

基于数字孪生的卫星网络移动边缘计算研究综述

孙云鹤, 王煜, 赵亮, 杨东升, 关云冲

引用本文

孙云鹤, 王煜, 赵亮, 杨东升, 关云冲. [基于数字孪生的卫星网络移动边缘计算研究综述](#)[J]. 计算机科学, 2024, 51(12): 12-19.

SUN Yunhe, WANG Yu, ZHAO Liang, YANG Dongsheng, GUAN Yunchong. [Review of Digital Twin Based Satellite Network Mobile Edge Computing](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(12): 12-19.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[面向数字孪生的混合业务确定性传输调度机制](#)

Deterministic Transmission Scheduling Mechanism for Mixed Traffic Flows Towards Digital Twin Networks

计算机科学, 2024, 51(12): 37-45. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240200063>

[元宇宙关键技术、研究进展与应用综述](#)

Review of Key Technologies, Research Progress and Applications of Metaverse

计算机科学, 2024, 51(12): 2-11. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240400166>

[基于自供电无人机远距离中继通信与计算卸载策略优化研究](#)

Study on Optimization of Long-distance Relay Communication and Computational Offloading Strategy Based on Self-powered UAVs

计算机科学, 2024, 51(11A): 240300069-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240300069>

[基于OpenFaaS的多边缘管理框架](#)

Open FaaS-based Multi-edge Management Framework

计算机科学, 2024, 51(10): 362-371. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230800203>

[无人机辅助边缘计算安全通信能力最大化方案](#)

Scheme for Maximizing Secure Communication Capacity in UAV-assisted Edge Computing Networks

计算机科学, 2024, 51(6A): 230800032-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230800032>

基于数字孪生的卫星网络移动边缘计算研究综述

孙云鹤¹ 王煜¹ 赵亮¹ 杨东升² 关云冲¹

1 沈阳航空航天大学计算机学院 沈阳 110136

2 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110167

(sunyunhe@email.sau.edu.cn)

摘要 随着通信技术的快速发展,卫星通信技术在当今信息通信领域扮演着至关重要的角色。卫星网络覆盖范围广,能够随时为全球用户提供低延迟服务。但卫星网络建设仍然面临卫星设计成本高、发射风险大、卫星网络的测试和维护成本昂贵等难题。随着数字孪生(Digital Twin,DT)技术的兴起,DT技术与卫星网络形成了一种完美的契合,为卫星网络运营提供了强大的数据支持和决策依据。文章综述了基于DT的卫星网络移动边缘计算的研究进展。首先介绍了地面基站通信的局限性,进而引出卫星网络的应用;其次详细阐述了卫星网络的组成结构、卫星分类及卫星边缘计算的概念;接着介绍了DT技术,并重点分析了DT卫星边缘计算平台和基于DT的卫星网络移动边缘计算算法;最后总结了当前研究中存在的问题和未来的发展方向。

关键词 卫星网络;卫星通信技术;移动边缘计算;数字孪生

中图分类号 TP393

Review of Digital Twin Based Satellite Network Mobile Edge Computing

SUN Yunhe¹, WANG Yu¹, ZHAO Liang¹, YANG Dongsheng² and GUAN Yunchong¹

1 College of Computer Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2 College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110167, China

Abstract With the rapid development of communication technology, satellite communication has become a crucial part of modern information and communication landscape. Satellite networks, with their extensive coverage, can provide ubiquitous low-latency services to users worldwide. However, the construction of satellite networks still faces significant challenges, such as high satellite design costs, the risks associated with launches, and the expensive testing and maintenance of satellite networks. The rise of digital twin(DT) technology presents a perfect synergy with satellite networks, offering powerful data support and decision-making tools for satellite network operations. This paper reviews the research progress on DT-based mobile edge computing in satellite networks. It begins by introducing the limitations of terrestrial base station communications, which leads to the discussion of satellite network applications. Then, the composition of satellite networks, satellite classifications, and the concept of satellite edge computing are thoroughly explained. Subsequently, DT technology is introduced, with a focus on the DT-based satellite edge computing platform and DT-based mobile edge computing algorithms for satellite networks. Finally, this paper summarizes the existing issues in current research and outlines future development directions.

Keywords Satellite network, Satellite communication technology, Mobile edge computing, Digital twin

1 引言

随着信息技术的快速发展,第五代移动通信(5G)^[1]在众多领域发挥着重要作用,例如车联网(Vehicle-to-Everything, V2X)^[2]、远程医疗、工业物联网^[3]和虚拟现实(Virtual Reality, VR)。然而,由于经济和技术发展的局限性,处于沙漠、海洋等其他偏远地区或灾区的用户无法直接接入地面网络。

据预计,超过95%的海洋区域和80%的陆地区域缺乏网络服务^[4-6]。除了网络覆盖的限制之外,网络设备的能力也会影响物联网网络的性能。由于网络设备功率有限,可用于通信、计算和缓存的可用资源稀缺。因此,迫切需要探索并开发5G网络之外的其他替代网络或补充网络,以实现全球各地区的无缝覆盖和持续网络服务。

近年来,随着卫星制造和发射技术的不断进步,越来越多

到稿日期:2024-07-08 返修日期:2024-10-25

基金项目:国家自然科学基金(62303331,62372310);辽宁省自然科学基金(2024-BS-156);辽宁省基本科研业务经费项目(LJ212410143073, LJ232410143040)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62303331,62372310), Natural Science Foundation of Liaoning Province, China(2024-BS-156) and Fundamental Research Funds for the Universities of Liaoning Province(LJ212410143073, LJ232410143040).

