场景示意如图5所示。

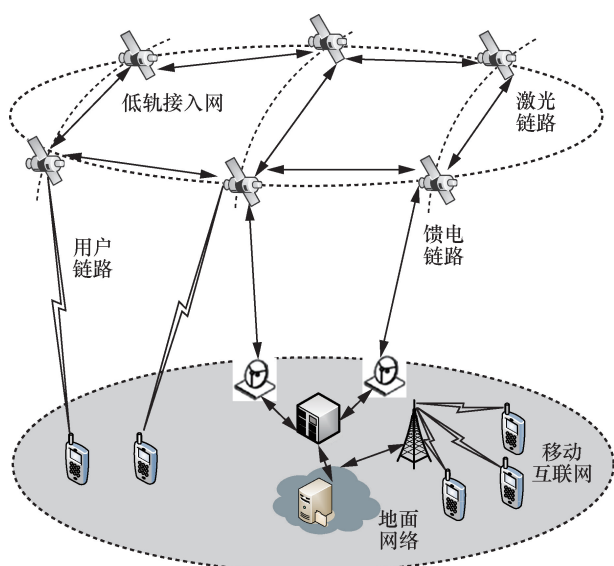


图5 星载云网融合应用于移动通信场景示意

从具体应用角度看,云网融合星座同时具有通信能力和较强的智能计算能力,可以在多领域发挥重要作用,重点保证数据处理业务需求的快速响应,降低链路带宽损耗。具体来说,遥感卫星拍摄到的图像中云覆盖的区域占了约70%,云网融合星座可以利用AI处理技术筛选出未被云覆盖的图像进行回传,很大程度节约星上存储和卫星下行带宽。在发生地震、火山爆发等自然灾害时,地面局部的通信与计算能力受限,卫星拍摄图像传输至其他区域再经计算处理传输至受灾区域时间开销较大。此时,星载云网融合技术一方面可以利用星载计算能力对受灾地区直接进行分析,另一方面可以为受灾地区提供卫星通信的同时传回数据处理结果。

星载云网融合在通信、计算、感知等诸多场景中均具有广泛的潜在应用价值,有望从系统级革新现有通算体系,推动卫星通导遥综合协同背景下的各类应用的发展。

3 未来星载云网融合研究方向

为实现星载云计算与边缘计算的协同与融合,实现通

信、感知、计算的一体化融合和端到端处理,从而显著提升卫星互联网的资源利用效率、通信计算效率、时敏任务响应效率,首先需要针对数据特征和应用场景设计统一高效智能的数据处理框架,以提升数据预处理和分发卸载效率。其次考虑到卫星互联网往往具有通信拓扑高动态时变、网络体系结构复杂、资源链路异构性强、多维资源分布非均衡等特征,云网融合下状态感知和虚拟化技术有望成为潜在热点研究方向。同时为了充分发挥云边协同、云网融合的架构优势,研究如何构建星地确定性路径规划和边缘协同计算服务迁移卸载策略有望为整体架构提供基础支撑。

3.1 卫星互联网云网融合架构

构建由低轨星座通信网络、天基边缘云以及地面云中心组成的“云-网-边”架构,引入边缘计算、SDN、NFV等技术,使卫星互联网星座中的卫星成为边缘计算节点,将星载有限资源统一接入平台,通过资源融合、封装、分配,实现云计算平台在网络边缘侧的延伸,是潜在热点研究方向。

