



专题：6G 空间互联网

AI 技术在卫星通信/互联网领域的应用综述

刘雅琼^{1,2,3}, 吕哲^{1,2,3}, 赵亚飞³, 寿国础^{1,2,3}

- (1. 先进信息网络北京实验室, 北京 100876;
2. 网络体系构建与融合北京市重点实验室, 北京 100876;
3. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 卫星互联网的诞生带来新的发展机遇, 同时也具备诸多挑战。主要调研了在空天地一体化的背景下, 人工智能 (AI) 技术作为重要的辅助工具在卫星通信/卫星互联网领域的应用, 涉及通信抗干扰、通信路由、星地网络系统架构、星座运营与管理等场景, 其中涉及的 AI 算法包括传统机器学习、深度学习、强化学习等; 最后, 针对 AI 技术在卫星通信/互联网领域的发展趋势, 提出了未来的研究方向, 为我国卫星领域的智能化发展提供了思路和技术方案。

关键词: 卫星通信; 空天地一体化; 卫星互联网; AI 算法; 机器学习

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023030

A survey on AI techniques applied in the satellite communication/satellite Internet field

LIU Yaqiong^{1,2,3}, LYU Zhe^{1,2,3}, ZHAO Yafei³, SHOU Guochu^{1,2,3}

1. Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing 100876, China
2. Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, Beijing 100876, China
3. School of Information and Communication Engineering,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The birth of satellite Internet brings new development opportunities, but also many challenges. How artificial intelligence, as an important auxiliary tool, was widely used in the field of satellite communication/satellite Internet in the context of the development of space-air-ground integration, was investigated, which involved communication anti-jamming, communication routing, satellite-terrestrial network system architecture, constellation operation and management and other scenarios. The AI algorithms included traditional machine learning, deep learning, reinforcement learning and so on. Finally, by taking the development trend of the AI applied in the satellite field into consideration, several future research directions were put forward, which provided new ideas and technical solutions for the intelligent development of satellite field in our country.

Key words: satellite communication, space-air-ground integration, satellite Internet, AI algorithm, machine learning

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-02-04

通信作者: 吕哲, zhelv@bupt.edu.cn

基金项目: 北京市科技计划项目 (No.Z221100007722012)

Foundation Item: Beijing Municipal Science and Technology Project (No.Z221100007722012)

0 引言

随着科学技术的发展和生活水平的提高,人们对通信的需求已不仅仅满足于地面通信,这使得卫星通信得到了迅猛发展。卫星通信是无线通信领域的一项新型技术,是微波通信的一种。卫星作为中继站发射和接收无线电波,实现在两个或多个地面站之间的通信。近年来,卫星通信在导航、定位、探测等领域发挥了巨大作用,其以覆盖范围广、通信容量高、信息传输速率快、信号传输质量高的显著优势得到了广泛应用^[1]。卫星通信系统的主要组成部分是卫星及地面控制设备和用户终端,卫星通信组成架构如图1所示。卫星端是通信中继站,用以接收地面设备发送的信号波并放大,再转发给另一台地面设备,现阶段主要是利用同步轨道卫星对地球进行全方位覆盖;地面控制设备包括信关站、网络控制中心和卫星控制中心,可对空中卫星系统进行跟踪、监测等,以控制通信系统的正常运营;用户端主要包括各类用户终端,如机载终端、船载终端、车载终端及固定站等^[2]。

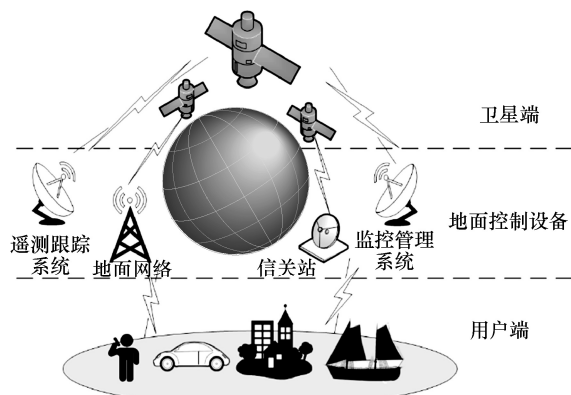


图1 卫星通信组成架构

近年来兴起的卫星互联网是卫星通信技术的发展产物,即在太空使用低轨高通量卫星以实现高带宽低时延宽带覆盖^[3],这些卫星组成的星座便可作为空中基站来达到与地面移动通信类似的效果。随着卫星载荷技术的不断创新,卫星网络

将具有更低时延、更大带宽^[4]。卫星互联网主要以低轨卫星为主进行搭建,低轨卫星一般指高度在500~1 500 km,质量在100~1 000 kg的现代卫星^[5],其制造和发射成本低,落地信号强,运行速度快,并且可以做到信号全覆盖。卫星互联网不仅可以提供宽带通信方面的服务,还可以实现更精准的定位和导航功能;通过与5G、物联网、大数据、人工智能(artificial intelligence, AI)等高端技术的结合,卫星互联网将在更丰富的应用场景中发挥作用。

随着低轨卫星互联网在商业和军事方面的规模应用,宽带卫星互联网逐步成熟并成为当前行业关注热点。由于地球低轨道空间资源有限,各国竞争焦点在于低轨卫星星座的建设以及卫星与5G等地面移动通信系统的融合^[6]。我国在2020年4月首次将卫星互联网纳入通信网络基础设施范畴,加速推动了卫星互联网产业的发展。2021年国家“十四五”规划发布,明确了卫星互联网的重要地位;《“十四五”信息通信行业发展规划》《“十四五”数字经济发展规划》和《“十四五”国家应急体系规划》均明确指出要加快布局卫星通信网络,推动卫星互联网建设,并鼓励卫星通信应用创新。由我国自主研发的北斗卫星导航系统建设受到政府的高度重视。“天智一号”就是AI与地球空间信息科学在我国首次实现融合的产物,它是全球首颗实际开展工程研制并发射的软件定义卫星,其主要载荷包括云计算平台、一台超分相机和4部大视场相机。而其中的云计算平台,是“天智一号”能够“智能”的关键^[7]。近年来,由美国太空探索技术公司(SpaceX)提出的“星链”计划已发射低轨卫星近3 000颗,除了在民用领域发挥作用,也涉足了军事领域;SpaceX随即在2022年12月发布了该计划的军用版——“星盾”卫星互联网星座项目,初步侧重于对地观测、卫星通信和托管载荷3个方面。除此之外,俄罗斯也在发展卫星互联网产业,其格洛纳斯系



统是全球第二个建成并使用的卫星导航系统；近年来，格洛纳斯系统与我国北斗系统的合作不断加强，为俄罗斯的全球导航领域提供了有力支持^[8]。欧洲航天局的发现项目（ESA Discovery）正在资助 12 个项目，这些项目将探索应用 AI 技术和先进计算范式的最新发展潜力，使卫星更具反应性、敏捷性和自主性^[9]。此外，还有日本 NTT 计划、欧洲的 RACE 计划等。

