

SICN : 天基智能云网体系架构设想

虞志刚, 李 朕, 章 扬, 龚 恺, 李 果, 朱雪田

(中国星网网络创新研究院有限公司, 北京 100029)

摘要: 随着太空探索与利用的智能化进程不断加速, 以星链、逐日者等为代表的项目已开始布局天基数据中心建设。在此背景下, 如何将通信、导航、遥感、计算、存储等多维资源深度融合, 构建统一、高效的天基信息基础设施, 已成为国内外工业界和学术界共同关注的关键课题。以天基云计算与虚拟化技术为基础, 面向未来天基信息系统的实际需求, 提出一种具备弹性可扩展、资源共享、信息融合与服务敏捷等特征的“天基智能云网”体系架构, 并针对动态组网、星地协同、高可靠计算等挑战, 系统剖析了相应的关键使能技术, 以期为我国构建自主可控的空间信息基础设施提供重要支撑。

关键词: 天基计算; 云计算; 云网融合; 虚拟化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2025070

SICN: Conception of space-based intelligent cloud network architecture

Yu Zhigang, Li Zhen, Zhang Yang, Gong Kai, Li Guo, Zhu Xuetian

China Satellite Network Innovation Co., Ltd., Beijing 100029, China

Abstract: With the accelerating intelligentization of space exploration and utilization, projects represented by Starlink and Project Sun-catcher have begun to promote the deployment of space-based data centers. Against this background, how to deeply integrate multidimensional resources such as communication, navigation, remote sensing, computing, and storage, and build a unified and efficient space-based information infrastructure, has become a key issue of common concern to industry and academia worldwide. Based on space-based cloud computing and virtualization technologies, and oriented to the practical requirements of future space-based information systems, this paper proposes a space intelligent cloud network (SICN) architecture featuring elastic scalability, resource sharing, information fusion, and agile service provisioning. It further analyzes key enabling technologies for challenges such as dynamic networking, space-ground collaboration, and highly reliable computing, aiming to provide important support for China to build an independent and controllable space information infrastructure.

Key words: space-based computing, cloud computing, cloud-network integration, virtualization

0 引言

当今世界, 太空领域智能化发展趋势日益明显, 进入太空、利用太空乃至掌控太空已成为世界航天强国的重要方向。在此背景下, 多国积极推进卫星互联网系统建设, 旨在构建覆盖全球、无缝连接的通信基础设施^[1-3]。例如, 美国的星链 (Starlink)^[4]和柯伊伯计划

(Kuiper)^[5]、欧洲的 IRIS2 卫星星座^[6]、俄罗斯的球体 (Sfera) 卫星星座^[7], 以及我国的国网^[8]、千帆^[9]等卫星星座计划均陆续启动部署。

与此同时, 随着卫星互联网系统建设的不断推进, 尤其是星间激光通信技术的日益成熟^[10], 为了谋求在新技术、新产业领域的先发优势, 各国纷纷布局天基计算的研发任务, 推动卫星互联网从提供通信连接的管道向

收稿日期: 2025-12-12; 修回日期: 2026-05-08

基金项目: 北京市科技新星计划 (No.20240484748); 国家自然科学基金资助项目 (No.62201534)

Foundation Items: Beijing Nova Program (No.20240484748), The National Natural Science Foundation of China (No.62201534)

提供信息服务的内容平台转变^[11-17]。2024年以来,全球多个国家的企业相继提出太空算力中心建设计划,例如美国的Starcloud、中国的轨道辰光与三体星座等,均致力于构建千兆瓦级太空数据中心,旨在颠覆传统天算地算模式,充分利用太空中的太阳能和高效散热等天然优势,推动实现地数天算,以提供成本低于地面数据中心的计算服务^[18-20],天基计算已成为国内外企业争相布局的热点。

在此基础上,为进一步实现全域态势感知,深度融合通信、导航、感知与计算能力,构建具有自治能力的天基智能云网信息系统,摆脱对地面系统的依赖,已成为重要的发展趋势。美国太空发展局(space development agency, SDA)提出的分布式作战人员太空架构初步体现了这一理念,该体系包含传输层、跟踪层、监管层、威慑层、导航层、战斗管理层(BMC3)、地面支持层,旨在通过分布式卫星群实现全域通信感知与连接^[21]。然而,如何高效整合通信、导航、感知、计算等异构资源,通过系统协同效应实现“1+1>2”倍增效应,已成为当前亟待深入研究的关键问题。

以天基计算为抓手,通过云计算与虚拟化技术,将分布式部署于多颗卫星的异构资源(包括通信、导航、感知、存储与计算)进行抽象与解耦,进而融合为一个可统一调度、弹性分配的资源池,最终形成一张架构高度弹性、资源高度共享、信息高度融合、服务高度敏捷的天基智能云网,已经成为航天智能化发展的大势所趋。体系架构是天基智能云网的关键,加强对它的前瞻性研究,具有十分重要的战略意义和现实意义。