云网协同星座服务模式示意如图6所示,拟建设的云网融合架构宏观上可以分为3个组成部分:云网融合卫星、全局管理中心、用户与终端设备。其中云网融合卫星主要由星载基础功能、虚拟化层、云服务层以及本地代理组成。星载基础功能将包含CPU、GPU、FPGA、DSP、磁盘、交换机等卫星有效载荷,从而兼具通信、计算、存储等能力。虚拟化层负责将硬件设备抽象为虚拟化资源。而云服务层被设计用来直接为用户提供数据处理、目标检测、增强现实等计算服务。本地代理有望自主完成服务登记、服务开始与终止、计算卸载等决策,从而实现本地服务最优。全局管理中心将负责整个云网融合卫星系统的资源编排与感知、服务分配与流转、服务能力优化等,以保证星座整体的可靠性和高效性。具体的流程可设计为用户向管理中心或已连接的卫星发起服务请求,管理中心为用户分配卫星,同时服务卫星对任务进行处理,在整个运行过程中,云网融合卫星将根据本地资源视图对虚拟化设备进行管理和调优,保证当前任务的完成效率;全局管理中心则根据资源编排和全局资源视图对不同卫星分配的任务进行调整和流转,保证所有请求的整体完成效率;同时根据优先级等调整服务的生命周期和服务顺序,保证紧急服务得到快速响应。

