



专题：新型网络技术

星算网络——空天地一体化算力融合网络新发展

邓平科, 张同须, 施南翔, 张童, 邵天竺, 郑韶雯
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 面对不断增长的算力和网络需求, 6G 空天地一体化网络通过网络集群优势突破单点算力和传统网络传输的极限, 形成以算为中心, 以网为根基, 云、边、端、网、数、算深度融合的新型空天地一体化算力融合网络。首先介绍了算力网络和空天地一体化网络的发展现状, 并结合 6G 空天地一体化算力融合网络的需求提出了星算网络的概念。其次, 对星算网络的分层系统架构中的空基网络、天基网络和地面网络进行描述, 并提出由算网资源层、算网抽象层和算网编排层组成的逻辑架构。之后, 针对未来星算网络面临的算存问题、可信传输问题、天基算力编址寻址和高移动性算力路由问题提出对应关键使能技术。最后, 对星算网络的典型应用场景进行了讨论和展望。

关键词: 天基云计算; 星算网络; 移动边缘计算; 空天地一体化网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022138

Computing satellite networks—the novel development of computing-empowered space-air-ground integrated networks

DENG Pingke, ZHANG Tongxu, SHI Nanxiang, ZHANG Tong, SHAO Tianzhu, ZHENG Shaowen
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: Facing the increasing demands for computing ability and network access, the space-air-ground integrated networks in 6G systems is expected to surmount the limits on a single point of computing ability and traditional network transmission through the advantages of network cluster, where the novel space-air-ground integrated networks that deeply integrate cloud, edge, terminal, network, data, and computation is subsequently formed by taking computing ability as the core and network infrastructure as the foundation. Initially, the current situation and development in existing computing force networks and space-air-ground integrated networks (SAGIN) was introduced. Along with the demands for 6G computing-empowered space-air-ground integrated networks, the concept of satellite computing networks was defined and the co-existed system of computing capability and communication networks was further discussed. Then, the space networks, air networks, and ground networks of the layered satellite computing network architecture were discussed. Based on that, its logical network architecture that includes computing resource layer, computing abstract layer, and computing orchestration layer was further introduced. After that, the key technology

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62032003)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62032003)



enablers with respect to computing and storage issue, trusted transmission issue, satellite computing force addressing issue, and high-mobility computing force routing issue was discussed. Finally, the typical application scenarios of satellite computing networks and envision its future was presented.

Key words: space-based cloud computing, satellite computing network, mobile edge computing, space-air-ground integrated network

0 引言

2019年11月,工业和信息化部(简称工信部)成立了IMT-2030(6G)推进组,我国正式启动6G的研发工作,6G网络在5G技术基础上进一步融合了卫星通信、大数据、云计算与人工智能等技术,使得“网络+算力”的特征愈加显著。随着6G从地面扩展到太空、空中、海洋、荒漠等自然空间,将形成大范围广域覆盖、泛在连接和算力更广泛分布。

鉴于此,本文对未来可能出现的6G空天地一体化算力融合网络进行了初步研究,并提出“星算网络”的概念,对空天地一体化算力融合网络可能出现的架构和所涉及的关键技术问题进行了讨论,并对其应用场景进行了展望。

1 空天地一体化算力融合网络的发展历程

1.1 算力网络发展历程

算力网络是国内首创的新型技术,是将网络转发、计算处理、资源存储等多项基础技术融合发展而来的创新技术。早在2019年,中国移动提出了“算力网络”的概念^[1],随后,多家运营商、设备商、科研院校等先后开展对“算力网络”的研究。

2020年9月,国内未来IP网络研究的主要组织——网络5.0产业联盟成立了“算力网络特设工作组”。同年4月,中国通信标准化协会网络与业务能力标准技术工作委员会(China Communications Standards Association Technical Committee 3, CCSA TC3)通过了“算力网络”总体技术要求等行业标准(简称行标)立项,并通过算力路由、算力交易等行标,初步建立了算力网络行标体系。

2021年5月24日,国家发展和改革委员会、中共中央网络安全和信息化委员会办公室、工业和信息化部、国家能源局联合印发了《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》,明确建设全国一体化算力网络国家枢纽节点,构建国家算力网络体系,标志着“算力网络”被正式纳入国家新型基础设施发展建设体系。

2021年11月,中国移动携手合作伙伴共同发布了国内首个算力网络白皮书《中国移动算力网络白皮书》,向业界提出算力网络发展倡议,体系化地提出了算力网络的目标、愿景、发展阶段和技术图谱,明确了算力网络分阶段的发展路线和各阶段的重点。中国电信发布的《云网融合2030技术白皮书》和中国联通发布的CUBE-Net 3.0网络体系也都把“算力网络”作为未来网络演进的重要方向。2022年1月,CCSA正式成立了算网融合标准推进委员会(TC621),积极推动算网融合标准的实施和产业化。此外,国内高校也启动了对算力网络关键技术的研究。

1.2 空天地一体化网络的发展历程

自1964年诞生以来,卫星通信已经发展到了第4代——卫星互联网阶段。随着卫星发射技术的革新及卫星建造成本的下降,卫星互联网技术得到了快速的发展。以Starlink低轨星座为例,单星容量已达20 Gbit/s,容量相当于单个5G基站,单星成本可低至50万美元。为了实现6G智慧泛在愿景目标,卫星通信被证明是一个非常有效的方法,但依旧无法替代地面网络。Starlink每月使用费用为99美元,单位流量成本仍高于5G移动通信,12 000颗卫星星座的通信容量仅能满足一个大型城市的全部通信需求。因此,地面网络和

