

天地一体化接入网切片资源管理技术综述

惠 宁^{1,2}, 孙 茜^{1,3}, 王园园^{1,2}, 张宗帅^{1,3}, 田 霖^{1,2,3}, 张 景⁴, 魏 肖⁴

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049 ;

3. 中科南京信息高铁研究院, 江苏 南京 211100 ;

4. 中国电子科学研究院, 北京 100041)

摘 要: 随着全球广域覆盖的天地一体化信息网络中, 差异化业务的爆炸式增长, 迫切需要在天地一体化接入网切片中, 对无线与计算资源进行按需、动态管理, 实现精细化的业务响应与服务保障。针对天地一体化接入网切片资源管理技术进行综述, 总结天地一体化接入网切片资源管理的研究现状, 分析未来天地一体化接入网切片系统的无线频谱资源高隔离、多维跨域计算资源协同管理、复杂异构网络实时决策需求, 进而对相应的关键技术进行展望。

关键词: 天地一体化; 接入网; 网络切片; 资源管理

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022043

Review of Slice Resource Management Technology in Space-Integrated-Ground Access Network

HUI Ning^{1,2}, SUN Qian^{1,3}, WANG Yuanyuan^{1,2}, ZHANG Zongshuai^{1,3}, TIAN Lin^{1,2,3}, ZHANG Jing⁴, WEI Xiao⁴

1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Computing Technology (Nanjing), Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211100, China

4. China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: With the explosive growth of differentiated services, it is urgent to manage wireless spectrum and computing resources on demand dynamically in the sliced access network (RAN) of the space-integrated-ground network. Resulting from that, refined and guaranteed qualities of services are achieved. Thus, it is necessary to study the dynamic management of spectrum and computing resources in the sliced RAN of space-air-ground integrated networks. The resource management technologies in sliced RAN of the space-integrated-ground were discussed. The current research status of resource management in the space-integrated-ground access network was summarized. The future demands of resource management in sliced RAN of the space-integrated-ground system were analyzed, included the high isolation of wireless spectrum resource, the collaboration of computing resources among space and ground parts, and the real-time heterogeneous resource management in complex sliced RAN of space-air-ground integrated networks. The corresponding key technologies of the three demands were provided.

Keywords: space-integrated-ground, access network, network slice, resource management

0 引言

随着移动通信技术的高速发展, 5G将为用户提供灵活、弹性的通信服务, 满足大带宽、低时延、大连接多

样化场景的通信需求^[1]。虽然如此, 移动通信网络在实际应用中仍存在两方面问题: 一是现有地面移动通信基础设施在地震、海啸、山体滑坡、飓风等严重自然灾害中

收稿日期: 2022-07-30; 修回日期: 2022-11-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2021YFB2900504)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900504)

极易损毁,造成地面通信中断^[2];二是地面移动通信网络覆盖范围有限,在偏远地区的地面网络铺设困难,成本高昂^[3]。卫星通信是解决上述问题的有效手段,相较于易受自然灾害影响造成基础设施损毁的地面移动通信而言,卫星通信具有通信覆盖范围广、通信距离长等特征,在抢险救灾和偏远地区通信等场景中可发挥重要作用。卫星通信系统频谱资源稀缺、信号衰落大、通信信号传输距离远,仅依靠卫星通信网络的通信峰值速率与连接数有限,通信时延高^[4]。为了解决上述问题,必须充分发挥地面移动通信与卫星通信在不同空间维度上的优势,两者协同组网形成天地一体化信息网络^[5],这是未来移动通信发展的必然趋势^[6]。目前,天地一体化信息网络已经成为我国乃至全球的研究重点之一。

作为天地一体化信息网络的重要组成部分,天地一体化接入网由卫星接入与地面移动通信接入部分组成,通过构建接入网切片为多样化业务提供差异化的接入服务。天地一体化接入网切片由于资源与基础设施在切片间共享,高效的资源管理至关重要,是天地一体化信息网络的重要研究方向之一^[7]。天地一体化接入网切片资源管理包含无线资源与计算资源的管理。天地一体化接入网资源管理架构如图1所示。由于天地一体化信息网络中无线与计算资源可用性随低轨卫星的高速运动存在动态变化、资源与用户分布时空不均、低轨卫星频繁切换导致接入频繁中断,影响天地一体化信息网络随遇接入、按需服务的保障能力,因此,天地一体化接入网切片的无线资源与计算资源管理面临巨大挑战。一方面,针对天地一体化接入网切片的无线资源管理,为了提升稀缺

的频谱资源的利用率^[7],需要在天地一体化切片间共享无线频谱资源,缓解频谱“假性枯竭”的现状。无线频谱资源复用将导致切片间的无线传输性能相互影响,具体为:对于某一切片,由于与其他切片共享无线频谱资源,该切片的无线传输性能受共享无线资源的其他切片的动态因素影响,导致切片的业务接入与无线传输不稳定^[7]。迫切需要通过切片间的资源隔离机制,一定程度上限制切片间的资源共享,保障共享频谱资源的切片的无线传输性能互不影响。因此面向天地一体化切片无线资源的管理,如何平衡切片间无线资源隔离与复用之间的矛盾,成为制约天地一体化接入网切片无线传输性能的关键问题。另一方面,针对天地一体化接入网切片的边缘计算资源管理,为了实现全球无缝覆盖的计算服务保障,降低天地一体化业务服务保障时延,提升系统资源利用率,需要实现天地广分布的计算资源高效协同。天地一体化接入网切片由于边缘计算服务节点分布广泛,低轨卫星高速运动导致边缘计算资源可用性不断变化,卫星服务节点频繁切换,面临边缘计算资源协同难的问题。与此同时,综合考虑天地一体化接入网切片无线资源和边缘计算资源管理的算法,由于传统在线网络切片资源管理方案复杂性高、资源效率低,因此在天地一体接入网切片资源管理中,需要引入人工智能算法,对训练数据自动分析、提取特征,获得资源分配的决策模型,从而对天地一体化接入网切片的无线资源与计算资源管理提供各种高效的优化决策,如切片间资源分配、切片内资源管理等。亟须引入智能化算法,讨论并总结面向天地一体化接入网切片的无线资源与边缘计算资源管理算法与机制。