通信作者:赵亮(lzhao@sau.edu.cn)

的学者开始关注卫星通信和卫星网络^[7-8]。卫星网络具有覆盖范围广、通信距离远、不受地形和地质灾害影响等优势,弥补了5G网络存在的不足。根据第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project,3GPP)报告^[9],卫星通信网络是在为人口密集地区和农村地区提供可靠的关键任务服务的同时,补充和扩展地面网络的有效解决方案。远距离传输以及长期服务和智能化管理需求的增加,对卫星网络性能和可靠性提出了更高的要求^[10]。

卫星设计成本高,发射风险大,卫星网络的测试和维护的费用昂贵,这些问题都亟待解决。在此情况下,数字孪生(Digital Twin,DT)技术与卫星网络形成了一种完美的契合,为解决这些问题提供了有力的支持。DT融合了物理空间和虚拟空间,使得不同领域的实体可以同步感知状态和执行任务,并记录和跟踪物理实体的组件状态、属性和参数演化等信息,同时优化和预测它们的行为状态。因此,将DT与卫星网络相结合,不仅可以显著降低调试和测试成本,还能够加速空地一体化网络(Space-Air-Ground Integrated Network,SA-GIN)的构建,从而更有效地发挥卫星网络的潜力,以应对不断增长的需求,成为未来发展的关键方向。

在此背景下,本文总结了基于数字孪生的卫星网络移动边缘计算研究。首先介绍了卫星网络架构和卫星边缘计算;接着介绍了DT的概念,并详述了基于DT的卫星边缘计算平台和基于DT的卫星网络移动边缘计算算法;最后对基于DT的卫星网络移动边缘计算进行了展望和总结。

2 卫星网络移动边缘计算

本章主要介绍了卫星网络移动边缘的相关概念和技术,包括卫星网络架构和卫星边缘计算。这些技术是解决卫星网络问题和实现高效、低时延传输的基础,对于融合网络的设计、优化和应用具有重要推动作用。

2.1 卫星网络架构

目前,根据飞行高度的不同,卫星网络主要由3类轨道卫星组成,从低到高依次为低地球轨道(Low Earth Orbit,LEO)卫星、中地球轨道卫星(Medium Earth Orbit,MEO)卫星和地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit,GEO)卫星。LEO卫星的轨道高度通常在500~2000 km之间,MEO卫星的轨道高度通常在2000~36000 km之间,而GEO卫星的轨道高度约为36000 km^[11]。在卫星网络中,通常使用LEO,MEO和GEO卫星进行组网,共同协助工作。由于LEO卫星的飞行高度远低于MEO和GEO卫星,因此,LEO卫星通信具有较小的传播延迟、传输功率和路径损耗。同时,与MEO和GEO卫星相比,LEO卫星的制造成本更低,这对于对功耗要求严格的物联网设备来说是更理想的选择^[12]。表1总结了LEO,MEO,GEO卫星的主要特点。

由于LEO卫星轨道高度低、覆盖面积小,要实现全球无死角覆盖,需要数千颗甚至数万颗卫星进行组网。随着Nvidia Jetson1和Xilinx Virtex FPGA等商用现成硬件的发展,卫星硬件系统也在不断改进,简单的弯管架构将被具备强大存储、在线计算和调度能力的智能处理架构所替代^[13]。因此,SpaceX,OneWeb和Telesat等航空公司正加速在低地球

轨道建设大型卫星星座,以提供全球宽带互联网接入。SpaceX的Starlink星座已经在北美和英国进入公开测试阶段,到2024年8月已有超过6000颗卫星,计划到2027年将部署超过12000颗卫星^[14-15]。这些卫星星座有望为全球数十亿用户提供低延迟、高速率和覆盖范围广的宽带服务^[16]。

表1 LEO,MEO,GEO卫星的主要特点

Table 1 Main characteristics of LEO,MEO and GEO satellites

	LEO 卫星	MEO 卫星	GEO 卫星
卫星高度	500~2000 km	2000~36000 km	约 36000 km
覆盖面积	小	大	非常大
路径损耗	低	高	非常高
延迟	低	高	非常高
卫星尺寸	小	大	非常大
每颗卫星成本	低	高	非常高
传输功率	低	高	非常高

2.2 卫星边缘计算

卫星在面对灾害检测、应急响应和军事监视等任务时,通常需要较长的等待时间,这会严重影响时间敏感型任务的实时性和效率。为了进一步提供低延迟、高带宽的泛在计算服务,引入了移动边缘计算(Mobile Edge Computing,MEC)技术作为延伸和补充,通过在LEO卫星上部署MEC计算平台^[17],计算任务将在靠近用户的边缘节点进行处理^[18],这将大幅缩短业务响应时间,并节省宝贵的卫星网络回波带宽资源。这种做法还能减少网络中的冗余流量,减轻远程云数据处理中心的计算负担,降低数据泄露的风险,提高系统的安全性,同时为用户提供更出色的服务体验^[19]。卫星边缘计算将计算平台扩展至卫星网络,为用户提供多层次、异构的计算资源。这意味着全球用户都能够访问附近的计算、网络和存储资源,以便快速响应其计算处理需求,从而提升用户的体验质量(Quality of Experience,QoE)。

