

天地融合网络智能组网体系架构研究

张婷婷¹, 武楠¹, 姚海鹏²

(1. 北京理工大学, 北京 100081;

2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 拓扑高动态、业务高差异、资源强受限等特征给天地融合组网带来了巨大挑战, 深度结合软件定义网络、网络功能虚拟化、人工智能等网络技术, 是实现未来天地融合网络智能重构、按需适变、高效管控等能力的主要技术途径。深入分析天地融合网络发展现状, 提出智能化与虚拟化驱动的天地融合网络体系架构, 并在此基础上针对网元异构、时空尺度大、业务需求差异化等带来的智能组网挑战, 提出多维异构数据平面资源池化、多域协同的感知功能按需部署、多层多域混合式网络自主管控、“云-边”协同的集中式与分布式网络智能等, 实现天地融合网络按需重构、智能服务的保障能力。

关键词: 天地融合网络; 软件定义网络; 智能组网

中图分类号: V19

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022031

Research on Intelligent Networking Architecture for the Integrated Space-Terrestrial Networks

ZHANG Tingting¹, WU Nan¹, YAO Haipeng²

1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The integrated space-terrestrial networks (ISTN), characterized by the high-dynamic of topology, the diversification of services and the constrained resource of satellites, face great challenges in the integration of networking. To achieve network capabilities of intelligent reconstruction, on-demand adjustment, effective management and control, the intelligent networking method for ISTN by applying SDN, NFV and artificial intelligence were studied. In-depth analysis of the development status of the world-earth fusion network, an intelligent and virtualization-driven world-earth fusion network architecture was proposed. On this basis, to addressed the challenges of intelligent networking brought about by network element heterogeneity, large space-time scale, and differentiated service requirements, the multi-dimensional heterogeneous data plane resource pooling, multi-domain collaborative sensing function on-demand deployment, multi-layer multi-domain hybrid network autonomous control, centralized and distributed network intelligence for "cloud-edge" collaboration, etc. were proposed, which realized on-demand reconstruction of the world-earth fusion network and intelligent service guarantee capabilities.

Keywords: integrated space-terrestrial network, software defined network, intelligent networking

0 引言

天地融合网络充分利用卫星网络覆盖范围广、通信容量大、部署成本低等优势, 能够有效提升下一代地面网络的承载和覆盖能力。通过空间网络、5G网络以及6G网络等的异构融合互联^[1-4], 能够满足全域覆盖、泛在服

务需求, 为陆、海、空、天各类用户提供随时随地按需接入的高质量信息服务。特别是随着星载计算、存储、交换等能力的不断增强, 下一代卫星将具备高性能路由交换、高速智能计算等能力, 能够满足全息通信、智慧交互等全新业务提出的更高网络服务要求。但是天地融

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-09-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2021YFB2900600)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900600)

合网络具有大时空尺度、高动态拓扑、星地能力高度不平衡等特性,难以保证低时延、高可靠、智能化的网络服务效果,需要从跨域异构资源统一管理、灵活调度、智能化网络管理与控制等方面探索天地融合网络智能组网体系架构,建立网络智能重构、按需适变、高效管控方法。

1 天地融合网络发展现状

近年来,工业界和学术界围绕天地融合组网开展了大量研究工作,主要结合软件定义网络、网络功能虚拟化、人工智能等融合网络体系架构。

1.1 下一代天基网络结构及资源特性

卫星网络通信以其覆盖范围广、通信实时性强、系统容量大等特点,与地面网络形成了极强的优势互补,是实现全域覆盖、万物互联、天地融合网络的关键。随着航天和通信技术的快速进步,特别是微小卫星技术的突破,以低轨卫星星座为主的卫星网络蓬勃发展,成为未来天基网络的主要组成部分。

国内外主要的低轨卫星星座计划,其主要特征是星座规模大、通信能力强但计算存储能力受限,如Starlink计划部署的星座总规模达到了4.2万颗,OneWeb计划部署648颗低轨卫星,Kuiper卫星星座将包括3 236颗卫星。通过空间激光通信等技术,低轨卫星星座网络正在实现大容量的数据传输,但是已部署的低轨卫星多采用微小卫星技术,计算存储能力较弱,甚至不具备星上处理能力。

低轨卫星在轨智能处理能力的开发是国际上正在探索的热点领域。如在美国的黑杰克低轨卫星星座计划中,拟采用自主运行、人工智能、机器学习等技术最大化利用在轨采集知识,实现自主任务、自主诊断与故障响应等星座自动化管理,而且已经演示验证了星载计算机对多源数据进行融合处理的能力,包括在轨数据处理、星载多源数据分析与转发,验证了在低轨卫星节点进行智能处理的可行性。

综上,下一代天基网络将以大规模低轨星座为主体形成新的空间网络结构,节点包括计算能力受限的微小卫星、具备智能处理能力的强能力节点等多类网元。因此,在进行未来天地融合智能组网方案设计时,需关注低轨卫星星座网络的高动态拓扑以及计算、存储等资源强受限特性,有针对性地设计网络管控与调度机制。

