

卫星网络星地协同边缘云服务关键技术

刘 言^{1,2,3}, 朱凯歌^{1,2,3}, 孙 枫^{1,2,3}, 师恩磊^{1,2,3}, 文少杰^{1,2,3}

(1.上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 202161;

2.上海市卫星互联网重点实验室, 上海 202161;

3.卫星互联网全国重点实验室, 上海 202161)

摘 要: 随着各类通感融合、智能应用、多样化服务等天基业务的演进和发展, 卫星网络呈现出云网协同的发展趋势, 对异构硬件虚拟化与算力服务多样化提出了更高要求, 因此提出一种支撑广域智能协作的星地协同边缘云架构。该架构可以提升卫星网络时空连续服务场景下的云边协同数据处理与即时服务能力, 实现星地资源高效利用及“云聚云散”, 为构建卫星网络高速智能计算、弹性部署与去中心化自主决策能力等提供有力支撑。

关键词: 卫星网络; 边缘云; 星地协同; 智能计算

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025026

Satellite and Ground Collaborative Edge Cloud Key Technologies

LIU Yan^{1,2,3}, ZHU Kaige^{1,2,3}, SUN Feng^{1,2,3}, SHI Enlei^{1,2,3}, WEN Shaojie^{1,2,3}

1. Shanghai Satellite Internet Research Institute Co., Ltd., Shanghai 202161, China

2. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 202161, China

3. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 202161, China

Abstract: With the evolution and development of various space-based services such as integration of sensing and communication, intelligent applications, and diverse services, satellite networks are showing a trend of cloud-network convergence. Satellite networks have put forward higher requirements for heterogeneous hardware virtualization and diversified computing power services. This article proposes a satellite ground collaborative edge cloud architecture that supports wide area intelligent collaboration. It can improve the capability of cloud side collaborative data processing and instant service under the spatio-temporal continuous service scenario of satellite network, achieve efficient utilization of satellite ground resources and "cloud convergence and cloud dispersion", and provide strong support for building high-speed intelligent computing, flexible deployment and decentralized independent decision-making capabilities of satellite network.

Keywords: satellite network, edge cloud, satellite ground collaboration, intelligent computing

0 引言

卫星网络作为新型信息基础设施, 可实现全球、全域、全时的泛在网络连接服务, 有效弥合“边远散”区域的数字鸿沟。然而, 受太阳能电池板供电、星载板卡能力、功耗散热等因素限制, 传统卫星服务采用“数据下传+地面融合处理”的业务流程^[1], 存在通信开销大、响应时间长的固有缺陷。此外, 现阶段卫星星座服务模式仍以单星服务为主体, 在运控、接收、处理等环节未能形成星间协作机制, 信息获取及数据处理链路长, 系统响应

慢^[2]。边缘计算通过将算存资源部署在近终端的方式减少数据传输并降低计算时延, 能够满足任务快速响应、资源合理调度和负载均衡的系统需求。作为边缘计算范式的一种具体实现形式, 边缘云通过在网络边缘侧构建轻量化云平台, 基于虚拟化技术提供标准化计算、存储、网络资源的池化服务。随着星载算存能力日趋增强, 实现卫星数据在轨处理的技术基础已基本成熟, 卫星网络将突破“转发器”的透明转发系统定位, 具备在轨处理能力。同时, 通过探索星间、星地协同服务机制, 构建按需取用的星地弹性资源池, 利用“云聚云散”实现星地资源的高效利用。

面向未来6G卫星网络“数字孪生、万物智联”的发展愿景^[3], 卫星通信与人工智能等技术的深度融合成为发展的新趋势。卫星网络需要突破通信、导航、遥感卫星系统间的信息壁垒, 提供全域高精度感知和高时效计算能力, 实现通感算智融通互惠, 满足新兴业务和新型场景的服务需求。借助星间/星地网络多层次算力资源配置对感知数据进行深度处理, 实现卫星网络广域智能协同, 将通信-感知-计算-智能化体系有效融合, 显著提高网络的服务质量和系统效率。

鉴于卫星网络系统存在业务分布时空不均、多维资源异构泛在等特性以及辐照/单粒子等空间环境影响, 现有地面边缘云架构无法有效支撑以广域智能协作为代表的星间/星地协同业务需求。本文针对卫星网络多维资源异构泛在、星地算力协同难的问题, 提出一种支撑广域智能协作的星地协同边缘云架构。该架构支持异构算力的池化与统一纳管, 通过卫星集群与地面设施之间的动态资源协作敏捷响应多样化卫星应用的服务需求, 从而提升卫星网络服务场景下的云边协同数据处理与即时服务能力, 实现星地资源高效利用及“云聚云散”, 为提升卫星网络高速智能计算、弹性部署与去中心化自主决策能力等提供有力支撑。

1 国内外现状

1.1 国外研究现状

随着卫星规模不断扩大, 为突破单星算力瓶颈, 利用边缘计算技术赋能卫星星座协同计算成为国外业界关注的重点。其中, 美国的“黑杰克”项目旨在开发和展示卫星网络的关键要素, 通过在轨边缘计算实现星座架构的自扩展和灵活性^[4]。另一项目 SmartSat CRC 致力于开发智能卫星系统和地球观测数据服务^[5]。

