

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.02.002

6G时代卫星算力网络发展思考

方海,赵扬,王显煜,高媛,杨旭

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

摘要:卫星已被广泛认为是6G网络的重要组成部分,卫星算力网络结合实时网络和计算资源状况,进行卫星计算节点间的任务调度,能够满足多样性业务的时延要求,实现在轨通信、处理、存储等资源的高效利用。首先,阐述卫星算力网络的概念内涵,对卫星通信网络的发展现状和趋势进行了总结;其次,从总体架构、硬件组成和软件架构三方面给出了卫星算力网络的设计考虑;最后,对卫星算力网络所面临的技术挑战进行总结,对卫星算力的发展进行了展望。

关键词:卫星;算力网络;天基计算;边缘计算

中图分类号:V1

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)02-0008-07

Thoughts on the development of satellite computing power network in 6G era

FANG Hai, ZHAO Yang, WANG Xianyu, GAO Yuan, YANG Xu

(China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Satellites have been widely regarded as an important part in 6G networks. Satellite computing networks can comprehensively involve real-time networking and computing resources, schedule different applications to appropriate computing nodes, meet the latency requirements of diverse services, and finally facilitate the efficient utilization of on-orbit communication, processing, storage and other resources. First, the concept of satellite computing networks is exhibited, along with the status and trend of satellite communication networks. Then, satellite computing networks are designed from three aspects, overall architecture, hardware structure, and software architecture. Finally, the technical challenges faced by satellite computing networks are summarized with the future work.

Key words: satellite; computing power network; space-based computing; edge computing

0 引言

6G网络需实现对全球覆盖已成共识,在沙漠、极地、山地、海洋等难以建设基站的地理位置,利用卫星无线接入网络可解决6G全域覆盖问题,卫星将是6G网络不可或缺的节点^[1]。6G卫星网络包含大规模低轨星座和高轨卫星进行混合组网,具有高带宽、泛在覆盖、泛在连接、泛在计算的特点,实现真正意义上的万物互联。

伴随不断进步的卫星通信技术,以卫星网络为核心的计算密集型业务规模日益庞大,如星上遥感图像快速目标识别、环境感知、电磁信号分析、任务

自主规划等^[2]。海量广域卫星网络用户节点数据回传对用户链路上行以及卫星馈电链路下行均产生巨大负载压力,同时不断变化的卫星网络状态需决策能力具备更高时效性。

在当前的卫星网络系统中,终端通过卫星将获取的数据转发到地面云平台进行后期处理,导致终端与云之间的通信占用带宽大,时延高。将网络传输服务与计算服务融合,通过组网实现云-边-端多级计算资源和服务能力智能调度以及高效分配,可以解决现有系统的不足。卫星算力网络将卫星转换为空间边缘计算节点,基于网络汇聚邻近卫

收稿日期:2022-06-23; 修回日期:2022-08-01

基金项目:国家重点研发计划(编号:2020YFB1808003)

引用格式:方海,赵扬,王显煜,等.6G时代卫星算力网络发展思考[J].空间电子技术,2023,20(2):08-14. FANG H, ZHAO Y, WANG X Y, et al. Thoughts on the development of satellite computing power network in 6G era[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(2):08-14.

星、地面云计算资源,对各类算力进行统一管理和调度,为上层业务提供算力服务,卫星节点通过按需动态在轨加载功能软件,灵活共享星载计算资源,并最终为用户提供服务。随着智能化业务对计算实时性要求的不断提升,算力向边缘下沉已成为卫星网络的发展趋势。卫星算力网络从时延、功耗、带宽资源联合优化服务,带来的好处包括:(1)减少通信数据量并减少网络链路上的带宽需求;(2)降低业务延迟;(3)支持设备和地理分布的应用程序的移动性;(4)优化系统整体计算和数据传输功耗。

截至目前,作者还未在国内外公开文献上查阅到关于天基算力网络的论著。因此,本文提出了 6G 网络愿景下的卫星算力网络架构及部署原则,并对卫星算力网络中可能存在的技术挑战进行讨论。

