



综述

空天地一体化网络资源优化：典型问题与研究展望

董博文¹, 朱敏^{1,2}, 顾家骅^{1,2}, 望运武^{1,2}, 张教²

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

摘要: 在空天地一体化网络 (space-air-ground integrated network, SAGIN) 的发展与应用过程中, 网络结构的复杂性与网络资源的多样性影响了SAGIN的服务能力。如何对异构网络进行资源分配优化以提升性能, 是网络普及与应用过程中亟须解决的重要问题。首先, 介绍了空天地一体化网络的架构与功能。随后, 总结了网络资源优化中的若干典型问题、常见的优化目标和建模与优化方法。最后, 分析了网络优化中存在的挑战, 探讨了该领域未来的研究方向。

关键词: 空天地一体化网络; 网络架构; 资源分配; 性能优化

中图分类号: TN915.0

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025024

Resource optimization of space-air-ground integrated network: typical issues and research prospects

DONG Bowen¹, ZHU Min^{1,2}, GU Jiahua^{1,2}, WANG Yunwu^{1,2}, ZHANG Jiao²

1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

Abstract: In the development and application of the space-air-ground integrated network (SAGIN), the intricate network structure and varied resources significantly affect the service capabilities of SAGIN. It is a challenge in the popularization of SAGIN to allocate and optimize resources to improve the performance in heterogeneous networks. Firstly, the architecture and functions of SAGIN were introduced. Subsequently, several typical issues in resource optimization were summarized and analyzed, along with the common performance objectives, modeling and optimization methods. Finally, the challenges in network optimization were analyzed, and the future research direction in this field was discussed.

Key words: SAGIN, network architecture, resource allocation, performance optimization

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-11-19

通信作者: 朱敏, minzhu@seu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2024YFE0200200)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2024YFE0200200)



0 引言

随着互联网、物联网、云计算等技术的发展与应用,全球数据流量呈快速增长趋势,对通信网络的容量、覆盖率和可靠性等方面提出了更高的要求。传统的地面通信网络承载能力与覆盖范围有限,难以满足海量设备接入、实时数据传输与无缝网络覆盖的需求。另外,地面通信设施容易在自然灾害场景中受到破坏,从而导致通信中断,显著地影响了网络的可靠性。

为了解决这些问题,空天地一体化网络(space-air-ground integrated network, SAGIN)^[1]成为未来网络的重要发展方向。空天地一体化网络架构如图1所示,空天地一体化网络是一种综合性的通信网络,通过整合地基网络、空基网络和天基网络的通信资源,实现全球范围内的网络无缝覆盖与信息互联互通。其中,地基网络(地面网络)使用现有的地面通信基础设施,包括蜂窝网络、无线局域网、无线自组织网络等提供高速、低延迟、大容量的网络服务;空基网络基于无人机

(unmanned aerial vehicle, UAV)^[2]、高空平台(high altitude platform, HAP)^[3]等载体,提供广覆盖、灵活、低成本的通信服务;天基网络(卫星网络)^[4]通过地球同步轨道(geostationary orbit, GEO)卫星、中地球轨道(middle earth orbit, MEO)卫星、低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星等协同工作,实现全球范围内的网络覆盖,为偏远地区、森林、海洋等区域提供无缝通信服务。

近年来,多个国家和组织对空基与天基网络的建设做出了努力,部分天基/空基网络项目见表1。基于LEO卫星在全球网络接入与无缝通信中的巨大潜力,已有多个LEO卫星星座快速建设并投入商用。其中,SpaceX公司提出的星链(Starlink)^[11]计划已经发射超过7 000颗LEO卫星,在100多个国家与地区为400万以上用户提供服务。在地面网络覆盖不足的区域,多个组织开展了基于空基通信的网络项目,以提供灵活廉价的网络接入服务。例如,谷歌公司提出的Loon项目^[12],通过在平流层中飞行的超压气球为偏远地区提供网络连接;空客公司展示了

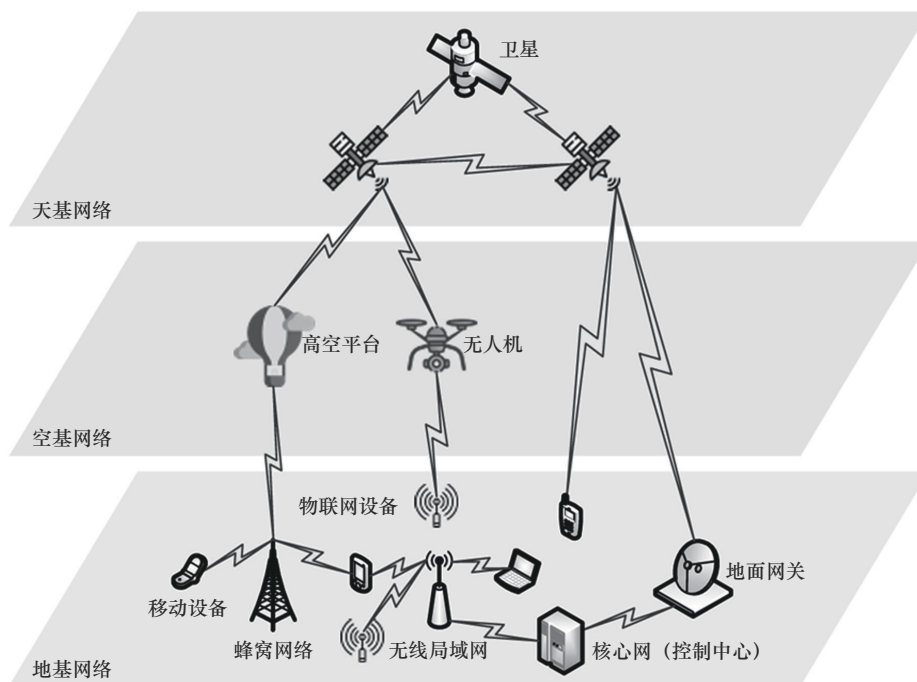


图1 空天地一体化网络架构

表 1 部分天基/空基网络项目

项目名称	系统平台	数量（截至目前）	提供服务
海事卫星通信系统 Inmarsat ^[5]	GEO 卫星	14	语音和数据
天通一号卫星 ^[6]	GEO 卫星	3	语音、短消息
O3b 卫星 ^[7]	MEO 卫星	20	数据
铱星 Iridium ^[8]	LEO 卫星	66	语音和数据
全球星 Globalstar ^[9]	LEO 卫星	48	语音、数据、短消息等
OneWeb ^[10]	LEO 卫星	634	数据
星链 Starlink ^[11]	LEO 卫星	7 000+	数据
谷歌 Loon ^[12]	HAP	—	网络接入
空客 Zephyr ^[13]	HAP	—	网络接入
Meta Aquila ^[14]	UAV	—	网络接入