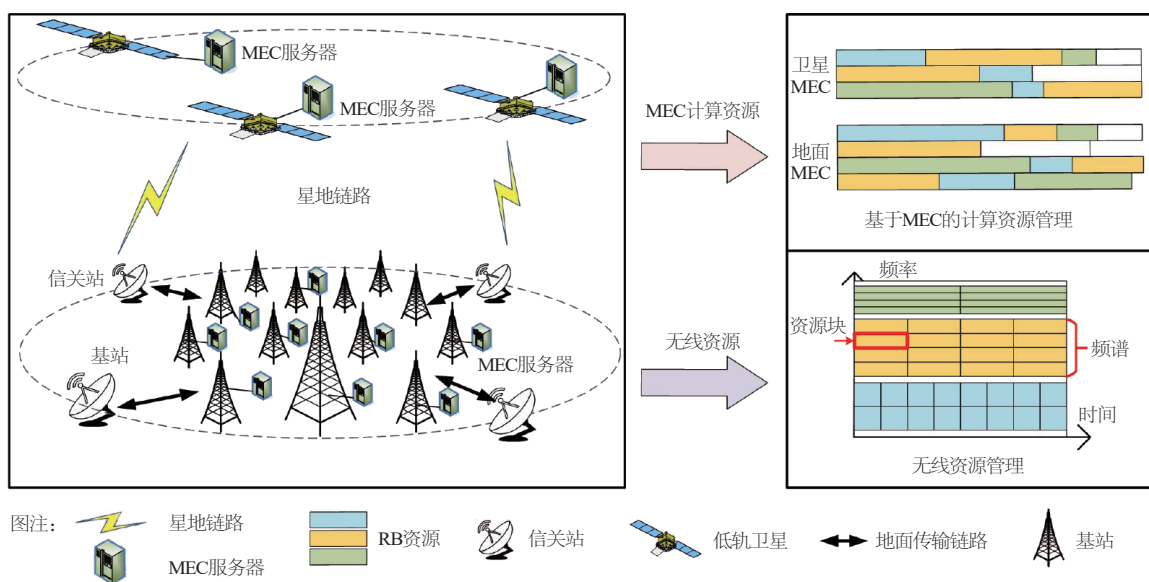


图1 天地一体化接入网资源管理架构

1 天地一体化接入网切片资源管理研究现状

在6G天地一体化接入网中，天地业务逐渐融合，不断衍生出具有卫星网络与地面网络特征的差异化新业务。如何设计智能资源管理机制，实现资源的实时、动态调度与分配，对天地一体化接入网切片的无线资源、计算资源进行精细化管理^[8-10]，具有重要意义。因此，本节主要总结并综述面向天地一体化接入网切片资源管理的相关研究，从无线资源管理、计算资源管理以及智能资源管理机制设计3个方面展开。

1.1 天地一体化接入网切片无线资源管理

对于天地一体化接入网切片无线资源管理而言，频谱资源的稀缺性造成天地一体化信息网络的无线频谱资源非常受限。传统的无线频谱资源静态分配方案将产生频谱资源的“假性衰竭”现象，大幅降低天地一体化接入网切片的资源效率。因此，天地一体化接入网切片系统需要利用灵活的资源共享方案，通过不断调整切片的无线频谱资源划分，提升无线频谱资源利用率与资源效率。这种高灵活性的频谱资源共享方案会带来切片无线资源隔离性能的下降，此时，每个切片可用资源量、无线干扰等易受其他切片数据流量波动、信道条件的变化和不同业务动态变化的影响，降低切片的无线传输性能。因此，天地一体化接入网切片系统迫切需要面向网络切片设计高隔离的频谱资源划分策略。网络切片的隔离通常可以分为硬隔离和软隔离两大类。对于硬隔离而言^[11]，资源在切片间静态分配，即资源被切片独占。对于软隔离而言^[12-18]，资源在切片间动态分配，即资源可以在切片间共享。由于频谱资源的稀缺性，在讨论网络切片的资源隔离性能时，还需要对切片的资源利用率进行考虑。因此，为了实现资源的灵活共享，提升资源利用率，目前研究领域已经开始针对软隔离前提下的资源利用率提升方案进行深入讨论。当前针对天地一体接入网切片高隔离频谱资源划分策略的研究主要围绕网络切片隔离性能的评价、网络切片隔离指标的定义两方面展开。

对于网络切片隔离性能的评价而言，部分研究者利用网络切片系统的QoS性能（如资源利用率、吞吐量、平均比特率等）的满意程度评价切片的隔离性能。通过优化这些QoS性能实现对网络切片隔离性能的保障，如通过提高QoS性能^[12]，最大化吞吐量^[13]，实现终端吞吐量与网络切片的信噪比^[14]，减小速率抖动^[15]等，分别保障网络切片的隔离性能，并利用博弈论、凸优化等方法对各切片之间的无线资源进行分配，实现高隔离资源切片。这些研究忽略了对网络切片隔离性能的量化定义，没有定义隔离性能指标，仅通过其他QoS性能指标很难