1 概念内涵与相关进展

1.1 概念内涵

在 6G 时代,算力是至关重要的数字化产业基础设施^[3]。算力向边缘延伸,对于卫星算力网络,卫星星座组成的卫星边缘云在提供泛在接入的同时,提供泛在的算力。卫星算力网络是解决地面中

心云、卫星边缘云、空天地海各类型终端多级异构算力资源并存情况下,基于用户的服务需求和系统资源约束,最优化系统资源统一供给问题的一种新型网络技术方案。卫星算力网络通过通信资源将动态分布的计算存储资源连通,使之形成统一、动态、智能的算力网络资源池。针对不同应用需求,对网络进行全局优化下的实时多维资源统一协同调度。

在卫星算力网络中,网络不仅仅是信息通道,网络和计算紧密关联,在服务业务时需要联合考虑。卫星算力网络通过星间链路、用户链路和馈电链路,将大量资源连接起来,分发节点可用算力、存储、功耗、覆盖、网络、服务功能等多维资源状况,针对多业务需求进行统一管理和调度,提供整网最优资源调度及网络连接方案。

具体应用场景如图 1 所示。卫星组成了一个空间计算系统,该系统可以从最终用户(例如车辆,飞机,轮船,浮标和传感器)获取、存储、处理和转发数据。面对不同的最终用户,空间边缘计算系统可以灵活地更改每个卫星上的应用程序,以满足不同的任务要求。此外,卫星可以虚拟化星载资源并形成资源池。根据任务,天基算力网络系统可以按需分配资源。