在架构设计方面, 星载边缘节点将能够利用全球覆盖的优势提供更低时延的服务。文献[6]针对弯管透传架构, 提出轨道边缘计算架构, 将卫星星座组织成基于地理位置的并行化数据收集和处理计算管道。卫星通过运行时服务明确地模拟物理环境的约束。该服务使用轨道参数、物理模型和地面站位置来触发数据收集、预测能源可用性并为通信做准备。文献[7]针对在轨边缘计算架构缺乏灵活性的问题, 设计了一种用于共享卫星平台的无服务架构, 利用功能即服务范式实现动态任务调度, 减少部署开销。

在计算卸载方面, 通过将部分或全部计算任务卸载至网络边缘, 从而有效节省能源和时间开销。文献[8]面向卫星车载应用, 提出了时变动态系统模型, 其中配备边缘服

器的高空平台连接到低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星的回程系统, 用于提供计算卸载能力与网络访问能力; 文献[9]针对对地观测传输数据量大、时延大的问题, 以在轨边缘计算为架构基础, 提出了一种基于强化学习集群形成和卫星访问模式的星载联邦学习方法, 从而有效降低卫星与地面站之间的通信轮次。

在负载均衡方面, 星间链路距离长导致的信号时延大、低地球轨道卫星高速运行导致的动态拓扑结构变化以及地面业务流量分布不均匀等限制, 广域维度下的负载均衡能力仍相对缺乏。文献[10]提出基于卫星链路历史流量的负载均衡路由策略, 其在传统的基于快照的卫星路由算法基础上, 计算最优路径时考虑各链路的过去流量, 并对流量负载在整个星座网络中的分布进行优化。

1.2 国内研究现状

星载边缘计算在我国同样受到业界的广泛关注, 相关研究成果为星载边缘计算的应用提供了理论基础和技术支持。其中, 北京邮电大学联合天仪研究院等发射了天算星座试验卫星, 初步构建了空天一体化计算在轨实验开放开源服务平台^[11]。华为云主导并开源的云原生边缘计算平台 Kube Edge 及其边缘 AI 子项目 Sedna 为天算星座提供统一的资源、应用管理、分布式应用协同能力和在轨 AI 推理能力, 结合卫星网络系统、基础通信组件, 可为空天实验提供一定的计算能力^[12]。

在架构设计方面, 文献[1]提出了一种低轨巨型星座遥感信息的“云-边-端”智能服务架构, 探索对地观测任务的智能化改进, 提出了面向即时任务的“云-边-端”智能服务模式; 文献[13]提出了一种面向 5G/6G 的卫星物联网智能计算架构, 并分析了边缘计算和深度学习如何在卫星物联网图像数据目标检测中发挥作用; 文献[14]提出一种面向高速星地协同网络的卫星边缘计算集成架构, 并提出一种动态网络功能虚拟化 (network functions virtualization, NFV) 技术, 将计算资源整合到低轨卫星的覆盖范围内; 文献[15]针对空地天地信息网络设备异构、业务多源、网络动态的特性, 提出了一种基于分散计算的空地天地信息网络架构, 探索计算任务合理调度与网络资源平衡分配的解决途径。

在计算卸载方面, 文献[16]研究了基于星间链路的低轨卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配问题, 基于部分任务迁移机制, 提出一种低轨卫星协作边缘计算的任务迁移和资源分配方法; 文献[17]对卫星集群的联合卸载决策和资源分配优化问题进行研究, 提出基于分布式深

度学习技术的卫星边缘计算卸载算法；文献[18]针对在轨移动边缘计算中卫星移动性导致的资源时变问题展开研究，提出一种基于多智能体协同的分布式任务卸载方案，使每颗卫星都能够根据本地观察动态调整卸载决策；文献[19]针对空天地一体化信息网络环境下资源管理算法收敛速度慢的问题，将天基边缘计算资源的管理建模为两阶段的斯坦科尔伯格博弈模型，提出分布式混合动态迭代算法与分布式分组动态迭代算法以提高资源分配博弈过程的收敛速度。

1.3 技术基础与挑战

天基边缘云将低轨卫星星座的广域覆盖与地面边缘计算的低时延、资源弹性扩缩深度融合，构建星地一体的智能计算网络。随着学界与业界相关研究的不断深入，星地协同边缘云实现的相关技术基础已日趋成熟：在航天技术方面，随着全球多项卫星网络计划的加速推进，卫星制造与发射成本持续降低，低轨卫星网络的规模化部署成为现实；在通信技术方面，高通量卫星和激光星间链路技术的持续演进大幅提升了星间及星地间通信链路的传输容量和可靠性；在边缘计算技术方面，云化虚拟化技术逐渐成熟，云原生服务不断丰富，使计算任务能够在异构节点灵活部署、迁移与协同，大大提升了异构资源统一调度能力。

尽管天基边缘云在国内外取得了一定进展，但仍然需要面对算力、存储、网络连接、带宽等限制以及管理和调度复杂性等方面的挑战。

(1) 算力和存储限制：与地面云相比，天基边缘云纳管的算力和存储容量相对有限，这限制了卫星上部署复杂计算任务和大规模数据处理的能力。

(2) 网络连接和带宽限制：卫星通信具有广域覆盖和远距离传输的特点，但其网络连接和带宽仍然具有一定的限制，因此，高速、稳定的卫星通信链路对于大规模数据传输和实时应用至关重要^[20-22]。

