

高低轨卫星异构网络资源管控策略与技术研究

张美蓉¹, 镐梦婷¹, 王 闯², 张更新¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003 ;

2. 解放军某部, 212000)

摘 要: 随着空间通信技术蓬勃发展, 天地一体化信息网络不断推进, 卫星通信网络资源管控愈发复杂。由于卫星资源稀缺、资源调度滞后于资源状态信息更新、业务不均匀分布等限制因素, 如何进行高效资源管控成为卫星通信发展中亟待解决的问题之一。针对高低轨卫星异构网络系统架构, 分析其网络资源管控面临的挑战。在综合分析传统管控架构的基础上, 总结出基于分组管理的协同管控架构; 针对卫星资源稀缺且分散的现状, 阐述卫星网络虚拟资源池管理策略; 引入基于深度强化学习的资源调度算法, 解决传统调度方法在复杂环境下的失配问题; 采用跳波束技术应对业务分布时空二维不均问题。

关键词: 异构网络; 资源管控; 虚拟资源池; 深度强化学习; 跳波束技术

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021045

Research on Strategies and Technologies for Resource Management and Control of Heterogeneous Network of High and Low Orbit Satellites

ZHANG Meirong¹, HAO Mengting¹, WANG Chuang², ZHANG Gengxin¹

1. College of Telecommunications&Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. A Certain Department of PLA, 212000, China

Abstract: With the vigorous development of space communication technology and the continuous advancement of space-integrated-ground information network, satellite communication networks resource management and control is becoming more and more complex. Due to the scarcity of satellite resources, the slowness of resource scheduling compared to the status refreshing, and uneven distribution of business, efficiently managing resources has become one of urgent problems to be solved in the development of satellite communications. In view of the heterogeneous network system architecture of high and low orbit satellites, the challenges, its network resource management and control facing, were analyzed. Integrating on the basis of traditional management and control architecture, the collaborative management and control architecture based on group management was introduced. The management strategy of satellite network virtual resource pool was explained to relieved resources scarcity. Resource scheduling algorithms based on deep reinforcement learning(DRL) was introduced to solved the mismatch problem of traditional scheduling methods in complex environments. Beam-hopping technology was adopted to deal with the two-dimensional unevenness of service distribution in time and space.

Keywords: heterogeneous network, resource management and control, virtual resource pool, deep reinforcement learning, beam-hopping technology

收稿日期: 2021-09-01; **修回日期:** 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91738201)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.91738201)

1 引言

近些年来,随着通信以及天气预报、定位导航、气候与环境监测、海上搜救等一系列任务需求剧增,大量卫星被送入太空。然而,仅靠单一的天基管理系统或地基管理系统仍然无法满足全球用户差异化、多样化的业务需求。为进一步提高天地通信系统的管控水平,建设集约化、智能化、自主化的天体一体化信息网络成为我国天地通信的研究趋势^[1]。为解决卫星通信网络存在的节点众多、网络拓扑动态变化^[2]、资源稀缺且利用率低、资源调度难以匹配资源状态信息更新速度、业务繁杂而分布不均等问题,深入研究高低轨卫星异构网络资源管控在天地一体化网络发展进程中尤为重要。

2 高低轨卫星异构网络系统架构

天地一体化信息网络旨在建成覆盖全球、按需服务、随遇接入、安全可靠的信息网络体系,为全球用户提供宽带接入、移动通信、数据中继、万物互联等服务,实现全球高度安全可靠、时空不间断、高传输容量通信以及高效率全程信息传输。典型的天地一体化信息网络系统架构如图1所示^[1]。其依托地面网络,实现空地海融合通信^[3]。

天地一体化信息网络由天基骨干网、天基接入网、地基节点网组成。天基骨干网主要通过通过星间激光链路互

联互通的地球同步轨道(GEO)卫星组成^[4],可实现全球覆盖。天基接入网由中轨(MEO)卫星、低轨(LEO)卫星和临近空间飞行器组成,为地面用户提供移动通信、宽带接入等服务。地基节点网由多个互联的地基骨干节点组成^[5],与地面互联网和移动通信网融合互联,部署地面通信基础设施、信关站、测控站、核心网、网管运维系统等。天地一体化信息网络可实现天基、地基网络互联,共享信息,统一管理。