使用高空平台站 Zephyr^[13]提供无线宽带连接的能力，可在山区、偏远岛屿和海洋地区提供通信服务；Meta 公司提出的 Aquila 项目^[14]，旨在开发一种高空长航时太阳能无人机来提供稳定、高速的互联网接入，帮助实现全球网络覆盖。这些项目展示了天基与空基网络平台的技术潜力和创新性，为空天地一体化网络的发展和应用打下了坚实的基础。

在空天地一体化网络的建设与应用过程中需要解决若干技术难题，如基础网络的建设和维护、不同通信方式的协同工作、网络的智能化管理等。其中，如何对空天地一体化网络中有限的资源进行合理地分配与优化，提升数据传输速率和网络服务能力，是当前学术研究的热点。近期，关于 SAGIN 资源分配领域的综述性文献已经根据关键技术^[1]、性能指标^[15]（吞吐量、能耗、延迟等）、优化方法^[16]（数学优化、动态优化、博弈论等）等对当前工作进行了梳理。然而，依然缺乏对 SAGIN 不同场景中典型研究问题的清晰归类与介绍，以及依据场景特点对网络建模与优化方法的总结与说明。本文旨在对空天地一体化网络资源优化相关研究进行总结与分析，重点介绍网络的架构与功能、网络优化中的典型问题、性能指标、系统建模和优化方法，并探讨该领域未来的研究方向与面临的挑战。

1 空天地一体化网络架构

如图 1 所示，空天地一体化网络结合了地基网络、空基网络与天基网络，形成一个统一、协同工作的网络体系，以实现跨域、无缝的通信和服务覆盖，提升网络的连通性、可靠性和灵活性。在本节中，对空天地一体化网络的组成结构与功能进行介绍与分析。

1.1 地基网络

地基网络（地面网络）由蜂窝基站、地面网关、核心网、控制中心等组成，提供地面设备的接入与数据服务，并可与空基网络和天基网络相连接。蜂窝基站对其附近的用户提供接入服务，并可通过光纤连接核心网。当基站无法直接连接核心网或其传输能力不足时，可将数据流量卸载至空基网络或天基网络后回传至核心网络。地面网关是地面网络与天基网络、空基网络相连的接口，可以实现跨域数据传输与网络控制等功能。控制中心可对网络设施进行统一控制与管理，包括数据转发、路由与网络资源分配、任务调度策略等，可以提升网络的服务能力。

网络接入设备主要包括移动设备、物联网设备等，不同类型的设备具有不同的特点与功能需求。移动设备的体积较小，收发功率受到限制，其设备接入密度在不同场景中差距较大；物联网



设备具有较小的体积与能量储备,数据传输量较低,常布置在森林、沙漠等无基站位置,维护比较困难。5G时代的地面接入网的传输速率、网络延迟、接入数量、可靠性等都已经有了较大的进步,但仍然难以满足快速增长的接入设备数量与多样的网络需求。

1.2 空基网络

空基网络一般由高空平台与无人机等组成,这些设备搭载通信载荷进行无线电发射和接收,相互或与地面站、卫星之间进行通信。空基网络设备距离地面较近,具有较高的灵活性与较低的建设成本,适合在地面网络覆盖或通信能力不足的时候提供设备接入、数据传输、边缘计算等服务的补充,以满足用户的通信需求。

无人机是一种可由远程控制或自主飞行系统控制的飞行器,广泛应用于军事侦察、航拍、农业监测、物流配送、紧急救援、环境监测等领域。无人机能够按照预设的路径飞行并执行特定任务,机动灵活且部署成本较低。由于无人机飞行高度较低,传输延迟低,因此可作为空中基站应用于网络快速恢复、通信扩容等场景,也可以在乡村、沙漠、草原等地区进行物联网设备的数据收集、计算卸载等。尽管无人机在灵活性与布置成本上相较地面网络存在优势,但是其较小的体型,有限的能量、存储和计算资源,以及复杂的飞行控制、多样的信道环境使其难以提供长期稳定的服务。

高空平台是距离地面 20 km 左右的相对静止的空中平台,较高的飞行高度使其可以覆盖数千平方千米的地面区域,提供较无人机更广泛的通信覆盖。高空平台可基于气球、飞艇、无人滑翔机等设备,承载能力较大,可以搭载太阳能电池板以提供运行能量,并维持数百天的飞行。与卫星通信相比,高空平台的部署和维护成本较低,可靠性与通信速率较高。高空平台可提供长期稳定的服务,包括作为通信中继将地面基站的数据回传至核心网或卫星,作为空中基站为用户或物

联网设备提供网络接入与边缘计算支持等。

1.3 天基网络

天基网络包括多种类型的卫星,按离地距离可以分为地球同步轨道卫星、中地球轨道卫星和低地球轨道卫星;按功能划分可以分为通信卫星、观测卫星、导航卫星等。其中,通信卫星多为低轨卫星,部分属于中轨卫星,可提供用户接入、数据中继、网络回程等服务;观测卫星为低轨卫星,可进行地球环境、气候变化等数据的收集;导航卫星多为中轨卫星。不同种类的卫星可以组成多层卫星网络,协同实现数据传输、遥感探测、全球定位等功能,也可与空基网络及地面网络合作进行空天地一体化通信。

尽管卫星网络相较地面网络与空基网络覆盖范围更广,但星地间不稳定的信道条件、通信延迟、更高的传输功率和较低的网络容量使其更适合作为地面网络的补充。同时,卫星网络还需要解决大型卫星网络的星座部署、网络控制、卫星连接、数据传输规划等问题。