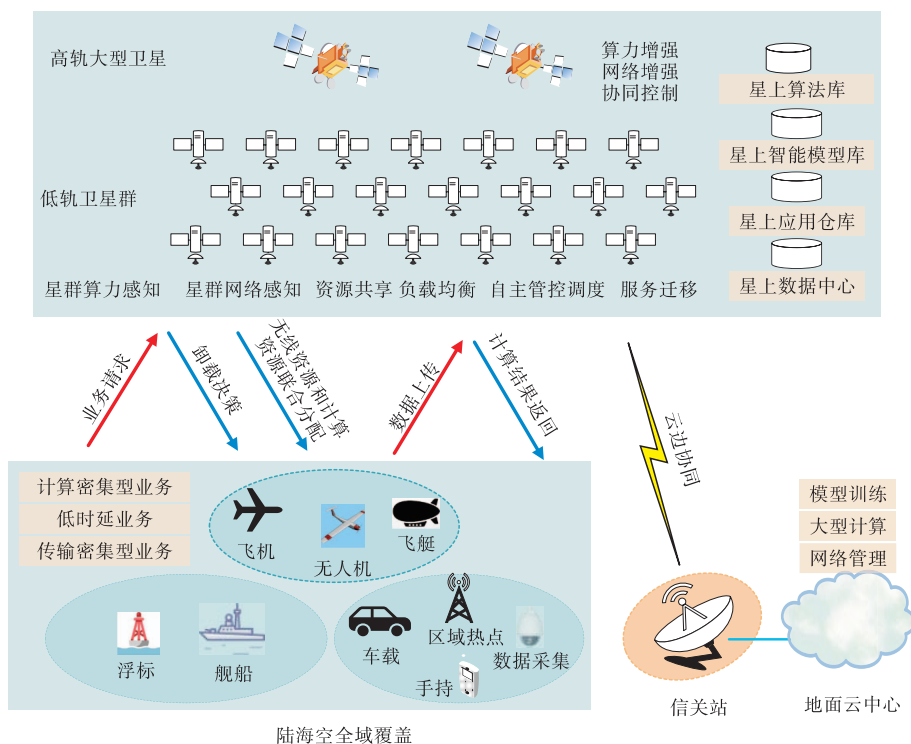


图 1 天基算力网络场景图

Fig. 1 The scenario of satellite computing power network

1.2 相关进展

近年来卫星网络不断革新,与软件化、虚拟化

等新技术相融合,提升与地面网络的兼容性,发展迅速。

(1) 低轨星座

低轨卫星因相对低的链路时延得到广泛关注。商业全球低轨道卫星通信系统 Orbcomm 使用分组交换来实现双向短数据传输,提供全球低速率的无线数据通信服务。高级研究和全球观测卫星 ARGOS 是法国和美国建立的用于数据收集和定位的卫星通信系统。SpaceX、OneWeb、星网、Starlink 等低轨卫星网络将卫星通信与互联网应用相结合,采用卫星星座组网实现无处不在的覆盖,通过模块化设计规模化生产大幅降低卫星研制成本,为用户提供平价服务^[4]。美国 DARPA 的 BLACK JACK 项目作为降低成本采用商用卫星平台先进技术思路的典型代表,充分体现了即插即用的低轨卫星的发展方向。

(2) 5G 通信卫星的发展

针对卫星与 5G 融合的问题,标准化组织国际电信联盟(international telecommunication union, ITU)及 SAT 5G(satellite and terrestrial network for 5G)联盟分别对 5G 通信卫星进行了推动^[5]。提出了面向 5G 的星地融合应用场景体系架构,以及多播支持、动态缓存管理、NFV/SDN 兼容、智能路由支持等关键技术。3GPP 5G 标准 R17 版本首次引入非地面网技术,是卫星通信系统与 5G 融合的重要里程碑。

目前业界已开展了一系列 5G 星地实验验证。韩国 KT SAT 公司于 2019 年底进行了通过卫星的全球首次 5G 数据传输,成功实现了“基于卫星通信干线链路的 5G 边缘云媒体传输”。2020 年 11 月,由航天科工、中国信通院开展的低轨宽带卫星互联网+5G 的组网试验,成功开展信息发送、网页浏览、文件传输、视频点播等一系列网络测试。

(3) 卫星天基计算平台最新进展

天基计算指在天基平台实现数据及信号处理, MUOS 卫星、WGS 卫星、Indium Next 卫星等均具备数字星上处理能力。将 DSP、GPU 以及 FPGA 模块配置在处理节点上,依托 CPU 提供调度控制能力,可编程 FPGA 提供信息编码解码能力及在调制解调时发挥作用^[6]。近年来,基于嵌入式集群计算的下一代星上处理计算机(on board computer-next generation, OBC-NG),形成了主处理节点-监控检测节点-从处理节点架构,可进行分布式并行计算。天基计算技术已应用于卫星遥感异常检测,云层与非云图像识别等领域。

目前开展星上载荷虚拟化及软件化研究也比较热门,欧洲航天局率先设计的软件定义的有效载

荷卫星“Eutelsat 量子”通过可定义软件来更改通信有效负载的参数,以实现功能上的重新配置。H2020 项目面向未来稳健灵活网络的虚拟化异构星地系统将虚拟化技术与软件定义网络技术结合,并在星地融合网络中提供应用场景。与此同时,中国科学院软件研究所也于 2017 年组织了“软件定义卫星技术联盟”,研究天基超算问题,使用通用计算平台的卫星解决方案,目前已发射“天象”系列 1 号以及 2 号实验星,验证基于虚拟化技术的星地协同组网传输。

(4) 卫星边缘计算网络最新进展

文献[7]~[9]分别对 5G 星地融合边缘计算网络节点部署、计算卸载方案、以及联合资源分配算法进行了研究。华为和北邮通过“天算星座”试验卫星“宝酿号”进行了 5G 边缘计算试验。

(5) 算力网络最新进展

算力网络与 6G 融合已经成为国内 IMT-2030 6G 网络组的研究课题之一^[10]。国内的中国通信标准化协会(China communication standards association, CCSA),“算力网络需求与架构”、“算力感知网络关键技术研究”两项课题也在研究中。中国主流运营商还先后发布了《算力网络白皮书》^[11]《算力感知网络技术白皮书》《算力网络架构与技术体系白皮书》^[12]等,进一步对算网融合进行了阐述。