高低轨卫星异构网络通过微波链路、太赫兹链路或激光链路星间相连,构建天地一体化信息网络中的天基信息网络。相对于地面网络而言,卫星通信用户面临更长的传播时延,且卫星资源稀缺、容量有限、链路不稳定、网络拓扑高动态,再加上卫星资源的利用率不高等因素,因此如何进行高效资源管控成为天地一体化通信网络发展的重点研究方向之一^[6]。

3 高低轨卫星异构网络资源管控面临的挑战

3.1 系统架构尚待改进

大规模卫星星座中,同层卫星轨道高度基本相同,卫星性能差异不大,节点间采用分布式方式进行信息交互,具有信令开销大、管控信息更新用时长等缺点。而在高低轨卫星异构网络中,可由高轨卫星收集低轨卫星链路、状态、资源信息并进行路由计算,降低巨型低轨

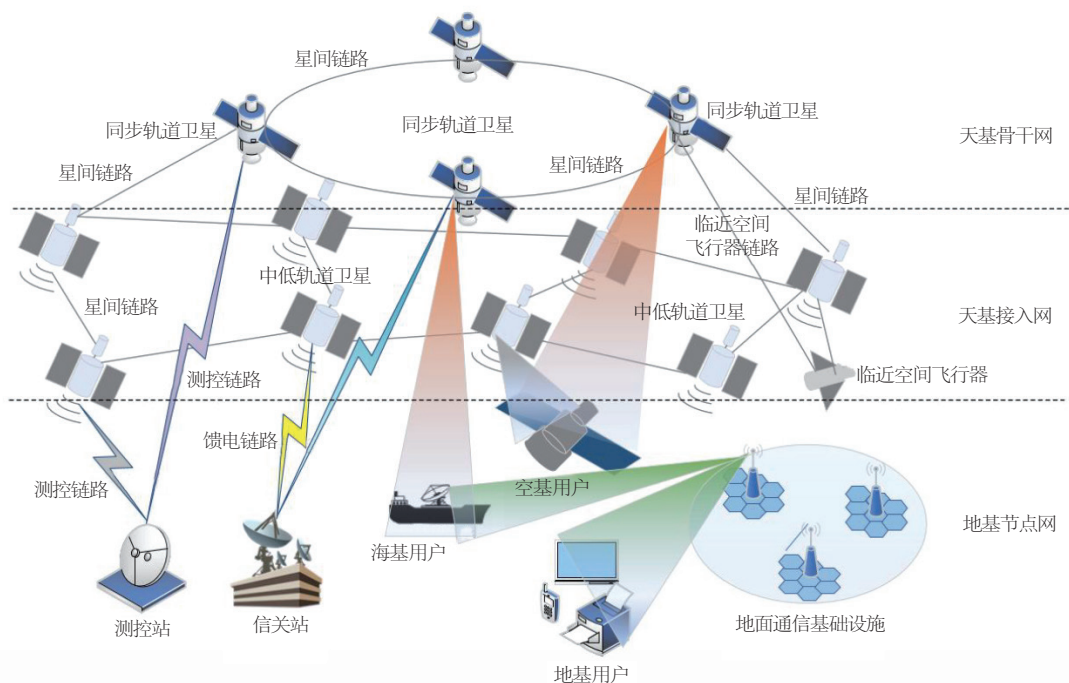


图1 典型天地一体化信息网络系统架构

星座信令开销。

目前,针对高低轨卫星异构网络管控,传统的分布式管控架构和基于数控分离的集中式管控架构如图2所示。

在分布式管控架构中,LEO卫星节点直接与地面站互联,尽管可以减少流量拥塞的可能性和响应时间,但低轨卫星相对地面高速移动,地面站不断更替,多节点的多连接增加了网络的复杂性。集中式管控架构,又称OpenSAN,秉持数据层和控制层分离理念^[7]。控制层高轨卫星与地面站互联互通,低轨卫星快速移动时发送位置信息、状态信息、资源信息至控制层,由GEO卫星对其全程资源管控。这可以简化网络结构,减少传统空间网络节点重连接和重配置次数,但高轨管控过程产生的响应时延会影响网络性能。