1.4 空天地一体化网络系统

为了实现空天地 3 层网络一体化体系,使地基、空基与天基 3 个层面的网络能够无缝协作,共同提供服务,需要解决一系列技术挑战。首先,对 3 层异构网络之间的跨域连接问题,需要制定统一的通信协议或网关转换机制,在实现融合通信的同时保障网络的安全性,以防止潜在的数据泄露或恶意攻击。在网络架构的设计过程中,需要从物理层至应用层进行全方位考量,确保系统的兼容性和可靠性。其次,当用户在不同的网络覆盖区域之间移动时,需要实现网络间的无缝切换以保证网络的覆盖与连通,这需要合理地分配和管理各类网络资源,确保协调一致,以提供稳定的服务质量 (quality of service, QoS)。最后,大规模网络中,控制与管理平台的设计、网络的运维和标准化工作,将成为构建下一代移动通信体系的重点研究方向。

2 空天地一体化网络资源优化中的典型问题

本节总结并分析了 SAGIN 资源优化研究中的若干典型问题, 空天地一体化网络资源优化典型问题见表 2, 列出了具体的优化目标、优化对象、优化方法和对应的文献。

2.1 地面网关部署问题

空天地一体化网络中的地面网关部署如图 2 所示, 空天地一体化网络中, 天基网络需要通过地面网关连接地面网络并接入核心网, 完成流量回程、网络控制等功能, 因此, 网关部署对网络延迟与可靠性有较大影响。基于用户数量、卫星数量和网络流量的变化情况, 网关部署优化需要综合考虑网络性能和建设成本。文献[17]提出了一种卫星地面集成网络架构, 并在此基础上进行卫星网关和控制器的联合部署优化, 以最小化地面交换机到卫星的平均传播延迟, 并最大化网络可靠性。该文献提出了一种基于模拟退火与聚类混合的优化算法, 计算复杂度优于枚举算法, 仿真验证了该算法的有效性。文献[18]通过 LEO 卫星地面集成网络中的网关部署设计, 实现了最大化系统总收益, 最小化网关数量与平均接入距离的目标。文献[18]考虑了不同地区的大气条件、人口数量和物联网终端设备分布等因素, 提出了一种基于分布式资源分配机制的算法来最大化服务数据需求总收益, 并通过遗传算法优化了网关部署的问题。

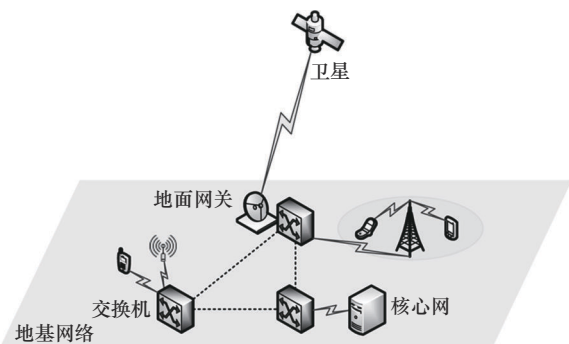


图2 空天地一体化网络中的地面网关部署

2.2 设备接入选择问题

空天地一体化网络的设备接入选择如图 3 所示, 空天地一体化网络中, 地面用户与设备可能同时处于多个网络的覆盖中。这些网络可能是不同类型的网络, 如地基网络 (图 3 中接入 1 和 2)、空基网络 (图 3 中接入 3 和 4) 与天基网络 (图 3 中接入 5), 也可能是同一类型网络的多个设备, 如多个地面基站、多台无人机或多颗卫星。当存在多网络接入选择时, 基于不同网络的特点与服务能力, 如何进行用户接入和信道分配, 以提高网络的性能和公平性是需要解决的重要问题。文献[19]通过优化卫星与 UAV 集成网络中用户接入选择策略, 同时分配接入链路、卫星与地面回传链路的资源, 满足用户请求的同时最大化网络的数据速率。该文献将联合优化问题建模为竞争市场模型, 并使用重球算法和分布式迭代求解。文献[20]设定的空天地一体化网络场景中, 地面基站、高空平台和卫星分层次为地面用户提供网络接入服务。通过优化用户接入、回传选择、基站功率分配与高空平台的位置, 最大化用户的数据吞吐量, 同时考虑了用户网络速率的公平性。文献[21]为了提高空天地一体化网络的资源利用率并实现负载均衡, 针对多种异构网络的接入优化问题进行了研究。该文献建立了网络选择模型并提出了一种基于进化博弈的网络选择算法, 同时提出了一种基于深度强化学习的选择方法以处理连续和高维的动作空间。

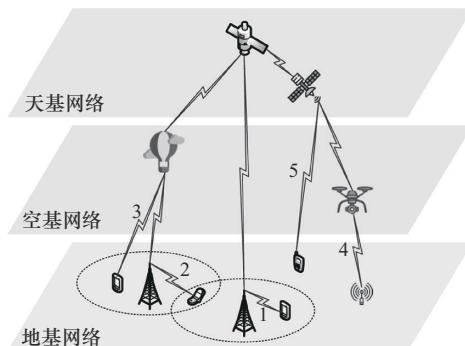


图3 空天地一体化网络的设备接入选择



表2 空天地一体化网络资源优化典型问题

典型问题	涉及网络	优化目标	优化对象	优化方法	文献
地面网关部署问题	卫星、地面	网络延迟 网络可靠性	网关和控制器位置	模拟退火与 聚类混合算法	[17]
	卫星、地面	网络收益 网关数量与接入距离	网关部署	交替方向乘法 遗传算法	[18]
设备接入选择问题	卫星、UAV、地面	网络数据速率	用户接入选择 回传选择 传输资源分配	重球算法 分布式迭代	[19]
	卫星、HAP、地面	网络数据速率	用户接入选择 回传选择 基站传输功率 HAP位置	泰勒展开 启发式算法	[20]
	卫星、空基网络、 地面网络	网络数据速率 网络延迟、能耗和拥塞 负载均衡	用户接入选择	进化博弈 深度强化学习	[21]
网络层间连接问题	卫星、HAP、地面	连接可靠性 连接成本	网络连接	贪心算法	[22]
	卫星、HAP、地面	网络收益	网络连接	匹配博弈	[23]
	卫星、HAP、地面	地面接收数据量	网络连接 数据流与存储	Benders 分解 加速算法	[24]
多维资源分配问题	卫星、地面	数据下载量	网络连接 缓存与能量资源管理	马尔可夫过程 动态规划	[25]
	卫星、HAP、地面	网络能量效率	缓存、计算与 通信资源管理	几何规划 泰勒级数近似	[26]
	卫星、UAV、地面	用户吞吐量	缓存放置 带宽与传输功率分配 无人机轨迹	块坐标下降法 逐次凸近似	[27]
位置路径规划问题	卫星、UAV、地面	无人机能耗	无人机轨迹	列生成算法 启发式算法	[28]
	卫星、UAV、地面	上传数据量 无人机能耗	物联网设备带宽分配 无人机轨迹、发射功率与 卫星选择	块坐标下降法 逐次凸近似 拉格朗日对偶分解法	[29]
	卫星、HAP、UAV、地面	网络公平性 基站负载	无人机轨迹 信道分配	深度强化学习 固定点迭代法	[30]
计算卸载决策问题	卫星、UAV、地面	延迟与能耗 服务器使用成本	计算卸载决策 计算资源分配	深度强化学习 启发式算法	[31]
	卫星、UAV、地面	计算任务数量 无人机能耗	计算卸载决策	随机博弈 多智能体强化学习	[32]
	HAP、UAV、地面	数据处理总量	计算卸载决策	匹配博弈 启发式算法	[33]
其他问题	卫星、地面	用户下行总速率	用户基站关联 基站卫星连接	拉格朗日乘数法 匹配博弈	[34]
	卫星	网络延迟	路由决策	深度强化学习	[35]
	卫星、地面	平均任务数量	任务调度周期 天线时间块分配	随机优化 李雅普诺夫优化 启发式算法	[36]