综上,未来卫星网路将不断提升与地面网络的融合能力,6G 网络将向星地算网融合一体发展。

1.3 发展趋势

通过以上分析,天基算力网络有关的趋势包括:

(1) 互联网卫星网络与地面移动网络从融合走向一体共生

目前 5G 卫星融合还处于在 5G 的基础上补充天基网络部分,卫星网络与地面蜂窝网络架构及技术体系依然彼此独立,而目前 5G NTN 架构已经考虑 5G 和卫星的融合^[13],构成天地一体的全球网络,是向 6G 迈进的第一步,未来 6G 网络的发展将使卫星网络和地面网络合为一体,卫星网络和地面网络不再单独区分,无论是在接入网还是核心网都是深度一体化的^[14]。

(2) 卫星从功能单一向软件可定义通用智能高速处理发展

随着处理器技术的不断进步,高性能处理器逐渐在轨应用,高性能 GPU 和 FPGA 等处理器已实现在轨实时处理海量业务数据。对于集群式、分布式计算设备的应用也开始探索。卫星功能根据特定

功能由专用硬件高度定制的功能确定卫星,向卫星具有高速处理能力、支持多个应用程序的灵活可扩展、软件定义的虚拟平台转变,通用服务定义管理和编排,逐步迈向面向 6G 的卫星网络完全虚拟化、构建 AI 赋能的以云原生为底层框架的 6G 天地一体化网络^[15]。

(3) 从高轨单星高通量向高轨和低轨卫星大规模联合组网发展

随着星上载荷通信能力的不断提高,近年低轨卫星通信系统组网规模向超密集发展,业务具备多类型多质量需求实时并发等特点,星间采用激光链路提升了通量。除此以外,天基算力网络从高轨单星高通量向高轨和低轨卫星大规模联合组网发展。低轨星座节点部署的设计密度逐渐增加,用以提升星地网络协同的服务质量与连续性,匹配地面业务传输量需求,支撑星地业务卸载及传输。批量化生产导致卫星开发和部署的成本已大大降低。LEO

卫星星座已经开始为物联网设备提供强大的支持。

(4) 需求催生卫星边缘计算技术向算力网络发展

现有技术的发展已经推动卫星星上处理模式的改变,星上处理能力主要取决于星上算力,星上计算处理能力的提高是 AI 赋能星上多接入边缘计算网络架构的基础,该技术发展使卫星算力网络系统成为可能。

2 卫星算力网络架构考虑

2.1 系统总体架构

为了实现泛在计算资源和服务需求的感知、互联和协同调度,卫星算力网络可分为算网基础设施、编排管理层和应用服务层的三层逻辑功能架构,其中算网基础设施可划分为专用资源和通用资源,如图 2 所示。