本文以层级为单位对卫星互联网云网融合架构进行直观阐述,云网融合层级关系示意如图7所示。和图6一致,首先考虑通过资源虚拟化技术将卫星的硬件资源

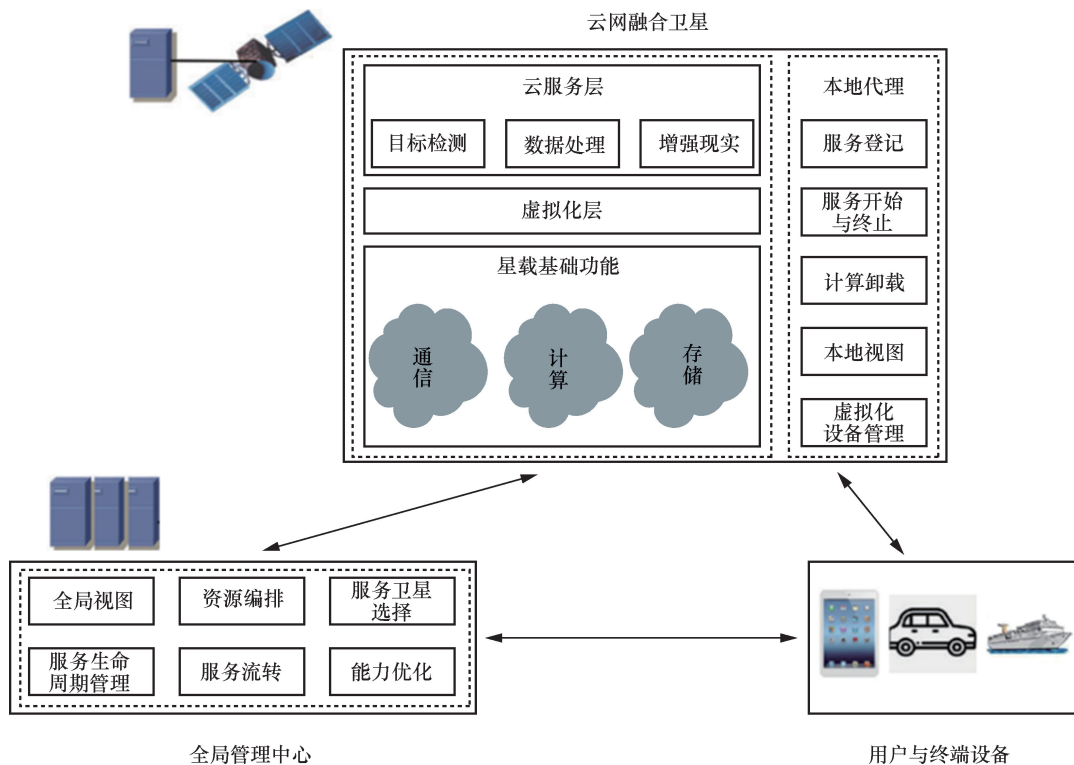


图 6 云网协同星座服务模式示意

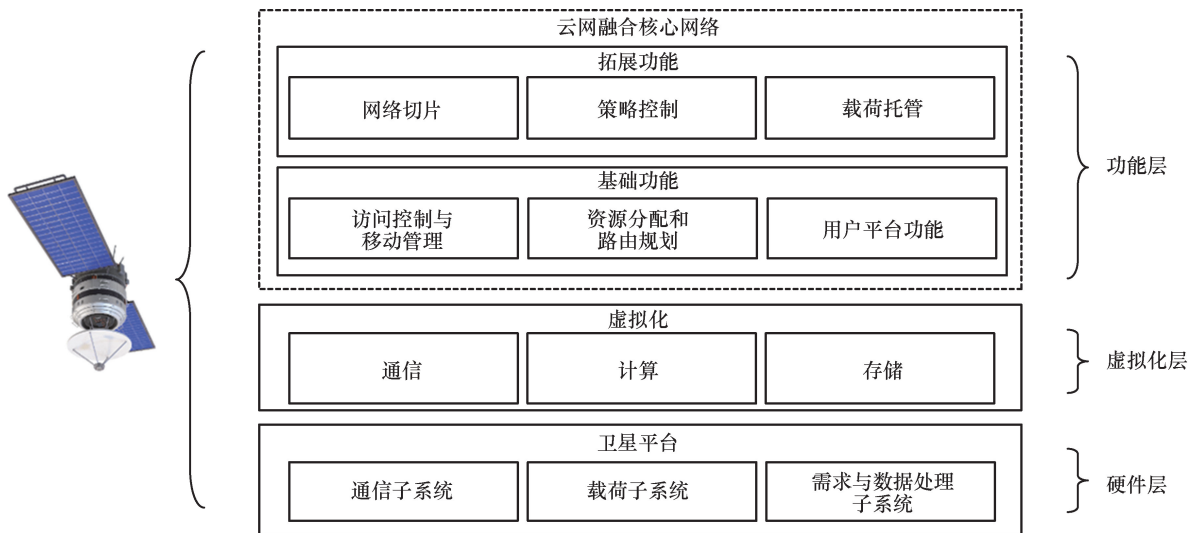


图 7 云网融合层级关系示意

抽象为虚拟化资源；然后对卫星网络带宽、服务质量等进行感知和对算力资源，存储资源进行感知和管理，根据不同地区、不同任务的需求对任务和卫星资源重新匹配；最后通过功能层为用户提供不同的基础服务和拓展服务。

构建云网融合框架，能够使得卫星不仅可以作为路由器，还可以作为地面使用的接入点或网关，同时具备星载数据处理与计算的能力，实现云计算和边缘计算的星上部

署。由于新兴的巨型星座具有一系列独特的特性，现有的空地架构仍然难以同时完成普遍、可靠和低时延的网络业务，因而融合架构的设计和验证必然会成为未来研究的核心趋势。

3.2 资源虚拟化和智能感知技术

资源虚拟化和智能感知是实现资源动态管理及统筹协调的基础，也有望成为星载云网融合的关键技术。通过

虚拟化能够实现资源的融合封装，构建云边协同资源池供上层服务调用。通过对资源状态数据的实时采集、监控、快速查询、自主更新，有望实现智能感知，从而满足资源按需分配、服务弹性部署需求。

引入分布式异构硬件平台的资源虚拟化技术是一个可行的研究路径。在云网融合网络中，需要通过有效的工具解决网络异构、大区域分布和资源利用不足等棘手问题。利用 NFV 技术，有望将卫星设备的物理资源映射为虚拟资源，这些虚拟资源聚集在虚拟资源池（VRP）中进行跨层调度。具体来说，一方面考虑边缘计算带来的卫星能耗增加和星载板卡资源开销；另一方面考虑构建资源占用少、启停速度快和轻量化的容器引擎，进而实现分布式的资源虚拟化，提高星载资源利用率，减少资源额外消耗。资源切片技术也能够为资源虚拟化和智能感知提供支撑。通过资源映射，将波长、内部接口和天线在时间、空间、频率和功率上灵活转换为通信资源，有望实现对异构资源的统一描述，并能够根据具体任务需求量化存储和计算资源，进而显著提高卫星互联网网络资源的灵活性和资源利用率，以支撑资源弹性应用，满足不同服务质量的需求粒度。