1.2 面向天地融合网络的新型组网技术

新一代卫星节点越来越强大的数据处理能力,为软件定义网络(SDN)、网络功能虚拟化(NFV)、人工智

能、云计算等网络技术融入卫星网络带来了契机^[5-6],为实现天地融合网络的重要技术途径。如何利用这些新技术实现天地融合网络的异构融合、高效管控、灵活资源分配、高质量服务等成为当前的研究热点。

SDN通过解耦数据平面和控制平面、采用集中式控制等方式,能够简化网络管控的复杂度、提高资源分配的效率,支撑服务与应用的灵活部署。SDN技术在地面网络的有效应用,使得众多研究者开始探讨如何利用SDN提升天地融合网络的管控灵活性,特别是解决高动态、大时空尺度天基网络带来的管控难题,将SDN的转控分离、集中控制等特性与天地融合网络环境融合,设计天地融合网络的软件定义架构。如LI等^[7]提出的星地一体化的软件定义架构SERvICE,将集中控制功能部署在地面卫星网络管控中心;利用GEO卫星的大覆盖以及对地静止的特性,在GEO部署低层级的天基网络控制器,负责收集底层卫星网络的状态信息,以实现SDN的全局视图管理能力;地面用户通过LEO卫星层接入,数据转发由MEO卫星层负责。在SERvICE框架中,GEO控制器不具备自主的管控功能,仅作为地面控制中心和天基网络数据平面的中继,而且LEO卫星也不具备数据转发功能。

随着航天技术的发展,未来星上节点的计算、存储、交换等能力将越来越强,可以将更强大的网络功能部署在天基节点,进一步扩展天基网络的服务能力。如XU等^[8]提出的基于软件定义的下一代卫星网络架构SoftSpace,赋予了GEO控制节点更强大的管理控制功能,如支持路由、自适应接入控制、点波束管理等空间段的管理控制;进一步地,针对GEO卫星在极地区域覆盖不足的问题,在LEO层部署从属控制器,可以通过带内方式收集网络状态信息并转发给GEO域控制器,从而实现天基网络的全局网络视图以及逻辑上的集中式管理。SoftSpace考虑到LEO卫星计算存储能力受限,未在LEO从属控制器部署自主管控功能,但是随着星载处理技术的飞速发展,未来可以考虑在LEO按需部署部分管控功能,以满足时延敏感型业务需求。

网络功能虚拟化将物理设备和网络功能分离,进一步采用资源虚拟化技术对物理网络的链路、设备和服务进行抽象,支持在共享的物理设施上进行网络服务的重构,从而实现网络功能的灵活部署和管理。通过SDN与NFV技术的融合应用,能够有效应对星地网络环境和能力强差异等带来的天地融合组网挑战。BERTAUX等^[9]探讨了不同场景下采用SDN/NFV技术增强宽带卫星网络的能力,如在虚拟网络运营(VNO)服务场景,通过对卫星hub的虚拟化,可以为每个VNO分配虚拟hub,支持VNO进行灵活按需的服务编排,结合SDN技术的网络可

编程性以及数据平面的可编程性,可以进一步支持VNO进行流量控制,综合实现动态的SLA服务保障。SHENG等^[10]提出了采用SDN/NFV的灵活可重构宽带卫星网络体系架构FBSN,通过虚拟化支持不同异构资源的统一管理,结合网络切片技术实现面向任务需求的资源分配,进而提出了资源管理架构以及基于时间演进图的资源分配策略,从而实现卫星网络的灵活可重构。欧盟H2020计划支持的VITAL项目^[13]探索了利用SDN/NFV实现星地一体化的方案^[11-12],包括卫星通信网络组件和功能的虚拟化、星地资源协同管理等问题^[13],通过试验平台和仿真器验证了SDN/NFV技术能够提高资源分配的效率 and 灵活性。

移动边缘计算MEC、机器学习等为网络的高质量服务、智能化管控等带来了更多的机遇,也是满足下一代新兴应用低时延、高可靠服务需求的重要技术途径。其中,MEC通过提高边缘网络的计算和存储能力,降低网络操作和服务交付时延,有效提升用户服务质量体验。如参考文献[14]将MEC融入星地一体化网络设计,以改善用户体验与网络服务质量。欧盟支持的Sat5G项目^[15],通过融入MEC、边缘分发等技术,成功演示了卫星与5G融合的边缘服务效果。如利用5G多链路卫星和地面网络进行基于MEC的无线分层视频流传输、利用混合回传网络进行5G本地内容缓存演示,表明MEC技术在天地融合网络的应用能够提供更可靠或更高质量网络服务。此外,利用机器学习等技术解决卫星网络拓扑动态性、用户服务质量、故障管理等带来的组网挑战也是当前的研究热点。如参考文献[16]通过在网络控制器中引入强化学习方法进行QoE感知路径选择,构建了QoE感知空间路由方案。参考文献[17]基于分层深度Actor-Critic方法提出了卫星互联网控制与频谱资源分配的联合决策方法,表明人工智能技术是解决路由优化、资源分配等复杂网络问题的有效手段。

综上,SDN/NFV技术能够有效实现多维异构融合,提升网络管控灵活性;利用人工智能的模糊信息、非线性处理和学习能力,能够进一步提升大规模、动态、异构网络的管控能力。