2.3 网络层间连接问题

空天地一体化网络的层间连接如图4所示,空基网络作为地面网络和卫星网络之间的中继,可以与地面设备(图4中连接1、2、3和4)和卫星(图4中连接5和6)建立连接。此外,卫星也能够与地面设备(图4中连接7)和网关(图4中连接8)周期性地连接与切换,进行星地间无缝数据传输。基于有限的网络资源、多种连接选择和变化的信道传输条件,需要合理设计网络层间的连接规划,以优化网络的整体性能。文献[22]研究了在卫星与HAP集成网络中,基于时变网络拓扑的网络连接优化问题,以提高连接可靠性并降低连接成本。该文献构建了方向时空图以表述空间节点的运动轨迹和网络的时间演化特性,并提出了3种基于贪心算法的连接规划方法。文献[23]研究了LEO卫星、HAP、远程用户和物联网设备组成的空天地一体化网络中,联合接入和数据回传的优化问题。通过合理匹配用户与HAP、HAP和卫星来最大化LEO卫星通过HAP中继的总收益和服务的用户数。该文献将该问题表述为混合整数非线性规划,仿真结果表明该文献所提的基于匹配博弈的优化方法相较于基准算法具有优势。文献[24]研究了空天地一体化网络中HAP与LEO卫星的协同数据收集和传输问题,通过优化网络节点之间的连接、存储和数据流传输,最大化地面数据中心接收的数据量。

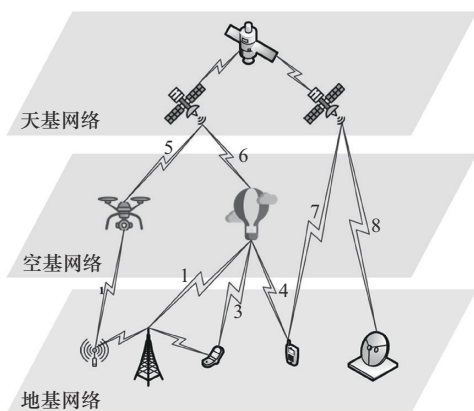


图4 空天地一体化网络的层间连接

2.4 多维资源分配问题

在空天地一体化网络中,因为卫星、高空平台和无人机设备的有限体积,执行功能时受到多种资源的约束,包括能量约束、功率约束、存储约束、计算资源约束等,如何合理地分配资源以提高网络的服务能力是需要解决的重要问题。文献[25]研究了在卫星网络中结合连接选择、能量和缓冲区管理的数据调度与资源优化问题。该文献将随机数据调度优化问题表述为离散无限马尔可夫决策过程,并提出了联合前向和后向归纳算法框架以最大化网络的数据下载量。文献[26]提出了在集成卫星、HAP和地面的网络中,考虑HAP的高度和最小仰角,结合网络中的缓存、计算和通信资源管理来最大化网络能量效率的方法。文献[27]研究了LEO卫星辅助的UAV通信系统中,通过联合优化缓存放置、资源分配(包括带宽和传输功率)和无人机的轨迹来最大化地面用户的最小可实现吞吐量,同时研究了缓存大小、文件大小、无人机传输功率和飞行高度等参数对系统性能的影响。空天地一体化网络的多维资源优化中,常有多决策变量参与,其数学模型通常为复杂的非线性规划问题,直接求解的难度很大。因此,需要使用多种方法对问题进行分解与简化,从而在网络性能与计算复杂度之间取得平衡。

2.5 位置路径规划问题

空天地一体化网络中的位置与路径规划如图5所示,空基网络设备的部署相对地面设施更灵活,同时高空平台的位置、无人机设备的高度与飞行轨迹等因素会对信道条件、干扰和与地面设备的连接等产生影响。作为空中基站时,HAP的部署倾向于用户密度更高的区域(图5中位置1),覆盖尽量多的用户以最大化接入设备的数量^[20]。无人机的飞行高度与轨迹不但影响飞行能耗与覆盖区域,还影响数据传输率、通信能耗、存储资源等。文献[28]使用无人机进行



物联网传感器数据收集, 针对不同类型数据的延迟容忍情况, 无人机能够携带数据或利用LEO卫星将数据回传至地面中心。该文献通过优化无人机的移动轨迹来最小化无人机的能量消耗。文献[29]在空天地一体化远程物联网场景中, 通过优化物联网设备的带宽分配和无人机的三维轨迹来提升物联网设备的数据采集效率, 同时通过优化无人机的发射功率和LEO卫星的选择来最大化总上传数据量并降低无人机的能量消耗。文献[30]提出了一种基于HAP和UAV的空天地异构网络设计方案, 通过深度强化学习和固定点迭代方法来优化无人机的三维位置和信道分配, 以确保网络公平性和服务质量, 并同时考虑了空中基站的负载。