(3) 管理和调度复杂性：天基边缘云涉及多个卫星节点和地面站间的资源管理和任务调度，由于卫星任务管理和调度的复杂性较高，因此，需要考虑任务优先级、资源利用效率等因素。

2 星地协同边缘云架构

2.1 星地协同边缘云概述

区别于传统卫星通信，星地协同边缘云将计算技术与网络技术深度融合，通过对卫星底层异构硬件资源的池化纳管，实现网络、计算、存储资源的管理与调度，使卫星网络服务能力得到本质提升。星地协同边缘云场景如图1所示，天基边缘云在低轨卫星星座的每个节点

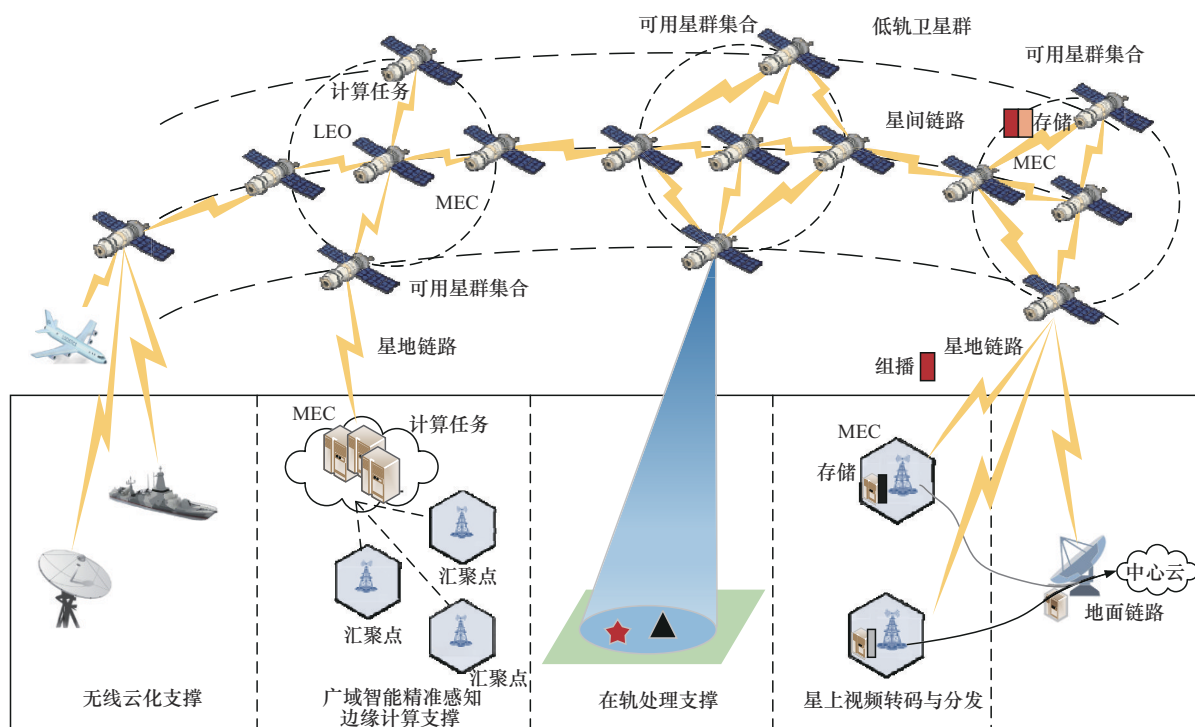


图1 星地协同边缘云场景

上均可按需部署边缘云服务,星间链路为点对点通量较高的激光链路,星地链路可采用高频Ku/Ka频段进行通信。

随着网络节点数量的增加,卫星网络需要解决的通感算智互惠赋能及融合问题愈发复杂。在广域智能协作场景下,星地协同边缘云需要具备以下几方面的能力。

(1) 异构资源纳管:为充分发挥星地平台中CPU/GPU等通用算力在计算上的灵活性以及FPGA/ASIC等专用处理器的高效性,需要基于星地协同边缘云构建面向异构算力的边缘基础设施底座,实现对星地平台异构计算资源的统一纳管。

(2) 星间/星地协同策略:面对多样化任务对资源和算力的差异化需求,星地协同边缘云需要在星地网络资源异构性和不均衡性特征下构建星间/星地协同策略,设计适应多星协同、星地协同的分布式计算处理架构,为星地资源的高效协同提供理论支撑。

(3) 自主服务迁移:针对卫星高速移动带来的网络拓扑时变、用户频繁切换问题,需要星地协同边缘云具备服务自主迁移能力,综合考虑迁移前后时延、带宽、算力的关系,寻找最佳迁移卫星节点及迁移路径。

星地协同边缘计算将分散在卫星上的计算资源通过卫星网络协同组织起来,在此基础上,通过与地面云协同,构建多星/星地协同的分布式计算环境,实现资源复用、任务协同。从部署位置、网络时延、应用负载、技术架构、协同关系等方面来看,可把分布式部署的云计算系统划分为边缘云和中心云,如图2所示。