判断是否达到了隔离要求。

为了实现对网络切片的隔离性能进行评价，目前已有大量研究者对网络切片隔离指标进行定义。参考文献[19]将所有相邻小区中的网络切片间已分配资源的总差异之和，定义为隔离指标，强调实现不同小区分配给不同切片的资源量的平衡，但该研究中忽略了实际切片的QoS需求。为了保障切片的实际需求，参考文献[20]将网络切片的隔离指数定义为实际速率与期望速率的比值，通过调整切片的资源分配，使隔离指数不断趋近于1，从而保障切片资源隔离性能。参考文献[21]将隔离指数的定义从速率的比值推广到任意QoS参数的比值，实现定制化、多样化的网络切片隔离性能的评估。这种基于QoS参数映射来定义隔离指标的方式仅可评估是否满足隔离性能，为0/1判别。在中国移动与华为联合发布的《网络切片分级白皮书》^[6]中，根据网络切片的隔离要求不同，将切片的隔离等级分为L0-L4 5个等级，如图2所示，要求系统可以保障不同等级的隔离性能。上述文献均无法实现对不同隔离等级的划分与评估。

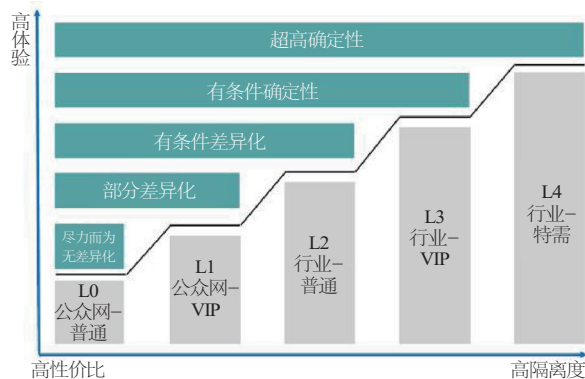


图2 网络切片分级能力示意

1.2 天地一体化接入网切片计算资源管理

对于天地一体化接入网切片计算资源管理而言，由于天地一体化接入网切片系统将为全球广泛分布的多类型业务提供泛在接入能力，从而催生了许多新的计算密集型与时延敏感型应用，如4K/8K视频、3D游戏、实时搜救系统等，对未来天地一体化系统提出了低处理时延与低传输时延的需求。因此需要在星地协同网络中引入移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）技术，将计算能力扩展到天地一体化信息网络边缘，可以有效减少卫星与地面之间频繁的星地链路传输，显著降低端到端业务传输时延的同时，有效节省星地链路业务数据传输带宽需求^[6]，为用户尤其是偏远地区用户和应急灾难救援等场景提供多维跨域的计算资源，做到全球业务无

缝覆盖,提升用户体验,降低服务与传输时延^[2]。

融合MEC的星地融合网络已成为当前天地一体化信息网络研究的热点问题之一。图3为当前天地计算资源管理的研究现状总结。具体而言,针对偏远地区和应急灾难救援场景下业务处理难的问题,参考文献[22]以快速运行的高速铁路为例,将卫星通信整合到5G通信系统中,并基于神经网络算法构建卫星资源分配方案,通过神经网络算法,将卫星资源分配给用于高速铁路接入的已定义的网络切片,从而满足用户的QoS/QoE需求。这种方案仅分配单星的计算资源,计算资源量受限,影响业务的处理。为了实现多星协同,参考文献[23]通过设计卫星天地协同的移动边缘计算系统架构和资源管理机制,使不同轨道的卫星星座分别充当云计算服务中心和雾计算服务节点,通过星间计算资源的协同,将地面所有任务路由至天基MEC网络进行处理,从而满足不同业务的QoS需求。该工作只考虑星间计算资源的协同,地面大量的计算节点的计算资源闲置,造成大量资源的浪费。同时,地面任务全部上星处理将造成星间链路紧张,使传输时延大大增加,降低用户体验。为了利用地面MEC网络丰富的计算资源,参考文献[24]设计基于机器学习的地面与卫星网络联合资源分配架构,通过动态为每个接入的用户保留特定资源,并不断学习用户频繁请求的接入路径,优化资源分配的决策,从而提升链接与质量,提升资源分配效率。在该方案中,计算能力仅部署于地面,仅考虑地面覆盖区域的地面计算资源的协同,无法为偏远地区和应急灾难救援场景提供服务,天基计算资源部署的优势被忽略。为了将星地计算资源进行协同,合理利用天地一体化信息网络卫星和地面融合的优势,参考文献[25]对地面计算任务的卸载进行决策,提出了边缘计算和深度学习辅助卫星互联网数据处理的方法,使用边缘计算减少卫星传输的数据量,节省馈线链路带宽,减少数据处理和通信实验,提升卫星间链路的带宽利用率,但是这种方法只将

任务卸载至卫星或地面节点中的一方,没有实现天地计算任务的协同处理,资源效率低。

1.3 天地一体化接入网切片智能资源管理机制

对于天地一体化接入网切片无线资源与计算资源的管理而言,需要设计相应的资源管理机制对资源分配与管理进行优化决策。在天地一体化接入网切片系统中,由于融合高速运动的低轨卫星的网络存在网络拓扑变化快、网络动态性强的特点,天地一体化接入网切片的资源管理优化算法的自由度与复杂度高。在切片的资源管理过程中,OTT运营商、虚拟网络运营商等多租户(切片实际运营者)需要向基础设施运营商租用多维资源(包括无线资源、计算资源等),用来支持多样化与定制化的服务,需要实时在线的动态资源调度与分配方案,保障高动态变化用户的QoS与网络的服务质量。由于传统网络资源管理策略在面向天地一体化接入网系统的大规模复杂资源管理问题上具有实时性低、自适应差的特征,网络效率低,难以实现对天地一体化接入网多维跨域资源的实时动态管理,难以有效保障业务QoS^[26-27]。针对日益复杂的天地一体化接入网资源管理问题,需要设计基于人工智能算法的智能化资源管理方案,这成为天地一体化接入网切片资源智能、动态管理的必要条件。