一方面,管控方式不同会导致其他网络管理方式的多样性,使网络管理更加复杂;另一方面,由于卫星通信网络的多节点、异构性和低轨卫星高度的动态性,网络集成受到显著影响,资源管理面临着极大的困难^[8]。未来的高低轨卫星异构网络的管控架构将是分布式与集中式的协同使用,达到二者的平衡。

3.2 卫星网络资源稀缺分散

随着用户通信类业务需求剧增,对卫星网络资源的需求量愈发增大。不同于地面通信丰富的资源,卫星处理、存储、频谱、星上载荷等资源都极为稀缺^[9]。卫星资源稀缺主要体现在以下几个方面。

(1) 卫星入轨后不能扩充资源,而卫星发射时承载资源有限,因此卫星上的节点资源和链路资源等都相对有限。

(2) 能够匹配天地一体化信息网络系统中继传输通

信能力要求的频率资源主要集中在Ka频段,而在为卫星间业务划分的频率范围内,同时存在无线电导航、空间研究、固定和移动等业务,导致频谱更加紧张。

(3) 卫星成本较高,一旦发射无法根据用户需求调整资源组成。除此之外,随着天地一体化的发展,高低轨卫星异构网络中卫星所承载的业务增多,卫星节点的种类和功能愈发复杂,资源表现出明显异构性。由于卫星网络节点和拓扑结构动态变化,星上资源位置随之动态变化,加上卫星与卫星之间距离较远,星间资源相对独立,因此造成了星上资源分散、处理困难、资源管控复杂。可见卫星系统整体性能受限,系统资源难以满足日益增长的用户业务需求^[10]。

系统资源与通信需求的不对称性是高低轨卫星异构网络通信发展和广泛应用所面临的巨大挑战。因此,为提高有限卫星资源的利用率,对高低轨卫星异构网络资源管控进行深入研究具有重要意义。

3.3 复杂环境下的资源调度算法失配

低轨卫星高速移动,使得低轨卫星星座覆盖区域不断变化,面临的网络环境随之复杂多变,影响卫星资源状态。同时,卫星需要为物联网设备以及空天地海移动载体用户提供连续的网络连接。复杂多变的业务需求和网络环境使得高低轨卫星异构网络多维资源分配呈现连续的动态变化。

为了满足不断增长的动态多元化业务需求,提高有限卫星资源的利用率,研究者提出了大量的卫星资源调度算法来解决卫星通信系统的资源分配、决策问题。然而,由于大规模星座网络节点和拓扑结构的动态变化,资源调度算法往往并不能和资源状态信息实时保持一