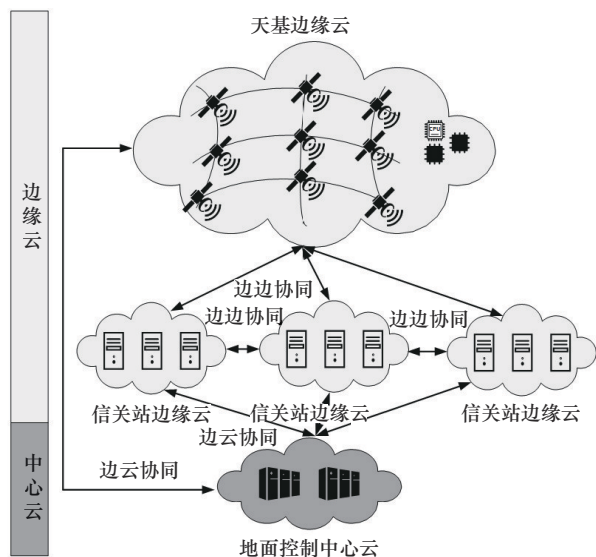


图2 星地协同分布式云部署示意

边缘云包括部署在星上的天基边缘云和部署在信关站中的信关站边缘云,二者主要面向不同卫星网络业务应用产生的具有低时延、实时响应要求的计算和数据处理任务。中心云部署于地面控制中心,主要面向全量数据备份存储、集中式数据处理、高性能图形图像处理、AI模型训练等,利用其强大的算力和海量存储能力,为边缘云提供辅助的算力和存储卸载服务。信关站边缘云可采用轻量级地面边缘云架构方案,中心云可采用地面数据中心主流、成熟、具备大规模资源管理能力的云计算架构方案。

2.2 星地协同边缘云技术架构

与地面环境相比,天基环境下的硬件资源、网络拓扑架构、物理运行环境、工作负载等均有较大差别,本文对天基边缘云技术架构进行整体设计,以有效支撑卫星网络云网协同发展。天基边缘云整体架构如图3所示,主要功能如下。

(1) 天基边缘云基础设施资源层

基础设施资源层以资源池的方式对外提供各类算力,应用程序可以在池中按需申请和释放算力资源。资源池应支持对算力的灵活切分,将硬件资源柔性分割为大小不等的算力单元分配给不同的应用程序以实现硬件资源复用的最大化。另外,资源池应支持板卡内多芯片、卫星内多板卡、跨卫星节点、跨星地等不同层面和颗粒度的算力组合,实现算力的按需聚合,以应对单星计算资源相对受限的问题。在数据存储方面可采用跨多个卫星节点构建的轻量级分布式存储,或直接使用卫星本地存储设备。

(2) 天基边缘云调度管理层

对算力进行高层级抽象,对不同类型计算资源能力的共性进行统一,并实现对算力硬件和软件栈关键维度信息的有效提取和刻画,使得开发者可以对算力信息进行全面、量化的感知。算力感知的内容包括算力的标识信息、算力度量信息、算力状态等内容。为了最大程度发挥资源的效能,需要进一步感知天基边缘云的工作负载信息,面向负载特点对算力进行全栈式软硬件结合优化,最大化算力资源效能。工作负载感知的内容包括负载的类型(如通用计算、模型推理/训练、网络通信等)、模式、特征,以及工作负载应用程序的运行时依赖库、编程框架等。