为了实现星地互联的全方位深度融合，卫星互联网与地面通信系统相结合的空天地一体化网络（space-air-ground integrated network, SAGIN）应运而生。顾名思义，空天地一体化网络由天基、空基、地基 3 部分网络组成，空天地一体化网络架构^[12]如图 2 所示。天基网络由地球静止轨道（geostationary earth orbit, GEO）卫星、中地球轨道（medium earth orbit, MEO）卫星、低地球轨道（low earth orbit, LEO，简称低轨）卫星以及地面的信关站组成。卫星之间链接成星座构成天基网络。空基网络主要由无人机（unmanned aerial vehicle, UAV）、直升机、飞艇等多种空中基点和高空通信平台构成。地基网络由地面通信系统组成，包括移动通信基站、机动或固定信关站和核心网。地基网络的核心网将蜂窝网络和天基网络进行了融合^[10]。信关站之间通过铺设或者租赁网络资源形成一张连通的地面网络^[11]。

卫星互联网，尤其是低轨卫星，随着低轨巨型星座建设和星间链路的部署，为分布式计算提供了可能。卫星组网搭建通信、导航、计算等多类载荷，实现分布式计算平台；同时结合地面信关站的部署，可实现空天地一体化的分布式计算平台，为星算网络提供支持，也是分布式计算的作用延续。传统卫星的星上算力资源有限，难以支撑复杂算法的应用；随着计算器件的发展，星载算力得以不断提高，呈逐年递增趋势。近日，我国的“天智二号”D 星于太原成功发射，星载算力高达 40 TOPS（tera operations per second，每

秒钟万亿次操作），超越了之前“星溪”系列产品的 20 TOPS 算力，极大地推动了智能星算的发展，这有赖于 AI 芯片的支持。

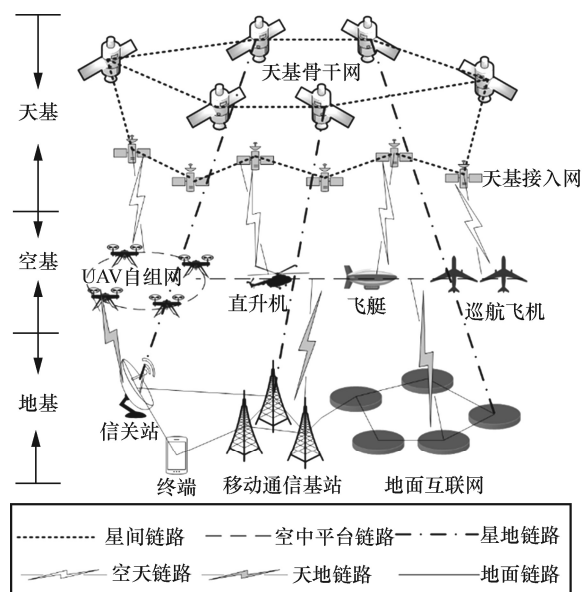


图 2 空天地一体化网络架构^[12]

随着超五代移动通信系统（B5G）和 6G 时代的到来，依托于 AI、大数据、云计算、多接入边缘计算（multi-access edge computing, MEC）等技术，卫星互联网正逐步迈向智能化网络。AI 技术包括机器学习（machine learning, ML）、深度学习（deep learning, DL）和强化学习（reinforcement learning, RL）等。传统的 ML 算法包括线性回归、K 近邻、支持向量机（support vector machine, SVM）、决策树、随机森林等；DL 算法主要指各类神经网络，如卷积神经网络（convolutional neural network, CNN）、循环神经网络（recurrent neural network, RNN）、多层感知机等可搭建的多层神经网络；RL 多指半监督学习范式、马尔可夫决策过程等。

与此同时，卫星应用趋于复杂。传统卫星一般是单一任务，只需要进行简单的指令和数据管理，并没有在星上处理数据的能力，而现在的太空任务更为复杂，如对地遥感观测、火星的视觉导航等，涉及图像、视频、多源信息融合等处理，需要大量的计算资源，这也促进了 AI 技术在卫星中的应用。

在卫星通信系统和星地互联不断发展的形势下,采用 AI 技术可以应对不断增加的系统复杂度,实现网络功能的地面节点及卫星节点之间的虚拟化配置,在组织与管理上实现空天地一体化智能运维^[13]。AI 技术应用到卫星领域中,主要为卫星通信技术提供辅助,进而为卫星互联网和空天地一体化的发展做出贡献;同时,卫星与 AI 技术结合,利用卫星数据造福人类。

本文将从 AI 技术在卫星通信/卫星互联网方面的应用角度展开阐述 AI 与卫星之间的关系,同时提出未来的研究方向。

1 AI 技术在卫星通信/互联网的应用

人造卫星最主要的用途之一是提供通信价值。空天地一体化网络的基础是卫星互联网,核心是卫星通信技术;其内部包含多种异构且复杂的网络元素,如物联网设备、移动终端、UAV 基站、低轨卫星节点等,利用 AI 技术将智能化融入其中,可为卫星通信/卫星互联网的发展带来新的突破。因此,AI 算法在卫星通信/卫星互联网领域的应用较为广泛,本部分将对此进行详细介绍。

1.1 AI 算法在卫星通信技术中的应用

AI 在卫星通信领域的广泛应用已展现巨大潜力,包括波束跳频、抗干扰、网络流量预测、信道建模、电离层闪烁检测、干扰管理、行为建模、空天地一体化和能源管理等^[14]。目前,有关 AI 在卫星通信技术中的应用研究,主要集中在卫星路由、通信抗干扰以及通信信号和信道调制等方面,下面具体进行介绍。

在通信抗干扰方面,文献[15]提出了一种基于 DL 与干扰感知的 AI 技术实现对卫星通信干扰的自主感知;利用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)深度学习网络对卫星各通道的干扰信号数据进行自动特征提取和融合,能够有效进行干扰感知、决策,提升通信网络的抗干扰能力。该算法符合干扰信号的时序特性,具有长

时记忆功能,可以解决模型梯度消失的问题;但在并行处理上存在劣势。文献[16]针对音频干扰、窄带干扰、扫频干扰及其两两叠加的复合干扰,提出了基于 RL 的智能抗干扰决策,通过选择合适的频段、发送功率以及调制方式优化目标。优化目标除了低误比特率外,还包括更高的通信速率以及更低的发送功率。强化学习的动作从频段、调制方式、功率 3 个方面选择;强化学习的状态的参量由频段、功率以及调制方式 3 个参量确定。理论分析和仿真结果表明,该方案可以有效提高卫星通信系统的抗干扰能力。该模型完整具体,可以针对复杂干扰情况做出最佳决策;但处理效率有待提高。

在卫星路由方面,文献[17]针对卫星网络的负载均衡问题提出了一种基于集中式软件定义网络(software defined network, SDN)架构的 ML 路由方法,该算法模型可以在短时间内完成相关计算并选择出负载均衡最优路径,在应用了置信域策略梯度优化(trust region policy optimization, TRPO)算法的卫星链路中,与传统的等价多路径路由(equal-cost multipath routing, ECMP)选路方案相比,链路最高负载均衡值降低了 10%以上,为链路拥塞问题提供了有效的解决方法。该算法收敛效率高,但模型稳定性不足且应用场景简单,不适用于复杂的链路情况。文献[18]开发了一种信息素激励智能多路径交通调度(pheromone incentivized intelligent multipath traffic scheduling, PIIMTS)方法,以支持 LEO 卫星网络的自主和高效通信;利用信息素感知网络路径状态,实现自适应多路径路由发现,降低了传输时延;并将多路径流量调度制定为马尔可夫决策问题,使用深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)优化,实现了自适应流量调度,降低了网络负载的能耗。该方案实现了高效的路由发现;但在优化过程中容易陷入局部最优。