2 智能化与虚拟化驱动的天地融合网络体系架构

天地融合网络旨在通过充分发挥空、天、地信息技术的各自优势,为各类不同用户提供实时、可靠、按需服务。其主要应用场景从广域覆盖、应急通信等典型场景,进一步扩展至全息通信、智慧感知等新兴业务,对网络提出了低时延、高可靠、高能效和超高密度连接等多样化需求。为此,本文针对天地融合网络时空尺度大、拓扑动态强、链路异构等特性,通过深度融合软件

定义、网络功能虚拟化、人工智能等信息网络技术,探索面向动态拓扑、异构链路与多样化需求的天地融合智能组网体系架构,提出了基于“感知平面—数据平面—控制平面—智能平面—应用平面”的天地融合网络体系架构,如图1所示。

通过引入软件定义网络数控分离的思想,将网络架构划分为数据平面、控制平面和应用平面,通过数据与控制相解耦,实现控制集中化,进一步利用网络功能虚拟化解决多维异构基础设施带来的资源管理难题,支持全局、宏观的网络资源调度以及敏捷、灵活、按需的网络重构。结合人工智能技术对网络管控、运维等带来的机遇,引入感知平面和智能平面,感知平面对底层数据平面的网络资源状态进行感知,并在智能平面进行学习、推理,最终生成面向业务需求的控制策略,从而形成“感知—学习—决策”闭环的网络智能管控机制。感知平面属于逻辑功能平面,其功能实体一般与数据平面网元紧耦合,通过新型带内遥测技术,能够实现灵活的感知功能按需部署,支持实时按需的网络数据采集,为网络智能化提供基础数据支撑。智能平面则利用丰富的算力资源,部署不同规模和形式的智能训练、推理引擎,对感知数据进行分析,实现业务意图和网络资源状态的分析、预测与匹配,形成控制平面可执行的智能化控制策略。控制平面是智能控制策略的具体执行者,通过标准的接口将相应的动作决策下发至数据平面,支持策略的实时精准下发。

下面详细描述该智能组网体系架构,并对天地融合智能组网相关的资源池化、感知功能按需部署、高效自主管控以及网络智能框架等关键技术进行探索。

(1) 多维异构数据平面资源池化

数据平面主要由各类异构的网络基础设施组成,包括地面的通用互联网、4G/5G等移动通信网络以及天基的各种卫星系统及其配套地面系统。其异构性一方面体现在地基网络和天基网络在体系结构、体制和接口等各方面的差异性;另一方面体现在天基网络涉及遥感卫星系统、通信卫星系统、中继卫星系统、导航卫星系统、空间站系统等诸多空间信息基础设施,所采用的通信手段、通信体制和数据格式等具有高度异构特性。面对这种物理网络与设备的差异性带来的资源一体化调配难题,采用资源虚拟化技术对物理资源进行抽象、映射、封装等,形成统一的虚拟资源池。在此基础上,对于用户的服务请求,天地融合网络控制器基于虚拟资源进行按需的资源编排,不再受限于星地物理资源异质、能力差异大等异构特性的约束,资源的调度更灵活。然而,天地融合网络的大时空尺度、高动态拓扑等特性为虚拟