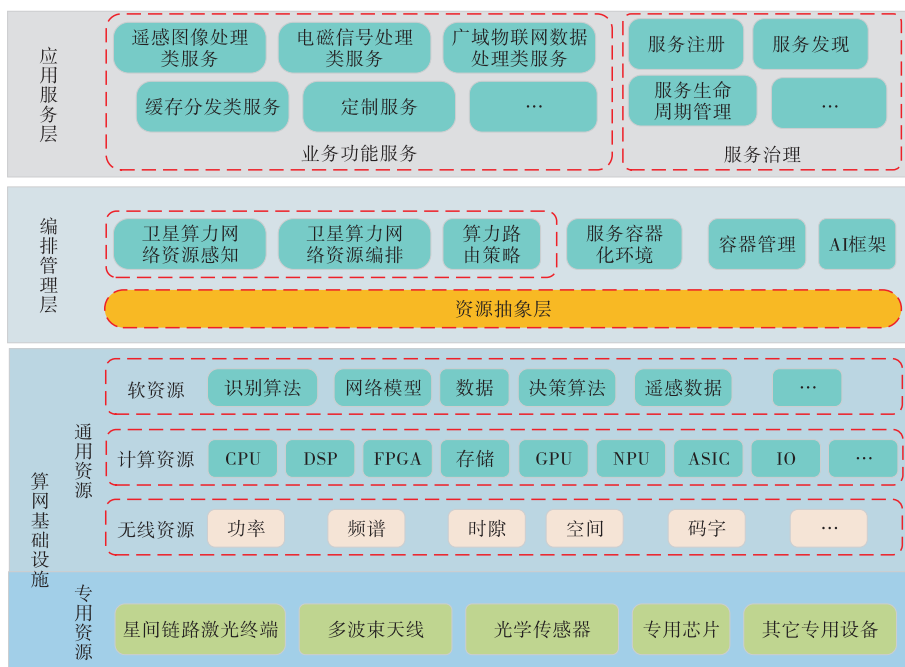


图 2 天基算力网络架构图

Fig. 2 The architecture of satellite computing power network

在该算力网络架构图中,其中应用服务层主要实现面向用户的服务能力开放,可以加载不同的应用程序,完成不同的功能。编排管理层一是负责服务部署环境如容器等服务资源的纳管、调度、配给和全生命周期管理;二是解决算力资源和通信资源的统一纳管和调度;三是实现对通用资源软资源、计算资源和网络资源的抽象。通用资源包含功能强大的标准化硬件平台和软件算法,为编排管理层

提供可调度的资源池。专用资源通过卫星专用的硬件,比如星间激光链路终端、光学传感器等完成专门的任务。在该架构中,多个功能层之间存在若干层间接口,负责不同功能平面之间的功能调用和数据通信。实现算网控制、编排、管理、转发、数据获取等功能的协同。

2.2 卫星算力网络平台硬件组成

卫星本身既可以是通信节点,计算节点也可以

是数据采集节点。因此卫星硬件平台包括天线,用于通信、SAR 探测和电磁数据采集,还可以包括光学相机及其它传感器设备。除此之外,新应用、大联接、爆炸式数据增长一方面要求卫星对于大规模联接场景下的实时数据传输处理能力,另一方面要求卫星必须拥有海量信息处理分析能力,实现各种应用场景下人工智能训练和推理能力。因此,星上处理器,不仅需要完成传统卫星平台的计算任务,而且还需要完成各种用户请求的通用计算任务,而且必须包含存储器,实现各种数据和应用软件的存储。本文将卫星算力网络平台硬件资源划分为算力资源池和感知资源池两类,组成框图如图 3 所示。

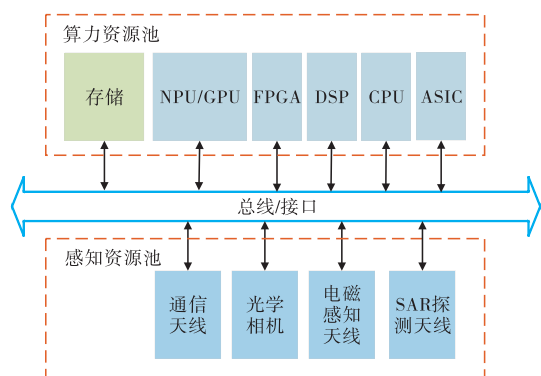


图 3 硬件组成图

Fig. 3 the composition of hardware

卫星算力网络中的算力资源池包括传统的 X86 通用服务器架构下的 CPU 计算单元,做图像和图形相关并行运算工作的 GPU 微处理器,擅长处理视频图像类海量多媒体数据的嵌入式神经网络处理器 NPU,广泛部署于边缘侧嵌入式设备的 ARM,半定制化处理器 FPGA 等。分别可为逻辑运算、并行计算和神经网络加速计算提供算力,供星上各类计算包括通信处理、智能推理等任务使用。

卫星算力网络中的感知资源池包括用于通信链路收发通信的天线,用于遥感数据采集的光学相机或者 SAR 天线,以及用于电磁信号感知的天线等,天线之间根据工作频段可以共用。