智能的天地一体化切片资源管理通过智能感知、自主决策和自主执行,可以实现天地一体化接入网多维跨域资源的实时调度与分配。参考文献[26-27]认为未来网络算力泛在为天地一体智能化的资源管控提供了数据基础,期望在保留中间节点通信功能的基础上,对中间节点的计算、存储功能进行不断改善。同时,基于人工智能的网络管理在经过离线大数据分析挖掘后,生成网络资源管理策略,可以根据实时网络状态对多维跨域资源的调度进行在线自主决策,有助于实时进行用户资源需求数据的预处理、存储与共享,实现天地一体化智能的业务感知。对于具体的人工智能资源分配解决方案,为

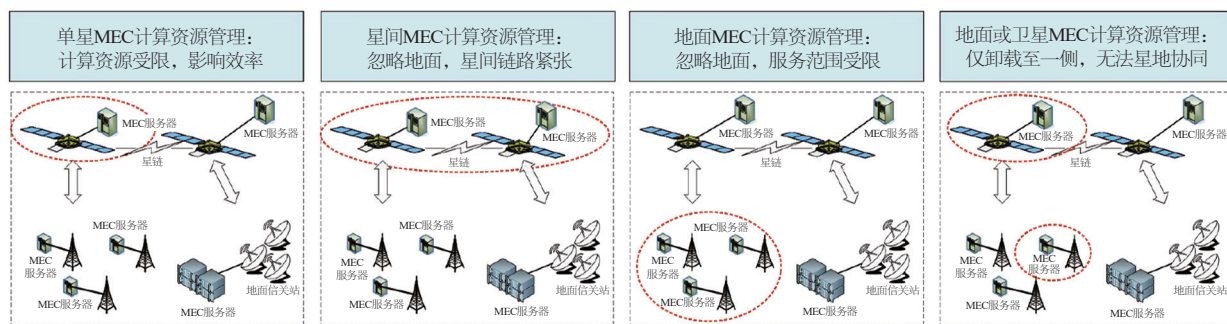


图3 天地计算资源管理研究现状

了实现无线与计算资源的联合分配,参考文献[28]定义了一种约束学习方案,通过在接入网切片中引入动态的无线与计算资源分配方案,以保障业务的QoS。参考文献[29]提出分散式深度强化学习方案,保障无线与计算资源受限环境下不同切片的SLA。参考文献[30]研究了联合RAN切片和计算卸载问题,并应用多智能体深度Q学习实现了通信和计算资源的最大化利用。参考文献[31]提出了一种基于深度强化学习网络的资源分配方法,用于虚拟RAN的无线资源和计算资源联合分配。以上方法通常需要大量的样本进行训练,即探索阶段较长,网络训练耗时过长^[32]。为了解决耗时过长的问題,参考文献[33]提出了一种基于关联Q学习的网络切片资源分配方法,但该方法没有考虑知识的传递能力。

2 未来天地一体化接入网资源管理需求

面向天地差异化新业务的需求,未来天地一体化接入网系统将主要包含3种典型应用场景:热点宽带覆盖、高机动平台移动接入和星地海量物联。这3种场景分别对网络提出更大带宽、更高移动速度下的低时延高可靠传输、海量终端入网的需求。由于当前天地一体化接入网切片资源管理存在无线资源的隔离性能无法保障、天地计算资源难协同、智能化算法无法实时决策的问题,无法满足天地一体化信息网络的差异化服务需求,因此,本节主要针对天地一体化接入网无线频谱资源高隔离需求、多维跨域计算资源协同管理需求、复杂异构天地一体化信息网络实时决策需求展开分析和讨论。

2.1 接入网无线频谱资源高隔离需求

在天地一体接入网切片系统中,同一切片内新用户的接入或当前切片与其他切片复用资源产生的干扰可能会降低现有用户的SINR,并导致当前的网络状况不再满足用户的QoS要求,所以网络切片的隔离水平将受到不断变化的用户请求和资源复用程度的影响^[34],带来网络隔离性能下降、故障或安全漏洞等严重威胁网络安全的后果。尽管在网络切片资源隔离和资源复用领域的研究很多,但多数网络切片资源隔离相关的研究忽略了系统资源的实际情况以及网络切片资源隔离与资源复用之间的关系。与此同时,网络切片资源复用目前的研究大多围绕资源分割、经济学角度等进行研究,没有考虑资源复用会使切片的隔离水平产生变化,即没有考虑隔离水平的上升带来资源复用水平的下降。目前,在地面移动通信系统与卫星移动通信系统中,对于隔离缺乏明确定义,没有可用的标准化资源隔离技术。因此,在天地一体化接入网切片资源

管理中,如何从业务资源需求动态保障的角度设计隔离指标,并在保障高隔离的天地一体化接入网切片的同时提升频谱资源利用率,成为天地一体化接入网切片无线资源分配中迫切需要解决的问题。

2.2 多维跨域计算资源协同管理需求

融合MEC的天地一体化信息网络架构如图4所示。目前工业界和学术界针对天地一体化信息网络中的边缘计算技术开展的相关工作中,多数卫星节点仍然被视为中继,即卫星仅充当通信和控制节点的角色,网络接入的任务处理主要利用地面计算资源,忽视了直接在卫星上进行任务处理的可行性。在卫星上直接处理来自移动用户的计算任务不仅可以减少回传链路的流量负担,还可以有效降低任务处理的时延,进而提升用户的QoS^[22-23]。与此同时,天基LEO卫星的移动性被忽略,存在计算任务卸载决策不够合理现象,可能会造成部分星上MEC和计算密集地区的部分地面MEC负载压力过大,带来时延增大、QoS降低等问题。目前,针对天地一体场景以卫星移动性管理为基础的计算资源协同的相关研究非常少。为了实现天地一体星地计算资源更好的协同,需要对卫星的移动状态进行预测,加强星间、星地间移动性管理^[35]。因此,在对天地一体化信息网络的跨空域、地面域计算资源进行跨域管控时,需要考虑如何基于预测的低轨卫星轨道信息协同卫星、地面5G NR和地面信关站中的MEC服务器,实现天地一体化多维跨域计算资源的协同与适配,实现区域内业务的高效处理,提升天地一体化信息网络的资源利用率。