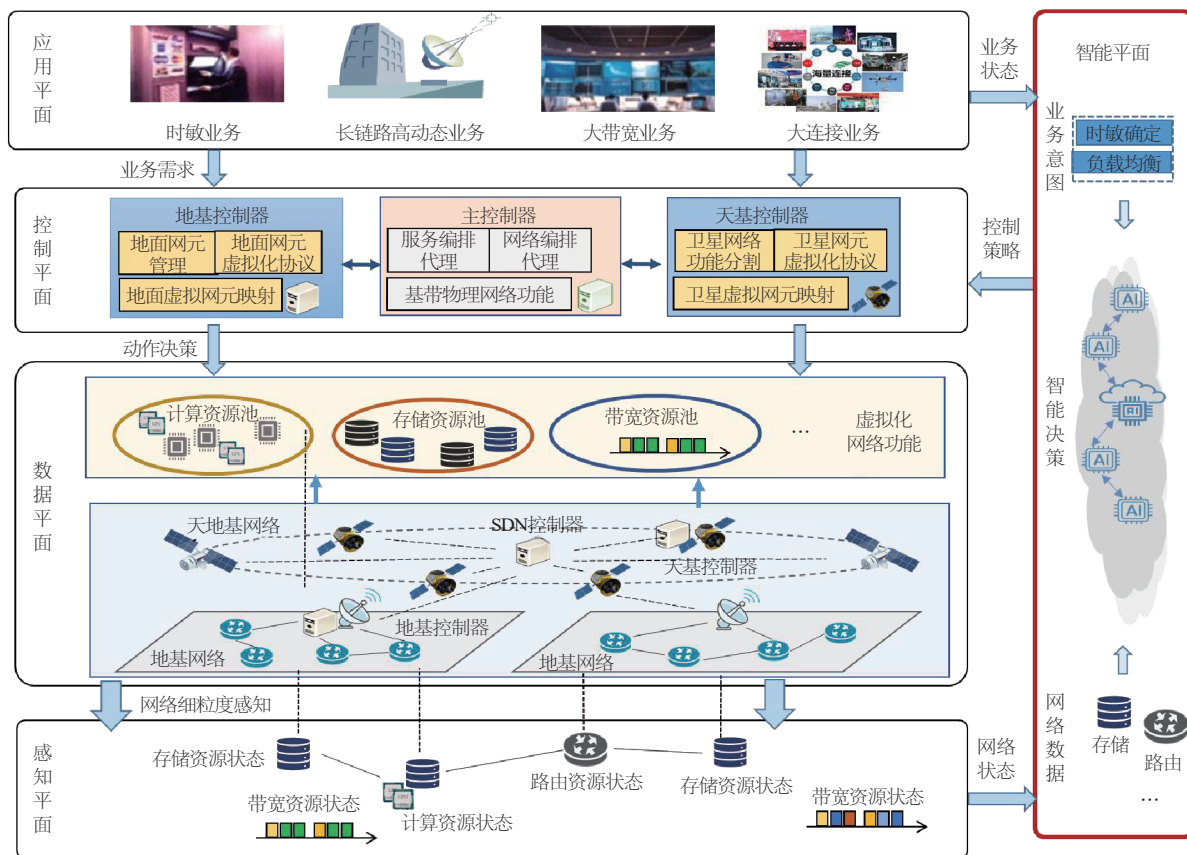


图1 天地融合网络智能组网体系架构

资源池的构建与动态管理带来了挑战。一方面在时间尺度上，卫星节点的高速移动，导致相对地面用户的天基资源类别、数量等随时间呈现高动态性；另一方面在空间尺度上，星间、星地链路跨度大，物理资源的动态变化，难以实时在虚拟资源池中实时更新，进而影响控制器资源调度的精确性。

现有时变图理论^[18]能够解决部分问题，通过结合卫星运动的周期特性，进行时间维度的划分，从而周期性地更新天基节点对应的虚拟资源，这在一定程度上能够解决拓扑高动态导致的虚拟资源池维护难题。但是，采用时变图模型刻画资源动态性，其精确性与离散时隙紧相关，如何平衡时变资源描述的精确性和由此带来的存储资源开销是一个难题。此外，作为下一代天基资源的主要组成部分，低轨卫星星座的拓扑变化频繁（高速运动的周期低于2 h），如何实现实时的资源状态收集并及时更新相应的虚拟资源池是值得研究的。针对此问题，可进一步引入时间网格模型设计天基资源池化方法。时间网格模型^[19]将整个空间分为小立方体（称为“网格”），从而可以通过网格而不是节点位置坐标索引天基节点资源。通过以网格为单位进行虚拟资源划分，对

于地面和高轨控制器来说，其管理域内的虚拟节点是固定的，变化的只是资源的类型和数量。而且，对于资源的时变性，在设计时间网格模型时，可以根据节点的空间位置变化的周期特性，动态调整网格的大小，从而使网格对应的虚拟资源类型、数量相对稳定。不仅如此，网格不一定是小立方体的形式，可以是一个涵盖部分天基节点的空间立体区域，只要能够使得每个网格涵盖的天基资源类型、数量相对稳定或者动态变化频率降低即可。综上，结合时变图理论和时间网格模型，可有效解决天地融合网络大时空尺度、高动态拓扑带来的虚拟资源池的构建与动态管理难题，为一体化的资源灵活调度提供基础支撑。

(2) 多域协同的感知功能按需部署

感知平面由具有网络状态感知能力的设备或模块组成，感知功能可以内嵌在数据平面，负责对数据平面进行网络状态采集，以支撑上层资源智能调度对实时、细粒度网络状态感知的需求。感知功能的实现可以是传统的主动测量、被动测量方式，但应以基于数据平面可编程的新型带内网络遥测为主。一方面带内网络遥测直接从数据平面收集数据，在避免海量探针通信及控制器计

算压力的同时,能够实现更细粒度的网络状态感知,支撑精细化的资源智能调配;另一方面,控制器通过下发可编程逻辑指令,能够改变数据平面可编程交换机的感知功能,从而实现按需的感知功能部署。

多域协同的感知功能按需部署架构如图2所示,将感知功能作为一种特殊的资源,进行统一的调配,实现面向智能管控需求的资源感知策略按需部署,建立状态分域采集、关键状态汇聚、感知策略按需部署的感知机制。首先,考虑到天地融合网络时空尺度大的特点,进行域的划分,由域控制器进行状态分域采集,通过机器学习等技术对网络状态数据进行分析,提取影响网络资源调配的关键状态参数并上传至主控制器;主控制器通过汇聚各域的网络关键状态参数,进行资源的智能调配;然后,主控制器根据资源与业务匹配性能,评估各域网络状态感知能力,并根据业务需求,生成对各域状态感知维度、感知精度等的感知指标要求,下发给各域控制器;域控制器根据上层控制器的感知指标要求,优先调度被动测量资源,进一步对带内遥测感知资源进行编排,根据感知指标要求按需下发可编程逻辑,实现按需资源状态感知,在此基础上,结合探针等主动测量方式提高感知精度,以达到上层控制器对感知精度的指标