卫星网络二者深度融合将成为下一代通信网络发展的趋势。

我国十分重视天地一体系统的研究与建设。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确提出要建设“高速泛在、天地一体”信息基础设施的目标,要求打造全球覆盖、高效运行的通信、导航、遥感空间基础设施体系。2020年4月,国家发展和改革委员会首次明确了新型基础设施的含义,将卫星互联网与5G、物联网、工业互联网一起纳入新型信息基础设施的范畴。

当前,天地一体国际标准远未成熟,6G尚处于愿景阶段,研究方向、典型应用场景和候选关键技术尚未达成产业共识,卫星网络与5G/6G实现融合尚需时日。

1.3 空天地一体化算力融合网络的发展现状

空天地一体化算力融合网络的发展驱动力主要有两点。一是地基与天基的融合在覆盖效果和拥塞控制和适应性上有很多优势,二是随着后5G及6G时代下所催生的新型应用要求超大带宽、极低时延和极高可靠性的性能需求(例如,将虚拟与现实世界高度融合来提供沉浸式体验的元宇宙)以及人们对未来社会全域泛在连接和智能普惠的终极愿景,通(通信)、感(感知)、算(算力)、空基、天基、地基一体化网络架构成为未来的发展方向已在工业界和学术界形成共识^[2-3],在通信网络、智能、算力等技术的赋能下最终实现自组织、自优化和自适应地适配差异化的应用服务,达到资源高效利用的目的。因此,软件定义网络(software defined network, SDN)/网络功能虚拟化(network functions virtualization, NFV)、云计算、人工智能等相关技术在空天地一体化算力融合网络中得到了广泛的研究、应用和发展。

星算网络作为算力网络的一部分,也是工业界关注的热点。事实上,智能星算不仅需要利用算力资源对航天器本身的运行状态进行控制,也

需要对空间目标的型号和行为进行在轨实时识别,还需要对陆地目标进行实时检测识别、追踪以及对地球大气进行实时预估。然而,为了实现这一目标,业界认为智算芯片平台是核心问题。解决方案有以下两种。

(1) 利用成熟的民用软/硬件平台,如美国目前使用的基于2017年3月英伟达公司针对深度学习算法推出的Tegra X2 SoC芯片而搭建的智能算力模块S-A1760 Venus、欧空局使用的基于英特尔Movidius的智算模块。而我国民用智算模块主要分两种,一种基于国外FPGA芯片而开发,如百度EdgeBorad边缘AI计算盒;另一种是自主研发的智算芯片,如华为Atlas 200。虽然这些芯片与国外相比在性能上没有差别,但由于抗空间辐照能力差,目前尚无空间的应用。

(2) 航天专用智算芯片,其可以有效解决民用智算芯片抗辐射能力差、可靠性难保障等缺点,如赛灵思公司推出的XQRKU060支持星上高带宽有效载荷等复杂算力任务、我国北斗双星使用的自主研发的龙芯IE和龙芯IF等。然而,目前的智算芯片的研发和智能算法之间是高度耦合的关系。由于一种芯片只适用于一类算法,新智能算法的出现,需要连同芯片一起更换,这对于卫星来说是很难实现的,因此工业界正在关注普适智算芯片的研发。

另一方面,为了有效融合算力、空基、天基、地基实现通感算服务,学术界在网络架构、关键技术方面也作出了积极的贡献。文献[4]提出基于SDN使能的5G地基和天基融合网络。在该网络结构中,文献[5]首次从系统的角度出发,提出在SDN控制网元和卫星网关联合分布的情况下采用不同最优时延算法的性能分析。文献[6]提出了一种基于博弈论的策略研究如何在SDN使能的天地混合网络中使用最优均衡负载来达到最优的期望效益。文献[7]讨论了基于SDN的卫星网络多路约束路由算法。文献[8]提出一个利用ICN和SDN使能的天地融合网络,研究了如何高效使用缓存



技术为用户提供高效的分发策略。

首先,文献[9]对边缘计算和云计算现状和发展做了整体概述。文献[10]进行卫星通信中天基计算讨论。之后,文献[11]从网络架构、挑战和开放问题角度概述边缘计算在天地融合网络中的使用,其核心思想是利用天基边缘计算节点以减小地基网络的计算量。文献[12]在该研究的基础上,提出了一个联合算力卸载模型策略。文献[13]从博弈论的角度出发分析了最优计算量卸载策略。文献[14]研究了基于云和边缘计算的 LEO 卫星网络,并提出了一个基于总能量消耗最低的计算量卸载算法。文献[15]提出了一个卫星 IoT 边缘计算架构,并基于边缘计算和 AI 技术提升了卫星数据的处理效率。文献[16]对 AI 在卫星网络中的作用进行了讨论,并对基于 AI 技术的天基网络数据处理方法进行探索。文献[17]提出了一个 AI 赋能的 6G 卫星通信网络总体架构并分析了基于区块链的 6G 卫星通信网络的稳定性。