2.3 卫星算力网络软件架构

作为算力网络的智能节点,卫星的核心是软件。与传统卫星软件和硬件的紧密耦合不同,参考地面云计算平台,卫星软件使用分层体系结构,结合容器、微服务、云原生等开发模式,可以通过加载应用程序在轨定义卫星的功能。卫星的软件架构如图 4 所示。

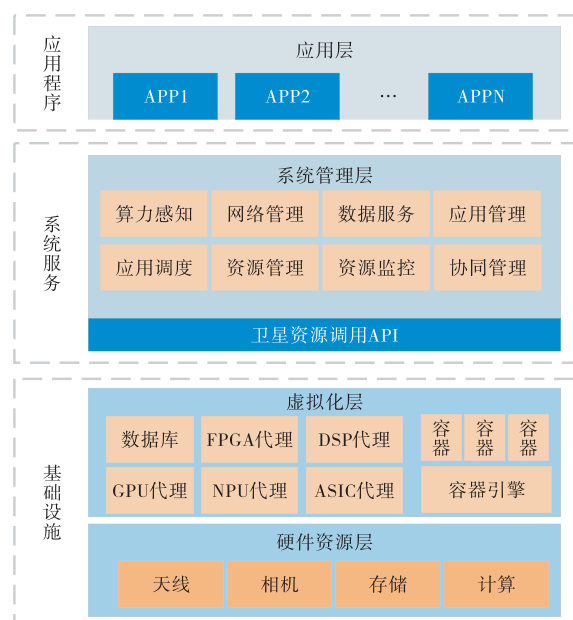


图 4 软件架构

Fig. 4 the composition of software

基础设施包含硬件资源层和虚拟化层,硬件资源层包含卫星的所有硬件单元。虚拟抽象层通过资源虚拟化技术将计算资源、存储资源、网络资源、无线资源及算法资源都抽象出来,作为可用资源供系统调度,以实现统一管理,并通过执中间件服务的资源管理策略,按需调度星上资源。

系统管理层提供应用程序运行时环境和管理 API,对卫星应用整个生命周期的进行管理。同时该层根据用户需求,通过智能算法优化的通信、计算以及存储资源业务需求智能适配,调用下层基础服务功能进行服务部署。为了增加可靠性与自主性,星群内所有卫星均应具备资源管理与控制功能。选其中一个为工作控制节点,通过虚拟化技术管理本地资源,实时监控卫星网络系统状态,并进行云-边-端分布式通信计算资源管理,支持多节点协同的任务卸载部署方案。

应用程序层包含各种卫星应用程序,卫星可以运行不同的应用程序,作为卫星的灵魂,应用程序可以根据需要上载。

3 卫星算力网络发展主要技术挑战及展望

3.1 存在挑战

目前卫星算力网络所面临的挑战主要来源于 5 个方面:

(1)业务分布不均,卫星节点的资源受限,如何

高效利用星上计算、网络和功率资源

卫星网络具有覆盖范围大、接入用户多、业务需求多样、业务分布不均并且时变的特点,单一僵化的算力网络资源配置策略将导致业务需求与星上有限可用计算和网络失配,降低网络资源利用效率。如何在满足用户业务需求的情况下,实现计算任务最优部署、算网资源最优分配、缓存文件最优存储,达到算网资源利用的整体优化是要解决的问题。

(2) 卫星网络拓扑高动态时变特性,低轨单星服务时长受限,如何保证服务连续性

低轨卫星单星目标区域过顶时间短,任务接入与任务返回大概率并非同一颗星,计算任务响应过程或涉及迁移,任务抢占,部分卸载问题,需要考虑如何针对业务解决最长服务星链问题;其次,涉及多个波束间甚至卫星间频繁切换、批量切换,带来的业务连续性管理及资源分配问题,星座节点资源处于动态变化中,需要解决自主运行的低轨卫星网络资源动态规划需求,研究具备动态特性的智能多接入资源优化配置策略。