为实现面向工作负载的资源优化,应构建统一算力能力描述模型,可以从3个维度来构建该模型。一是硬件能力维度,用于描述硬件原生的计算能力,包括硬件的

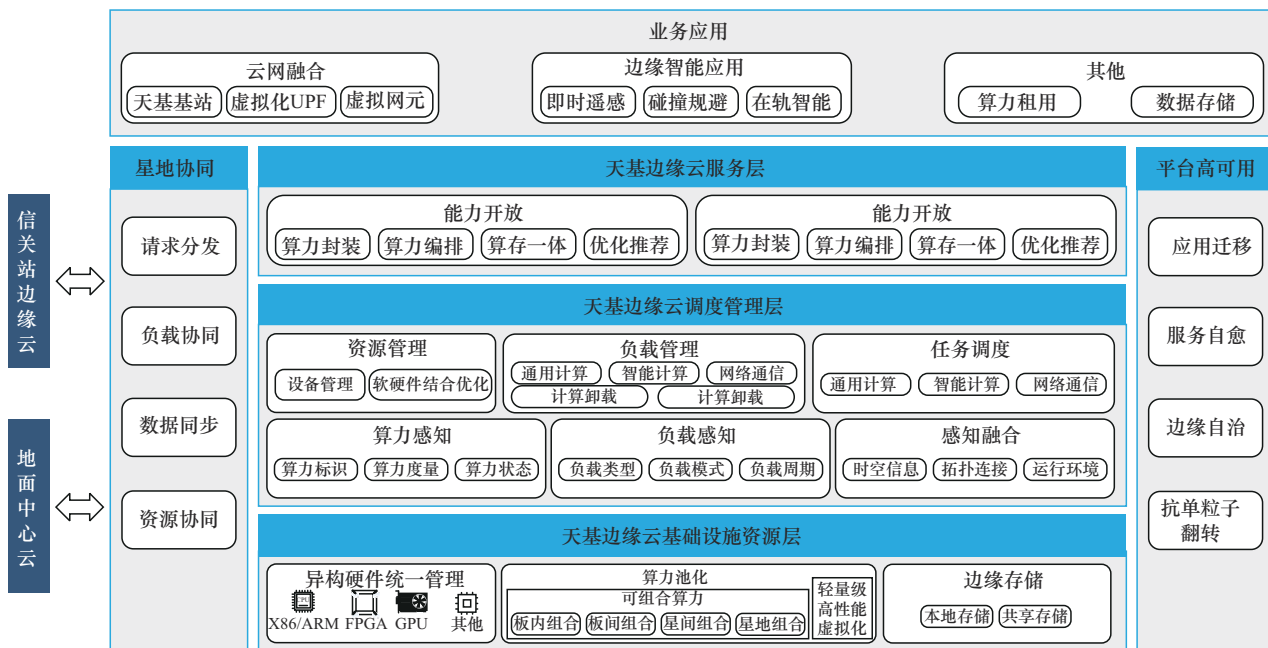


图3 天基边缘云整体架构

架构、算力规格、IO能力、功率、能耗等信息；二是平台软件维度，用于描述基于该硬件提供的基础软件，包括操作系统类型、设备驱动的IO模式、虚拟化类型等；三是应用运行时依赖软件，用于描述业务应用运行时的软件依赖，包括应用程序的编程框架、所调用的函数库等。

此外，还需要进一步收集周围系统的感知信息，比如卫星节点间的网络拓扑连接、卫星所处的轨道信息、运行控制信息等，以便和天基边缘云自身的感知数据相融合，实现最大程度上的资源优化利用和调度。

考虑到星地时变拓扑以及受限卫星算力资源等因素，天基边缘云调度管理层应具备对工作负载的灵活调度和管理能力。一是要支持工作负载的按需卸载和迁移，包括卫星节点之间、卫星和信关站之间、边缘云和中心云之间的算力卸载和负载迁移。进行算力卸载时要综合考虑整体的数据传输和计算耗时，保证端到端的时延可以满足业务需求；进行工作负载迁移时应实现虚拟化载体（如虚拟机、容器）的平滑迁移，包括持久数据的迁移和动态变化的内存数据的迁移，实现整体迁移时间和迁移停机时间的最小化。二是要支持灵活的调度机制，包括确定性调度、抢占式调度、动态调度等，根据实际业务需求，自动调整资源的使用情况和工作负载运行的优先级，以满足面向多样化工作负载和动态资源可用性场景的调度管理需求，保证业务应用的服务质量，提升卫星

算力资源的利用效率。

（3）天基边缘云服务层

天基边缘云作为服务提供者，能够将业务需求的综合表达转译为可部署的计算任务表达，进而将计算任务需求映射为算力和存储等需求。同时，服务层提供支持星地协同编排的策略引擎，能够针对业务应用需求进行问题建模和求解，实现资源编排调度的最优化。

考虑到卫星网络云计算系统的分布式特征，服务编排有以下3种方式。

一是集中式编排。集中式编排器可以作为卫星网络分布式云的全局管理者，负责全局的资源管理和调度。它可以收集边缘云和中心云的状态信息，并根据业务需求制定全局策略，实现多个云之间的协同调度。集中式编排器可以统一管理算力资源和存储资源，构建全局拓扑信息，根据业务需求生成总体调度策略，实现自动化业务质量保障。

二是分布式边缘编排。不同集群节点之间的协同调度需要借助分布式协同控制技术将全局策略转化为各个集群的本地策略，并由各个集群自主执行。同时，各个集群也可以根据自身的状态信息和反馈调整本地策略，以实现全局最优。通过分布式协同控制和负载迁移，各个节点可以协同工作，对异常进行实时监测和预警，及时发现并解决问题，从而提高系统的可靠性。

三是多级别协同编排。多云集中式编排器可与边缘

云编排器进行交互。聚焦边缘云侧的编排器会跨多个卫星节点集群或信关站边缘云，收集的边缘云算力信息、负载信息等可以传递给集中式编排器，为进行更高层次资源编排和调度逻辑提供依据；另外，可在边缘云侧进行自治管理和资源编排、调整和管理算力资源，执行更为具体的编排和管理任务。

在能力开放方面，天基边缘云除了提供资源层级的算力外，还支持对算力进行封装，提供任务级、函数级的计算服务，以便用户通过调用函数完成定制计算而无须考虑底层算力。能力开放的服务接口应支持服务发现、订阅、注册等。

(4) 星地协同

星地协同功能主要用于实现边、云之间的协同，通过星地协同功能可以将部分任务通过东西向负载均衡能力卸载至相邻卫星节点中，进行分布式协同计算。若天基边缘云难以提供满足任务算力需求的算力资源，则考虑通过南向卸载智能协同能力与信关站边缘云和地面中心云计算集群协同，以完成任务需求。对于数据分析类业务可以充分利用网络边缘所采集的实时数据，结合地面历史数据进行协同数据分析；对于星上计算密集型的业务，可将卫星上的计算负载卸载到地面集群以实现卫星算力的扩展；对于AI类业务，可在地面中心云中进行AI模型的训练，并将训练完毕后的模型推送到卫星上进行实时推理。