本文重点面向天基算力网络架构开展讨论。天地一体化算力网络架构如图 1 所示,将星上网元与星上路由相结合形成天基星云算力节点,再由这些同时具备算力、管理和传输能力的算力节点通过有机编排构成具有传输、计算、存储能力

的星上虚拟单元。利用天基核心网和天基云技术将天基网络形成天基星云网络,并与星上边缘计算/CDN 结合,提供低时延大带宽业务,形成空天地一体化算力融合网络。

2 空天地一体化算力融合网络的架构

6G 空天地一体化算力融合网络作为 6G 网络的有机组成部分,在提供泛在连接的基础上,基于多星座、多体制、多接入融合形成天地一体分布式自治网络,实现“算力上空天,星云做算力”,构建空天地一体化算力网络^[18]。这类新型网络也被称为“星算网络”。星算网络是一种空天计算的新形式,以空天计算赋能卫星网络,以计算服务连接通信、感知、导航等时空应用需求,实现异构星座互联、星地网络一体、应用数据共享等应用目标。

2.1 星算网络组成

随着对未来 6G 技术的深入研究,初步形成了集中和分布协同、分布式自治 6G 网络。一方面将更多的网络功能扩展到网络边缘,另一方面将面向全局的核心功能集中,通过云网融合、分布式协同的方式,达成支持更加复杂的业务的共识^[19]。6G 空天地一体化网络融合了地面网络、高轨的 GEO 卫星通信网络和中低轨非静止轨道

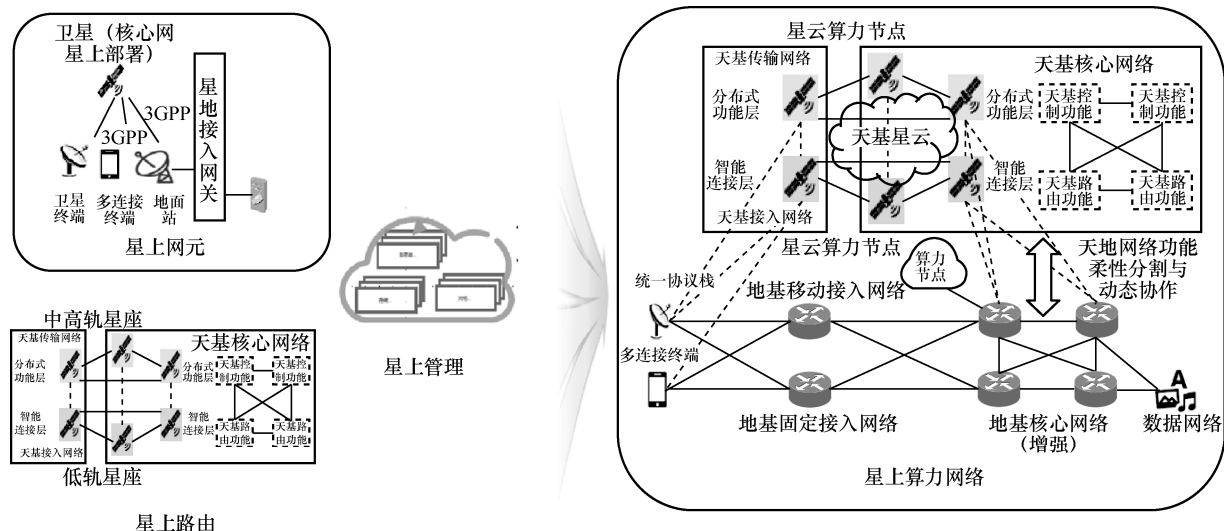


图1 天地一体化算力网络架构

(non-geostationary orbit, NGSO) 卫星通信以及高空浮空器、无人机等空基网络, 构成了高、中、低和地面网络的分层网络架构。这使得大型 GEO/MEO 卫星具备了高性能算力和轻量化核心网及天基数据中心的能力, 而 LEO 卫星和高空浮空器、无人机等则具备了接入网络和边缘计算的能力, 从而为实现空天地一体的高效计算体系提供了物质基础。星算网络的系统结构如图 2 所示。

2.1.1 天基网络

天基网络作为未来 6G 网络的重要组成部分之一, 它的加入使得蜂窝网络从传统的平面网络变成一张立体网络, 极大地丰富了蜂窝网络的服务范围, 也将为 6G 网络带来更多的应用场景和更丰富的应用服务。面向星算网络的天基网络将结合软件定义卫星技术, 同时引入地面网络的服务化技术和 NFV/SDN 技术, 基于高性能硬件模块和统一接口搭建高算力卫星节点, 通过星间链路、

自主路由、无缝组网、大规模部署、自动维护等技术构建星云算力节点, 实现基于空天网络的算力系统。在此基础上, 将边缘技术和云边协同引入天基网络, 使得卫星在轨实现协同计算。

2.1.2 空基网络

空基网络属于局部覆盖网络, 一般部署在地面移动网络无法覆盖的地方, 作为地面网络的补充。空基节点从部署方式上看具有典型的稀疏性, 通过用户链路和馈电链路与地面及卫星网络连接。高空浮空器或长航时无人机作为空基节点, 一般具有滞空时间长、负载功率大、覆盖范围较大和覆盖区域相对固定等特点, 但其运动特性和地基节点类似。基于上述特点, 一般空基网络主要作为地基网络的边缘节点, 填补地面网络通信和算力的空白或盲区。因此主要应用于实时性要求较高的区域和中、小规模计算场景, 为河、湖、山区、荒漠等地广人稀地区提供应用能力。此外,