目前,一些关于卫星边缘计算的研究仅考虑了单颗卫星,即用户将任务分配给其视线范围内的卫星进行处理,每颗卫星独立处理其接收到的所有请求,而不会将这些任务分配给邻近的卫星。基于此,部分研究者提出了利用传统算法来解决单颗卫星边缘计算问题,在文献^[20]中,Wang等研究了一种针对卫星边缘计算的计算卸载策略优化的博弈论方法,并将任务的响应时间和能耗作为优化性能的指标,提出了一种迭代算法来求解纳什均衡。Song等^[21]提出了一种新的MEC框架,研究了物联网移动设备在卫星上的任务处理能力,并将优化问题分解为空间段和地面段对应的两个子问题。此外,他们还提出了一种高效节能的计算卸载和资源分配算法。Mei等^[22]提出了HAP-Satellites边缘计算框架,利用高空平台与LEO卫星合作为地面用户提供计算服务,通过智能启发式算法优化任务卸载和资源分配,有效降低了能耗。为了延长星座的平均电池寿命,Li等^[23]研究了在能量收集动力学和无线环境不确定性条件下的卫星边缘计算中的电池感知能量优化,并开发了一种模式感知的在线能量调度算法。也有一些研究者利用进阶算法来解决这一问题,在文献^[24]中,Sthapit等讨论了计算卸载到卫星中的安全问题,并提出了一种利用强化学习的安全感知卸载算法。

单颗卫星执行边缘计算时,在人口密集地区往往面临

较大的计算负载,而在人口稀少地区则存在资源浪费的问题。因此,实现多卫星计算对于提高卫星服务质量(Quality of Service, QoS)和资源利用率至关重要。卫星可以通过星间链路(Inter-Satellite Link, ISL)将任务卸载到邻近卫星,从而更好地利用机载资源。然而,在进行多颗卫星之间的计算卸载时,面临着以下挑战:

1)在卫星网络中,数据传输会随着卫星地理位置的变化而产生波动,因此需要有效利用多颗卫星之间有限的计算资源,以确保计算服务的持续可用。

2)由于卫星无法始终处于充电状态,并且电池的使用寿命有限^[25],因此,在进行星间任务卸载时必须考虑能源消耗,以避免单颗卫星过度耗电和老化。

3)为了减少计算延迟,可以将任务卸载到多颗卫星上,但这会增加传输成本。因此,在进行计算合作时,需要共同优化通信和计算成本。

基于此,部分研究者提出利用传统算法来解决多颗卫星协同计算卸载问题。Zhang等^[26]提出了一种基于MEC的卫星网络中的多跳计算对等卸载方案,旨在在系统资源和积压

约束下共同减少延迟和能耗;此外,他们利用Lyapunov框架下的延迟在线学习方法,开发了一种实用的在线分布式算法来解决多跳卫星对等卸载问题。Leyva-Mayorga等^[27]使用ISL在多颗卫星之间分配数据,构建了用于实时超高分辨率地球观测的卫星移动边缘计算框架,并优化了图像分布和压缩参数,以最大限度地降低能耗。一些研究者采用进阶算法来解决这一问题,Wu等^[28]为了解决卫星边缘计算服务迁移任务卸载问题,提出了一种分布式方案,并利用深度强化学习方法最小化业务延迟。Tang等^[29]建立了一个双时间尺度的框架,用于解决卫星边缘计算网络中的联合服务部署和任务调度问题,旨在最小化网络的能耗、负载不平衡和数据包丢失,同时确保长期延迟。由于仅基于GEO或LEO卫星的边缘计算很难满足服务的延迟要求,Cui等^[30]混合GEO-LEO卫星网络,进行了联合计算和通信资源分配,并提出了智能任务卸载和多维资源分配算法,以最小化任务卸载和处理的延迟。表2列出了卫星边缘计算相关文献在算法、方法创新点、优化目标、对比方法和实验结果上的对比。

表2 卫星边缘计算相关文献的比较

Table 2 Comparison of literatures on satellite edge computing

		算法	来源	年份	方法创新点	优化目标	对比方法	性能表现
单颗卫星边缘计算	传统算法	博弈论+排队论	文献[20]	2020	构建卸载博弈模型	设备成本	均匀卸载、随机卸载、全部本地执行	显著降低设备的平均成本
		顺序分数规划+拉格朗日对偶分解方法	文献[21]	2021	提出节能的计算卸载和资源分配算法(E-CORA)	能耗	全卸载、本地计算	存在一定数量的卸载比特,可以最小化IMDs的能耗
		智能启发式算法	文献[22]	2022	提出智能启发式算法优化任务卸载和资源分配	能耗	本地卸载、随机卸载、贪心	能够有效降低系统的加权能耗
		模式感知在线能量调度算法	文献[23]	2024	实现亚线性遗憾度的理论保证和渐进零约束违规	电池寿命	最优动态基准	可以显著延长电池寿命达1.32倍
	进阶算法	深度强化学习	文献[24]	2022	深度确定性策略梯度(DDPG)	能耗、时延、成本	本地计算、DQN	DDPG优于静态策略和DQN
多颗卫星协同计算	传统算法	在线分布式算法+Lyapunov优化	文献[26]	2024	设计多跳卫星对等卸载(MHSPO)方案	能耗、时延	单跳卸载、无能量卸载、本地卸载	显著提高了系统性能
		分布式算法	文献[27]	2023	构建并解决SMEC框架中的分割、分配和处理阶段的全局优化问题	能耗	本地处理、全局最优算法	系统能够支持的图像数量增加了12倍,能耗减少了11%
	进阶算法	深度强化学习	文献[28]	2024	提出D3QN算法	时延	DDQN, DQN, CMA-DQN, RR, CC	能够实现比基准更好的延迟性能
		深度强化学习+演员-评论家模型	文献[29]	2024	建立双时间尺度的分层框架,提出基于启发式的原子轨道搜索方法	能耗、负载平衡	DDPG、贪心、全云端计算、本地计算	在卫星网络性能和QoS方面具有有效性和优越性
		深度强化学习	文献[30]	2023	结合DRL和凸优化提出TOMRA算法	时延	遗传算法、随机	TOMRA优于其他参考方案

3 数字孪生在卫星网络中的应用

基于上述对卫星网络架构和卫星边缘计算的讨论,本章将进一步深入讨论DT技术在卫星网络中的应用,着重关注基于DT的卫星边缘计算平台和基于DT的卫星网络移动边缘计算算法的发展,更全面地理解DT在卫星通信领域的潜在价值,并探索其在提升卫星网络性能和效率方面的实际应用。