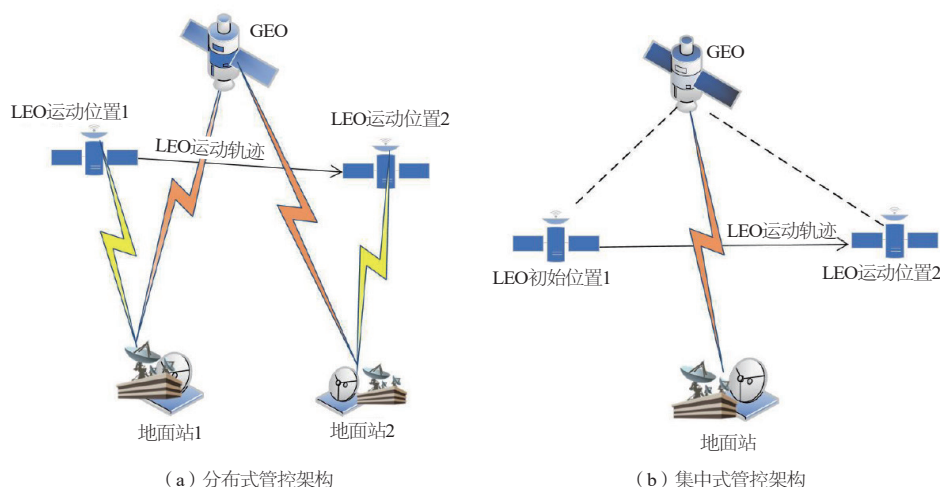


图2 传统的分布式管控架构和基于数控分离的集中式管控架构

通过分别管控与地面站直接互联互通的时延敏感卫星和分组管理的时延容忍卫星,可以实现对巨型卫星星座的快速控制,在确保网络服务的连续性和一致性的同时,提升网络整体响应速度。

4.2 虚拟资源池管理

高低轨卫星异构网络资源具有多样性和分散性,可分为硬资源和软资源。硬资源指卫星网络能源、温控、控制等设备状态及参数,即由本卫星使用的不可共享资源,提供电源、指令和遥测,维持卫星正常运行。软资源指频率、功率、带宽、地址以及标识等,可以完成通信、处理、存储、侦察等业务功能,是卫星网络的资源管控对象,可进行星间共享。资源虚拟化技术是将诸如服务器、网络、内存、存储之类的实体软资源抽象化后呈现、对虚拟资源进行综合管理应用的一种技术,包括将单个物理资源拆分成多个虚拟资源、多个物理资源再组合成更高机能的虚拟资源。

卫星网络资源虚拟化技术区别于地面的资源虚拟化技术,各类天基资源传感器探测约束条件复杂、卫星在轨运行时空高动态、传输时延大。卫星受重量、体积限制,存储资源有限;受蓄电池和太阳能板限制,能源资源有限;受CPU/GPU功耗限制,计算资源有限^[8]。因此,对虚拟资源进行多资源集合,生成虚拟资源池,采取集中控制协调的方式进行资源调配,能有效增加可请求卫星资源,从而支持多系统协同的任务规划。当单系统资源能力不足以承担任务需求时,利用虚拟资源的池化进行共享联合。面向任务的卫星网络虚拟资源池管理方式如图4所示^[13]。

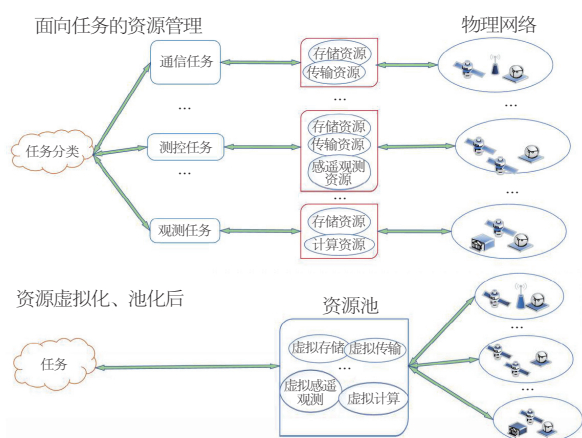


图4 面向任务的卫星网络虚拟资源池管理方式

资源虚拟化技术在卫星网络系统中的应用,可以

通过逻辑上的资源拆分与组合,打破高低轨卫星异构网络资源物理上的隔离,高效整合服务资源,最大化资源利用率,降低资源管理复杂度,提高资源管理灵活性^[14]。卫星虚拟资源池化管理过程描述如下:网络中的单星节点资源状态信息通过星间链路动态更新发送资源池,统一管理;对网络中物理资源进行统一描述和表征,将各个卫星节点的星上可共享资源虚拟化为相应的能力参数,量化资源能力,生成能力值;收到业务请求后,用户依据资源池内的虚拟资源能力值选择所需的业务资源。