在通信信号和信道调制方面,文献[19]针对卫



星信道资源调度问题，构建了多目标约束规划模型并利用智能水滴（intelligent water drop, IWD）算法进行求解。解决思路是优先执行任务优先级较高的数据传输任务，通过不断迭代优化调度方案，最后利用实验证明了该算法能够为卫星分配合适的数据传输任务，可以有效解决卫星信道的资源调度问题。该方案具备较好的稳健性，且能最大化地利用卫星资源；但收敛速度较慢，同时在求解大规模问题上不具备优势。文献[20]提出了一种基于多重分形谱和 DL 的方法来识别信号调制方式，对残差网络（residual network, ResNet）50 架构进行了多尺度优化改进，利用改进后的网络对多重分形谱特征矩阵进行多层次智能化提取，实现了卫星通信信号调制方式的有效识别。该模型计算量小，易于实现，具备较好的稳健性和适应性；但改进的网络复杂度升高，耗时变长。文献[21]针对卫星的 Q/V 波段提出了在线随机回归森林（online random regression forest, ORRF）算法预测信噪比（signal to noise ratio, SNR）值的时间序列，它能够在卫星链路运行期间优化自适应编码和调制（adaptive coding and modulation, ACM），实际上是通过从瞬时测量的 SNR 值“逐

个样本地学习”，以帮助 ACM 切换决策。实验结果表明，ORRF 算法的 SNR 预测在频谱效率方面优于经典的 ACM 方法，且保证了较低的误码率。该算法具备较高的精度和准确率，但计算成本较高。文献[22]介绍了解决已知和未知操作条件下卫星信道中信号失真的两个 AI 框架；对于已知的操作条件，提出了 RL 模型，用于对传输信号进行预失真操作，以补偿由卫星信道引起的信号失真。对于未知的操作条件，应用多目标强化和自适应神经网络，并使用贝叶斯环境预测器（Bayesian environment predictor, BEP）来估计操作条件；该模型目前用于实际跳频信号，且被成功演示。两个框架都具备较强的理论基础和应用价值，但模型较为复杂，成本较高。文献[23]综述了深度强化学习（deep reinforcement learning, DRL）在多波束卫星信道分配、功率分配和跳波束算法方面的研究，表明 DRL 在卫星资源管理中具有良好的应用前景。

在卫星通信其他技术的应用方面，文献[24]提出了 AI 赋能的 6G 卫星通信网络总体架构、接入网架构及核心网架构；其中，AI 在 6G 卫星地基通信中的赋能应用^[24]如图 3 所示。卫星通信网

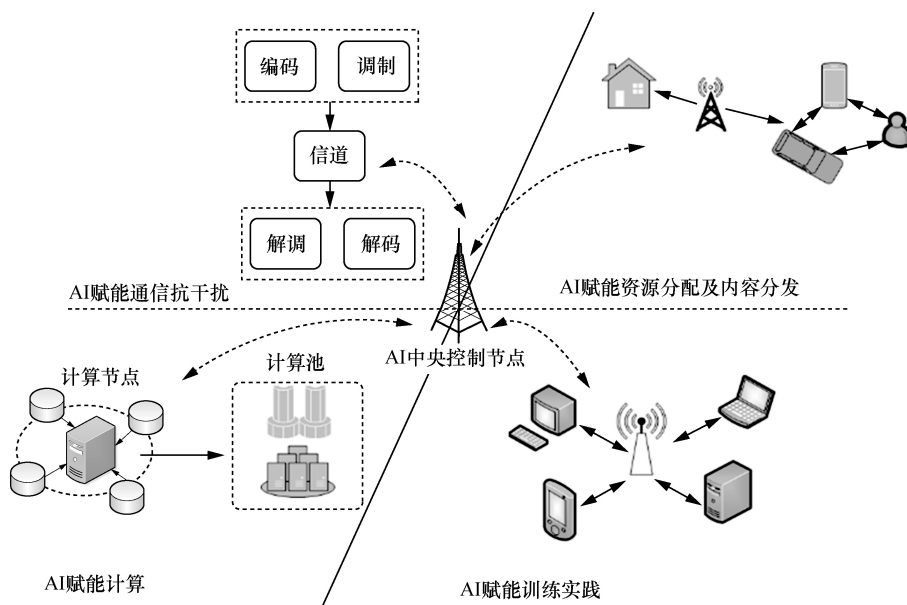


图3 AI在6G卫星地基通信中的赋能应用^[24]

络在 AI 技术的智能协作下,保障了系统容量的弹性伸缩、星地资源按需动态分配、天地异构网络智能自愈和灵活重构。整体的网络架构实现了高度的弹性、灵活和智能特点,同时具备较强的业务能力;不过在具体实现上,仍然面临很多挑战。

文献[25]将 AI 技术应用到多层卫星通信过程中,主要是及时调整卫星地球站天线的指向,优化最佳天线角度和减少时间消耗。针对静态环境下的卫星对准天线(satellite alignment antenna, SAA)任务,提出了一种基于迭代门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)的快速天线指向算法;针对移动环境下的卫星配对请求,使用 RL 算法根据实际数据对环境进行判断和动态优化,采用智能改进的 DRL 算法完成 SAA 任务。实验结果表明,上述两种算法均能提高卫星指向和跟踪任务的效率,可以快速响应任务请求;但前者无法处理并行计算,后者模型复杂度高。文献[26]是针对低轨道卫星星座领域中无线电指纹识别的有效性和局限性的一次开创性研究,验证了基于 AI 的解决方案对低轨卫星物理层认证的有效性。该方案利用 ResNet18 对卫星星座测量得到的同相正交(in-phase/quadrature, I-Q)样本进行分类,证明 CNN 和自动编码器可以用于指纹无线电卫星发射器,且具备较高精度;不过认证能力的影响因素众多,难以控制。文献[27]提出了一种针对计算卸载(computation offloading, CO)的安全感知算法,将问题制定为多目标优化问题,使用 RL 框架联合约束最小化系统的时间、能量和安全成本,并使用 DDPG 方法来解决,最终证明该算法可以提高系统效率和空间应用的性能,且具有较高的适用性;但性能提高的同时也伴随着能耗的增加,在风险较高的情况下性能较差。文献[28]基于卫星光电效应的应用,采用 AI 算法预测了卫星在表面充电时通信的可行性;使用 ML 模拟太阳能电池和航天器之外的条件,并检测周围环境,从而对太阳能充电电池进行控制,加强了 AI 与航

天器充电的结合,可以显著减少表面充电期间对导电表面和太阳能电池阵列的损坏。该项应用的提出扩展了 AI 在卫星通信中的应用面,但也有可优化的发展空间。文献[29]基于多波束高吞吐量卫星的动态功率分配问题,分别实现了遗传算法(genetic algorithm, GA)、模拟退火算法(simulated annealing algorithm, SA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)和 DRL 算法及 SA-GA 和 PSO-GA 混合方法,比较了时间收敛性、连续可操作性、可扩展性和稳健性等特征,证明了 DRL 是最快的算法,PSO-GA 性能最强大且功耗较低,而 GA 则具备较强的稳健性。文献[30]基于 DNN 算法,提出了用于地球观测卫星的新型架构;该架构用于在源头而不是在地面上使用数据,允许在空间中部署增值应用程序,只占用原本需要的下行链路带宽的小部分。由于数据的边缘处理对带宽下行链路方面带来了好处,该算法将会为空间部署新应用的时间和成本减少几个数量级。