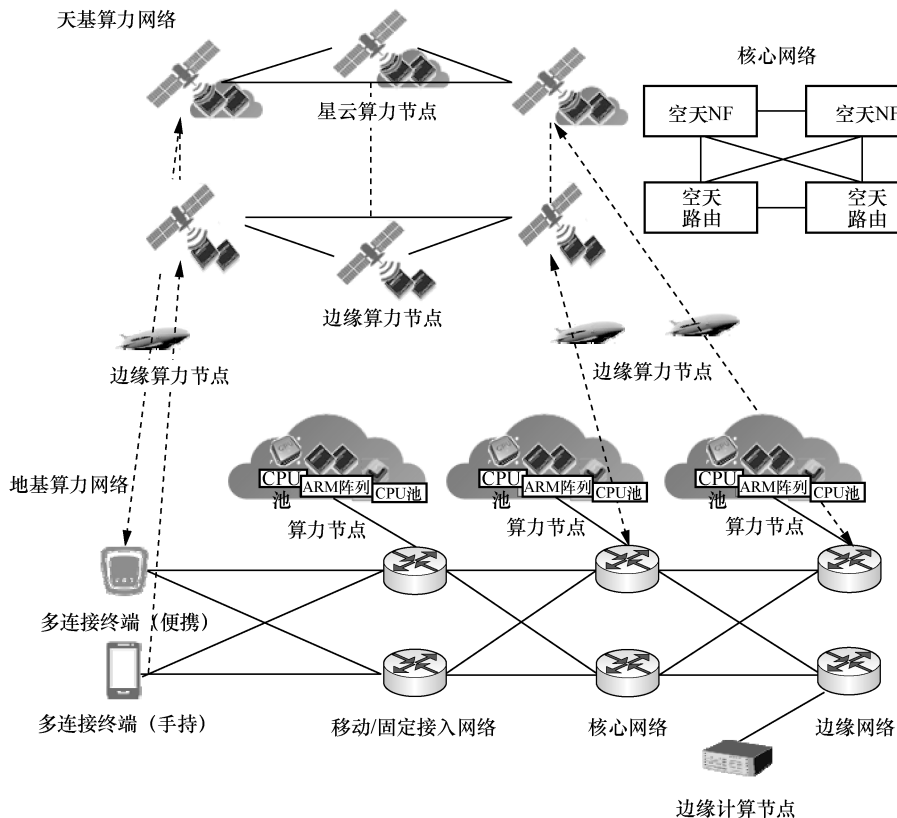


图2 星算网络的系统结构



空基网络还可以在应急情况下，作为地面网络的备份，提供应急通信和应急处理能力。

2.1.3 地面网络

在空天地一体化网络中，地面网络作为天基网络的地面锚固点和 6G 网络通信和算力供应的主要提供者，通过星地链路、地面光纤骨干网和高性能可编程交换机等网络设备以及具备通信及算力感知和调度的核心网中心或较为集中部署的数据中心，为人员密集区域和算力热点区域提供集中式的通信和算力服务。同时，通过算力感知和 SLA 制定策略，进行通信和算力的调度。利用地面光纤网络的带宽优势和可靠性优势，处理面向超大流量和海量数据的复杂计算；而面向超低

时延要求和小规模计算等工业现场，将利用分布式协同网络将更多的网络功能扩展到网络边缘，利用边缘计算节点为实时性强的小规模计算进行现场处理，并将资源占用等算力感知信息传回到核心网节点。