2.3 星地协同边缘云部署架构

星地协同边缘云部署架构如图4所示，在卫星侧实现天基边缘云组件的轻量化部署，通过星载资源管理器、星载负载管理器和信息感知模块实现对卫星本节点资源的优化管理和实时感知，星间协同功能实现跨卫星节点的工作协同。在地面侧（信关站边缘云或中心云）部署天基边缘云管理平台，对天基边缘云服务组件进行远程管理，当卫星和地面网络出现连接异常时，可以激活卫星上部署的微控制器，实现对天基边缘云服务组件的接管调度。天基边缘云通过星地协同模块实现与地面信关站边缘云以及中心云之间的跨星地的边边协同和云边协同。

3 关键技术

3.1 边缘网络

空间网络的动态性引发资源连接关系以及网络资源关系的时变性，星地协同边缘云平台需要根据当前网络自身的高动态以及泛在接入的特性，优化平台管理机制，建立高可靠、高效率的天基边缘云平台管理及终端接入机制。

(1) 弱网连接

部署天基边缘云的卫星时刻处于高速运动的状态，在完成卫星大规模组网前，天基边缘云部分节点有时会处于无法与中心管控节点通信的弱网连接下，因此需要天基边缘云自身具有边缘自治的能力，使上述节点在弱

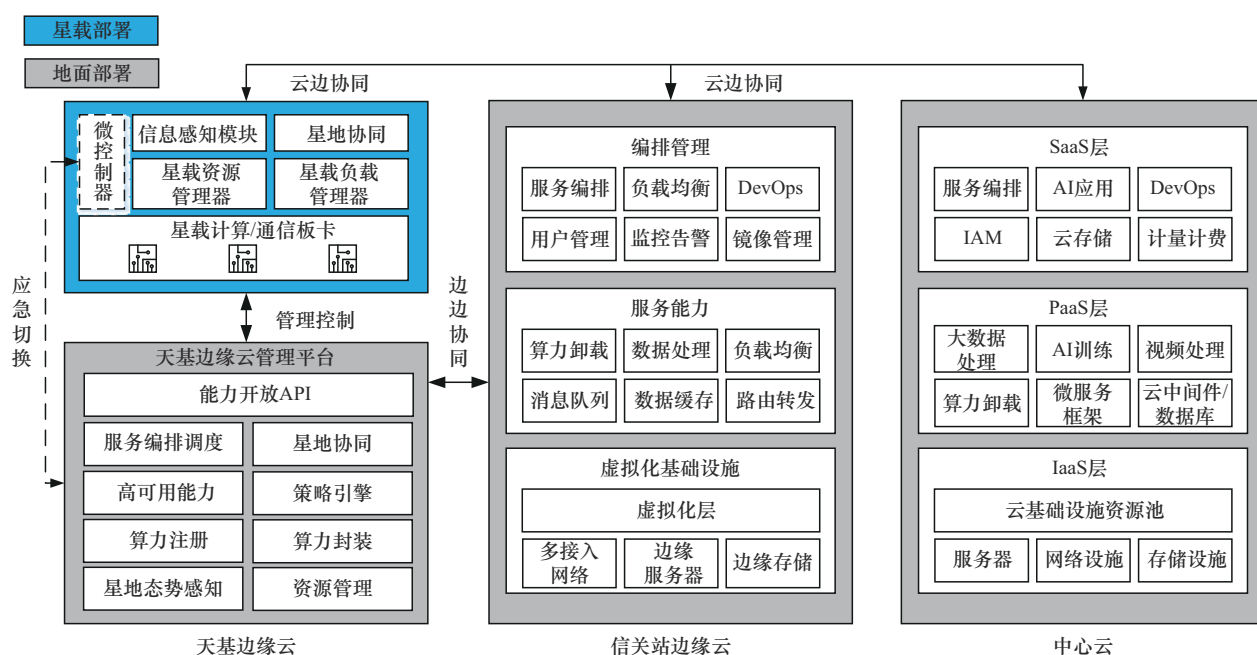


图4 星地协同边缘云部署架构

网连接的限制下失去与中心管控节点的连接后,可以保持原先业务正常运行不受影响。重点需解决节点异常或重启造成的内存数据丢失、断连时业务容器无法恢复、长时间断连后网络恢复时边缘和云端数据的一致性保障问题。

(2) 网元云化支撑

天基边缘云支持接入网/承载网/核心网网元的星上部署,为终端设备提供泛在接入服务。考虑不同网元的业务需求,天基边缘云提供容器及裸金属两种部署形式,分别为网元提供面向控制面的一致性部署环境以及面向数据面低时延需求的裸机环境。

3.2 算力资源池化

天基边缘云需要有效整合星上算力资源,解决硬件虚拟化、网算资源池化等问题,并针对星载环境设计轻量化容器,支撑上层应用的可靠运行。

(1) 硬件虚拟化

利用虚拟化技术将不同类型、不同架构的硬件(包括CPU、GPU、FPGA等)抽象成统一的计算资源或算力模型,为上层应用系统提供统一的资源调用和管理接口。通过这种硬件抽象,实现对异构硬件资源的标准化管理(包括资源的发现、分配、调度和回收等操作),将底层硬件资源与上层软件应用进行解耦和隔离,使得上层应用开发者可以忽略底层硬件的具体实现,而使用统一的接口进行编程调用。