AI 算法在卫星通信技术方面的应用见表 1,从所使用的 AI 方法和智能化内容/目标方面总结了 AI 算法在卫星通信技术方面的应用。

1.2 AI 算法在卫星互联网方面的应用

卫星通信网络的资源管理、网络控制、网络安全、频谱管理和能源使用比地面网络更复杂也更具挑战性^[14]。低轨卫星互联网的空间段主要由低轨卫星组成,同轨道卫星和非同轨道卫星之间均通过建立星间链路(inter-satellite link, ISL)进行数据交换。地面段主要完成向卫星发送控制信号和从卫星接收回馈信号的功能,同时提供使卫星网络数据到达地面网络与用户终端的接口^[31]。充分考虑低轨卫星互联网和 5G、6G 核心网体系架构、终端形态和服务方式的融合;加入 AI 技术,可以使之适应未来卫星互联网的多层次、巨型化、天地融合的发展趋势,也可以实现卫星网络内部资源的有效管理和分配。下面具体对卫星互联网中星座及路由、星地网络系统架构及卫星资源管



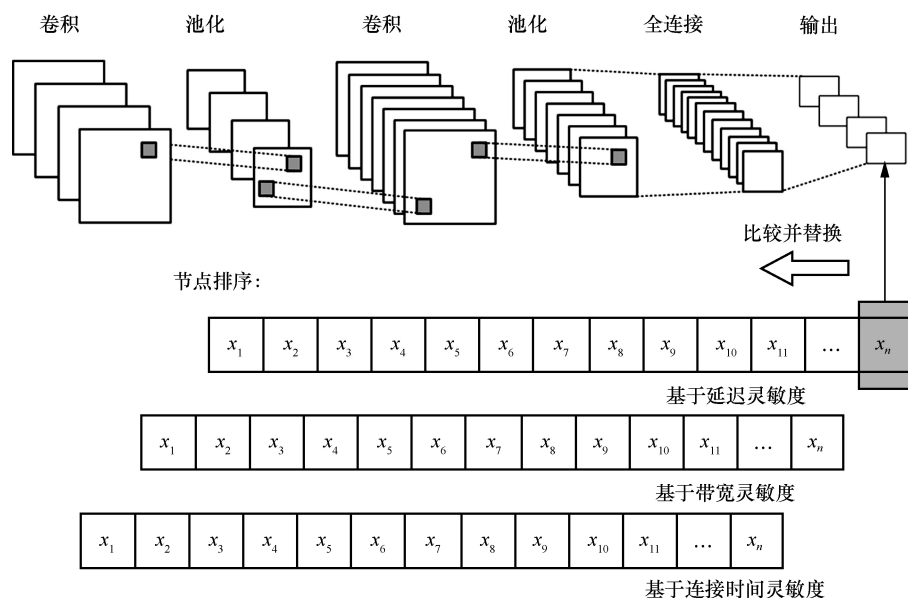
表 1 AI 算法在卫星通信技术方面的应用

智能化内容/目标	使用的 AI 方法	代表性文献
实现对卫星通信干扰的自主感知	基于 DL 与干扰感知的 AI 技术 LSTM	文献[15]
针对音频干扰、窄带干扰、扫频干扰及其两两叠加的复合干扰的智能抗干扰决策	RL	文献[16]
负载均衡最优路径	基于集中式 SDN 的 TRPO	文献[17]
自适应多路径路由发现	PIMTS DDPG	文献[18]
信道资源调度	智能水滴算法	文献[19]
识别通信信号调制方式	ResNet50	文献[20]
优化自适应编码和调制	在线随机回归森林 ORRF	文献[21]
卫星信道中信号失真问题	RL 多目标强化和自适应神经网络	文献[22]
多波束卫星信道分配、功率分配和跳波束算法	DRL	文献[23]
6G 卫星通信网络	AI 赋能技术	文献[24]
多层卫星通信	快速天线指向算法 智能改进的 DRL 算法	文献[25]
低轨卫星物理层认证	ResNet18	文献[26]
计算卸载	深度确定性策略梯度方法	文献[27]
卫星表面充电通信	ML	文献[28]
多波束高吞吐量卫星的动态功率分配	遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化 DRL	文献[29]
降低带宽下行链路成本	DNN	文献[30]

理等方面的应用进行介绍。

在卫星星座路由及管理方面,文献[32]对基于 AI 的服务质量 (quality of service, QoS) 星座路由算法做了详细介绍:针对多目标优化问题,提出了基于卫星网络多 QoS 约束的蚁群优化路由算法;对蚁群算法的启发函数提出了多个条件约束,将链路 QoS 信息作为选择下一跳的依据,将蚁群算法和多 QoS 路由相结合,在提供多目标 QoS 保障的同时,提高了收敛速度和寻优能力;但其计算量大,复杂性高,路由的灵活性受限。文献还提出了多目标 QoS 约束遗传算法的 SDN 路径增强算法,通过改进遗传算法的初始种群生成方法,使初始路径满足大部分的约束条件,显著提高了搜索效率,但该方法存在数据包失序的可能性。文献[33]提出了在所构建智能化卫星互联网架构上,结合 SDN 技术和双延迟 DDPG 算法,解决了卫星互联网的实时路由优化问题;将基于 SDN 定

义的卫星互联网中的流量矩阵 (traffic matrix, TM) 作为深度强化学习智能体的状态,将改变网络中的源端到目的端多条链路的路由流量权重矩阵作为智能体对网络实施的动作,将最小化卫星互联网的平均时延作为路由优化算法的优化目标,将平均网络时延的负数定义为强化学习的奖励值。实验验证该算法有效降低了平均网络时延,且具备较快的收敛速度和较强的性能;但其稳健性较差,且难以适用于大规模动态网络的路由优化问题。文献[34]提出了一种基于模糊卷积神经网络 (fuzzy convolutional neural network, Fuzzy CNN) 的多任务路由方法,将 SDN、AI 技术和模糊逻辑相结合,以优化星地融合网络 (integrated satellite-terrestrial network, ISN) 中的多任务路由, Fuzzy CNN 模型^[34]如图 4 所示。CNN 模型被训练用于有效的 ISN 路径查找。模糊逻辑用于评估每个任务并突出主要路径要求;仿真结果表明该算

图4 Fuzzy CNN 模型^[34]

法在不同 ISN 条件下具有更好的流量控制性能和路径查找灵活性,且资源利用率较高,相比于经典算法取得了突破性进展。

文献[35]综述了基于 AI 的卫星星座的管理运营,提出了星座管理面临的技术挑战,指出提高自动化水平的必要性;例如,在地面部署专家系统,用于高级任务预测、规划、诊断、维修等。文献[36]提出了一种基于 QL 的一体化自适应路由算法,结合 SAGIN 天基网络中卫星轨道的运行特点,改进了路由计算过程中 Q 值的更新方式和选路策略,提升了路由算法对于 SAGIN 网络拓扑变化的适应性。仿真结果表明,该算法具有更高的包递交率,同时在端到端传输时延、时延抖动方面也都有明显的性能提升,算法整体上具有更好的可靠性和稳定性;但该算法只适用于低轨星地融合。文献[37]针对敏捷观测卫星对地观测的任务规划问题建模及求解和在轨服务卫星的任务规划问题建模及求解两方面研究,提出了禁忌退火遗传算法、自适应变异遗传算法、鲸鱼优化算法和基于邻域搜索的遗传算法,均经过仿真验证了算法有效性,但仍有待改进。