要求。通过多域协同的感知资源编排实现感知功能的按需部署,在满足资源智能管控对网络状态感知需求的基础上,实现网络感知资源的高效利用。

(3) 多层多域混合式网络自主管控

在基于网络虚拟化实现异构网络设备资源池化的基础上,进一步采用软件定义网络设计天地融合网络的组网控制机制。由于天基网络是由分布在不同轨道上的卫星组成的,其网络节点的空间位置不固定,星间链路持续性动态切换,导致天基网络拓扑大范围、持续性动态变化,显著增加了天地融合网络自主管控的难度。一方面,在大时空尺度下,传统SDN集中管控部署困难,难以保障业务的实时响应,需从管控灵活性、实时性等角度设计合理的管控架构;另一方面,与地面网络相比,天地融合网络业务类型更加多元,业务处理需求多样化,控制平面需要具备资源按需动态管控能力,从而能够根据用户和业务的服务要求进行资源的按需匹配。然而,天基网络资源时变特性增加了资源自动化管理与编排的难度。

控制平面主要提供组网控制、接入控制、网络编排、拓扑管理、路由计算等管控功能,负责根据业务需求和网络状态生成管控策略,并将管控策略的结果翻译成转发指令下发至数据平面,按需为用户提供快速的网

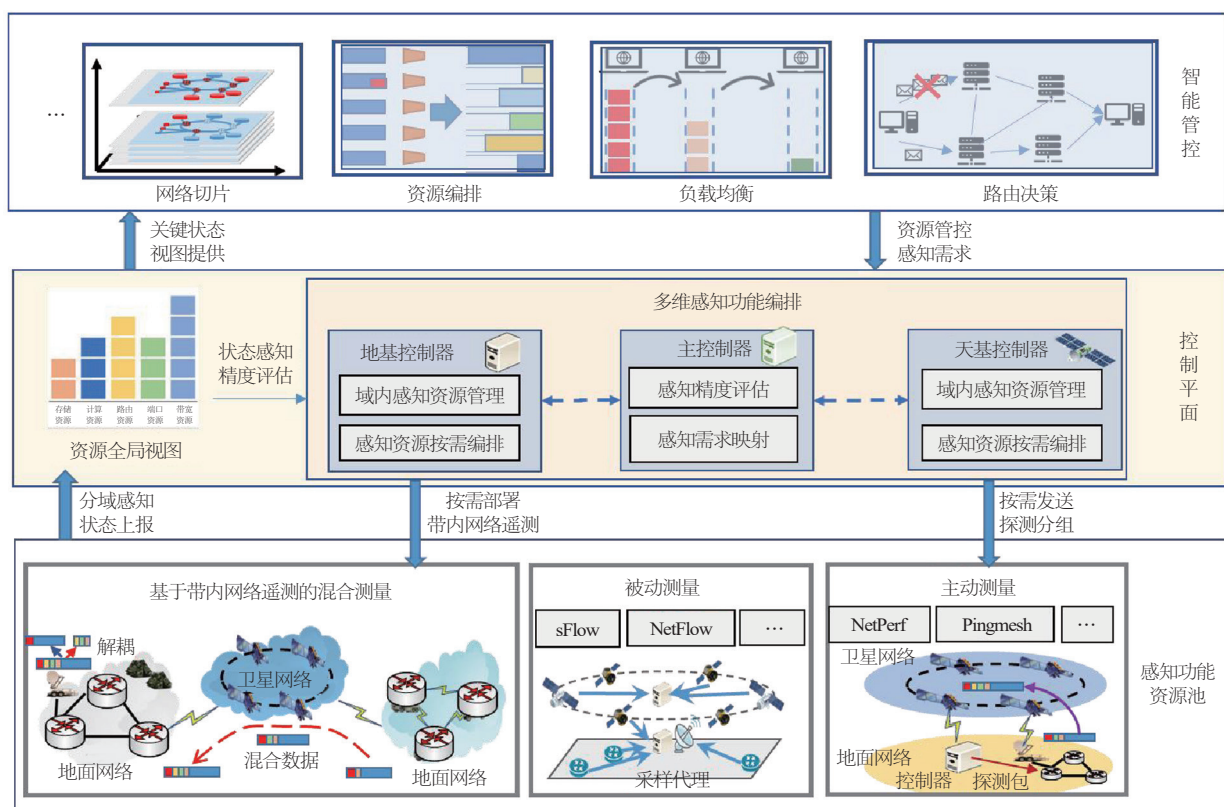


图2 多域协同的感知功能按需部署架构

络服务。为了实现业务的快速响应与按需部署,可从多层多域管控架构和功能分割机制两个方面对控制平面进行设计^[20]。考虑到天地融合网络的大时空尺度特性,采用集中式控制模型将导致海量控制信息汇聚到控制器节点。目前的主要解决方案是结合层次化、分布式控制方法,构建多域层次化的管控架构,通常在地面部署控制器的基础上,再利用GEO卫星节点覆盖范围广、与地面站指向关系固定、数据处理能力相对强等特性,设置多个GEO域控制器。进一步,针对时延要求较高的业务,在中低轨卫星节点上进行功能网元的按需动态部署。为了适应星载网络、存储、计算资源受限的特性,尤其是中低轨节点资源强约束特点,一方面基于轻量化容器等技术建立支持分布式协同处理的云化平台;另一方面基于微服务理念对传统复杂的单体功能网元进行柔性分割,主控制器根据业务需求分布特性以及各控制器资源特性按需部署虚拟网元。