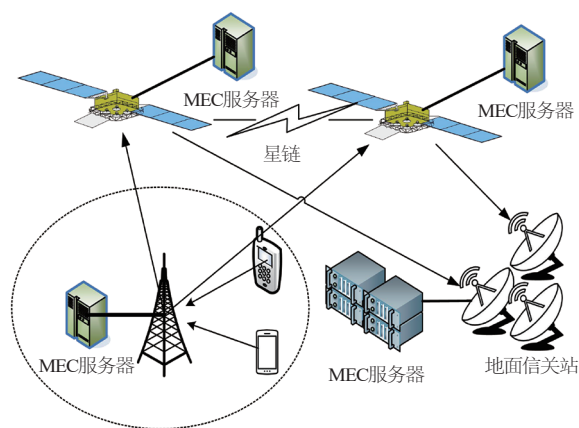


图4 融合MEC的天地一体化信息网络架构

2.3 复杂异构天地一体化信息网络实时决策需求

尽管针对未来接入网切片的资源分配与调度提出了各种机器学习等人工智能方法,但是在实际天地一体化信息网络中应用人工智能算法进行决策,除了人工智能

算法本身泛化能力有限^[36]、存在概念漂移问题^[37]以及由于低轨卫星高速变化易导致人工智能算法产生潜在的输入-输出关系不可预测^[38]等固有缺陷与弊端外;还存在由于低轨卫星高速移动、网络拓扑动态变化等特征导致的天地一体化信息网络频繁切换,可用资源状态不断变化(资源隔离水平低),资源管理复杂度高等天地一体化信息网络的特有问題。与此同时,这种高动态性带来的频繁切换将在海量互联的天地一体化系统中,造成大量的能耗和较长的地面与卫星之间的唤醒时间,限制天地一体化接入网系统的实时性能。因此,如何设计低时延、低能耗的人工智能算法,保障卫星的高速移动与网络的大动态环境下天地一体化接入网无线与计算资源分配决策的低时延生成、天地业务的低能耗处理,成为保障用户的QoS与网络的快速响应能力需要解决的问题。

3 未来天地一体化接入网资源管理技术

为了更好地应对天地一体化接入网3种典型应用场景在无线资源管理、计算资源管理、智能化资源管理决策的新需求,在设计资源管理技术时,首先需要面向无线频谱资源高隔离需求,设计资源隔离性能评价指标,实现对不同接入切片隔离性能的评估,并设计基于隔离度指标的无线频谱资源管理方法,实现对天地一体化接入网无线频谱资源的高隔离管理;然后,对于多维跨域计算资源的管理需要跨域协同,需要引入移动边缘计算与虚拟化技术,对全球边缘计算资源进行虚拟化编排设计,保障全球多维跨域资源可虚拟化调度与协同;最后,由于使用传统优化算法导致复杂异构的天地一体化信息网络资源管理决策实时性差,需要引入模型与数据联合驱动的思想,将传统通信领域的经典与先进模型和实际运行数据相结合,并利用智能化手段提升决策效率,从而保障实时决策需求。针对天地一体化接入网切片资源管理存在的无线频谱资源高隔离、多维跨域计算资源协同管理、复杂异构天地一体化信息网络实时决策需求,本节分别面向高隔离无线频谱资源管理技术、跨域边缘计算资源协同管理技术、模型与数据联合驱动的资源管理算法进行展望。

3.1 高隔离无线频谱资源管理技术

针对无线频谱资源高隔离的需求,本小节对隔离度评价指标进行设计与展望,为无线频谱资源高隔离管理提供模型基础。

针对无线频谱资源高隔离的需求,为了保障未来天地一体化接入网中接入用户与业务的QoS,迫切需要设计资源复用和隔离联合优化的天地一体化接入网切片无线资

源分配机制。本文在参考文献[39]中通过网络切片资源复用的基础上考虑资源隔离性能的约束,利用基于最优保留与矩阵编码的改进遗传算法对无线资源的分配方案进行决策与动态调整,可以在保障天地一体接入网切片系统的SLA与隔离性能的基础上,最大化天地一体化系统的资源共享能力,最大限度提升有限的资源利用率,实现高隔离无线频谱资源管理。技术原理如图5所示。

对于隔离性能的评估而言,根据中国移动2020年3月发布的《网络切片分级白皮书》^[4],从性能指标、功能差异、对网络的需求、运维模式等方面进行分析,可以将用户对5G的需求归纳为两大类:公众网用户需求和行业网用户需求。5G公众网与行业网既有共享又有隔离,为应对这两大类5G网络切片的需求,综合考虑网络隔离性以及部署运营要求,中国移动等针对不同能力的网络切片,根据网络现有能力,对网络切片进行分级。为了在实际系统中实现对资源隔离性能的评价与量化,便于评估切片的资源复用水平,参考文献[41]提出根据实际切片的资源需求,考虑当前切片中可保障切片QoS性能的资源量与资源归属,利用切片中资源的实际变化量定义无线资源隔离性能指标和无线资源复用增益指标,分析无线资源隔离性能和无线资源复用增益之间的关系。通过这种从资源层面定义隔离指标的方式,可以实现对不同隔离等级的量化,满足不同等级的切片隔离性能的评估要求,为天地一体化场景下的切片隔离指标定义提供参考。