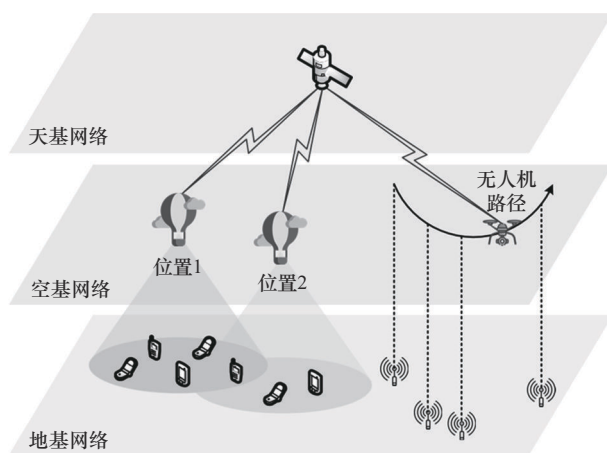


图5 空天地一体化网络中的位置与路径规划

2.6 计算卸载决策问题

空天地一体化物联网中, 物联网设备受体积和能量限制, 在数据的收集与处理过程中通常需要进行计算卸载。空天地一体化网络中的计算卸载如图6所示, 任务可卸载至附近的空基网络设备或远程服务器(计算中心)进行处理, 而计算卸载的决策与计算资源的分配会影响网络性能。文献[31]研究了在物联网计算场景中, 如何将计算任务合理地分配至物联网设备本地进行、卸载至无人机进行边缘计算, 或通过卫

星卸载至云计算中心进行处理。该文献考虑了无人机有限计算资源的分配问题, 并以最小化能耗、服务器使用成本和延迟为目的, 提出了一种基于深度强化学习的计算卸载方法。文献[32]研究了面向延迟约束远程物联网的SAGIN计算任务调度问题。其中, 无人机从物联网设备收集计算任务后, 可在无人机进行处理或卸载至LEO卫星进行计算。该文献以最大化满足延迟约束的计算任务数并降低无人机的能耗为目标, 设计了一种多智能体强化学习计算卸载策略以优化网络性能。文献[33]提出了一个由高空平台和无人机组成的分层空中计算框架, 为地面物联网设备提供边缘计算服务。通过基于匹配博弈的算法来处理物联网设备到无人机的数据卸载决策, 通过启发式算法来处理无人机到高空平台的数据卸载决策, 从而最大化计算处理的物联网数据总量。

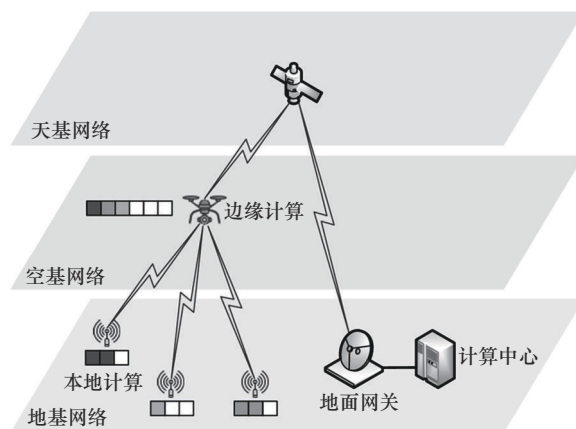


图6 空天地一体化网络中的计算卸载

2.7 其他问题

除了上述问题, 空天地一体化网络中的干扰控制、星间路由和任务调度等问题也常被关注。文献[34]针对卫星综合地面网络的高密集度和高动态性加剧了卫星间干扰, 从而降低了回程容量与网络速率的问题, 提出了一种联合干扰管理和用户关联方案。该方案通过协同计算优化用户与地面基站之间的关联, 以及地面基

站与LEO卫星之间的连接,提高了网络的下行链路用户总和速率。文献[35]针对大型动态LEO卫星星座的路由问题,提出了一种基于图神经网络强化学习的路由决策方案。该方案将源节点到目的节点的路由过程建模为马尔可夫决策问题,使用图神经网络提取卫星与星间链路的状态特征,使用基于Actor-Critic的强化学习框架进行下一跳卫星的路由决策。实验结果表明,该方案在算法收敛性、网络延迟、对网络动态情况的适应性等方面有良好的表现。文献[36]研究了数据中继卫星网络中动态混合任务的调度问题,通过分配多天线的时间块,在满足时间窗口约束的同时尽可能多地容纳紧急任务和临时任务,并减少失败任务的数量。仿真结果表明,该文献所提的方法可以最大化混合任务的时间平均数量,有助于提高系统资源的利用率。值得注意的是,资源分配与优化问题通常不是独立的,而是相互结合的,这也是空天地一体化网络优化的研究趋势。

3 空天地一体化网络优化目标

网络系统的性能可以通过多个维度来评估,如数据吞吐量、网络延迟和资源利用效率等。在进行空天地一体化网络优化时,需要根据不同的应用场景和用户的实际需求来确定具体的优化目标,从而提高网络服务的整体质量。此外,在资源优化研究过程中,选择恰当的网络性能指标对于指导网络模型建立和优化方向至关重要。本节总结归纳了空天地一体化网络中常见的优化目标与代表性研究。

3.1 数据吞吐量

空天地一体化网络中,网络的数据吞吐量是重要的性能指标之一,在不同的网络场景中有着不同的要求。在数据传输场景中,优化目标可为最大化地面接收到的数据量^[24-25];在多用户接入场景中,除了提高网络的总速率^[19],

还需要考虑网络的公平性,即网络中接入设备的最小数据速率^[20, 27];在物联网场景中,优化目标包括最大化设备上传数据量^[29]等。为了提高空天地一体化网络的容量,具体的优化方法包括多维资源的联合优化^[27]以改善网络瓶颈、跨层连接优化以降低干扰^[34]、数据流优化^[24]以提高资源利用率等。

3.2 网络延迟

空天地一体化网络中,延迟是服务质量评价的重要一环,主要由传输延迟、传播延迟、计算延迟和排队延迟组成。其中,传输延迟是设备发送数据的总时间,与数据量和传输速率相关;传播延迟为数据从发送端到接收端所需要耗费的时间,与传播距离相关;数据处理与计算过程的时间被称为计算延迟,而等待处理的过程会引入排队延迟。空天地一体化网络中,因为有限的网络资源与变化的网络条件,需要对网络进行整体优化以降低延迟。以文献[31]为例,在物联网计算卸载场景中,综合考虑了不同设备在处理数据时的计算延迟、等待处理的排队延迟和在不同设备之间传输数据的延迟,并通过合理的卸载决策与资源分配方法降低了网络总延迟。