一般来说,地面主控制器具备完整的接入功能、核心网功能、网络管控功能等;高轨域控制器需要具备天基/空基/海基用户以及偏远区域地基用户的接入功能,并根据域内业务分布特性设计轻量化的核心网功能以及网络管控功能;中低轨节点由于移动速度快,不适合部署固定的网元功能,可以根据业务需求按需动态部署虚拟网元,并且结合节点移动轨迹的可预测性,进行服务迁移的预规划,避免中低轨接入点切换导致业务中断。综上,通过多层分域控制降低大时空尺度、高动态、异构特性带来的控制复杂性,结合网络功能柔性分割以及基于微服务理念的中低轨边缘网络

功能按需动态部署,减少由于长距离星间链路导致的控制信令传输时延,提高天地融合网络的业务响应能力。

对于资源的按需动态管控,主要需要应对天基网络时变特性带来的资源高效管理与灵活编排难题。为此,基于时变图论和时间网格模型的虚拟资源池,进一步提出了虚拟资源池管理与调度机制,以实现网络服务能力与海量业务需求的精准适配。如图3所示,首先,在多层多域管控架构的基础上,将中低轨卫星网络按照网格进行域的划分,根据高轨卫星覆盖范围设置不同的高轨域控制器。为了尽可能地降低中低轨节点移动导致的资源状态更新频率,高轨域控制器根据各个网格的资源时变特性,将每个网格映射为静态虚拟资源节点和动态虚拟资源节点。其中静态虚拟资源节点表示在一定时间片内网格中固定的虚拟资源,可以用确定的资源类型和数量进行精确表征,动态虚拟资源表示在此时间片内由于卫星节点移动而动态变化的资源。域控制器采用更细粒度的时变图刻画动态虚拟资源,并统计该时间片内动态资源类型集合及其大小范围,作为该时间片内的动态资源的模糊描述。高轨域控制器实时监控、收集并更新域内静态虚拟资源节点和动态虚拟资源节点的状态,将静态虚拟资源节点精确描述以及动态虚拟资源节点模糊描述上报给地面主控制器。通过将网格资源表征为静态虚拟资源节点和动态虚拟资源节点,能够有效降低虚拟资源池的更新频率,支撑资源的灵活编排。进一步地,主控制器根据不同场景和业务的需求,优先为高优先级业务预留静态虚拟资源;对于低优先级业务,特别是对时

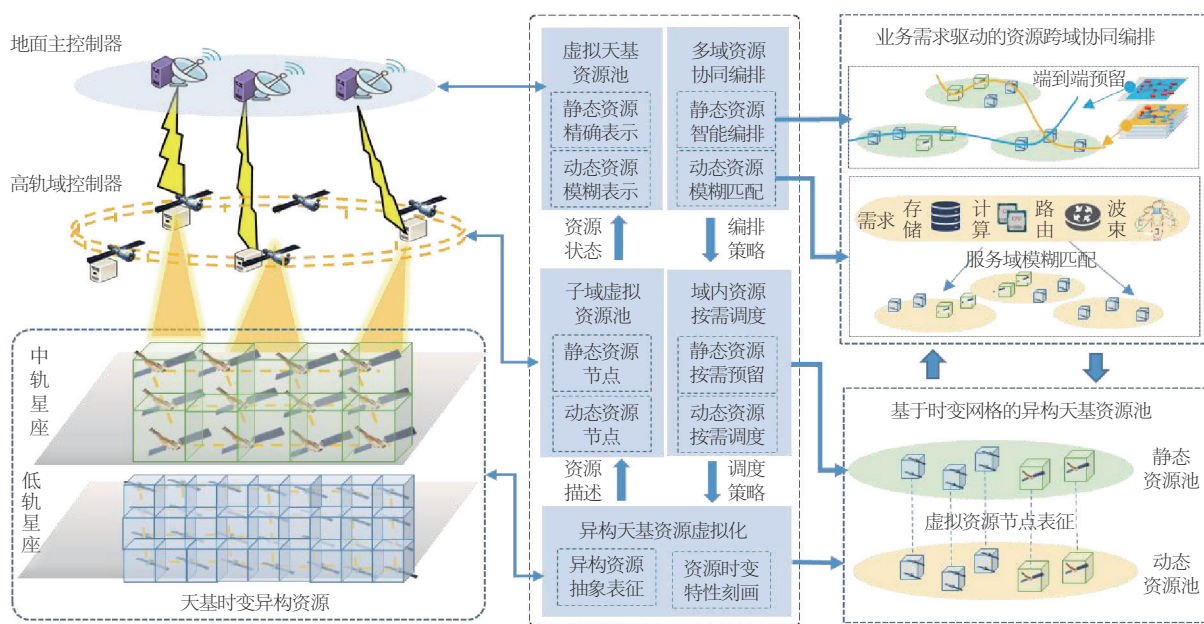


图3 多层多域混合式资源管控示意

延等要求不高的业务，在动态虚拟资源池中进行资源的模糊匹配，通过与域控制器协同确定业务匹配的子域，然后将业务需求交付给相应的域控制器。域控制器根据业务需求，为高优先级业务预留相应的静态虚拟资源，采用基于时变图理论的动态资源调度策略为低优先级业务提供按需的服务保障。通过主控制器与域控制器的协同进行静态和动态虚拟资源的按需调配，能够实现业务需求驱动的网络能力按需保障。