2.2 星算网络逻辑架构

根据星算网络的系统结构划分，可以将其从逻辑上分为算网资源层、算网抽象层和算网编排层。星算网络的逻辑结构如图 3 所示。

2.2.1 算网资源层

星算网络资源层是算力网络的坚实的物质基础，由实际网络系统与物理环境构成，包含节点设备、网络状态的运行监控和管制以及物理数据

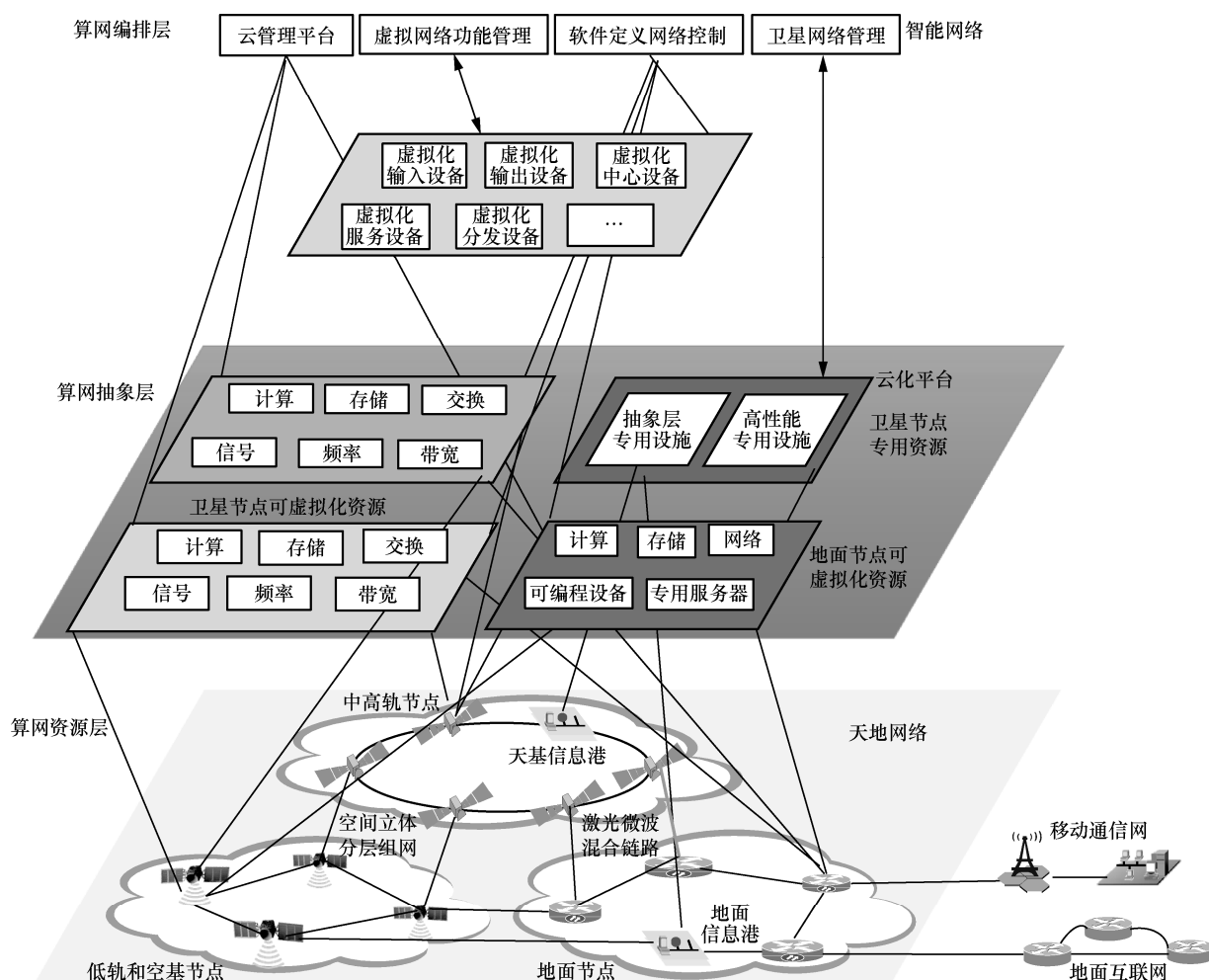


图 3 星算网络的逻辑结构

的感知反馈。具体包括中高轨卫星网络、低轨和空基网络以及地面移动网络和数据中心及其所属的网元设备信息、设备状态、网络流量、数据分布、路由拓扑、卫星星历等。空天地算力网络以高效、安全、节能为基础,形成云-边-端多层次、立体泛在的分布式算力体系,满足数据中心级和边缘网络级的算力需求。算网资源层不仅具有向上反馈、向下执行、可为用户提供全时全域的泛在连接功能,还具有数据采集回传的算网感知能力。网络资源层基于统一 IP 基座,实现云-边-端算力的高效互联,满足数据高效、可信的传输需求。用户可以随时、随地、按需地通过泛在接入网络接入无处不在的算力,共享网络算力的服务。

2.2.2 算网抽象层

随着应用对于算力提出的专业化需求越来越高,能够提供算力的软、硬件出现了多样化的异构形态,其存储、计算、交换方式甚至信号类型等要素各不相同。为了能够在系统中对算力进行感知和统一调度,构建了算网抽象层,将多种芯片架构中的多样性算力统一抽象出来,统一抽象为计算、存储、交换、带宽、频率、信号等虚拟算网功能,并将部分特殊资源抽象为专用算力感知单元。通过屏蔽异构硬件差异,减少用户跨架构编程和迁移的代价,使得应用只需要关注计算表达,而无须关注计算在硬件上的具体实现。

2.2.3 算网编排层

算网编排层是星算网络演进的控制核心,由各类面向应用的子平台构成,包括云管理子平台、虚拟网络功能管理子平台、软件定义网络控制子平台以及卫星网络管理子平台等多个系统级子平台。通过南向接收来自算网抽象层的弹性模型服务(elastic model service, EMS)归一化度量数据后,经过统计分析生成决策机制,并借助网络智能化、数字孪生等技术实现整体网络功能和网络算力的自主、自治及闭环网络管理运维等操作。

基于前期论证分析和初步仿真,本文认为上

述架构是合理可行的。下一步将开发星载核心网软、硬件平台原型系统,开展地面模拟试验,并寻找适当的时机选择卫星进行搭载,在轨开展星算网络的原理性验证和业务试验。目前已初步完成原型平台的硬件设计,正在进行软件方案的设计工作。