(2) 算力资源池化

借助虚拟化技术可以将单个星载板卡虚拟成多个虚拟机,但是单个星载板卡的资源有限,可分配的颗粒度较小,会导致在虚拟化应用中出现资源配置空洞。在硬件资源虚拟化的基础上,天基边缘云需要实现计算、存储、网络等资源的池化,通过将星上算力资源进行集中管理和动态分配,向上提供动态可扩展的资源池,并根据用户需求提供对应的资源,实现高效、灵活、可扩展的计算资源管理和提供服务方式,提高星上网算资源的利用效率。

天基边缘云可以将CPU、内存、GPU等资源按照使用需求动态申请和释放,将一类资源以资源池的形式整合,并将所有资源分解到最小单位,如CPU按CPU核心数分解,内存按大小分解,GPU按显存、算力分解等,避免物理资源固定配比,打破资源被用户或业务独占使用的模式。

(3) 轻量化容器设计

星上资源呈现出单点受限的特点,现有的容器多面

向地面运行环境设计,部分功能存在进一步优化的空间。星地协同边缘云需要考虑星上资源约束,根据地面已有的容器架构,设计星载轻量化容器,识别星上业务需求,保留核心功能,裁剪冗余组件。星地协同边缘云需要识别操作系统层面的必需依赖,优化底层代码,保证低级容器运行时与操作系统的兼容性,以及高级容器运行时与管理平台的兼容性,便于实现星上及地面容器的统一调度和管理。

3.3 网算资源感知

通过对卫星空间信息的全面感知、深度挖掘和智能处理,构建高效准确的网算资源感知体系。

(1) 资源度量

在星载环境中,由于资源相对有限且分散,需要综合考虑单节点性能以及整个网络的协同,实现卫星网算资源的精准感知与度量。星地协同边缘云资源度量技术包含算力度量、存储度量、网络度量,其中,算力度量模型主要用于衡量设备的计算能力,尤其是在面对大规模数据任务时的性能,算力包括不同类型的计算资源,如CPU性能、GPU性能、TPU性能、FPGA性能或整个云中心或边缘侧的计算能力。

(2) 网算资源一体化建模

用户在请求高算力应用服务时,往往也会伴随着较强的时延约束,卫星网络需要同时向用户分配足额的算力资源和网络资源,因此,在算网融合的趋势下,网络资源和算力资源需要统筹考虑,实现网算资源的一体化建模。网算资源一体化度量模型的关键指标包含计算性能指标、存储性能指标、网络性能指标、弹性和可扩展性、可用性和可靠性等。

3.4 星地资源协同智能优化

借助虚拟化及网算资源感知技术实现对整个平台内计算、存储、通信资源的感知、注册、编排及回收,提高平台资源的利用效率,实现资源的按需分配,为上层应用提供灵活可扩展的资源服务。星地协同边缘云为各类型业务提供高可靠性、高可用性的计算和服务平台,通过云中心服务器、分布式的高性能星载板卡以及用户终端设备之间的相互配合,将实时性业务服务部署在网络边缘侧。通过将部分计算能力下沉至边缘侧,实现数据的就近处理,保障业务的时效性,同时将一些长周期、非实时、高计算复杂度的任务部署在云中心,从而借助云中心强大的计算能力,提供业务的高可靠性保障。以卫星网络为基础,星地协同边缘云平台可以突破时间限制,实现全时全域的算力连接,为接入的终端设备就近

调度星上或地面的可用算力资源，满足上层业务需求，实现通感算智等要素的融合，赋能上层业务应用。

4 结束语

随着卫星网络与边缘云技术的蓬勃发展，未来有望通过星地协同边缘云实现异构卫星算存资源的高效整合与共享，构建跨天基与地基节点的协同计算生态，提升卫星网络时空连续服务场景下的云边协同数据处理与算力即时服务能力，敏捷响应云网协同、泛在智能通信、在轨智能推理、通感算智融合等多样化卫星应用的服务需求。为有效推进星地协同边缘云的发展与应用，应加快边缘云星载先进载荷及轻量化架构的研发验证，打造天基基础设施底座；推动星地协同计算技术标准制定和生态建设，为构建卫星网络网元功能虚拟化、高速智能计算、弹性按需部署与自主决策能力等提供有力支撑；深度融合大数据、人工智能等前沿技术，提升边缘云自动化管理和智能化协作能力，构建可满足大规模卫星组网需求的智能化星地协同边缘云。本文提出的星地协同边缘云架构是对未来卫星网络云网协同发展的重要探索，助力中国科学技术协会2024年十大产业技术问题之一的“云网融合技术在卫星互联网中的应用”集智攻关，有望为我国卫星网络迭代演进技术发展及建设提供新的思路。