在卫星互联网及星地网络系统架构方面,文献[38]基于卫星互联网的架构能力需求,提出了层级化智能部署架构,自顶向下地进行跨层智能化功能及决策部署,以实现融合大尺度、长周期状态信息的智能模型在局部集群协同网络中的灵活部署;分析了跨层在轨智能部署中可能应用的训练技术,包括深度强化学习、迁移学习及联邦学习等。该方案可以实现业务的快速响应,高效提升了网络性能,具备良好的适应性,也为星地网络的管理提供了思路;但其尚在初步探索阶段,在网络分层、集群协同、在轨模型轻量化等方面面临诸多挑战。文献[39]提出了一种基于集成学习方法的云-卫星边缘-终端集成 AI 解决方案,来满足星基边缘智能的资源限制和可靠性。在这种方法中,简化模型在云端训练并部署在卫星上;每颗卫星都会响应远程用户的 AI 服务请求,在用户端将结果进行合并,得到最终输出。最后利用不同层的 ResNet 的集成和具有不同修剪率的视觉几何组网络 (visual geometry group network, VGGNet) 的集成验证了模型具有良好的性能和可靠性。该方案可以解决有限的边缘卫星和简单模



型服务性能差的矛盾，但在具体实现上仍然面临技术难题。文献[40]提出了基于分布式 SDN 控制器的软件定义星地融合智能无线网络体系架构，以完成对卫星网络和地面移动通信网络的状态监测；采用基于 Q 学习（ Q -learning, QL）的路由恢复技术，整合边缘计算和 AI 构建网络管理知识库实现对星地融合网络虚拟化资源池的智能管控与调度，可以显著降低融合网络的运维复杂度和成本。该架构可以进行高效的星地协同网络管控，但星地协同组网的关键技术还有较大的研究空间。文献[41]针对大规模星地资源统筹和复杂任务规划等技术难点，提出构建卫星智能化任务规划系统和星地协同系统；采用遗传算法解决多星多任务智能资源调度的组合优化问题，通过深度感知用户的任务需求偏好，精准规划卫星遥感任务，为卫星效益的良好发挥提供最佳支撑。赖于 AI 技术，该系统得以高效、可靠、稳定地运行，有较大的发挥空间。文献[42]提出了一种基于 AI 的自学习（AI-based self learning, ASL）网络框架，用以指向、追踪并支持无监督的卫星选择和天线调整；感知运动目标信息，并建立移动指向跟踪模型，使用无监督学习，让星地网络从不同环境中获取数据并进行训练，优化资源配置，学习调度其任务对站点和终端的历史信息数据进行深度学习，以实现实时指向和跟踪，并预测未来某个时间的站点和终端分布。该模型具备较高的天线指向精度和较好的稳健性，同时也有一定的实用性。文献[43]介绍了一个用于 5G 星地综合网络的数据驱动网络编排器 ANChOR；基于 AI 技术，利用网络的一些反馈知识适当分配资源，旨在支持 5G 综合卫星地面网络上的不同服务，协助系统实现项目基础设施的多层自动化。相关算法包括深度 Q 学习（deep Q -learning, DQL）、RNN 和 CNN 等。该项目对卫星-地面综合网络中的资源分配研究做出了贡献，但尚在理论研究阶段。文献[44]提出了双边智能综合星地网络，使用 MEC 和 AI 技

术，该框架具有卫星和蜂窝网络的系统学习和自适应网络管理能力；将卫星和地面网络中的通信、存储和计算资源深度集成到智能系统中，以保证无缝覆盖、动态回传和多种 QoS 要求。关键技术是将 SDN 和网络功能可视化概念与 MEC 技术和 AI 相结合，实现深度融合。该网络结构优于现有的集成网络，且具备良好的性能。文献[45]提出了一种基于 SDN 和 AI 的智能频谱管理框架。SDN 将异构卫星和地面网络转变为具有可重构性和互操作性的综合卫星和地面网；AI 则用于智能环境感知和认知频谱访问，并配置网络以实现最佳资源分配。该框架为整合和利用卫星和地面网络的频谱提供了新的范例，同时也存在一些问题，例如数据安全性、国外卫星的合作等。文献[13]针对网络结构复杂、动态性高、资源高度约束等问题，提出了基于 RL 的空天地一体化网络设计与优化框架，以进行高效快速的网络设计、分析、优化与管控。同时给出了实例分析，阐明了利用 DRL 进行空天地一体化网络智能接入选择的方法；并通过搭建空天地一体化网络仿真平台，解决了网络观测稀疏与训练数据难以获取的问题，极大地提升了 RL 的训练效率。文献[46]提出了一种新的 AI 使能空地综合网络，由 LEO 卫星和携带空中基站的民用飞机组成，设计了联合覆盖星座；仿真结果表明，民用飞机的协助可以减轻卫星网络的压力，提高空天地一体化网络的性能，降低建造成本，节省空间资源。该方案具备一定的理论价值，但包含一些理想的假设，实用价值有待提高。文献[47]提出在 SAGIN 的优化问题上的常用 DL 模型，包括深度置信网络（deep belief network, DBN）、深度 Q 网络、CNN 和 LSTM；并以卫星流量平衡问题为例，提出了一种基于 CNN 的选择卫星通信系统路径组合来提高流量控制性能的方法。仿真结果表明，DL 技术是提高 SAGIN 性能的有效工具，同时也表明 AI 技术在 SAGIN 多个领域的性能优化方面有极大的发展空间。文献[48]

提出了一种基于 AI 的 LEO 卫星网络资源管理架构设计, 基于空天地一体化网络架构, 在地面引入 SDN 对卫星网络资源状态信息进行实时观测, 再应用 AI 算法得到资源分配优化策略, 形成观测、分析、处理和控制在结合的一体化结构, 实现高效信息传输。该方案通用性强, 且简单有效, 为 LEO 卫星网络的资源分配提供了思路。文献[49]针对 AI 技术在天基通信中的应用价值, 从系统架构设计和通信卫星资源获取两个方面, 实现了智能天基通信系统的科学设计。采取的方法是: 应用了 SDN 组网智能化功能, 实现对相关信息的智能化处理和设备的智能化管理、终端的智能化接入; 采用用户终端接入的方式, 实现波束的智能化切换; 选用相控阵天线等。将 AI 技术与天基通信结合, 提高了天基通信智能化发展水平, 保证了相关信息数据传输的稳定性、可靠性和安全性。

在卫星资源管理方面, 文献[50]提出了一种利用多目标 RL 和人工神经网络集成的新型无线电资源分配算法, 能够用于天基通信系统, 管理可用资源, 为下一代航天器和卫星中空间通信系统开发提供参考。通过 RL 实现多目标性能, 利用神经网络来开发和探索无线电参数集以动态改变频道, 仿真结果表明该方案实现了较低的性能误差和较高的准确率, 若用于大规模系统参数, 该算法仍需优化改进。文献[51]在网络资源管理、业

务流量管理和网络状态管理 3 个方面重点调研了 AI 算法在卫星互联网运维与管理领域方面的应用, 见表 2。将 AI 引入卫星互联网运维与管理领域, 借助其数据感知和学习更新能力, 能有效提高卫星互联网资源利用效率、网络稳健性和业务支持能力。