3.2 跨域边缘计算资源协同管理技术

针对多维跨域计算资源协同管理的需求,本小节对基于MEC的任务卸载与迁移机制进行展望,并设计Docker MANO架构对配置后的天地一体化跨域计算资源进行编排管理,为未来多维跨域计算资源管理提供研究思路。

面向天地一体、多场景多业务背景,广泛地理位置分布的卫星MEC系统与多类型地面MEC系统的多维跨域计算资源需要协同处理的需求,联合考虑低轨卫星的移动性,需要设计天地一体跨域边缘计算资源协同管理技术。通过综合考虑天地一体多场景多业务地理分布情况,跨域地面节点、信关站、卫星MEC资源实际情况,低轨卫星运行轨迹与覆盖范围预测,系统内平均业务时延需求,在设计多维跨域计算资源切片协同管理机制时,首先需要预测卫星轨道的运行规律,然后根据差异化业务的QoS需求以及星间、星地、地面MEC计算资源的状态,通过设计高效的MEC计算任务卸载与迁移方案,降低任务传输与处理时延,满足不同类型业务QoS,并优化偏远地区、应急区域的服务时延与服务质量,实现对天地一体场景下业务与资源的协同适配和资

源配置决策。

在完成计算资源配置决策后，需要利用网络切片对天地计算资源进行编排管理。图6是一个端到端的天地一体化切片实例，包括用户应用设备部分、接入网部分、核心网部分和承载网部分，不同切片之间在逻辑上相互独立。中国科学院计算技术研究所已提出并设计具有基带/协议处理资源池化、全局智能管控等特点的网络切片资源管理平台，利用虚拟化技术在底层的基础设施上提供逻辑独立的虚拟基站，对全网的各种处理资源进行调度分配，具有灵活部署，减少能耗，降低成本等优点。

网络切片资源编排的核心是将各域网元进行虚拟化，利用资源编排管理机制对各虚拟网元进行灵活管控，是后续快速形成天地一体化多场景差异化切片的基础。虚拟网元资源编排需要统一、灵活组织对处理资源各方面的

需求，包括计算能力需求、内存需求、网络需求、镜像需求等，需要统一多域的需求并能灵活管控虚拟网元的整个生命周期，从而可以快速更新转换虚拟网元的各种状态，完成虚拟网元的资源编排管理。本文提出依托Docker设计轻量级的虚拟网元资源编排管理框架（Docker MANO）完成天地一体化接入网切片系统不同虚拟网元的计算资源分配与生命周期管理，所提框架如图7所示。