3 星算网络的核心技术

3.1 多级池化分流算存技术

随着未来 6G 面临的超低时延、超大数据量、类脑 AI 等复杂业务应用的出现,这些应用不仅使网络流量正在以前所未有的速度增长,还产生了巨大网络数据量的存储和计算需求,这给星算网络的存储和计算带来了巨大的挑战。通过存算一体技术,将多种类型的计算和存储集成到一个芯片上,用以消除海量数据存取和超大算力处理并行的时延,存算一体技术可以消除传统的数据中心集中式存储产生的“存储墙”瓶颈的问题,通过直接利用存储器结合内部算数逻辑单元实现对数据的就近处理。通过云原生技术,对星算网络中的多类异构计算架构进行统一抽象和虚化,实现对全局数据资源的动态高效存储和对海量算力的实时处理,形成多级虚拟化的存算一体单元,最终形成多级池化分流,解决数据洪流和算力分配不均衡的问题。通过多级池化分流的算存一体技术,有望构建新的分布式计算机体系架构,实现空、天、地基的接入端算存,传输路由端算存和中心端算存。通过算力编排层中的智能算法将数据和算力按用户行为进行动态分配,保证星算网络高效可靠的服务。

3.2 基于区块链的可信传输技术

算力的加入,使得网络从一种基于概率的/尽力而为的传输转向一种可信的传输。当前缺少面向空天地一体化的可信网络传输方法和统一的可靠算力传输机制,因此数据在异构网络且不被信任的天基、空基和地基节点上进行接入和多跳传输时容易出现各种各样的差错。事实上,空天地网络的高



异构性也使得追踪数据的出处变得非常困难。

为了提供可信的算力服务,一方面,用于个性化服务而无处不在的用户日志数据可以追踪节点的行为,并记录节点的日常活动;另一方面,基于算力的加持,未来星算网络对可信传输的需求变得越来越高。由于区块链技术具有去中心化、透明化、不变性、可追踪性和可审核性等特点,因此区块链技术被认为是实现可信、智能、稳定和安全的星算网络的关键安全技术。

为了实现可信传输,一种方式是独立成链。在这种方式下,用户请求的数据通过网络感知得到的算力负载作为基础来划分成多个任务,每个任务在天基网络、空基网络和地基网络各自形成独立的区块链来保证在传输过程中的信息有效性和准确性。区块链作为一种分布式的共享数据账本技术,利用记录在区块链上的数据只能增加和难以篡改的特性,实现天基网络、空基网络和地基网络中的全流程监控。为了减小数据的占用量,重点记录各传输、计算节点的日志信息。

另一种方式是跨链联合传输^[20]。在这种方式下,若一个可信传输链中断,如卫星的高速移动经常出现用户脱离覆盖区,或者出于负载均衡的目的,需要通过一条中继区块链作为可信第三方来协助跨链合作。中继区块链不需要很大存储空间,因为它的作用主要是记录源和目的区块链交易的区块头信息。

3.3 基于天基算力的编址寻址技术

星算网络中的天基卫星相对地球高速移动,使得星算网络中的卫星存在全球高动态时变以及星间与星地链路的拓扑频繁变化,从而导致与地面固定位置对应的天基卫星编址不稳定。事实上,现有的地面IP编址和寻址无法直接应用于星算网络。IP地址的频繁切换,严重影响网络的可用性和用户体验。这些都导致基于现有逻辑IP编址与寻址效率低、不稳定、不易扩展。通过将空、天、地资源统一编址、寻址,可以有效解决甚至屏蔽

网络的动态性,实现编址与卫星移动相解耦,兼容现有的地面网络,支持可扩展、增量部署和差异化的多目标业务,确保IP编址的天地全网统一、唯一与兼容。

本文关注文献[21]所提出的基于星下点轨迹、递归可扩展的层次化IP编址方案F-Rosette,其核心思想是利用空间卫星的运动特征对全球地表位置进行层次化分区和编码,进而提出的一种基于天基算力的编制寻址技术。对于混合星座,其工作原理是通过递归连接星间链路,形成层次化卫星网络拓扑。每迭代一层,上一层的每个区块会被划分为 N^2 个不相交的子区块(N 为卫星的数量),因此可用以构造层次化的IPv6空间位置编址。最后,基于天基云网形成的算力,利用上述方法实现空、天、地统一的编址和寻址,打破异构网络之间壁垒,化异构互联为同构融合,在高动态环境下确保星算网络的稳定、高效、可扩展。

3.4 基于高移动性的算力路由技术

卫星高速移动所导致的卫星网络内部与地面网络之间连接关系的不断变化是一直困扰卫星网络及天地一体化网络路由机制设计的最重要难题之一,因此寻求一种不受频繁切换影响的路由机制变得越来越重要。

当卫星网络仅承载简单业务时,相对于星间链路的高速传输能力而言,卫星接入的业务负载较轻,发生网络拥塞的概率较低。此时,具有较低复杂度的静态路由算法就足以解决星座网络路由问题。然而,当需要承载宽带多媒体业务时,网络业务负载显著加重,且随着卫星规模增长,切分卫星运行周期内的静态拓扑片段难度急剧增加。时间片增长规模正比于链路切换次数,导致星上存储开销和维护开销急增,星上面临路由表爆炸问题,对网络可用性造成极大影响。考虑在星座网络中业务的地域分布极不均匀的特征,如果采用动态路由算法,则可以减小网络拥塞概率,提高网络的利用率和承载能力。基于这个思路,

可分为两个方案去设计：一为基于时隙空间的动态调整的路由算法，主要以时间和空间的动态规律来设计算法对星上路由进行流量调度；二为基于流量预测的智能路由算法，主要以机器学习或深度学习方法对流量的产生进行预测，并结合星历对星上路由进行路由调度。