在多任务资源感知方面，基于人工智能算法的智能化信息感知技术是潜在关键技术之一。针对不同任务的资源需求多样性与终端数据类型多样性特征，多模态融合、迁移学习与领域自适应技术能够通过数据分布对齐解决数据异构问题，针对巨型星座场景下单星数据采集困难、实时数据稀缺问题，基于生成对抗网络的数据增广技术能够通过模拟数据生成进一步提升信息感知质量。另外，利用深度神经网络强大的信息提取能力，能够对冗杂的异构资源数据进行减冗、融合、处理和有效信息特征提取，提高数据中的信息密度和传输效率，通过为多源多维异构数据提供统一的标准化框架，实现面向多任务多服务的资源信

息智能感知。

在资源智能感知之后，需要直观地呈现给管理员或者管理系统，即监测资源能力与状态，支撑资源动态调度。在云网融合的卫星互联网中，资源类型、任务需求呈现出高度非均衡性和双重动态性，资源感知和视图构建表现出多模态数据融合的特征。因而有必要展开针对资源数据的实时感知、精准预测、快速查询、自主更新技术研究，为资源动态管理及分配提供支撑。同时需要构建通算资源视图，实现资源快速查询和可视化。构建多云管理平台实现服务注册、服务配置、服务调度和监控，对网算资源进行动态管理，添加一致性组件完成节点间数据存储、同步、共享，最终有望为星间任务智能决策和运算提供算力支撑。

3.3 云边协同计算技术

云网融合架构下边缘协同计算的解决方案如图8所示。

在边缘协同计算场景下，其目标是实现云网融合网络架构下的任务智能调度，可开展的具体研究方向划分为两个方面，即路径规划技术研究和计算服务分配卸载策略研究。一方面，为平衡网络负载，减少网络时延，提供可靠的数据传输，星地确定性路径规划技术被设计用来根据任务的通信计算资源需求和对响应时长的灵敏性设定任务优先级，根据测控信息预测星座可用拓扑联通性，支撑链路层切换，进而实现星地间的确定性路径规划，以保证服务连续性；另一方面，针对高算力、快响应、资源合理利用等需求，计算服务分配卸载策略被设计用来根据动态网络特征进行实时任务分解、分配，进而实现计算任务在不同卫星间的迁移和在云端、边缘端的卸载，有望通过星地边缘协同计算提高计算资源使用效率和计算任务完成效率。此外，考虑星上资源受限对轻量化模型的迫切需求，有必要展开对轻量化模型和弹性部署技术的研究，实现空闲资源的最大化利用以及多星资源整合，最终有望构建一个资源可全局调度、能力可全面开放、容量可弹性伸缩、