文献[52]针对提高空天地一体化网络的吞吐量问题, 提出了基于 RL 的链路优化算法, 通过优化卫星-基站和基站-用户间的资源分配、资源管理和 UAV 的轨迹, 来提高系统吞吐量; 先建立优化回程链路和接入链路的目标问题, 再利用 RL 工具——多臂老虎机, 来求解目标问题。仿真结果表明, 该算法有效地提升了吞吐量和地面用户的可达速率, 但其复杂度高, 运算性能较差。文献[53]针对卫星系统传输时延较大的问题, 利用 MEC 技术, 结合空天地一体化智能网络架构, 提出了一种基于人工蜂群的智能卫星节点优化部署算法。该算法通过迭代, 结合网络分簇算法, 选出边缘服务有效覆盖率最高的智能卫星节点部署策略, 旨在部署最少的智能卫星节点, 为其他卫星以及偏远地区的地面用户提供更加全面的边缘计算服务。仿真结果表明该算法有效降低了传统卫星网络的平均传输时延, 为今后星上边缘服务系统的部署提供了思路。文献[54]研究 SAGIN 中的接入控制和功率分配机制, 应用基于 DRL 的智

表 2 AI 算法在卫星互联网运维与管理领域方面的应用^[51]

场景	AI 方法	优势
资源分配等需要考虑用户空间分布的问题	CNN	感知二维空间数据
预测问题, 如用户流量预测、信道质量预测、异常预测	RNN	感知时序数据
学习卫星间拓扑关系, 用户间、卫星与用户间的图关系	图神经网络	感知图关系
对计算效率要求高的场景, 如核心网数据流异常检测	SVM	模型复杂度低
网络运维数据的高维特征降维; 网络运行状态异常检测	自编码器	高维数据降维
解决数据样本不足问题或用鉴别器检测异常	生成式神经网络	生成模型, 可应对小样本数据问题
动态网络环境中序列决策问题, 如资源分配、流量调度	Q 学习、深度 Q 学习	解决无模型环境中的序列决策问题
大规模网络中节点分布式控制资源分配、流量调度等	多智能体强化学习	各智能体独立决策
网络中标签训练数据不足的问题	迁移学习	所需训练样本少



能化方法, 解决或优化无线资源管理问题。首先提出了一种基于深度强化学习框架的动态信道预留策略, 数值结果表明, 该算法实现了较好的长期整体系统性能、平均呼叫成功率和信道利用率; 其次提出了一种基于多智体深度强化学习的智能接入选择算法, 实现了更优的系统吞吐量, 提升了系统综合性能; 但文献并未考虑多星协同下的动态资源分配机制。

在其他方面, 文献[55]提出了低轨卫星 MEC 网络架构及其组网方式, 有利于 MEC 与智能计算技术在天地融合网络中的发展。低轨卫星边缘计算网络可借助 AI 算法优化本网络的资源配置方案, 辅助星上以及星间资源调度自主性决策, 实现智能时敏的分布式控制。该模型较为系统全面, 不过尚停留在理论阶段。文献[56]提出了面向卫星动态网络业务的 AI 离线训练学习方法, 以提高卫星互联网业务识别能力; 通过分析卫星间的连通关系建立时空稳态图, 确定动态卫星网络拓扑, 并构建卫星仿真网络, 进行灰度图智能识别模型的离线学习; 搭建神经网络模型并调整参数, 对业务类型进行识别, 验证了所提算法的有效性, 为卫星互联网空间载荷的发展提供了技术支撑。文献[57]针对卫星物联网中的数据安全问题, 采用 LSTM 算法预测能量收集功率, 通过可用能量和安全需求动态调整加密和认证等级, 实现服务质量和安全的联合优化; 仿真结果表明, 所提算法可在满足基本安全需求的前提下, 有效延长节点工作时间, 保障数据的安全传输, 但算法性能仍有待提高。

2 AI 在卫星通信/互联网领域的未来研究方向

本节介绍 AI 在卫星通信/互联网领域的有前景的研究方向。

(1) 6G 低轨卫星的通信导航遥感计算一体化
目前已经实现的是卫星通信导航一体化, 例

如, 我国的北斗系统可以在实现定位导航的功能之外, 提供一些基本的通信服务; 而对智能遥感卫星的构想处于实现集成通信、导航、遥感于一体的平台设计, 且随着 6G 网络的发展, 通导遥一体化将会使卫星具备星地通信传输、导航接收与增强、高分辨率遥感成像、在轨实时智能处理等功能。但是, 实现这些功能将对算力提出更高要求, 因此, 在通导遥集成系统中加入计算是必然趋势。AI 技术可赋能面向低轨卫星的通导遥算一体化的波形设计、多天线技术、干扰管控体系架构、可重构智能组网、资源管理、创新应用等。

(2) 实现卫星通信资源利用的最大化

卫星通信具备电波覆盖范围大、通信距离远、通信容量高等诸多优势, 可以为人们提供丰富的资源。传统的卫星通信资源管理难以做到高效、准确、统一地处理信息; 面对种类繁多且关系错综复杂的资源信息, 如何实现不同卫星资源的统一管理和高效使用是急需解决的难题。建立卫星资源数据库, 利用 AI 技术进行调度规划是未来研究可行的方向之一。

(3) 空天地融合网络分层技术

星地互联网络由多层架构组成, 从空基、天基到地基包含众多节点, 它们相互协作、互联互通、层层递进, 由局部到整体, 具有非常复杂的网络结构。随着云边协同技术的发展, 以及对卫星数据实现高效全面的分析和优化的强烈需求, 在空天地网络中进行智能分层次管控成为未来的挑战之一。各层级的功能定位、计算能力、存储数据等存在差异, 可以作为分层管理的依据, 同时需要考虑各层级间的数据传输关系, DRL 等 AI 算法可为网络分层决策提供基础。

(4) 卫星运行系统的自动化

当前卫星运作系统中仅有个别环节实现了自动化, 如数据反演、任务接收和规划等方面, 而在应急处理、故障诊断、干扰规避等具有复杂关系的问题上仍然需要大量的人工干预。随着卫星

数量的增多和卫星网络规模的增大,卫星星座系统需要更多的自动化管控运营技术,以降低成本、提高效率。由于卫星运行系统包含的模块众多,实现全面的自动化需要AI的大力辅助。选择并开发合适的AI技术运用到卫星系统的各个模块,这将是未来的挑战之一。

(5) 卫星网络安全性

在卫星互联网产业如火如荼之际,卫星网络系统的安全性成为需要重点关注的方向,主要针对通信安全方面。各国低轨道卫星类型不一,很容易产生无线电干扰,同时宇宙中存在各种电磁辐射信号,也会造成一定程度的隐患。虽然目前的监测技术和加密技术可以完成大部分的信号干扰、窃听和轨道碎片损毁等抵御工作,但是对于一些偶然或蓄意情况,需要在卫星网络内部建立可靠的安全防御机制,AI算法将发挥重要作用。

(6) 卫星通信网络时延优化

卫星通信存在许多优势,但是数据传输需要经过多个节点,通信时延较长。GEO与地面进行通信的双向往返时延约为500 ms,卫星互联网最小时延为20 ms,而5G互联网时延仅为1 ms甚至更低。卫星通信对于一些时延敏感业务显得力不从心,尤其是在具有高精度的航空航天领域。因此,使用AI技术优化卫星通信时延问题将是未来的重要方向之一。