3.3 网络资源消耗

在空天地一体化网络的优化过程中,需要在满足用户需求的同时,降低能量、通信、存储和计算等有限的网络资源的消耗。常见的优化目标包括:在卫星地面网络中,最小化地面网关数量以降低网络成本^[18];在无人机通信场景中,最小化无人机有限能量资源的消耗^[28-29];在边缘计算场景中,降低计算设备的负载与网络传输能耗^[31];在卫星通信场景中,优化星间链路的资源消耗^[37]等。

3.4 任务完成量

用户需求常以任务方式存在,任务可能包含观测需求、传输需求、计算需求等,任务完



成数量是衡量网络服务能力的重要指标。空天地一体化网络中,常见的优化目标包括有限网络资源下的任务完成数^[36,38]与任务请求接收率^[39]等。

3.5 多目标优化

在实际的网络优化问题中可能存在多个优化目标,包括网络覆盖率、通信性能、网络成本等,需要在不同的性能指标中寻求合适的平衡。各优化目标之间通常相互影响,如网络的数据吞吐量和网络延迟呈负相关,而与网络资源消耗呈正相关。为了实现多目标协同优化,需要合理设计性能指标。例如,文献[26]将最大化网络的能量效率,即一定时间内传输的总数据量与消耗的总能量的比值作为网络优化目标;文献[40]在远程物联网场景中提出了吞吐量与延迟比作为性能指标。

4 空天地一体化网络建模方法

针对复杂的空天地异构网络,合理精准的建模是性能优化的必要流程。针对网络的资源分配规划问题,需要合理设置目标函数和约束条件来描述网络的优化目标与资源限制;针对动态拓扑与时变资源的网络,常使用时间演化图对网络进行建模;此外,网络虚拟化、博弈论模型和马尔可夫模型等也常用于网络的建模与优化中。根据这些方法的特点与具体应用场景,本节梳理了空天地网络中常见的建模方式与相关文献。

4.1 基于数学规划的建模

在空天地一体化网络资源分配中,优化问题通常被表述为数学规划。规划是数学优化的一种方法,涉及在一组(不)等式约束下的目标函数的最大化或最小化。其中,目标函数常为网络的优化目标,约束则是网络中的资源限制。多维资源优化问题通常包含能量、功率、存储、数据流等线性变量与计算卸载决策^[33]、信道分配^[30]、

设备接入选择^[20]、路径规划^[28]、网络连接^[24]等整数变量。因部分决策变量被限制为整数,常被建模为整数规划或混合整数规划,复杂问题也可以被建模为非线性规划^[23,41]。数学规划的决策变量与约束数量会随着问题的复杂性而快速增长,使精确求解的计算复杂度指数增加,难以获得最优解,此时需要对数学模型进行简化、松弛等过程以加快求解速度。

4.2 基于图模型的建模

空天地一体化网络的拓扑可能是动态变化的(如周期性变化的卫星星座),不同时间段之间网络拓扑与资源之间的联系不能忽略,而时间演化图能够精确地表示网络中的多维时变资源及连续变化的关系^[42-43]。时间演化图中,动态的网络拓扑被划分为时间片,每个时间片内的拓扑可视为静态;时间片之间可使用虚拟的存储链路连接,以描述资源的连续性。该方法可在连续时间内规划资源分配,广泛应用于空天地动态网络资源优化的研究中^[22,24,37,44]。

4.3 基于网络虚拟化的建模

网络虚拟化技术能够将空天地一体化网络的硬件设备与上层网络解耦,为解决异构网络的建模与资源分配优化问题提供了新的思路。文献[41]提出基于软件定义网络和网络功能虚拟化的天地一体化网络架构,通过网络功能虚拟化嵌入、虚拟链路速率适配、频谱分配和功率分配优化来最大化网络收益。文献[45]提出了一种基于业务类型的空天地一体化网络架构的服务功能链映射方法,该算法有效地提升了网络资源利用率,优化了服务接受率与延迟性能。文献[46]提出了一种区域卫星网络中基于深度强化学习的负载均衡虚拟网络嵌入算法,提高了网络的虚拟嵌入接受率和资源利用率,并降低了平均延迟,表现出了更好的动态网络适应性。

4.4 其他建模方法

除了上述的建模方法,空天地一体化网络资

源优化问题还存在多种建模方法。针对多用户或多节点之间的竞争问题,如用户接入^[21,34]、跨层网络连接^[23,34]、计算卸载^[32-33]等,可以使用博弈论来建模多用户或设备之间的互动,对网络资源分配的策略进行分析与优化。另外,竞争市场模型^[19]、排队模型^[40]、马尔可夫模型^[25,32,39]等也常在网络建模中使用。

5 空天地一体化网络性能优化方法

空天地一体化网络的性能优化可以通过多种方法实现,包括基于数学优化的求解方法、启发式算法和基于机器学习的优化方法等。其中,数学优化方法常在规模较小或有严格最优解要求的问题中使用,并可借助工具软件辅助求解;启发式算法可在大规模复杂网络中高效地获得近似最优解;机器学习则擅长处理动态和不确定环境中的优化问题。不同的方法各有其特点与优势,需要根据具体应用场景选择合适的优化方法以实现最佳效果。

5.1 基于数学优化的求解方法

当数学规划问题存在全局最优解时,理论上能够通过数学优化方法,并借助辅助工具(如MATLAB, Python库函数linprog、cvxpy等)求解,但计算复杂度通常较高。在网络的规模较小、拓扑与参数静态或可预测、优化目标明确的情况下,可以使用基于数学优化的方法来寻找网络的最佳设计方案。对于大规模复杂问题以及非凸优化问题,还需要对问题进行分解与近似等处理。常见的优化求解方法包括块坐标下降法^[27,29]、逐次凸近似^[27,29]、分支定界法^[24,28]、列生成算法^[28]、Benders分解^[24]、动态规划法^[25]及拉格朗日对偶法^[29,34]等。

5.2 基于启发式算法的求解方法

对于包含大量节点与参数的空天地网络,数学优化方法可能因为计算复杂度过高、计算时间过长而难以实际应用。启发式算法是一种

基于直观或经验构造的算法,常用于解决搜索、组合、优化和决策等问题。尽管该算法不能保证找到最优解,但通常能够在可接受的时间内给出可行的解,具有较好的适应性与可扩展性。因此,针对空天地网络中大规模、非线性、动态变化和多目标优化等特点,启发式算法能够通过随机性和多样性避免陷入局部最优解,通过迭代过程逐步改进解的质量。常用的启发式算法包括遗传算法^[18]、模拟退火算法^[17]、贪心算法^[22,47]等,被广泛应用于网关部署与网络连接优化等问题中。