3.3 模型与数据联合驱动的资源管理算法

针对复杂异构天地一体化信息网络实时决策需求，本小节对模型与数据联合驱动的资源管理算法进行讨论，分析其优势与发展前景，为制定资源实时调度决策提供思路。

针对复杂异构天地一体化信息网络实时决策需求，

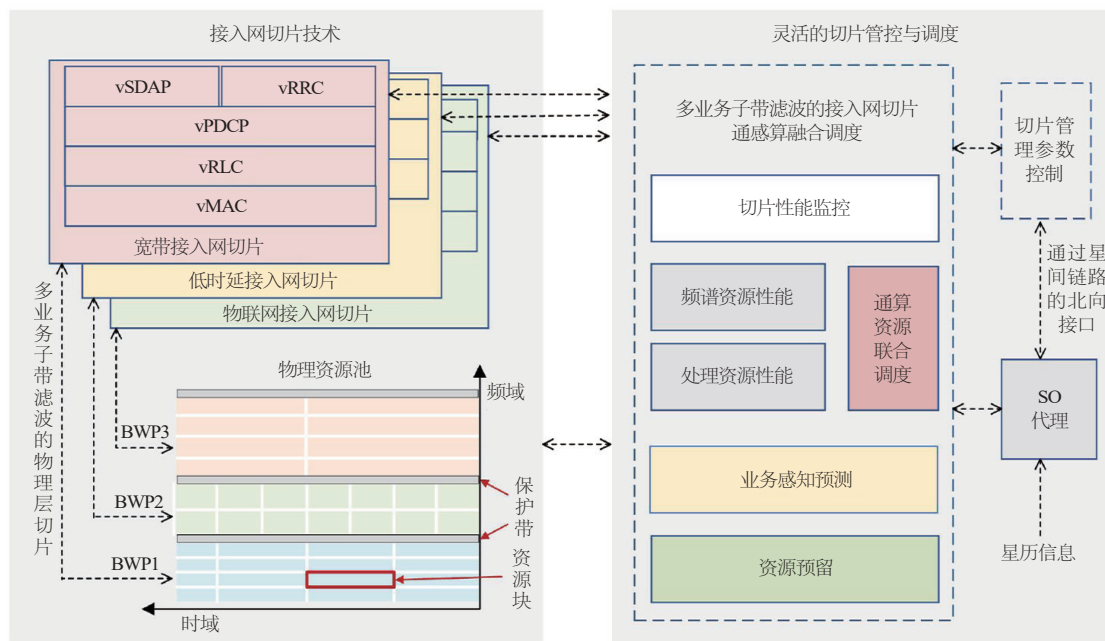


图5 高隔离接入网无线频谱资源高层切片技术原理

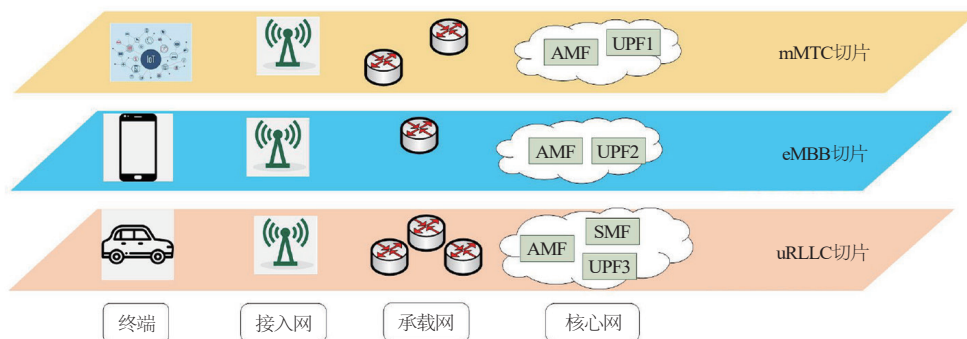


图6 端到端天地一体化切片实例

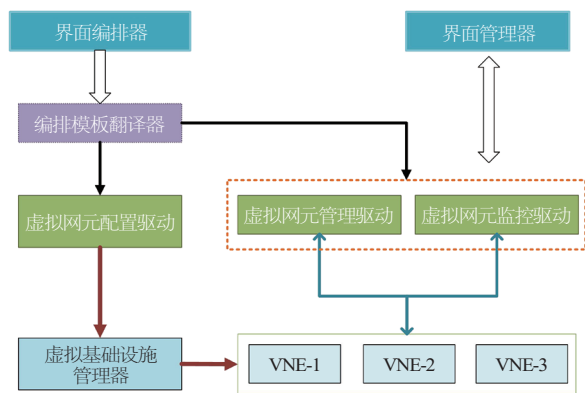


图7 Docker MANO框架

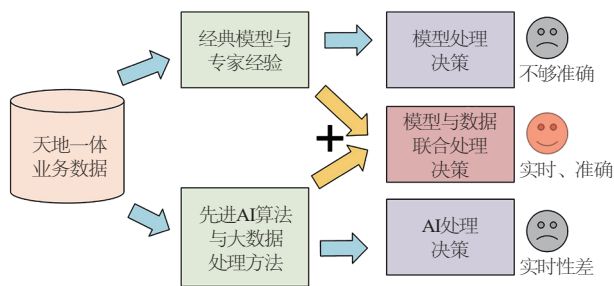


图8 天地一体业务处理方法对比

由于天地一体化接入网切片系统中持续增长的网络复杂度、用户差异化的业务需求对网络资源的实时调度与分配带来了多方面的问题与挑战，需要能够兼顾低时延与低能耗的天地一体化接入网切片资源管理与调度方案，实现对高动态与差异化业务需求的复杂网络的QoS保障。相较于其他研究领域，无线系统经过5代的研究与发展，已有海量可用的数学模型对实际系统进行描述，即专家知识。这些专家知识可以作为先验知识，用于AI算法的初始化探索学习，减少数据量，降低计算复杂度与能耗，降低网络开销；同时，利用AI进行大数据训练，可以弥补未来天地一体化接入网切片系统中模型对于实际复杂无线场景的数学描述精确度低、灵活性差的缺陷。图8为天地一体业务处理方法对比。未来有望通过模型与数据联合驱动的资源管理算法，将传统模型的高执行效率与现有数据和AI算法的高自适应性能相结合，充分发挥二者的优势；并相互弥补对方的缺点，从而提升网络的自适应性，更高效地实现高动态网络中的自适应资源重分配与调度策略生成，大大降低优化问题的复杂性；实现实时资源分配与调度，降低时延与能耗，提升业务处理效率，从而更好地保障用户的QoS。这是未来天地一体化接入网切片资源智能、动态分配与调度的可行方案。

4 结束语

随着研究领域对天地一体化接入网资源管理技术研究的推进，未来天地一体化信息网络将逐步成为B5G甚至6G的重要组成部分，谱写我国网络架构的新蓝图。

参考文献：

- [1] YAO H P, WANG L Y, WANG X D, et al. The space-terrestrial integrated network: an overview[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 178-185.
- [2] 唐琴琴, 谢人超, 刘旭, 等. 融合MEC的星地协同网络: 架构、关键技术与挑战[J]. 通信学报, 2020, 41(4): 162-181.
TANG Q Q, XIE R C, LIU X, et al. MEC enabled satellite-terrestrial network: architecture, key technique and challenge[J]. Journal on Communications, 2020, 41(4): 162-181.
- [3] 付书航, 周笛, 盛敏, 等. 空天地海一体化网络体系架构与网络切片技术[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 8-14.
FU S H, ZHOU D, SHENG M, et al. An architecture and network slicing technology in space-air-ground-sea integrated network[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 8-14.
- [4] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [5] 张晓凯, 郭道省, 张邦宁. 空天地一体化信息网络研究现状与新技术的应用展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 19-26.
ZHANG X K, GUO D X, ZHANG B N. Research status of space-air-ground integrated network and application prospects of new technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 19-26.
- [6] China Mobile, Huawei, Tencent, et al. Categories and service levels of network slicing white paper[Z]. 2020.
- [7] 王晓虹, 王卅, 唐宏伟, 等. 构建“新基建”国家战略的技术底座——“信息高铁”综合试验场建设的实践与思考[J]. 中国科学院院刊, 2021(9): 1066-1073.
WANG X H, WANG S, TANG H W, et al. Building substrate for national strategy of new infrastructure construction-practice and thought of information superbahn testbed[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021(9): 1066-1073.
- [8] 李丹, 朱棣, 申涓. 全维可定义的天地协同组网架构与切片技术研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 30-38.
LI D, ZHU D, SHEN J. Networking architecture and slicing technology of space-ground cooperative network based on full-