(7) 分布式计算策略优化

分布式计算策略需要对卫星任务进行并行响应,那么任务自适应分区计算、分区任务优化分配、高速缓存文件分布式存储等便成为新的技术挑战,需要使用一系列AI算法来优化星座任务的部署策略,协同任务处理。

3 结束语

本文主要围绕AI在卫星领域的应用,选取了最具代表性的应用场景展开阐述。首先是AI在卫星通信技术中的应用;之后是AI在卫星互联网中

的应用;最后,对未来AI在卫星通信/互联网领域的应用做了展望,提出了一些有前景的研究方向和思路。

参考文献:

- [1] 徐阳. 卫星通信技术及其展望[J]. 电子技术, 2022, 51(7): 258-259.
XU Y. Study on satellite communication technology and its prospect[J]. Electronic Technology, 2022, 51(7): 258-259.
- [2] 宋川川, 姚雅雯. 探讨卫星通信系统在航空领域的应用[J]. 电子测试, 2022(16): 72-73, 68.
SONG C C, YAO Y W. The application of satellite communication system in aviation field is discussed[J]. Electronic Test, 2022(16): 72-73, 68.
- [3] 武音璇. 卫星互联网产业发展前景与展望[J]. 张江科技评论, 2022(3): 39-41.
WU Y X. Development prospect and prospect of satellite Internet industry[J]. Zhangjiang Technology Review, 2022(3): 39-41.
- [4] 张聪, 高峰. 卫星互联网未来应用场景及安全性分析[J]. 信息技术, 2022, 46(3): 120-126.
ZHANG C, GAO F. The future application scenarios and security analysis of satellite Internet[J]. Information Technology, 2022, 46(3): 120-126.
- [5] 李锋, 韩燕妮, 马晓玲, 等. 我国低轨卫星互联网发展的问题与对策建议[J]. 全球化, 2022(6): 77-84, 134.
LI F, HAN Y N, MA X L, et al. Problems and countermeasures for the development of low-orbit satellite Internet in China[J]. Globalization, 2022(6): 77-84, 134.
- [6] 黄曜明, 姬天相. 卫星互联网发展趋势和面临挑战分析[C]//5G网络创新研讨会(2022)论文集. 2022: 474-477.
HUANG Y M, JI T X. Analysis on the development trend and challenges of satellite internet[C]//Proceedings of 5G Network Innovation Symposium (2022). 2022: 474-477.
- [7] 李莉. 软件定义卫星 智能引领航天[J]. 中国科技奖励, 2019(1): 26-28.
LI L. Software-defined satellite intelligence leads space flight[J]. China Awards for Science and Technology, 2019(1): 26-28.
- [8] 弋耀武, 龚辉, 陈兆源. 全球卫星导航系统建设发展的启示[J]. 经纬天地, 2022(5): 57-59.
YI Y W, GONG H, CHEN Z Y. Enlightenment from the construction and development of global satellite navigation system[J]. Survey World, 2022(5): 57-59.
- [9] 更智能的卫星: ESA发现项目(ESA Discovery)加速太空中的的人工智能[J]. 中国测绘, 2022(6): 78-79.
Smarter satellites: ESA discovery program to accelerate artificial intelligence in space[J]. China Surveying and Mapping,



- 2022(6): 78-79
- [10] 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.
- [11] 王文哲, 安岗, 李忻, 等. 面向空天地一体化场景的 5G 卫星双模终端需求及应用探讨[J]. 电信科学, 2022, 38(S1): 221-230.
- WANG W Z, AN G, LI X, et al. Discussion of 5G satellite dual-mode terminal requirement and application in the integration communication scenario of satellite and UTRAN[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(S1): 221-230.
- [12] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
- SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [13] 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, 2022: 1-11.
- CUI X Y, WU J, ZHOU Y Q, et al. Challenges and key technologies of air-space integration networking[J]. Journal of Xi-dian University, 2022: 1-11.
- [14] FOURATI F, ALOUINI M S. Artificial intelligence for satellite communication: a review[Z]. 2021.
- [15] 刘佩璋, 杨博, 刘江春, 等. 基于深度学习的卫星通信抗干扰方法[J]. 电子测试, 2020(1): 86-87.
- LIU P Z, YANG B, LIU J C, et al. Interference awareness method based on deep learning for satellite communication[J]. Electronic Test, 2020(1): 86-87.
- [16] 孔景娜. 基于强化学习的卫星通信智能抗干扰决策探讨[J]. 无线互联科技, 2021, 18(5): 3-4.
- KONG J N. Research on intelligent anti-interference decision of satellite communication based on reinforcement learning[J]. Wireless Internet Technology, 2021, 18(5): 3-4.
- [17] 李新桐, 张亚生. 一种适用于低轨卫星的 SDN 网络人工智能路由方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(22): 109-114.
- LI X T, ZHANG Y S. Artificial intelligence routing method for SDN network suitable for LEO satellites[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(22): 109-114.
- [18] 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.
- [19] 段超凡, 王锐. 基于智能水滴算法的卫星信道资源调度研究[J]. 现代计算机, 2022, 28(7): 75-78, 86.
- DUAN C F, WANG R. Satellite channel allocation based on the intelligent water drops algorithm[J]. Modern Computer, 2022, 28(7): 75-78, 86.
- [20] 杨伟超, 杜宇, 文伟, 等. 基于多重分形谱智能分析的卫星信号调制识别研究[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1336-1343.
- YANG W C, DU Y, WEN W, et al. Modulation recognition of satellite communication signal based on intelligent analysis of multi-fractal spectrum[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(6): 1336-1343.
- [21] EBERT J, BAILER W, FLAVIO J, et al. A method for ACM on Q/V-band satellite links based on artificial intelligence[C]//Proceedings of 2020 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [22] NGUYEN T M. Advanced mathematical modeling of machine learning and artificial intelligent addressing satellite transponder distortions[C]//Proceedings of 2020 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [23] 韩永锋, 张晨, 张更新. 基于深度强化学习的卫星动态资源管理研究综述[C]//第十六届卫星通信学术年会论文集. 2020: 37-43.
- HAN Y F, ZHANG C, ZHANG G X. A review of satellite dynamic resource management based on deep reinforcement learning [C]//Proceedings of the 16th Annual Conference on Satellite Communications. 2020: 37-43.
- [24] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向 6G 的卫星通信网络架构展望[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 1-14.
- WU X W, JIAO Z F, LING X, et al. Outlook on satellite communications network architecture for 6G[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 1-14.
- [25] XIAO W J, WANG R, SONG J, et al. AI-based satellite ground communication system with intelligent antenna pointing[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [26] OLIGERI G, SCIANCALEPORE S, RAPONI S, et al. PAST-AI: physical-layer authentication of satellite transmitters via deep learning[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2022, 18: 274-289.
- [27] STHAPIT S, LAKSHMINARAYANA S, HE L G, et al. Reinforcement learning for security-aware computation offloading in satellite networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(14): 12351-12363.
- [28] ZHANG S T. Research on photoelectric effect for artificial satellite communication[C]//Proceedings of 2020 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (IS-