3.1 数字孪生技术

DT的概念最初是由美国密歇根大学的Grieves教授于2003年在产品生命周期管理课程(Product Lifecycle Manage-

ment, PLM)上提出^[31]。他将DT描述为信息镜像模型,定义为活体或非生物物理实体的数字化复制品。Grieves等在最初提出的DT模型中,将其体系划分为物理层、虚拟层和贯穿两层之间的数据交流层^[32]。如图1所示,为了拓展DT技术的应用范围,Tao等^[33]在现有三维模型的基础上增加了孪生数据和服务两个维度,创新性地提出了DT五维模型的概念。

随着美国的工业互联网、德国的工业4.0以及中国制造2025等国家级制造业发展战略的出台,智能制造成为全球制造业发展的普遍趋势和共同目标。学术界广泛关注和深入研究了DT作为解决智能制造中信息物理融合难题、实现智能制造理念与目标的重要技术^[34]。经过各界学者多年来的

研究,DT的应用迅速从PLM扩展到航空航天^[35]、工业维护^[36]、边缘计算^[37-39]等更多领域。

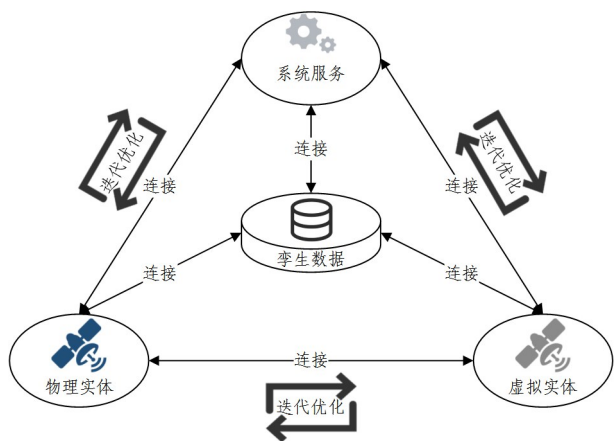


图1 DT 五维概念模型

Fig. 1 Digital twin five-dimensional conceptual model

3.2 基于数字孪生的卫星边缘计算平台

DT 卫星边缘计算平台结构如图 2 所示,主要包括模型层、数据库、支撑层和应用服务层。模型层涵盖了多个学科领域的基础知识模型库,以及专门为星座系统开发的专业模型库,其中包括空间层、地面层和用户层。数据库用于存储各种模拟数据、型号参数和实验数据。支撑层则提供模型编辑和模拟求解功能,支持以组态化的方式构建高精度卫星星座系统模型,并通过结合机理模型和大数据的方法实现模拟求解。模拟结果可以通过曲线、二维动态图和三维动画等多种方式来呈现。DT 星座系统的多种应用服务都由应用服务层负责,这些服务涵盖了如覆盖分析、时延分析、光照分析和误码率模拟等分析功能^[40]。

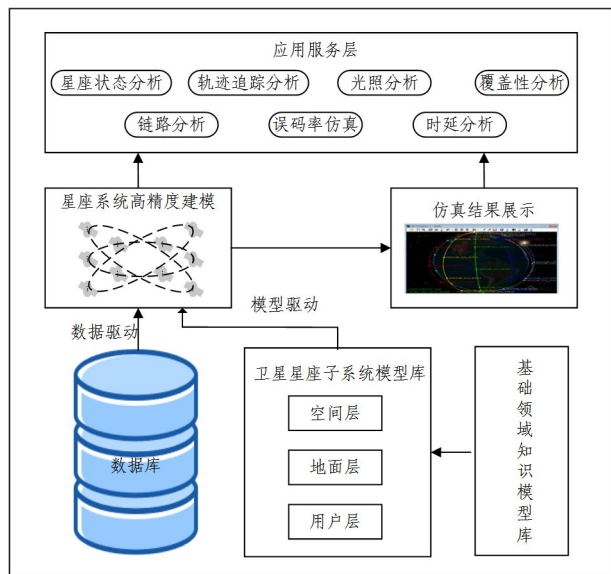


图2 DT 卫星边缘计算平台

Fig. 2 Digital twin satellite edge computing platform

基于DT的卫星网络移动边缘计算平台的实现依赖于两个关键要素。首先是数字空间的构建,这可以通过数字化感知技术来实现。相比传统的平面图,数字空间具有独特的

优势,它允许用户通过鼠标拖拽实现沉浸式的交互体验。其次是全要素信息的采集、分析和传输,这可以通过先进的传感器技术、智能检测软件以及网络技术来实现。通过构建DT卫星边缘计算平台,各专项技术检测系统得以集成到一个统一的系统中,实现数据综合推送。此外,借助数字建模技术,可以创建卫星星座的立体虚拟环境。在DT技术的支持下,能够将现实中的设备和链路状态映射至虚拟空间中,并通过虚拟数字中心可视化展示设备、链路和环境信息数据。用户可以通过简便的操作完成对卫星星座状态的分析、轨道追踪分析、光照分析及链路分析等,从而进一步提升卫星星座的服务质量。

3.3 基于数字孪生的卫星网络移动边缘计算算法

因受到卫星节点不断移动、通信链路不断变化、业务服务类型各异等因素的影响,卫星网络模型的建立、通信协议的设计以及网络性能的保障变得异常困难。将DT与卫星网络融合有望解决上述问题,并推动卫星行业实现数字化和智能化转型升级。具体来说,DT融合卫星网络的应用主要包括两个部分^[41]。