4 星算网络的应用发展

广泛的连接服务、高度的网络异构性和巨大的网络动态性给星算网络带来了一系列性能最优化的挑战。然而，通过引入人工智能技术，赋予算力和存储能力的星算网络实现网络环境的感知、自组织和自适应的最优化有了可能。星算网络应用场景如图 4 所示。基于人工智能的星算网络的典型应用发展包括大带宽通信、位置导航、远程图像感知和物联网，具体如下。

(1) 大带宽通信服务

随着技术的快速发展，高吞吐量卫星通信可

以提供更大的带宽、更快的速度和更低的时延。通过 AI 赋能，它将能够极大地提升频谱使用率和传输效率并减少通信成本。与传统路由算法相比，通过深度学习算法在异构网络中实现流量控制可以减少 70% 的路由开销，同时提升 2% 的吞吐量^[22]。因此，可以预见 AI 赋能大带宽通信将促进天地算力网络智能化的发展，并在未来提供更多的应用场景。

(2) 位置导航服务

位置导航在政治、经济等方面的应用中已经成为不可或缺的关键技术。例如，它为无人驾驶的机动车和海洋船只提供安全保证。结合 AI 技术将更加有效地提升位置的准确性，并提供更多的便利服务。在交通网络中，深度学习技术已能处理一个小时前收集的数据，并实现未来 6 min 内 88% 精准度的行为预测^[23]。因此，人工智能技术能够辅助星算网络提供高精度的全域位置导航服务。

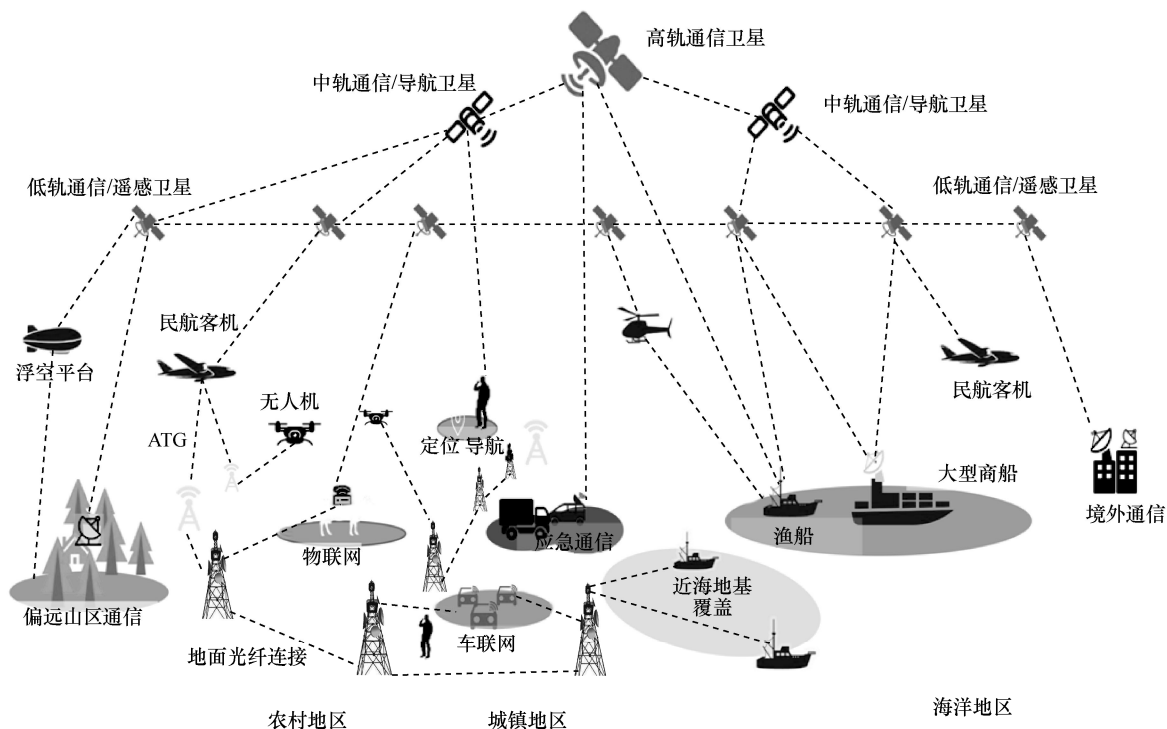


图 4 星算网络应用场景



(3) 远程图像感知服务

国土监测与资源保护等领域对高分辨图像的需求促进了远程图像感知技术的发展。随着算法和算力上的不断突破,卫星网络将实现各种远程感知数据的在轨实时解析。通过将深度学习应用于卫星在轨感知图像,能够实现精度为 94.7% 的对山体滑坡等情况的预测^[24]。

(4) 物联网服务

面向下一代物联网,在广域范围的巨量传感设备用来收集和分析采集到的数据。在轨部署人工智能是解决广域范围、海量数据挖掘和处理的一个很好的方法。例如,深度学习中的卷积神经网络通过分析大范围的电力输送线路的传感数据,能够实现精度为 83.2% 的故障告警^[25]。基于 AI 的星算网络可以通过大范围海量全域元组数据,为更多的物联网应用提供更快和更精准的决策服务。