在拥有卫星网络整体资源信息的情况下,针对不同的用户请求,资源虚拟池可以融合全网资源为一个有机整体,通过统一的控制和管理机制进行资源分配和重构,共享有限的卫星网络资源;并选择资源的最优分配方案,发挥有限卫星资源的最大效益,提升系统的任务执行能力,同时降低信息获取时延,提供高效一体化服务,最大化资源利用率,提高资源管理灵活性。

4.3 基于DRL的资源调度算法

深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)是目前人工智能领域的主要研究方向之一。它将深度学习的感知能力和强化学习的决策能力相结合,可用于解决复杂系统的感知决策问题^[15]。其学习过程可以描述为:在每个时刻,智能体与业务环境交互得到一个高维度的观察,并利用强化学习方法来感知观察,以得到具体的状态特征表示^[16];基于预期回报来评价各动作的价值函数,并通过某种策略将当前状态映射为相应的动作;环境对此动作做出反应,并得到下一个观察^[17]。通过不断循环以上过程,最终可以得到实现目标的最优策略。

在卫星通信领域,已出现基于深度神经网络的跳波束动态决策、序列决策、多目标增强学习等大量算法研究。基于DRL的卫星资源调度算法,就是将资源的拥有者卫星建模为智能体,根据卫星通信系统中的信道链路质量、波束间通信业务量等复杂因素,自主地、智能地做出不同的资源分配方案。基于DRL的卫星资源调度算法研究中,一种较为典型的基于深度Q网络的DRL-DCA算法框架如图5所示^[18]。

基于DRL的资源调度算法中的强化学习本质是通过与环境的交互来指导卫星智能体的动作策略。通过连续不间断的学习,卫星智能体可以优化特定环境^[17],并在其动态变化时正常工作,降低网络环境动态变化影响。同时,卫星网络系统做出的决策通常具有很高的重复性,为DRL算法生成了大量的训练数据。通过卫星智能体感知环境中资源分配状态以及波束用户业务请求状

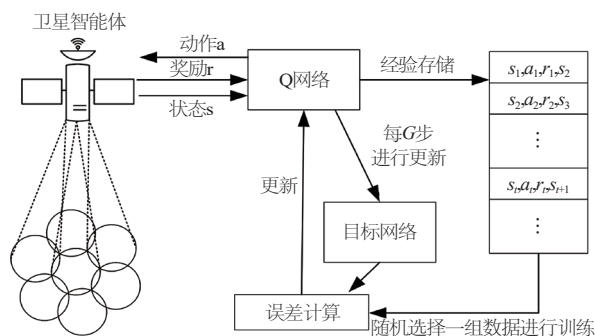


图5 基于深度Q网络的DRL-DCA算法框架

态，然后根据到达业务实际服从分布的初始化模型的训练参数并应用约束条件来优化预测值，做出决策。对卫星节点中的网络资源（接入资源和路由转发资源）进行预分配，进一步基于环境的奖赏收益计算预测值误差，并利用一定的算法规则优化更新资源分配策略，做出动态调整，减少资源调度响应时间，提高资源调度策略变化与资源状态变化的一致性^[11]。通过对卫星业务的预测，旨在完成高效的资源分配及资源调度。

4.4 跳波束技术

跳波束是一种利用时间分片的波束跳变技术，通过接收地面传达的指令实现对星上波束的控制，调整卫星覆盖范围内的波束形状以及方向，控制星载多波束天线的空间指向、带宽、频点和发射功率，为用户终端动态配置通信资源。在某一时刻，卫星仅部分波束激活工作，在下一时隙，卫星继续根据用户业务需求激活部分波束。

在高低轨卫星异构网络中，多波束卫星系统各个覆盖区域内波束业务需求和业务种类不同。通过改变跳变波束在每个波束覆盖区的时隙分配数^[19]，将整段卫星带宽以时隙为单位分配给各个波束，可以提高卫星资源在带宽和功率方面的使用效率，优化分配时域带宽，在有限星载资源条件下提高卫星宽带通信吞吐量，最大化星上带宽资源利用率。跳波束工作原理如图6所示^[20]。