- PA/BDCloud/SocialCom/SustainCom). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1465-1469.
- [29] LUIS J J G, PACHLER N, GUERSTER M, et al. Artificial intelligence algorithms for power allocation in high throughput satellites: a comparison[C]//Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-15.
- [30] FURANO G, MEONI G, DUNNE A, et al. Towards the use of artificial intelligence on the edge in space systems: challenges and opportunities[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(12): 44-56.
- [31] 岳洋, 倪少杰, 吕志成, 等. 低轨卫星互联网建模与仿真系统设计[C]//第三十四届中国仿真大会暨第二十一屆亚洲仿真会议论文集. 2022: 376-384.
- YUE Y, NI S J, LYU Z C, et al. Design of Internet modeling and simulation system for low-orbit satellite[C]//Proceedings of the 34th China Simulation Conference and the 21st Asian Simulation Conference, 2022: 376-384.
- [32] 董超颖, 续欣, 刘爱军, 等. 低轨卫星星座网络路由新方法[J]. 计算机科学, 2020, 47(12): 285-290.
- DONG C Y, XU X, LIU A J, et al. New routing methods of LEO satellite networks[J]. Computer Science, 2020, 47(12): 285-290.
- [33] 魏琳慧, 刘国文, 刘雨, 等. 基于深度强化学习的卫星互联网路由优化研究[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 65-71.
- WEI L H, LIU G W, LIU Y, et al. Research on routing optimization in satellite Internet based on deep reinforcement learning[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 65-71.
- [34] WANG F, JIANG D D, WANG Z H, et al. Fuzzy-CNN based multi-task routing for integrated satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(2): 1913-1926.
- [35] CURZI G, MODENINI D, TORTORA P. Large constellations of small satellites: a survey of near future challenges and missions[J]. Aerospace, 2020, 7(9): 133.
- [36] 罗泽耀. 天地一体化网络下基于机器学习的路由技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- LUO Z Y. Research of routing technology based on machine learning in integrated satellite-terrestrial information network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [37] 高新洲. 基于智能优化算法的卫星任务规划问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- GAO X Z. Satellite mission planning based on intelligent optimization algorithms[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [38] 纪哲, 吴胜, 王文博. 面向卫星互联网的层级化智能部署架构[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(1): 56-61.
- JI Z, WU S, WANG W B. Hierarchical intelligence deployment architecture for satellite Internet[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(1): 56-61.
- [39] GAO Z, ZHANG Y Q, SUN W. Artificial intelligence service by satellite networks based on ensemble learning with cloud-edge-end integration[C]//Proceedings of 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2022: 158-163.
- [40] 袁硕, 任奕璟, 王则予, 等. 软件定义的星地融合智能无线网络[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 66-77.
- YUAN S, REN Y J, WANG Z Y, et al. Software defined intelligent satellite-terrestrial integrated wireless network[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 66-77.
- [41] 雷永刚, 张若禹, 马佳楠. 人工智能技术在卫星任务管控领域的应用[J]. 电讯技术, 2022, 62(9): 1377-1382.
- LEI Y G, ZHANG R Y, MA J N. Application of artificial intelligence technology in satellite control system[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(9): 1377-1382.
- [42] LIU Q, YANG J, ZHUANG C J, et al. Artificial intelligence based mobile tracking and antenna pointing in satellite-terrestrial network[C]//Proceedings of IEEE Access. Piscataway: IEEE Press, 2019: 177497-177503.
- [43] PATRONE F, BACCI G, GALLI A, et al. Data-driven network orchestrator for 5G satellite-terrestrial integrated networks: the ANChOR project[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [44] ZHANG J X, ZHANG X, WANG P, et al. Double-edge intelligent integrated satellite terrestrial networks[J]. China Communications, 2020, 17(9): 128-146.
- [45] LIANG Y C, TAN J J, JIA H N, et al. Realizing intelligent spectrum management for integrated satellite and terrestrial networks[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2021, 6(1): 32-43.
- [46] LI S X, CHEN Q, LI Z, et al. Civil aircraft assisted space-air-ground integrated networks: architecture design and coverage analysis[J]. China Communications, 2022, 19(1): 29-39.
- [47] KATO N, FADLULLAH Z M, TANG F, et al. Optimizing space-air-ground integrated networks by artificial intelligence: IEEE, 10.1109/MWC. 2018. 1800365[P]. 2018.
- [48] 王朱伟, 徐广书, 买天乐, 等. 基于AI的LEO卫星网络资源管理架构设计[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(2): 20-22, 36.
- WANG Z W, XU G S, MAI T L, et al. Design of LEO satellite network resource management architecture based on AI[J]. Information Technology and Network Security, 2018, 37(2): 20-22, 36.
- [49] 周小伟, 郑伟. AI人工智能技术在天基通信中的应用分析[J]. 电子测试, 2021(6): 55-56.



- ZHOU X W, ZHENG W. Application analysis of AI Artificial Intelligence Technology in space based communication[J]. Electronic Test, 2021(6): 55-56.
- [50] FERREIRA P V R, PAFFENROTH R, WYGLINSKI A M, et al. Multiobjective reinforcement learning for cognitive satellite communications using deep neural network ensembles[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 1030-1041.
- [51] 唐斯琪, 潘志松, 胡谷雨, 等. 智能化卫星互联网运维与管理: 现状与机遇[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 75-83.
- TANG S Q, PAN Z S, HU G Y, et al. Intelligent satellite Internet maintenance and management: progress and opportunities[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 75-83.
- [52] 杜丹冰. 一种优化空天地一体化网络吞吐量算法[J]. 弹箭与制导学报, 2022: 1-6.
- DU D B. An algorithm for optimizing throughput of air-space integrated network[J]. Journal of Projectiles, Arrows and Guidance, 2022: 1-6.
- [53] 杨力, 何兆斌, 孔志翔. 天地一体化智能网络智能节点部署策略[J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43(1): 159-164.
- YANG L, HE Z B, KONG Z X. Deployment strategy of intelligent node in integrated intelligent network[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2022, 43(1): 159-164.
- [54] 周家豪. 面向天地一体化网络的智能接入控制与资源分配机制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- ZHOU J H. Research on intelligent access control and resource allocation mechanism for space-air-ground integrated network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [55] 王鹏, 张佳鑫, 张兴, 等. 低轨卫星智能多接入边缘计算网络: 需求、架构、机遇与挑战[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 35-46.
- WANG P, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Low earth orbit satellite intelligent multi-access edge computing networks: requirements, architecture, opportunities and challenges[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 35-46.
- [56] 崔涛, 任智源, 黎军, 等. 卫星互联网业务智能识别分类算法与仿真[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(2): 72-80.
- CUI T, REN Z Y, LI J, et al. Intelligent identification and classification algorithm and simulation of satellite Internet

business[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(2): 72-80.

- [57] 毛伯敏, 郭鸿志, 刘家佳. 卫星物联网中服务质量与安全的智能联合优化方法[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 31-34.

MAO B M, GUO H Z, LIU J J. Intelligent joint optimizations of QoS and security for satellite Internet of Things[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 31-34.

[作者简介]



刘雅琼(1988-), 女, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授, 主要研究方向为边缘智能、车联网、卫星通信。



吕哲(2000-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为知识图谱、网络运维和边缘智能。



赵亚飞(1987-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院特聘副研究员, 主要研究方向为低轨卫星通信导航一体化。



寿国础(1965-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为接入网络与边缘计算、光纤与无线网络虚拟化、网络构建与路由、移动互联网与应用等。