1) 卫星数字孪生模型

卫星研发投入巨大,并且在太空任务中安全性至关重要,因此对卫星进行任何修改都必须经过详尽的仿真测试,以确保其效果符合预期。同时,在卫星全生命周期会产生大量数据,而数据的来源广泛,需要实时感知、存储和不确定性预测,因此数据管理面临极大的困难。借助孪生模型构建仿真环境,卫星的产品设计和组装、在轨监控与状态评估,以及网络运维等各个阶段的管理都可以通过智能化手段来改进。

2) 基于卫星网络的数字孪生模型

卫星星座系统是由上千颗甚至上万颗通信卫星组成的巨型星座系统,并且卫星网络节点的高速运行和链路的动态变化对卫星网络拓扑的时变重构提出了极高的要求。通过数字孪生卫星的仿真模型,结合卫星的状态数据,可以将物理卫星网络映射到虚拟网络。通过这种方式,可以对网络行为进行高精度仿真,并实现它们之间的实时信息交互。

典型的基于DT的卫星网络系统如图3所示,主要由4个部分组成:空间层、用户层、地面层和DT层。空间层包括LEO卫星星座,由多颗LEO卫星及其之间的ISL构成。这些卫星通常采用均匀对称分布或多层混合分布的方式,在不同轨道上交错角度运行,以实现全球范围的LEO卫星组网。这种设计确保了在任何时间、任何地点,至少有一颗卫星能够提供覆盖和接入服务。用户层包括接入网络和终端设备,如综合信息服务平台,业务支撑平台,以及舰载、机载、车载设备和移动终端(如手机)等。通过ISL和星上处理与转发功能,可以实现全球范围内的网络连接和数据交换。地面层主要由综合网络管理中心、卫星控制中心、移动通信网络和地面业务支持网络组成。其主要任务是监测和管理空间层,将卫星网络连接至地面核心网络,并承担用户管理等功能。DT层由多个数字孪生网络组成,通过相互连接、通信、学习和演化,构成了DT融合卫星网络的核心。

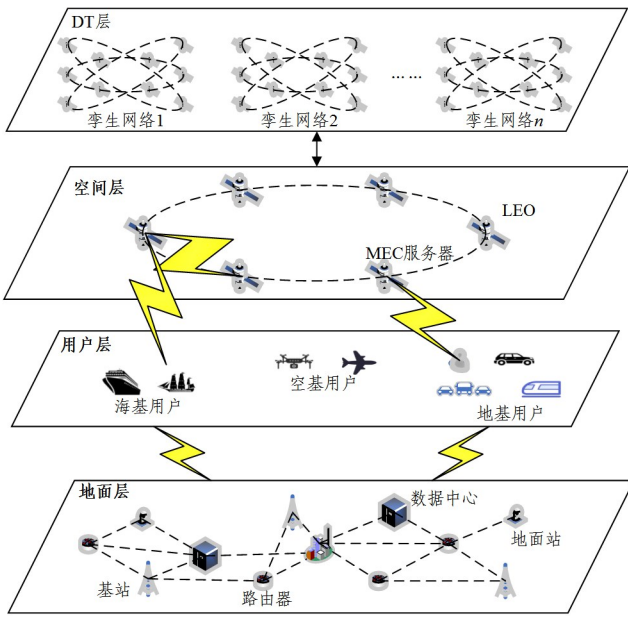


图3 DT融合卫星网络体系架构

Fig. 3 Digital twin integrated satellite network system architecture

从图3可以看出,地面层、用户层、空间层和DT层4个部分协同工作才能构成完整的DT融合卫星网络,这也是DT融合卫星网络体系的特点。其中,空间层利用卫星之间的ISL等技术相互配合,实现网络连接,提高系统的容量并扩大覆盖范围,并通过多种组网方案最大化地利用频谱资源;用户层根据用户和服务需求进行灵活组网,以满足不同领域的差异化需求,提供高效、快速的服务;地面层通过设置网络组件,有效地管理和支持卫星通信系统,完成数据存储、处理和传输^[42];DT层通过定期收集LEO卫星、基站(Base Station, BS)和地面各种终端设备的全球网络状态信息,包括用户的卸载请求、LEO卫星和BS的计算能力,以及网络中任务缓冲队列的堆积情况等,达到监控和预测网络状态的目的。通过DT融合卫星网络软件平台来监控集成网络的动态变化,还优化了LEO卫星资源的共享。针对每颗卫星,还可以决定

分配多少资源给其相邻的卫星^[43]。未来DT融合卫星网络将以多颗LEO卫星组网为数据通信提供服务,通过DT卫星边缘计算平台对网络进行监控和预测,实现全球范围内的持续覆盖和资源分配。

基于此,部分研究者提出利用传统算法来解决基于DT的卫星网络移动边缘计算问题。Zhao等^[41]提出了一种数字孪生辅助的卫星-地面网络存储策略,该策略通过DT将卫星网络映射到虚拟空间,以实现更优的通信效果,并提出了一种面向卫星存储的切换方案,利用遗传算法解决一个多目标优化问题。Jiang等^[44]提出了一种基于数字孪生的卫星网络路由算法,通过实时采集真实卫星网络信息,在DT网络中建立ISL的交换预测和拥塞预测模型,对具有通信风险的拓扑边缘进行修剪和预处理,并应用改进的蚁群算法进行路由求解。Fan等^[45]提出了一种基于DT和多智能体系统的动态更新的微云结构,设计了一个高效的解决方案算法,以解决任务优先级和卫星位置随时间动态变化所导致的低效任务调度的最大收益问题。