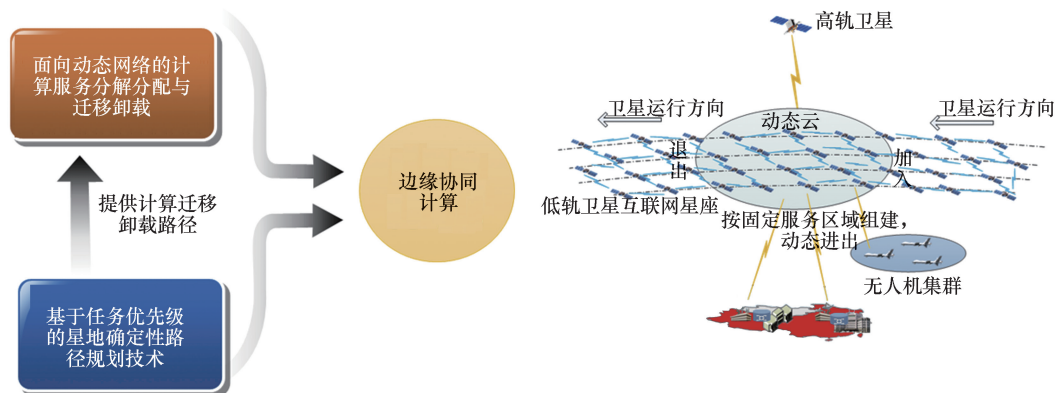


图8 云网融合架构下边缘协同计算解决方案

架构可灵活调整的云平台。

在路由路径规划和模型轻量化方面,基于人工智能算法的模型构建研究能够提供智能化解决途径。面向开放重场景,基于巨型星座的云网融合架构需要能够根据实时场景与多任务下的计算资源与通信任务需求对任务调度、分配、执行进行动态调整,并根据卫星实时运行状态和星座构型进行智能化路由路径规划。通过定义状态、动作、奖励等元素,强化学习智能体能够通过与环境的不断交互自主学习最优行为策略,实现智能路径规划。遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、模拟退化算法等启发式算法也能够为星间最优路径搜索这一优化问题提供思路借鉴。考虑星载资源受限问题,不同于地面云边端协同架构设计,星载云网融合系统表现出对轻量化模型的迫切需求。基于人工智能的模型剪枝、量化、蒸馏、压缩技术能够根据实时任务需求和硬件资源状态进行轻量化模型构建,轻量化卷积神经网络、轻量化YOLO、轻量化BERT模型也为星载图像、视频、文本任务的处理提供了轻量级模型选择。多智能体强化学习与模型轻量化技术有望为星载云网融合架构的部署实现提供智能化算法支撑。

综上,边缘协同计算与轻量化技术有望为星载云网融合网络提供资源调度、动态路由、通算一体的解决方案,预期能够有效提高星载边缘云计算服务的效率和性能,进而保障全球互联网用户的平等接入和星地一体化网络建设。

参考文献:

- [1] XING R, MA X, ZHOU A, et al. From earth to space: a first deployment of 5G core network on satellite[EB]. 2022.
- [2] LU H, DUAN X F, CHEN Y Z. Integration of low earth orbit satellites with terrestrial cloud-edge systems[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SAGC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 167-168.
- [3] ZHAO P, LIU J, ZHA X Y, et al. Research on key technology and pioneering practice for mega-constellation network[C]//Proceedings of 2021 4th International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). Piscataway: IEEE Press, 2022: 98-104.
- [4] CASSARÁ P, GOTTA A, MARCHESE M, et al. Orbital edge offloading on mega-LEO satellite constellations for equal access to computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(4): 32-36.
- [5] XIE H R, ZHAN Y F, ZENG G M, et al. LEO mega-constellations for 6G global coverage: challenges and opportunities[J]. IEEE Access, 2021, 9: 164223-164244.
- [6] HUANG J H, CAO J. Recent development of commercial satellite communications systems[C]//Artificial Intelligence in China. Singapore: Springer, 2020: 531-536.
- [7] LEV D, MYERS R, LEMMER K, et al. The technological and commercial expansion of electric propulsion[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 213-227.
- [8] SCHNEIDERMAN B, PELTON J N. Economic and market trends for ground systems to support new and future small satellite systems[M]//Handbook of Small Satellites. Cham: Springer, 2020: 1-22.
- [9] GORATTI L, HERLE S, BETZ T, et al. Satellite integration into 5G: accent on tested implementation and demonstration results for 5G Aero platform backhauling use case[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(4): 380-399.
- [10] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, FOGGI T, et al. LTE-based satellite communications in LEO mega-constellations[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(4): 316-330.
- [11] 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.
- [12] CHEN Q, GIAMBENE G, YANG L, et al. Analysis of inter-satellite link paths for LEO mega-constellation networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(3): 2743-2755.
- [13] 柴英特, 王港, 张超, 等. 巨型感知星座星地一体智能化资源管控体系架构[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 13-22.
CHAI Y T, WANG G, ZHANG C, et al. Satellite-earth integration intelligent resource management and control architecture of giant sensing constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 13-22.
- [14] WANG N Y, LIU L, QIN Z T, et al. Capacity analysis of LEO mega-constellation networks[J]. IEEE Access, 2022, 10: 18420-18433.
- [15] 史凡. 云网络: 云网融合的新型网络发展趋势[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(1): 8-10.
SHI F. Cloud network: new network development trend of cloud network convergence[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(1): 8-10.
- [16] HUANG J, LIU G Q, DUAN Q, et al. QoS-aware service composition for converged network-cloud service provisioning[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Services Computing. Piscataway: IEEE Press, 2014: 67-74.