(4) “云-边”协同的集中式与分布式网络智能框架

不断涌现的新业务和应用场景对天地融合网络提出了更高的要求，网络控制应该以AI为基础实现泛在的智能管控能力。为此，将网络智能管控功能从控制平面解耦，构成智能平面。智能平面主要应对天地融合网络大时空尺度下分布式资源的智能管理和调度难题，利用人工智能技术提升网络资源编排和管控的性能。因此，在传统SDN控制平面的基础上，将资源映射、路由优化等

与智能学习强依赖的管控任务进行解耦，部署在智能平面以便充分利用网络的智能化资源。而对于设备管理、用户鉴权等不需要或者对智能学习依赖较弱的管控任务则依然由控制平面负责。

如图4所示，智能平面由AI用例、AI模型、数据、算力等智能管控的AI要素资源组成，通过对AI资源的按需编排与调配实现面向业务需求的资源智能管控能力。首先，智能平面的部署应适应天地融合网络的复杂结构以及资源特性，可采用“云-边”协同的集中式与分布式混合智能框架。地面作为集中式云端，主要负责智能资源的管理，并且根据各域网络特性按需分发AI用例、AI模型等。具体来讲，一方面云端将汇聚大规模网络状态数据，采用数据清洗、增强、统一表征等技术对多域异构数据进行融合处理，形成智能学习所需的数据资源；另一方面，针对各域业务需求特性和网络资源特性，按需部署智能管控功能，并为智能功能的云端离线训练提供算力、数据资源。