跳波束技术从时域上对星上功率、带宽资源进行优化。相比于传统的多波束卫星系统，跳波束更能够满足业务需求不均衡的应用场景。通过波束跳变，可以充分发挥星载相控阵天线波束指向可调整、波束形状可赋形的优点，在有限的资源下合理高效地分配系统资源，满足海量用户的差异化需求，实现系统资源的全局调度和按需、灵活、高效的利用。

在高低轨异构混合网络中，GEO、LEO卫星频率共

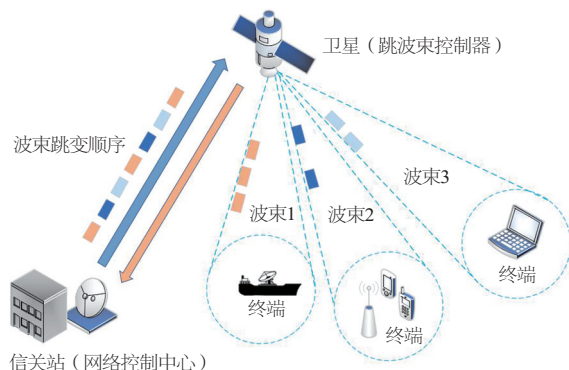


图6 跳波束工作原理

享。低轨星座卫星用户通常作为次级用户，高轨卫星用户作为主用户，LEO卫星在频段的使用上受到GEO限制，其可用资源取决于高轨卫星资源的使用情况^[21]。在一些最新的研究中，低轨卫星采用跳波束技术，高轨多波束卫星采用频率复用技术，高低轨共享卫星频谱。通过计算波束覆盖禁区、自适应功率控制等方式规避次级系统对主系统的干扰^[22]，实现高轨卫星资源的精准共用，最大化系统容量与业务服务能力，满足海量不均匀业务需求。

5 结束语

建设集约化、自主化、智能化的天基信息网络是我国天地通信的发展趋势，高效的资源管控手段是高低轨卫星异构网络稳定高效运行的重要前提。面向高低轨卫星异构网络资源管控架构，分析了其面临的挑战与应对策略，介绍了一种基于分组管理的协同管控架构，以及基于强化学习的卫星资源调度算法学习过程以及资源虚拟化技术、池化技术、跳波束技术等关键技术。经过分析和总结，对高低轨卫星异构网络资源管控策略和技术进行了梳理，为未来天地一体化信息网络资源管控技术研究提供了一定的理论参考。

参考文献：

- [1] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.
WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information Network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.
- [2] 孙晨华. 天基传输网络和天地一体化信息网络发展现状与问题思考[J]. 无线电工程, 2017, 47(1): 1-6.
SUN C H. Research status and problems for space-based