(3) 低轨星座数量庞大、距地面网络控制中心远,如何实现分布式自主管理

算力网络控制方案的实现有集中式和分布式两种,低轨星座距地面网络控制中心远,通过集中控制器实现中心云及边缘云间的算力网络的统一管理和协同调度,存在计算节点无法快速与网络属性实时联动、远距离多重信令交互对系统服务响应速度影响大,因此,集中式控制无法全部满足卫星算力网络的管理控制需求,亟需提出在轨分布式自主管理系统,在地面控制中心长时间无法工作的情况下系统仍能自主运行,综合考虑实时的网络和计算资源状况,为不同的应用调度匹配计算节点。提升低轨卫星系统对计算密集型业务的快速稳健处理能力。

(4) 针对不同的处理要求,如何保证卫星算力网络的适应性和灵活性

当前卫星多为定制化,星上能力的可编程性和可扩展性不强,限制卫星通信处理、遥感处理、导航处理、物联网数据处理之间算力资源调度的通用性;如何既满足通信处理包括灵活的物理层帧结构和调制方式的信号处理以及高层协议网络转发处理的灵活性,又满足遥感和物联网数据处理,最大程度的共享计算资源,提高资源的适应性和利用效率,是卫星算力网络需要考虑解决的问题。

(5) 卫星网络信道开放、节点暴露,星地网络异构、链路频繁切换,如何保证卫星算力网络的安全性
低轨卫星信道开放,节点暴露,无线长距离传

输使星间串扰,信息拦截、窃听、泄露风险大;星地网络的异构特征也带来多样化的业务安全性要求。需设计卫星算力网络安全管理架构与资源管理模型,保障星地网络安全接入及资源可靠管理,在保障卫星算力网络资源安全的前提下提高资源利用率,降低节点间低时延高吞吐量资源共识算法的计算开销。

3.2 发展展望

卫星信息网络发展从信息交换向信息数据分析处理交换转变,如何支撑这种转变,本文认为需要从以下几个方面考虑以支持算力网络的发展。

(1) 从总体架构上推动卫星算力网络的标准化工作

卫星算力网络相关的技术需要地面设备商、卫星设备商、运营商多方合作,共同推进,标准化工作必须提前开展,包括:一是满足未来新应用场景需求出发,开展网络、算力等多维度资源开放融合架构设计,制定相关的总体技术要求及接口标准。二是研究分布式算力资源、网络资源和存储资源等多维资源感知、控制和调用的协同机制,实现统一编排和全局优化。三是从总体架构上考虑安全性与可靠性的需求,保障用户数据的安全性和系统的安全运行。

(2) 智能内生的卫星算力网络

智能内生的卫星算力网络主要体现在一是环境的支持,包括硬件环境支持低功耗智能加速计算,软件环境支持轻量神经网络化框架,在保持模型可用精度的情况下采用模型压缩等方法减少模型的规模;二是充分利用网络边缘采集的海量数据,借助卫星算力网络的实现人工智能应用;三是借助人工智能技术优化算网资源联合分配方案,辅助卫星网络资源自主性决策调度,实现智能时敏的分布式控制。

(3) 统一资源纳管的卫星算力网络

卫星算力网络的低时延低功耗优势依赖于计算资源和底层网络资源的融合。统一资源纳管一是算力资源和网络资源的统一纳管,算力和网络服务在一个层面、一个调度算法中进行;二是在轨卫星之间分布式的算网资源统一纳管协同,考虑业务数据的来源,覆盖的情况,服务的负载,实现计算资源、存储资源、带宽资源、卫星波束资源的整合;三是地面云中心、卫星边缘网络和应用终端之间的算网资源统一纳管协同,针对云-边-端网络中异构算力资源并存的情况,构建天地算力网络的全网视图,探索计算能力的统一纳管与协同方式。

(4) 适应卫星网络特点的卫星算力网络基础软件

卫星算力网络可引入云原生技术,实现业务逻辑和底层资源的完全解耦。通过打造如 K3S、KubeEdge 的面向服务的容器编排调度平台,实现服务编排面向算网资源的能力开放。同时应该考虑以下几方面:一、卫星为嵌入式环境,卫星算力网络基础软件应该是轻量化的环境;二、同时由于卫星系统应具备抗毁韧性和空间适应性,基础软件应考虑软件容错性;三、卫星节点作为具有管理能力的边缘节点,应考虑边边交互协同的支持。