5 结束语

本文引入了星算网络的概念,同时提出了一种基于算网一体的星算网络拓扑模型。该模型系统结构包括天基网络、空基网络和地基网络,并基于此从逻辑层面提出一个包括网络资源层、算力资源层和算力编排层的3层网络逻辑架构系统。此外,根据各自逻辑层的功能重点讨论了星算网络算力协同策略、多级池化分流算存技术、基于区块链技术的天地一体化网络可信传输、基于高移动性的算力路由等关键技术问题。最后,本文针对星算网络所涉及的典型应用场景进行简要讨论,并已开展了相关原型验证系统的研发和设计工作。由此可见,基于算网一体的星算网络将成为未来 6G 网络架构的重要发展趋势之一,为新的业务和应用的发展提供支持和动力。由于当前卫星载荷能力有限,星上核心网技术研究相关领域处于起步阶段,基于动态拓扑而构建巨型星云算力星座仍然任重道远。

参考文献:

- [1] 中国移动通信集团有限公司. 算力感知网络技术白皮书[R]. 2019.
CMCC. Computing-aware networking technology white paper[R]. 2019.
- [2] WANG X Y, SUN T, DUAN X D, et al. Holistic service-based architecture for space-air-ground integrated network for 5G-Advanced and beyond[J]. China Communications, 2022, 19(1): 14-28.
- [3] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告[R]. 2021.
CIC. The integration of communication, sensing, and computing networks research fronts[R]. 2021.
- [4] GOTO D, SHIBAYAMA H, YAMASHITA F, et al. LEO-MIMO satellite systems for high capacity transmission[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [5] 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.
- [6] DU J, JIANG C X, ZHANG H J, et al. Auction design and analysis for SDN-based traffic offloading in hybrid satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(10): 2202-2217.
- [7] 刘治国, 姚巧雨, 汪林, 等. 基于SDN与NDN的卫星网络多约束路由算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(8).
LIU Z G, YAO Q Y, WANG L, et al. Satellite network multi-constraint routing algorithm based on SDN and NDN[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(8).
- [8] LI J, XUE K P, LIU J Q, et al. An ICN/SDN-based network architecture and efficient content retrieval for future satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(1): 188-195.
- [9] 周悦芝, 张迪. 近端云计算: 后云计算时代的机遇与挑战[J]. 计算机学报, 2019, 42(4): 677-700.
ZHOU Y Z, ZHANG D. Near-end cloud computing: opportunities and challenges in the post-cloud computing era[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(4): 677-700.
- [10] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔. 6G 中的卫星通信高效天基计算技术[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 50-53, 78.
WU X W, JIAO Z F, LING X. High-efficiency space-based computing for satellite communications in 6G[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 50-53, 78.
- [11] 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.
- [12] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. IEEE Network,

- 2019, 33(1): 70-76.
- [13] WANG Y X, YANG J, GUO X Y, et al. A game-theoretic approach to computation offloading in satellite edge computing[J]. IEEE Access, 2020(8): 12510-12520.
- [14] TANG Q Q, FEI Z S, LI B, et al. Computation offloading in LEO satellite networks with hybrid cloud and edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 9164-9176.
- [15] WEI J Y, HAN J R, CAO S Z. Satellite IoT edge intelligent computing: a research on architecture[J]. Electronics, 2019, 8(11): 1247.
- [16] FOURATI F, ALOUINI M S. Artificial intelligence for satellite communication: a review[J]. Intelligent and Converged Networks, 2021, 2(3): 213-243.
- [17] 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(4): 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(4): 1-14.
- [18] 中国移动通信集团有限公司. 算力网络白皮书[R]. 2021. CMCC. Computing force network whitepaper[R]. 2021.
- [19] WANG S G, DING C T, ZHANG N, et al. A cloud-guided feature extraction approach for image retrieval in mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(2): 292-305.
- [20] SUN W, WANG L, WANG P, et al. Collaborative blockchain for space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 82-89.
- [21] LI Y J, LI H W, LIU L X, et al. Fractal rosette: a stable space-ground network structure in mega-constellation[J]. arXiv-2105.05560. 2021.
- [22] KATO N, FADLULLAH Z M, MAO B M, et al. The deep learning vision for heterogeneous network traffic control: proposal, challenges, and future perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 24(3): 146-153.
- [23] MA X L, YU H Y, WANG Y P, et al. Large-scale transportation network congestion evolution prediction using deep learning theory[J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0119044.
- [24] LIU Y, WU L Z. Geological disaster recognition on optical remote sensing images using deep learning[J]. Procedia Computer Science, 2016(91): 566-575.

- [25] KAUTZ T, GROH B H, HANNINK J, et al. Activity recognition in beach volleyball using a deep convolutional neural network[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2017, 31(6): 1678-1705.

[作者简介]



邓平科 (1977-), 男, 中国移动通信有限公司研究院主任研究员, 主要研究方向为 6G、空天地一体化网络。



张同须 (1964-), 男, 中国移动通信有限公司研究院党委书记、科学技术委员会主任, 中国通信学会、工业和信息化部通信科学技术委员会委员。长期从事移动及数据通信网络的设计及研究工作。



施南翔 (1987-), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级研究员、工程师, 主要研究方向为 6G 网络架构、空天地一体化网络。

张童 (1992-), 男, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为 6G 网络架构、空天地一体化网络。

邵天竺 (1995-), 男, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为 6G 网络架构、空天地一体化网络。

郑韶雯 (1993-), 女, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为 6G 网络架构、空天地一体化网络。