- [17] SECCI S, MURUGESAN S. Cloud networks: enhancing performance and resiliency[J]. Computer, 2014, 47(10): 82-85.
- [18] FENG H, LLORCA J, TULINO A M, et al. Optimal dynamic cloud network control[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(5): 2118-2131.
- [19] GAO L. Design of intelligent zebra crossing system based on cloud-network convergence[C]//Proceedings of 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1332-1335.
- [20] CAI Y, LLORCA J, TULINO A M, et al. Ultra-reliable distributed cloud network control with end-to-end latency constraints[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2022, 30(6): 2505-2520.
- [21] CAI Y B, WANG Y, ZHONG X X, et al. An approach to deploy service function chains in satellite networks[C]//Proceedings of NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [22] FENG B H, LI G L, LI G W, et al. Enabling efficient service function chains at terrestrial-satellite hybrid cloud networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(6): 94-99.
- [23] LAI Z Q, LIU W S, WU Q, et al. SpaceRTC: unleashing the low-latency potential of mega-constellations for real-time communications[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1339-1348.
- [24] DO-DUY T, VÁZQUEZ-CASTRO M Á. Network coding function for converged satellite-cloud networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(1): 761-772.
- [25] BUTASH T, GARLAND P, EVANS B. Non-geostationary satellite orbit communications satellite constellations history[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(1): 1-5.
- [26] PENG C, HE Y Z, ZHAO S H, et al. Integration of data center into the distributed satellite cluster networks: challenges, techniques, and trends[J]. IEEE Network, 2022 (99): 1-8.
- [27] DONG F H, HUANG T, ZHANG Y S, et al. A computation of flooding strategy in LEO constellation edge cloud network[J]. Electronics, 2022, 11(13): 20-24.
- [28] HENRI Y. The OneWeb satellite system[M]//Handbook of Small Satellites. Cham:Springer, 2020: 1-10.
- [29] BOYLE A. Amazon to offer broadband access from orbit with 3,236-satellite 'Project Kuiper' constellation[J]. Geek Wire, 2019, 4.
- [30] JIANG C X, ZHU X M. Reinforcement learning based capacity management in multi-layer satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(7): 4685-4699.
- [31] BHATTACHERJEE 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.
- [32] HAMMADI A, MHAMDI L. A survey on architectures and energy efficiency in data center networks[J]. Computer Communications, 2014, 40: 1-21.

[作者简介]



张丹 (1984—), 女, 硕士, 中国电子科技集团有限公司第十研究所高级工程师, 主要研究方向为航天测控及卫星应用。

李晶晶 (1989—), 男, 博士, 电子科技大学计算机科学与工程学院研究员, 主要研究方向为人工智能。

刘田 (1981—), 男, 博士, 中国电子科技集团有限公司第十研究所研究员, 主要研究方向为航天测控及卫星应用。

陶孙杰 (1977—), 男, 硕士, 中国电子科技集团有限公司第十研究所研究员, 主要研究方向为航天测控及卫星应用。

吕子平 (1961—) 男, 硕士, 中国航天基金会研究员, 主要研究方向为卫星通信。