5.3 基于机器学习的优化方法

针对空天地网络中动态的、不确定环境下的资源分配和决策问题,机器学习方法能够使用数据驱动的方式,通过持续地学习来改进性能。对于网络中的大规模参数,机器学习可以捕捉到更复杂的特征关系,从而训练优化长期性能。其中,深度学习利用神经网络对复杂环境的特征进行识别和预测,而强化学习方法能够在智能体与环境的交互过程中学习最优的资源分配策略。基于机器学习的研究包括建模与性能优化^[48]、信道状态预测^[49]、信道分配^[30]、资源分配^[39]、流量调度^[50]、计算卸载^[31-32]、网络接入选择^[21]、位置与轨迹优化^[30]等。

6 研究展望

6.1 网络分布式优化

在已有的工作中,空天地一体化网络资源分配与优化通常是集中式的,但在实际应用中,空天地一体化网络设备遍布全球,网络状态信息的集中处理是难以实现的,同时状态与控制信息的传输也会引入延迟,影响网络优化的即时性。在分布式网络优化中,每个节点可基于局部信息并行处理子问题,并通过多个节点之间的信息交换和协同决策实现网络优化。目前,基于分布式优化^[18]、分布式迭代算法^[19]和分布式强化学



习^[39]等优化方法的问题中, 算法适应性、实时性、安全性和多目标优化等方向仍存在广阔的研究空间。

6.2 网络优化实时性与自适应性

空天地一体化网络的优化问题中, 常使用数学规划和元启发式算法求解。这些方法通常需要经过分解简化或迭代优化等过程, 求解时间较长。此外, 在网络状态发生变化时, 需要重新进行求解, 在实际应用场景中通常难以满足实时性要求。针对规模很大、实时性要求很高的问题, 可设计启发式算法以快速有效地获得近似最优解。启发式算法的设计中, 计算复杂度和可扩展性是研究的重点。另外, 基于强化学习的方法可以根据环境的变化实时地调整模型, 表现出较强的适应能力。在设计强化学习方法时, 神经网络模型的构建, 输入与输出的表征设计是优化过程的重要挑战。

6.3 随机性网络优化

目前针对空天地网络的研究中, 通信数据通常是预设的, 且环境信息是完全已知的。而在真实的网络场景中, 数据通常是随机生成的^[25, 44, 51], 外部环境也存在未知与不确定性^[52]。如何依托部分已知信息优化网络性能, 是未来研究中需要重点关注的问题。如文献^[25, 44, 51]考虑了卫星网络中随机的数据到达情况, 文献^[52]进一步考虑了卫星物联网中未知的信道条件和太阳能输入过程等因素。尽管随机优化和机器学习等方法在该领域的研究中展现出了较大的应用潜力, 但算法的计算复杂度与实时性的平衡、算法的适应性与灵活性、算法实际部署的可行性等仍然需要进一步研究。

7 结束语

为了实现全球无缝通信的宏伟目标, 空天地一体化网络已成为通信领域研究与应用的热点。本文针对空天地一体化网络中的资源分配和性能

优化问题进行了详细的论述。首先, 本文介绍了空天地一体化网络的组成架构; 随后, 结合当前研究对网络性能优化中的典型问题进行了总结与分析。此外, 本文介绍了网络中的主要性能指标、建模方法和优化方法。最后, 本文探讨了该领域研究的挑战与展望。

参考文献:

- [1] CHENG N, HE J C, YIN Z S, et al. 6G service-oriented space-air-ground integrated network: a survey[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(9): 1-18.
- [2] LI B, FEI Z S, ZHANG Y. UAV communications for 5G and beyond: recent advances and future trends[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2241-2263.
- [3] KARABULUT KURT G, KHOSHKHOLGH M G, ALFATTANI S, et al. A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 729-779.
- [4] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [5] 董浩, 宋亮, 化存卿, 等. 海上通信技术的发展与研究综述[J]. 电信科学, 2022, 38(5): 1-17.
DONG H, SONG L, HUA C Q, et al. Survey of the research and development on the maritime communication technology[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(5): 1-17.
- [6] ZHENG J, WANG R, LI Q, et al. Research on key technologies of satellite mobile communication system[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). Piscataway: IEEE Press, 2022: 34-38.
- [7] MOTA S, ROCHA A, CUPIDO L, et al. Challenges and achievements setting up a propagation campaign with MEO satellites[C]//Proceedings of the 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.
- [8] CHEN P H, CHO R L T. The technological trajectory of LEO satellites: perspectives from main path analysis[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2024, 71: 3629-3640.
- [9] ELHALAWANY B M, HASHIMA S, KHAN W U, et al. Next generation LEO satellite constellation networks: opportunities,