- dimension definability[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 30-38.
- [9] LEE Y L, LOO J, CHUAH T C, et al. Dynamic network slicing for multitenant heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2146-2161.
- [10] SUN Q, TIAN L, ZHOU Y Q, et al. A two-layered incentive scheme for cooperation in sliced 5G D2D networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13289-13304.
- [11] KOKKU R, MAHINDRA R, ZHANG H H, et al. CellSlice: Cellular wireless resource slicing for active RAN sharing[C]// Proceedings of 2013 Fifth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-10.
- [12] DEMIROVIĆ S, KIŠ P, JANKOVIĆ J, et al. Resource utilization-QoS isolation trade-off in 5G networks considering network slicing reconfiguration interval[C]//Proceedings of 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO). Piscataway: IEEE Press, 2020: 407-412.
- [13] NOJIMA D, KATSUMATA Y, SHIMOJO T, et al. Resource isolation in RAN part while utilizing ordinary scheduling algorithm for network slicing[C]//Proceedings of 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [14] RAVINDRAN S, CHAUDHURI S, BAPAT J, et al. Isolation-based sub-slices for throughput optimization in 5G radio access network[C]// Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [15] KASGARI A T Z, SAAD W. Stochastic optimization and control framework for 5G network slicing with effective isolation[C]// Proceedings of 2018 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [16] REYHANIAN N, MAHAM B. Statistical slice selection in multi-tenant networks with maximum isolation of reserved resources[C]// Proceedings of 2020 54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1002-1006.
- [17] YANG X, LIU Y, WONG I C, et al. Effective isolation in dynamic network slicing[C]//Proceedings of 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [18] VILÀ I, SALLENTO O, UMBERT A, et al. Guaranteed bit rate traffic prioritisation and isolation in multi-tenant radio access networks[C]// Proceedings of 2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [19] YANG X, LIU Y, WONG I C, et al. Genetic algorithm for inter-slice resource management in 5G network with isolation[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [20] TIAN L, DAI L L, SUN Q, et al. Wireless resource management in sliced networks based on isolation indexes[C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [21] SUN Q, FENG C, HUI N, et al. Computing and storage resources allocation of UPF based on isolation in private 5G networks[C]// Proceedings of 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [22] DE COLA T, BISIO I. QoS optimisation of eMBB services in converged 5G-satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12098-12110.
- [23] CAO S Z, WEI J Y, HAN H, et al. Space edge cloud enabling network slicing for 5G satellite network[C]//Proceedings of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 787-792.
- [24] RODRIGUES T K, KATO N. Network slicing with centralized and distributed reinforcement learning for combined satellite/ground networks in a 6G environment[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(1): 104-110.
- [25] WEI J Y, CAO S Z. Application of edge intelligent computing in satellite Internet of Things[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 85-91.
- [26] SHEN X M, GAO J, WU W, et al. AI-assisted network-slicing based next-generation wireless networks[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2020(1): 45-66.
- [27] YAN M, FENG G, ZHOU J H, et al. Intelligent resource scheduling for 5G radio access network slicing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7691-7703.
- [28] WU W, CHEN N, ZHOU C H, et al. Dynamic RAN slicing for service-oriented vehicular networks via constrained learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(7): 2076-2089.
- [29] LIU Q, HAN T, MOGES E. Edge slice: slicing wireless edge computing network with decentralized deep reinforcement learning[C]//Proceedings of 2020 IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems. Piscataway: IEEE Press, 2020: 234-244.

- [30] YE Q, SHI W S, QU K G, et al. Joint RAN slicing and computation offloading for autonomous vehicular networks: a learning-assisted hierarchical approach[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2021(2): 272-288.
- [31] AYALA-ROMERO J A, GARCIA-SAAVEDRA A, GRAMAGLIA M, et al. vrAI: deep learning based orchestration for computing and radio resources in vRANs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(7): 2652-2670.
- [32] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning[J]. Nature, 2015, 518(7540): 529-533.
- [33] ZHOU H, ELSAYED M, EROL-KANTARCI M. RAN resource slicing in 5G using multi-agent correlated Q-learning[C]//Proceedings of 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1179-1184.
- [34] HUIN N, MEDAGLIANI P, MARTIN S, et al. Hard-isolation for network slicing[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2019: 955-956.
- [35] 唐清清, 李斌. 面向空天地一体化信息网络的移动边缘计算技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(1): 27-35.
- TANG Q Q, LI B. Overview of mobile edge computing in space-air-ground integrated network[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(1): 27-35.
- [36] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A. Deep learning[M]. MIT Press, 2016.
- [37] LU J, LIU A J, DONG F, et al. Learning under concept drift: a review[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2019, 31(12): 2346-2363.
- [38] LEI L, YUAN Y X, LYU T X, et al. Dynamic-adaptive AI solutions for network slicing management in satellite-integrated B5G systems[J]. IEEE Network, 2021, 35(6): 91-97.
- [39] HUI N, SUN Q, WANG Y Y, et al. Wireless resource allocation based on multiplexing and isolation in sliced 5G networks[C]//Proceedings of 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1629-1634.

[作者简介]



惠宁 (1995-), 女, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为通信与计算融合、卫星互联网、网络切片资源管理等。



孙茜 (1990-), 女, 博士, 中国科学院计算技术研究所助理研究员, 主要研究方向为通信与计算融合、无线资源管理等。



王园园 (1986-), 女, 博士, 中国科学院计算技术研究所高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为计算与通信融合、移动通信系统架构、边网协同资源管理、智能网络运行控制技术等。



张宗帅 (1989-), 男, 博士, 中国科学院计算技术研究所助理研究员, 主要研究方向为计算与通信融合、云边端算网资源管理、算力网络等。



田霖 (1980-), 女, 博士, 中国科学院计算技术研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为无线资源管理、无线多媒体多播、新型无线网络架构。



张景 (1974-), 男, 中国电子科学研究院研究员级高级工程师, 主要研究方向为基于5G移动通信技术体制的卫星无线接入网技术、基于4G/5G技术体制的时敏专网、移动边缘计算技术在行业专用中的应用等。



魏肖 (1991-), 女, 现就职于中国电子科学研究院, 主要研究方向为星地融合网络接入技术、卫星物联网传输技术、卫星5G接入技术等。