此外,一些研究者利用进阶算法解决上述问题。Ji等^[46]研究了DT赋能的星地协同边缘计算网络,提出了一个多层计算卸载优化问题,旨在最小化总系统延迟和卫星能耗的加权和。Gong等^[47]提出了一种基于SG-DT的区块链辅助网络模型,利用多智能体分布式联邦强化学习算法优化CPU周期频率、每个区块链的大小、DTs的数量,以及太阳能的收集,旨在最小化执行能耗和隐私时间开销。随着时间敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)的引入,Lu等^[48]提出了一个基于DT的TSN框架,旨在降低管理成本并优化卫星网络的性能。Paul等^[49]将DT技术整合到SAGIN中,以增强车辆边缘计算,其目标是在超可靠低延迟通信支持的车辆网络中高效地卸载任务。为了解决该问题,研究者开发了一种新颖的多智能体深度强化学习算法。表3列出了基于DT的卫星网络移动边缘计算相关文献在算法、方法创新点、优化目标、对比方法和实验结果上的对比。

表3 基于数字孪生的卫星网络移动边缘计算相关文献的比较

Table 3 Comparison of literatures on satellite network mobile edge computing based on digital twins

算法	来源	年份	方法创新点	优化目标	对比方法	性能表现	
传统算法	遗传算法	文献[41]	2022	提出面向卫星存储的切换方案(ASHER)、引入DT辅助的卫星间路由方案(ITO)	切换次数、时延	MaRST, MSC, MAT, Dijkstra	有效减少了切换次数和通信延迟、提高了内容分发率
	改进的蚁群算法	文献[44]	2023	提出基于DT的卫星网络路由(DTSR),建立切换预测和拥塞预测模型	QoS	Bellman-Ford, LCRA	在数据包丢失率、端到端延迟、延迟抖动和网络吞吐量方面具有显著优势
	卫星范围调度算法(SRS&TPP)	文献[45]	2022	构建虚拟数字孪生网络、提出可变优先级任务的自适应调度模型	任务调度收益、资源利用率	机器学习、启发式或元启发式和强化学习	具有更高的完成率、更大的任务收益和更高的时效性
进阶算法	多智能体深度强化学习	文献[46]	2023	提出多智能体双参与者双延迟确定性策略梯度(MA-DATD3)算法	时延、能耗	MADDPG	有效地提高了计算卸载性能,同时平衡了能耗和总延迟
	多智能体联邦强化学习	文献[47]	2023	提出隐私辅助的区块链计算卸载模型	时延、能耗	MARSP, Actor-Critic	在执行能效、处理的比特量和隐私时间开销方面优于一些最先进的基准
	生成对抗网络(GAN)	文献[48]	2023	提出基于数字孪生的时间敏感网络架构、使用深度卷积生成对抗网络(DCGAN)	成本、网络性能	不同数据流下的DCGAN	高效地确保和预测端到端的延迟
多智能体深度强化学习算法	文献[49]	2023	提出将DT技术与MEC辅助的SAGIN相结合	时延、网络覆盖范围、能耗	PPO,DDPG	有效最小化任务卸载的延迟	

4 挑战与展望

随着基于 DT 的卫星网络技术逐渐成熟,其应用前景变得愈发广阔。然而,在实际的应用和推广过程中,依然存在诸多技术与操作层面的挑战亟待解决。以下将从多个角度探讨这些挑战并展望未来的发展方向。

4.1 现有挑战

当前,基于 DT 的卫星网络在多个关键领域面临瓶颈,尤其是在时延、能耗、算法和数据安全等方面,这些挑战对网络的实际性能和可靠性构成了重大考验。

1) 时延约束

在基于 DT 的卫星网络移动边缘计算中,降低时延是最大的挑战之一^[50]。在关键应用领域,如灾害响应和军事通信,高时延可能导致严重后果。现有研究表明,一些算法的性能并不稳定,在实际应用中可能出现明显波动。在卫星通信中,偶然的时延波动可能导致关键信息传输的延迟,进而影响任务的成功率。

2) 能耗约束

能耗对基于 DT 的卫星网络移动边缘计算中设备的续航能力至关重要。由于卫星的电池寿命有限,过高的能耗会缩短卫星的续航时间,如果不加以控制,能耗问题可能导致资源的大量浪费^[51]。因此,降低能耗是卫星边缘计算中必须考虑的关键因素。在设计调度策略时,必须充分考虑设备的功耗,以尽可能减少能源消耗。

3) 算法及模型更新

在基于 DT 的卫星网络移动边缘计算中,随着新数据的不断生成,模型需要持续更新迭代,并且在更新过程中保持稳定的性能,避免算法效率因更新而下降。随着基于 DT 的卫星网络移动边缘计算模型智能化程度的提高,其复杂度和规模可能会不断增加。这不仅提高了模型训练和部署的成本,还增加了模型维护和更新的难度,成为一个具有挑战性的问题。

4) 数据安全

在基于 DT 的卫星网络移动边缘计算中,处理大量敏感数据时会面临多种安全威胁。卫星数据在数据传输过程中可能会被窃听,导致数据泄露。同时,DT 卫星边缘计算平台可能存在安全漏洞,易受黑客的恶意攻击,从而导致数据被窃取或者篡改,降低虚拟模型的可靠性,使评估变得不可信^[52]。

4.2 未来展望

基于 DT 的卫星网络作为卫星网络的升级,是引领未来网络发展的关键方向和进程。未来网络的发展需要不断突破,以实现低成本、广覆盖、便捷化的目标,从而为推动社会智能化发展提供全方位的智能网络支持。因此,基于 DT 的卫星网络移动边缘计算的发展研究将朝着网络智能化方向迈进。针对前述挑战,本文提出以下展望。

1) 模型智能化

传统算法在解决 NP 难问题时,往往难以获得最优解^[53]。因此,越来越多的研究者正在探索使用人工智能技术,尤其是深度强化学习和联邦学习等方法,以优化和简化模型结构,从而实现更高效和灵活的网络资源分配,提升模型的性能和效率。