- transmission network and space-ground integrated information Network[J]. Radio Engineering, 2017, 47(1): 1-6.
- [3] 崔高峰, 李鹏绪, 张尚宏, 等. 天地一体化信息网络中卫星通信关键技术初探[J]. 电信网技术, 2017(10): 1-6.
- CUI G F, LI P X, ZHANG S H, et al. Investigation on key technologies of satellite communication for integrated space-terrestrial information networks[J]. Telecommunications Network Technology, 2017(10): 1-6.
- [4] 胡志言, 杜学绘, 曹利峰. 软件定义天地一体化网络接入认证架构与方法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(3): 873-877.
- HU Z Y, DU X H, CAO L F. One access authentication architecture and method for software defined space-ground integration network[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(3): 873-877.
- [5] 闫富朝, 刘怡良, 韩帅, 等. 空天地通信网络中物理层安全技术综述[J]. 电信科学, 2020, 36(9): 1-13.
- YAN F C, LIU Y L, HAN S, et al. A survey of physical layer security in space-air-ground communication and networks[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(9): 1-13.
- [6] 任伟龙, 张霄, 姚艳军, 等. 天地一体化信息网络星地协同管理架构设计[J]. 通讯世界, 2020, 27(5): 21-22.
- REN W L, ZHANG X, YAO Y J, et al. Design of space-ground integrated information network satellite-ground collaborative management architecture[J]. Telecom World, 2020, 27(5): 21-22.
- [7] BAO J Z, ZHAO B K, YU W R, et al. Open SAN: a software-defined satellite network architecture[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(4): 347-348.
- [8] 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.
- [9] 翟伟亭. 卫星网络虚拟化资源管理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- ZHAI W T. Research on virtualization resource management technology of satellite network[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [10] 陈丹阳. 天地一体化网络多维虚拟资源管理[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- CHEN D Y. Multi-dimensional virtual resource management in satellite-terrestrial network[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [11] 周笛, 盛敏, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 26-35.
- ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network operation, maintenance and resource management in mega constellation System Full text replacement[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 26-35.
- [12] QU Z C, CAO H T, CHENG Y F, et al. A LoRa WAN-based network architecture for LEO satellite Internet of Things[C]// Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW). Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [13] 赵瑾. 天地一体化网络虚拟化资源管理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- ZHAO J. Research on virtualized resource management technology of space-ground integrated network[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [14] 朱洪涛, 郭庆. 面向低轨卫星网络的动态虚拟化分布式移动性管理方法研究[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 78-84.
- ZHU H T, GUO Q. Research on dynamic virtualization distributed mobility management method for LEO satellite Network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 78-84.
- [15] 吴漪菡. 多目标无线网络跨层资源智能分配方法仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(2): 271-274.
- WU Y H. Simulation of cross-layer resource intelligent allocation for multi-objective wireless Network[J]. Computer Simulation, 2019, 36(2): 271-274.
- [16] 万仁卓, 王思源, 冯绎铭, 等. 基于二连杆任务的深度强化学习算法分析与比较[J]. 湖北科技学院学报, 2019, 39(3): 151-156.
- WAN R Z, WANG S Y, FENG Y M, et al. Analysis and comparison of reinforced deep learning algorithm based on two-link Task[J]. Journal of Hubei University of Science and Technology, 2019, 39(3): 151-156.
- [17] 王月平, 徐涛. 基于演化博弈的用户接入机制[J]. 计算机应用, 2020, 40(5): 1392-1396.
- WANG Y P, XU T. User association mechanism based on evolutionary game[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(5): 1392-1396.
- [18] LIU S J, HU X, WANG W D. Deep reinforcement learning based dynamic channel allocation algorithm in multibeam satellite systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15733-15742.
- [19] 王亚昕, 边东明, 胡婧, 等. 基于分簇的全带宽跳波束图案优化方法[J]. 计算机工程, 2020, 46(4): 169-176.
- WANG Y X, BIAN D M, HU J, et al. Optimization method for full bandwidth beam hopping pattern based on Clustering[J]. Computer Engineering, 2020, 46(4): 169-176.
- [20] 张晨, 彭明阳, 张更新. 基于联合优化的高通量卫星跳波束图案设计研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021(3): 1-8.
- ZHANG C, PENG M Y, ZHANG G X. Beam hopping pattern method for high-throughput satellite based on joint optimization[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021(3): 1-8.

- [21] 唐璟宇, 李广侠, 边东明, 等. 卫星跳波束资源分配综述[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 21-26.

TANG J Y, LI G X, BIAN D M, et al. Review on resource allocation for beam-hopping Satellite[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 21-26.

- [22] WANG C, BIAN D M, ZHANG G X, et al. A novel dynamic spectrum-sharing method for integrated wireless multimedia sensors and cognitive satellite networks[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3904.

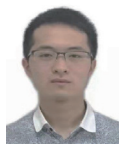
[作者简介]



张美蓉 (1999-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星通信、空间信息网络等。



龚梦婷 (1997-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星通信、空间信息网络等。



王闯 (1991-), 男, 博士, 主要研究方向为卫星通信、无线通信。



张更新 (1967-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等。