参考文献

- [1] 王密, 仵倩玉, 肖晶, 等. 低轨巨型星座遥感信息“云-边-端”智能服务关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1256-1263.
WANG M, WU Q Y, XIAO J, et al. Key technologies on “cloud-edge-end” collaborative intelligent service of low-orbit giant constellation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1256-1263.
- [2] 王密, 仵倩玉. 面向星群的遥感影像智能服务关键问题[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 1008-1016.
WANG M, WU Q Y. Key problems of remote sensing images intelligent service for constellation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 1008-1016.
- [3] 中国信通院 IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.
China Academy of Information and Communications Technology (CAICT) IMT-2030 (6G) Promotion Group. White paper on 6G overall vision and potential key technologies[R]. 2021.
- [4] 李菲菲, 胡敏. “黑杰克”项目动向及应用前景分析[J]. 中国航天, 2020(9): 57-69.
- LI F F, HU M. Analysis of the “Blackjack” project developments and application prospects[J]. China Aerospace, 2020(9): 57-69.
- [5] SmartSat Cooperative Research Center. Satellite cyber resilience white paper[R]. 2025.
- [6] DENBY B, LUCIA B. Orbital edge computing: nanosatellite constellations as a new class of computer system[C]//Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. New York: ACM, 2020: 939-954.
- [7] TOBIAS P, NIKITA B, ALEXANDER L, et al. Trabant: “A serverless architecture for multi-tenant orbital edge computing”[J]. arXiv: 2504.08337. 2025:1-17.
- [8] WAQAR N, ALI HASSAN S, MAHMOOD A, et al. Computation offloading and resource allocation in MEC-enabled integrated aerial-terrestrial vehicular networks: a reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 21478-21491.
- [9] JABBARPOUR M R, JAVADI B, LEONG P H W, et al. FedOrbit: energy efficient federated learning for orbital edge computing using block minifloat arithmetic[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2024, 17(6): 3657-3671.
- [10] HOU L M, KANG S L, SUN S H, et al. A load balancing routing method based on real time traffic in LEO satellite constellation space networks[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference(VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [11] XU X B, WANG Q, HOU Y Z, et al. AI-SPACE: a cloud-edge aggregated artificial intelligent architecture for Tiansuan constellation-assisted space-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2023, 37(2): 22-28.
- [12] 华为云. 华为云分布式云原生首次在太空验证, 提升“天算星座”复杂任务能力[R]. 2025.
Huawei Cloud. Huawei Cloud's distributed cloud-native technology validated in space for the first time, enhancing complex task capabilities of the “Skynet Constellation” [R]. 2025.
- [13] WEI J Y, CAO S Z. Application of edge intelligent computing in satellite Internet of things[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 85-91.
- [14] 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.
- [15] 吕挺. 基于分散计算的空天地信息网络资源分配研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
LYU T. Research on resource allocation of space earth information network based on distributed computing[D]. Beijing: University of

Science and Technology Beijing, 2024.

- [16] 宋政育, 郝媛媛, 孙昕. 低轨卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法[J]. 电子学报, 2022, 50(3): 567-573.

SONG Z Y, HAO Y Y, SUN X. Computation offloading and resource allocation algorithm for collaborative LEO satellite multi-access edge computing[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(3): 567-573.

- [17] 周锦雯, 刘乃金, 陈清霞. 基于分布式深度学习的多星计算卸载策略[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(2): 73-80.

ZHOU J W, LIU N J, CHEN Q X. Distributed deep learning-based computation offloading strategy for multi-satellite systems[J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(2): 73-80.

- [18] ZHANG H Y, ZHAO H B, LIU R K, et al. Collaborative task offloading optimization for satellite mobile edge computing using multi-agent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(10): 15483-15498.

- [19] 徐晓斌, 王琪, 范存群, 等. 面向空地一体化信息网络的边缘计算资源融合管理方法[J]. 计算机学报, 2023, 46(4): 690-710.

XU X B, WANG Q, FAN C Q, et al. An aggregated edge computing resource management method for space-air-ground integrated information networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2023, 46(4): 690-710.

- [20] 邹明, 赵子骏, 魏凡. 新兴低轨卫星通信星座发展前景研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(12): 1155-1162.

ZOU M, ZHAO Z J, WEI F. Research on the development prospect of emerging low earth orbit satellite communication constellations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(12): 1155-1162.

- [21] LIU Y, SHEN Y, GUO D N, et al. Network localization and synchronization using full-duplex radios[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(3): 714-728.

- [22] LIU Y, SHEN Y, WIN M Z. Single-anchor localization and syn-

chronization of full-duplex agents[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(3): 2355-2367.

[作者简介]



刘言 (1985-), 男, 博士, 高级工程师, 现就职于上海卫星互联网研究院有限公司、卫星互联网全国重点实验室, 主要研究方向为卫星网络架构、云网融合、通感算智融合、人工智能应用及天基边缘云等。



朱凯歌 (1993-), 男, 博士, 工程师, 现就职于上海卫星互联网研究院有限公司、卫星互联网全国重点实验室, 主要研究方向为云网融合、边缘智算、人工智能应用等。



孙枫 (1995-), 男, 博士, 工程师, 现就职于上海卫星互联网研究院有限公司、卫星互联网全国重点实验室, 主要研究方向为云网融合及天基边缘云等。

师恩磊 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 现就职于上海卫星互联网研究院有限公司, 主要研究方向为卫星网络架构、云网融合及天基边缘云等。

文少杰 (1987-), 男, 博士, 高级工程师, 现就职于上海卫星互联网研究院有限公司、卫星互联网全国重点实验室, 主要研究方向为卫星网络架构、资源分配、路由算法等。