2) 数据安全保障措施

在数据传输过程中,必须采用端到端加密技术,以确保数据的机密性和完整性。此外,还需定期对 DT 卫星边缘计算平台进行安全漏洞扫描和评估,及时修补系统中的漏洞。实施严格的安全配置和权限管理,限制对系统的访问和操作权限,并加强对系统软件和硬件组件的安全审查和监控,以确保系统的整体安全性。

3) 标准和规则制定

基于 DT 的卫星网络移动边缘计算涉及多种技术和领域的交叉,因而标准和规范的制定面临技术多样性和复杂性的挑战。不同技术的标准体系在不同国家和地区之间可能存在差异,标准化工作需要统一各方利益、加强国际合作和沟通,确保全球标准的完整性和一致性。

结束语 卫星网络凭借其广阔的覆盖范围和无处不在的低延迟服务,为全球用户提供了便利。然而,卫星设计成本高、发射风险大等不足导致卫星网络移动边缘计算发展缓慢。DT 技术的兴起,为卫星网络的运营提供了强大的数据支持和决策依据。本文系统地讨论了基于 DT 的卫星网络移动边缘计算算法,总结了卫星网络在时延、能耗、算法和数据安全方面所面临的挑战,并从数据安全性、模型智能化与标准和规范制定角度对未来卫星网络的发展进行了展望。

参 考 文 献

- [1] YANG H, ALPHONES A, XIONG Z, et al. Artificial-intelligence-enabled intelligent 6G networks [J]. IEEE Network, 2020, 34(6): 272-280.
- [2] GARCIA M H C, MOLINA-GALAN A, BOBAN M, et al. A tutorial on 5G NR V2X communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3): 1972-2026.
- [3] MAHMOOD A, BELTRAMELLI L, ABEDIN S F, et al. Industrial IoT in 5G-and-Beyond Networks: Vision, Architecture, and Design Trends [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 4122-4137.
- [4] CASONI M, GRAZIA C A, KLAPEZ M, et al. Integration of satellite and LTE for disaster recovery [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 47-53.
- [5] LIAO H J, ZHOU Z Y, ZHAO X W, et al. Learning-Based Queue-Aware Task Offloading and Resource Allocation for Space-Air-Ground-Integrated Power IoT [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5250-5263.
- [6] YANG L, PAN C S, KONG X G, et al. Review on 5G-satellite integrated network [J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 202-215.
- [7] LIU Y, JIANG L, QI Q, et al. Energy-Efficient Space-Air-Ground Integrated Edge Computing for Internet of Remote Things: A Federated DRL Approach [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(6): 4845-4856.
- [8] ZHANG H Y, LIU R K, KAUSHIK ARYAN, et al. Satellite Edge Computing With Collaborative Computation Offloading: An Intelligent Deep Deterministic Policy Gradient Approach

- [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(10):9092-9107.
- [9] GUIDOTTI A, CIONI S, COLAVOLPE G, et al. Architectures, standardisation, and procedures for 5G satellite communications: A survey [J]. *Computer Networks*, 2020, 183:107588.
- [10] YANG W Q, ZHENG Y, LI S Y. Application Status and Prospect of Digital Twin for On-Orbit Spacecraft [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:106489-106500.
- [11] ZHANG Z J, LI Y, HUANG C W, et al. User Activity Detection and Channel Estimation for Grant-Free Random Access in LEO Satellite-Enabled Internet of Things [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9):8811-8825.
- [12] ABDELSADEK M Y, CHAUDHRY A U, DARWISH T, et al. Future Space Networks: Toward the Next Giant Leap for Humankind [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(2):949-1007.
- [13] TANG Q Q, FEI Z S, LI B, et al. Computation Offloading in LEO Satellite Networks With Hybrid Cloud and Edge Computing [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11):9164-9176.
- [14] HU M L, XIAO M, HU Y, et al. Software Defined Multicast Using Segment Routing in LEO Satellite Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024, 23(1):835-849.
- [15] PFANDZELTER T, HASENBURG J, BERMBACH D. Towards a Computing Platform for the LEO Edge [C] // *ACM EdgeSys Workshop*. UK, 2021:43-48.
- [16] CAO X L, YANG B, SHEN Y L, et al. Edge-Assisted Multi-Layer Offloading Optimization of LEO Satellite-Terrestrial Integrated Networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(2):381-398.
- [17] WANG Y X, YANG J, GUO X Y, et al. Satellite Edge Computing for the Internet of Things in Aerospace [J]. *Sensors*, 2019, 19(20):4375.
- [18] YANG Y R, WANG Y, WANG R, et al. A resource allocation method based on the core server in the collaborative space for mobile edge computing [C] // *IEEE/CIC International Conference on Communications*. Beijing, China, 2018, 1:568-572.
- [19] ZHANG Y R, CHEN C, LIU L, et al. Aerial Edge Computing on Orbit: A Task Offloading and Allocation Scheme [J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2023, 10(1):275-285.
- [20] WANG Y X, YANG J, GUO X Y, et al. A Game-Theoretic Approach to Computation Offloading in Satellite Edge Computing [J]. *IEEE Access*, 2020, 8:12510-12520.
- [21] SONG Z Y, HAO Y Y, LIU Y W, et al. Energy-Efficient Multi-access Edge Computing for Terrestrial-Satellite Internet of Things [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(18):14202-14218.
- [22] MEI C L, GAO C, XING Y X, et al. An Energy Consumption Minimization Optimization Scheme for HAP-Satellites Edge Computing [C] // *IEEE 22nd International Conference on Communication Technology*. Nanjing, China, 2022:857-862.
- [23] LI Q, WANG S G, MA X, et al. Battery-Aware Energy Optimization for Satellite Edge Computing [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2024, 17(2):437-451.
- [24] STHAPIT S, LAKSHMINARAYANA S, HE L, et al. Reinforcement Learning for Security-Aware Computation Offloading in Satellite Networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(14):12351-12363.
- [25] YANG Y, XU M W, WANG D, et al. Towards Energy-Efficient Routing in Satellite Networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12):3869-3886.
- [26] ZHANG X Y, LIU J, ZHANG R, et al. Energy-Efficient Computation Peer Offloading in Satellite Edge Computing Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024, 23(4):3077-3091.
- [27] LEYVA-MAYORGA I, MARTINEZ-GOST M, MORETTI M, et al. Satellite Edge Computing for Real-Time and Very-High Resolution Earth Observation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(10):6180-6194.
- [28] WU H N, YANG X M, BU Z Y. Task Offloading With Service Migration for Satellite Edge Computing: A Deep Reinforcement Learning Approach [J]. *IEEE Access*, 2024, 12:25844-25856.
- [29] TANG Q Q, XIE R C, FANG Z R, et al. Joint Service Deployment and Task Scheduling for Satellite Edge Computing: A Two-Timescale Hierarchical Approach [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(5):1063-1079.
- [30] 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.
- [31] GRIEVES M, VICKERS J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex System [J]. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, 2017:85-113.
- [32] WANG J F, WEN C C, HUA G R. A survey of digital twins for concept, technology and application [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2023, 21(2):116-133.
- [33] TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1):1-18.
- [34] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4):2405-2415.
- [35] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94:3563-3576.
- [36] MI S H, FENG Y X, ZHENG H, et al. Prediction maintenance integrated decision-making approach supported by digital twin-driven cooperative awareness and interconnection framework [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58:329-345.
- [37] LIU T, TANG L, WANG W L, et al. Digital-Twin-Assisted Task Offloading Based on Edge Collaboration in the Digital Twin Edge Network [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(2):1427-1444.
- [38] ZHANG K, CAO J Y, ZHANG Y. Adaptive Digital Twin and Multiagent Deep Reinforcement Learning for Vehicular Edge Computing and Networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(2):1405-1413.