(5) 自主在轨分布式管理控制的卫星算力网络

网络泛在、计算泛在要求管控实时化,卫星算力网络应具备自主管控运行能力,即使无地面中心控制,星上也可通过智能算法进行去中心化的决策控制与管理维护,实现在轨自主决策执行任务。可根据计算任务的数据量、算力和时延需求以及是否可分解为并行或串行子任务,结合实时感知的网络和计算资源状态,进行任务、计算、网络资源联合分配调度。

(6) 灵活可定义的卫星有效载荷

多样化业务需求要求卫星算力网络具有弹性化的服务能力,无线资源、计算资源均可以灵活调度。因此,卫星有效载荷须具备灵活可定义的能力,一、天线需要具有灵活性,包括发射功率可定义、覆盖空间可定义、工作频段可定义;二、处理载荷需要具有灵活性,包括能够动态地在轨加载软件,支持多速率的信号处理,支持多协议的网络处理,而且计算资源池化,能够支持算力统一编排调度。

4 结论

算力网络是应对从以信息传递为核心的网络基础设施,向融合计算、存储、传送资源的智能化云网基础设施发生转变的新一代信息网络。本文面向卫星算力网络愿景,基于对低轨卫星及地面移动网络相关研究的梳理,针对不同低轨星座现状分析业务需求,提出卫星算力网络架构,包含卫星的软件和硬件体系结构。在硬件方面,将原有的卫星硬件模块拆分重组,奠定资源池化管理基础。在软件方面,参考地面云原生架构,进行卫星资源虚拟化,

星地协同进行任务与资源的灵活编排调度。最后,总结了卫星算力网络可能面临的技术挑战,并对未来发展进行了展望。

参考文献:

- [1] 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.
- [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.
- [3] 雷波,赵倩颖,赵慧玲. 边缘计算与算力网络综述[J]. 中兴通讯技术,2021,27(3):3-6.
- [4] 李虹,孙一中,贺玉. 低轨卫星互联网融合 5G 信息网络分析与应用[J]. 卫星应用,2022(1):42-45.
- [5] 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.
- [6] 白保存,张越,陆洲,等. 一种开放式架构的天基网络化计算平台体系设计[J]. 中国电子科学研究院学报,2020,15(9):900-904.
- [7] 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.
- [8] XU F M, YANG F, ZHAO C L, et al. Deep reinforcement learning based joint edge resource management in maritime network[J]. China Communications, 2020, 17(5): 211-222.
- [9] ZHANG S H, CUI G F, WANG W D. Joint data downloading and resource management for small satellite cluster networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(1): 887-901.
- [10] 林奕琳,陈思柏,单雨威,等. 6G 网络潜在关键技术研究综述[J]. 移动通信,2021,45(4):120-127.
- [11] 中国移动. 中国移动算力网络白皮书[R/OL]. (2021-11-2). <http://www.net.cn/article>.
- [12] 中国联通. 算力网络架构与技术体系白皮书[R/OL]. (2020-10). https://download.csdn.net/download/m0_38106923/13009754.
- [13] 毛一丁,薛治纲,孙汉汶. 一种星地协同的路由协议处理架构方案[J]. 空间电子技术,2021,18(4):27-32.
- [14] 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.
- [15] 张飞,陈小前,于帅,等. 基于天基边缘计算的在轨智能技术[J]. 上海航天(中英文),2021,38(4):19-24.

作者简介:方海(1983—),陕西西安人,博士,高级工程师。主要研究方向为天基计算、卫星网络边缘计算和人工智能。E-mail:hai_fang@yeah.net

通讯作者:杨旭(1976—),河北唐山人,硕士,研究员,173 首席科学家。主要研究方向为软件定义卫星、卫星网络边缘计算。E-mail:sunshine561@163.com