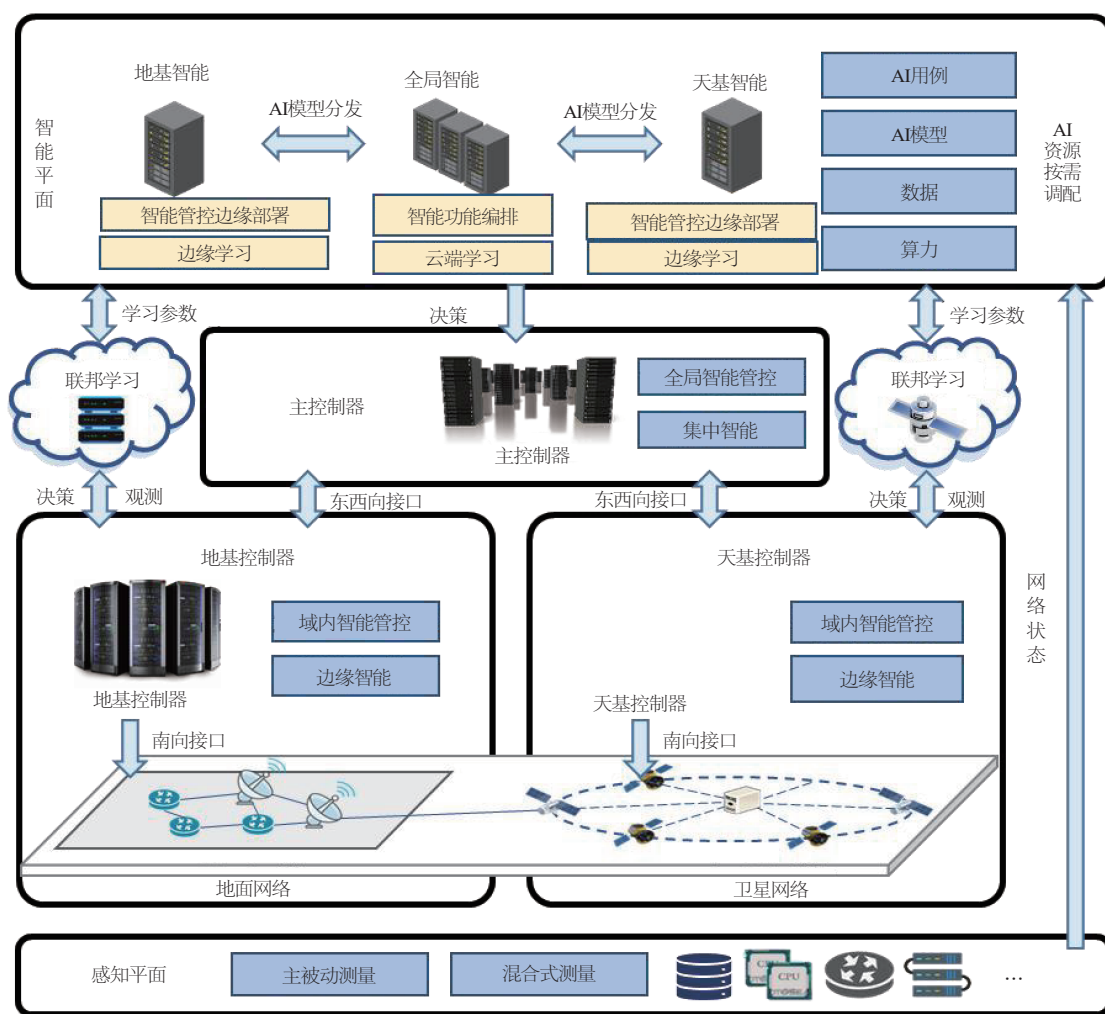


图4 “云-边”协同的集中式与分布式网络智能框架

同时,在各个子域内分布式部署具有一定计算存储能力的边缘智能节点,一方面能够通过分布式计算实现复杂智能控制功能的部署;另一方面,为了适应网络复杂动态属性,智能管控策略需要具备自优化自演进能力。因此,引入联邦学习理论,实现各域的本地策略智能优化,从而提高面向本地状态的智能能力实时响应。各域边缘智能节点根据域内感知节点采集的网络环境状态,在与网络环境的交互中进行本地网络策略优化,通过参数共享的机制将模型参数或中间结果上传至云端。云端基于各域的局部网络状态参数和网络整体性能对优化结果进行聚合,并将优化结果下发至各域控制器,进行下一轮的学习迭代,从而实现各域的自感知、自适应。

3 结束语

本文针对天地融合网络的时空大尺度、星地能力差距大、业务需求多样化等特性,结合软件定义网络、网络功能虚拟化、人工智能等先进网络技术,提出了由“感知平面—数据平面—控制平面—智能平面—应用平面”组成的天地融合网络体系架构。在SDN架构的基础上,引入感知平面和智能平面,感知平面获取底层数据平面的网络资源状态并上传到智能平面,通过学习、推理生成面向业务需求的控制策略,形成了“感知—学习—决策”闭环的网络智能管控机制。进一步,提出了多维异构数据平面资源池化、多域协同的感知功能按需部署、多层多域混合式网络自主管控、“云一边”协同的集中式与分布式网络智能框架等,提升了天地融合网络的自感知、自适应、自优化能力。

参考文献:

- [1] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 437-461.
- [2] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [3] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [4] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 2-10.
XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [5] GARDIKIS G, COSTICOGLOU S, KOUMARAS H, et al. NFV applicability and use cases in satellite networks[C]//Proceedings of 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 47-51.
- [6] AGAPIOU G, FERRÚS FERRÉ R A, KOUMARAS H, et al. SDN and NFV for satellite infrastructures[C]//Proceedings of 2016 IEICE ICTF. Institute of Electronics, Information and Communications Engineers (IEICE). [S.l.:s.n.], 2016: 1-4.
- [7] LI T X, ZHOU H C, LUO H B, et al. SERVICE: a software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(3): 703-716.
- [8] XU S, WANG X W, HUANG M. Software-defined next-generation satellite networks: architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Access, 2018, 6: 4027-4041.
- [9] BERTAUX L, MEDJIAH S, BERTHOUE P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 54-60.
- [10] SHENG M, WANG Y, LI J D, et al. Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network: resource management architecture and strategies[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 127-133.
- [11] Virtualized hybrid satellite-terrestrial systems for resilient and flexible future networks[EB]. 2017.
- [12] FERRUS R, SALLENT O, AHMED T, et al. Towards SDN/NFV-enabled satellite ground segment systems: end-to-End Traffic Engineering use case[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 888-893.
- [13] AHMED T, FERRUS R, FEDRIZZI R, et al. Satellite gateway diversity in SDN/NFV-enabled satellite ground segment systems[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 882-887.
- [14] HUANG X Y, ZHAO Z F, MENG X J, et al. Architecture and application of SDN/NFV-enabled space-terrestrial integrated network[C]//Space Information Networks.[S.l.:s.n.], 2016: 244-255.
- [15] LIOLIS K, GEURTZ A, SPERBER R, et al. Use cases and scenarios of 5G integrated satellite-terrestrial networks for enhanced mobile broadband: the SaT5G approach[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(2): 91-112.
- [16] QIU C, YAO H P, YU F R, et al. Deep Q-learning aided networking, caching, and computing resources allocation in software-defined satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5871-5883.

- [17] SHAH H A, ZHAO L, KIM I M. Joint network control and resource allocation for space-terrestrial integrated network through hierarchal deep actor-critic reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5): 4943-4954.
- [18] 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.
- [19] LI J, LU H C, XUE K P, et al. Temporal netgrid model-based dynamic routing in large-scale small satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 6009-6021.
- [20] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向6G的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
- SUN S H, DAI C Q, XU H, et al. Survey on satellite-terrestrial integration networking towards 6G[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(6): 891-901.

[作者简介]



张婷婷（1989-），女，北京理工大学预聘助理研究员，主要研究方向为天地融合网络、软件定义网络、网络功能虚拟化、智能组网。



武楠（1981-），男，北京理工大学教授，主要研究方向为天地融合网络、未来网络体系架构、智能组网技术。



姚海鹏（1983-），男，北京邮电大学教授，主要研究方向为未来网络体系架构、无线通信网络、软件定义网络、人工智能。