- [39] ZHANG Y D,ZHANG H B,LU Y L,et al. Adaptive Digital Twin Placement and Transfer in Wireless Computing Power Network [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(6): 10924-10936.
- [40] ZHAO Q, GUO X Y, ZHAO Y. Exploration of digital twin application in satellite constellation system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(2): 121-128.
- [41] ZHAO L, WANG C C, ZHAO K L, et al. INTERLINK: A Digital Twin-Assisted Storage Strategy for Satellite-Terrestrial Networks [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(5): 3746-3759.
- [42] JIANG R H, FENG Y Z, SUN Y H, et al. A survey on networking key technologies for LEO satellite network [J]. Telecommunication Science, 2023, 39(2): 37-47.
- [43] CHEN X C, CAO J N, LIANG Z X, et al. Digital Twin-assisted Reinforcement Learning for Resource-aware Microservice Offloading in Edge Computing [C]//IEEE 20th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems(MASS). Toronto, ON, Canada, 2023: 28-36.
- [44] JIANG X Y, ZHANG T, LIU L. Research on Satellite QoS Routing Algorithm Based on Digital Twin [C]//2023 11th International Conference on Intelligent Computing and Wireless Optical Communications(ICWOC). Chongqing, China, 2023: 118-122.
- [45] FAN H L, LONG J, LIU L M, et al. Dynamic Digital Twin and Online Scheduling for Contact Window Resources in Satellite Network [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 19(5): 7217-7227.
- [46] JI Z, WU S, JIANG C X. Cooperative Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Computation Offloading in Digital Twin Satellite Edge Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(11): 3414-3429.
- [47] GONG Y K, YAO H P, LIU X N, et al. Privacy-Assisted Computation Offloading Schemes for Satellite-Ground Digital Twin Networks [C]//IEEE International Conference on Communications. Rome, Italy, 2023: 723-728.
- [48] LU Y Z, ZHAO G F, XU C, et al. A Framework for Digital Twin-Based Deterministic Communication in Satellite Time Sensitive Networks [C]//IEEE International Conference on Communications. Rome, Italy, 2023: 6301-6306.
- [49] PAUL A, SINGH K, NGUYEN M T, et al. Digital Twin-Assisted Space-Air-Ground Integrated Networks for Vehicular Edge Computing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2023, 18(1): 66-82.
- [50] LIN Y S, FENG W, WANG Y M, et al. Satellite-MEC Integration for 6G Internet of Things: Minimal Structures, Advances, and Prospects [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 3886-3903.
- [51] ZHOU X, MIAO H, YANG J, et al. Edge computing resource scheduling overview: Historical perspective, architecture, modeling, and method analysis [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, DOI:10.13196/j.cims.2023.0132.
- [52] MAO B M, ZHOU X M, LIU J J, et al. Digital Twin Satellite Networks Toward 6G: Motivations, Challenges, and Future Perspectives [J]. IEEE Network, 2024, 38(1): 54-60.
- [53] LI C C, ZHANG Y S, CUI Z X, et al. An Overview Of Low Earth Orbit Satellite Routing Algorithms [C]//2023 International Wireless Communications and Mobile Computing(IWC-MC). Marrakesh, Morocco, 2023: 866-870.



SUN Yunhe, born in 1994, Ph.D, associate professor, is a member of CCF (No. L0971M). Her main research interests include satellite mobile edge computing, space-ground integrated network and complex network controllability.



ZHAO Liang, born in 1983, Ph.D, professor, Ph.D supervisor, is a senior member of CCF(No. 86501S). His main research interests include digital twin technology, mobile computing, intelligent transportation, etc.

(责任编辑:何杨)