- applications, and challenges[J]. China Communications, 2024.
- [10] NAJATI N, UTAMA S, HASBI W. Analysis of WRC-23 agenda item 7A case study: starlink – OneWeb satellite constellation[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.
- [11] 王静贤, 虞志刚, 祝超, 等. 星链系统服务能力分析[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(3): 3-10.
- WANG J X, YU Z G, ZHU C, et al. Analysis of starlink system service capabilities[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(3): 3-10.
- [12] UYEDA F, ALVIDREZ M, KLINE E, et al. SDN in the stratosphere: loon's aerospace mesh network[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. New York: ACM, 2022: 264-280.
- [13] DRUBIN C. Zephyr HAPS achieves connectivity in trial conducted by airbus and NTT DoCoMo[J]. Microwave Journal, 2022, 65(1): 49-50.
- [14] BAJRACHARYA R, SHRESTHA R, KIM S, et al. 6G NR-U based wireless infrastructure UAV: standardization, opportunities, challenges and future Scopes[J]. IEEE Access, 2022, 10: 30536-30555.
- [15] SHARIF S, ZEADALLY S, EJAZ W. Space-aerial-ground-sea integrated networks: resource optimization and challenges in 6G[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2023, 215: 103647.
- [16] LIANG H, YANG Z Q, ZHANG G B, et al. Resource allocation for space-air-ground integrated networks: a comprehensive review[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2024, 9(1): 1-23.
- [17] LIU J J, SHI Y P, ZHAO L, et al. Joint placement of controllers and gateways in SDN-enabled 5G-satellite integrated network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 221-232.
- [18] ZHOU D, SHENG M, WU J X, et al. Gateway placement in integrated satellite – terrestrial networks: supporting communications and Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(6): 4421-4434.
- [19] HU Y, CHEN M Z, SAAD W. Joint access and backhaul resource management in satellite-drone networks: a competitive market approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(6): 3908-3923.
- [20] ALSHAROA A, ALOUINI M S. Improvement of the global connectivity using integrated satellite-airborne-terrestrial networks with resource optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(8): 5088-5100.
- [21] FAN K X, FENG B W, ZHANG X L, et al. Network selection based on evolutionary game and deep reinforcement learning in space-air-ground integrated network[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2022, 9(3): 1802-1812.
- [22] DAI C Q, GUO L F, FU S, et al. Contact plan design with directional space-time graph in two-layer space communication networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10862-10874.
- [23] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. Joint HAP access and LEO satellite backhaul in 6G: matching game-based approaches[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(4): 1147-1159.
- [24] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. Toward data collection and transmission in 6G space-air-ground integrated networks: cooperative HAP and LEO satellite schemes[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(13): 10516-10528.
- [25] ZHOU D, SHENG M, LUO J, et al. Collaborative data scheduling with joint forward and backward induction in small satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(5): 3443-3456.
- [26] FU S, GAO J, ZHAO L. Collaborative multi-resource allocation in terrestrial-satellite network towards 6G[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7057-7071.
- [27] TRAN D H, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Satellite and cache-assisted UAV: a joint cache placement, resource allocation, and trajectory optimization for 6G aerial networks[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2022(3): 40-54.
- [28] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. LEO-satellite-assisted UAV: joint trajectory and data collection for Internet of remote things in 6G aerial access networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(12): 9814-9826.
- [29] MA T, ZHOU H B, QIAN B, et al. UAV-LEO integrated backbone: a ubiquitous data collection approach for B5G Internet of remote things networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(11): 3491-3505.
- [30] ARANI A H, HU P, ZHU Y Y. HAPS-UAV-enabled heterogeneous networks: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2023(4): 1745-1760.
- [31] CHENG N, LYU F, QUAN W, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: a learning-based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,



- 2019, 37(5): 1117-1129.
- [32] ZHANG S B, LIU A J, HAN C, et al. Multiagent reinforcement learning-based orbital edge offloading in SAGIN supporting Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(23): 20472-20483.
- [33] JIA Z Y, WU Q H, DONG C, et al. Hierarchical aerial computing for Internet of things via cooperation of HAPs and UAVs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(7): 5676-5688.
- [34] ZHANG L W, LIU J Y, SHENG M, et al. Exploiting collaborative computing to improve downlink sum rate in satellite integrated terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(4): 4670-4682.
- [35] ZHANG S B, LIU A J, HAN C, et al. GRLR: routing with graph neural network and reinforcement learning for mega LEO satellite constellations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, PP(99): 1-13.
- [36] HE L J, LI J D, SHENG M, et al. Dynamic scheduling of hybrid tasks with time windows in data relay satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4989-5004.
- [37] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. VNF-based service provision in software defined LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 6139-6153.
- [38] ZHOU D, SHENG M, LIU R Z, et al. Channel-aware mission scheduling in broadband data relay satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 1052-1064.
- [39] WANG C, LIU L, JIANG C X, et al. Incorporating distributed DRL into storage resource optimization of space-air-ground integrated wireless communication network[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2022, 16(3): 434-446.
- [40] ZHU Y, BAI W G, SHENG M, et al. Joint UAV access and GEO satellite backhaul in IoRT networks: performance analysis and optimization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(9): 7126-7139.
- [41] HE J C, CHENG N, YIN Z S, et al. Service-oriented network resource orchestration in space-air-ground integrated network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1): 1162-1174.
- [42] SHENG M, ZHOU D, LIU R Z, et al. Resource mobility in space information networks: opportunities, challenges, and approaches[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 128-135.
- [43] ZHANG T, LI J D, LI H Y, et al. Application of time-varying graph theory over the space information networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(2): 179-185.
- [44] ZHOU D, SHENG M, LI B, et al. Distributionally robust planning for data delivery in distributed satellite cluster network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(7): 3642-3657.
- [45] ZHANG P Y, YANG P, KUMAR N, et al. Space-air-ground integrated network resource allocation based on service function chain[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(7): 7730-7738.
- [46] ZHU R J, LI G, ZHANG Y D, et al. Load-balanced virtual network embedding based on deep reinforcement learning for 6G regional satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(11): 14631-14644.
- [47] 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.
- [48] KATO N, FADLULLAH Z M, TANG F X, et al. Optimizing space-air-ground integrated networks by artificial intelligence[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(4): 140-147.
- [49] ZHANG H J, SONG W, LIU X N, et al. Intelligent channel prediction and power adaptation in LEO constellation for 6G[J]. IEEE Network, 2023, 37(2): 110-117.
- [50] HUANG Y H, JIANG X F, CHEN S W, et al. Pheromone incentivized intelligent multipath traffic scheduling approach for LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 5889-5902.
- [51] HE H M, ZHOU D, SHENG M, et al. Hierarchical cross-domain satellite resource management: an intelligent collaboration perspective[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2201-2215.
- [52] ZHOU D, SHENG M, WANG Y X, et al. Machine learning-based resource allocation in satellite networks supporting Internet of remote things[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6606-6621.

[作者简介]



董博文 (1997-), 男, 东南大学移动通信国家重点实验室博士生, 主要研究方向为空地一体化网络资源分配优化技术。



朱敏（1980-），男，博士，东南大学移动通信国家重点实验室教授，主要研究方向为光网络技术、太赫兹无线通信技术。



望运武（1995-），男，东南大学移动通信国家重点实验室博士生，主要研究方向为光无线通信综合网络技术。



顾家骅（1994-），男，东南大学移动通信国家重点实验室博士生，主要研究方向为云无线接入网资源优化调度技术。



张教（1988-），男，博士，紫金山实验室副研究员，主要研究方向为面向 5G-A/6G 的光子毫米波太赫兹无线通信、光电融合通信、光纤无线融合接入。