然而,现有研究与试验多集中于将计算能力部署于太空,以构建分布式天基计算系统^[12-20],关于如何以天基云计算与虚拟化技术为基础,将通信、导航、遥感、计算、存储等空间资源深度融合,进而构建统一、高效、可调度的天基信息基础设施,仍缺乏系统性的体系架构研究。面向未来天基信息系统对动态组网、星地协同、高可靠计算和敏捷服务的实际需求,本文提出一种天基智能云网体系架构,并从物理架构、功能架构、星载智算载荷和云网操作系统等方面展开分析,进一步梳理其面临的关键挑战与使能技术,以期为我国构建自主可控的空间信息基础设施提供参考。

1 需求分析

随着航天任务复杂性的日益增加,为应对瞬息万变的在轨任务,天基系统在时效性、自主性与协同性等方面面临更高要求,这也将成为未来空间信息系统的核心

发展方向。

1.1 高时效性任务亟须在轨实时处理与分发

在应对突发性、高时效性任务时,传统“数据下行→地面处理→结果上传”的星地闭环模式已难以满足实时响应需求^[18-20],因为此类场景强烈依赖在轨数据处理能力,以最大限度地压缩信息时延,提升决策与行动效率。在应急救援领域,如林火、洪涝等灾害场景的动态监测与评估,需要卫星在过顶的短暂时间内快速提取火线蔓延范围或淹没区域变化,并直接下发至现场指挥中心,方可支撑快速疏散与救援决策。在金融与安全领域,基于遥感影像的全球大宗物流监控、敏感区域活动监测等场景,也要求近乎实时的目标变化识别与告警。在国防领域,对高速飞行器等移动目标的预警与跟踪,必须在数分钟甚至数十秒内完成探测、识别、定位与信息分发,任何地面中转环节都可能贻误拦截时机。美国太空发展局提出的下一代太空体系架构将依赖地面系统的战斗管理、指挥控制与通信功能迁移至天基以提升响应速度与作战韧性^[22]。

因此,从应用需求视角看,将处理环节前置至太空,实现“感知—计算—分发”一体化,已成为提升天基系统响应能力、支撑瞬时决策的关键。

1.2 极端对抗环境亟须自主智能运行与决策

未来天基信息系统正向高度自治化方向发展,其核心目标是逐步摆脱对地面管控系统的深度依赖,演进为可自主运行、自我维护、智能决策的独立天基自治信息域。这一趋势主要源于多类任务对实时性、韧性和独立生存能力的迫切需求。面对日益严峻的强对抗环境,天基系统应具备在星地链路中断或地面站被摧毁的情况下,仍能维持基本功能并完成关键任务的能力。例如,感知星座必须能够在无地面干预的情况下,自主完成对目标的探测、跟踪、融合与信息分发,确保在极短时间内将感知信息送达拦截单元。此外,大规模低轨星座的运维也远超传统地面操控的负担极限,需借助星间自主管理、在轨故障诊断与重构等技术,实现星座的自我维护与持续服务。美国国防部高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)启动的“黑杰克”项目,卫星配备星载高性能自主控制与处理系统,能够提供星座级和任务级的在轨自主决策能力^[23]。

因此,发展具备自治能力的天基系统,不仅是应对极端工况的必要保障,也是构建弹性空间信息体系和大规模星座高效运行的必然选择。

1.3 跨域协同场景亟须多源信息融合与处理

随着任务复杂度的不断提升和跨域协同需求的日益增长,未来许多关键应用将高度依赖通信、导航、遥感感知与计算等多种天基资源的深度融合与协同调度^[21]。单一类型资源已无法满足系统级、智能化、强实时的任务要求,必须通过一体化调度实现功能互补与效能倍增。例如,在无人系统集群协同的低空经济应用场景中,不仅需要导航卫星提供高精度定位,还需遥感卫星实时感知环境变化、通信卫星保障低时延数据交互,同时,天基计算资源需在轨处理感知信息并快速生成集群控制指令。只有将这些资源动态整合、统一调度,才能支撑广域环境下无人平台的自主协同与智能决策。又如,面向全球级灾害应急响应,需联合调度遥感卫星快速成像、导航卫星标定受灾位置、通信卫星构建应急传输通道、天基计算资源实时提取灾情信息,形成“感知—定位—传输—分析”一体化贯通的应急服务链,极大提升救援效率。

因此,从功能协同与系统效能角度看,构建通信、导航、遥感、计算资源一体化调度能力,已成为支持未来智慧化、响应式、多域融合应用的必然方向。

2 天基智能云网架构设想

本文提出了一种天基智能云网架构,并分别从物理架构、功能架构、天基智算载荷等多个角度进行阐述。

2.1 物理架构

在物理组成上,天基智能云网遵循“节点+连接”的基本架构。节点由装载天基智算载荷的各类卫星或航天

器构成;连接则依托激光或微波链路,实现节点间的高速互联。这些节点可临机自组织为动态集群,形成天基智能“云网”环境,从而支持对广域分布的通信、导航、感知、计算等资源的统一调度与管理,并赋予系统自治、自学习与自演进的核心能力。天基智能云网物理架构如图1所示。

2.1.1 节点:天基智算载荷

天基智算载荷是实现通信、导航、感知等各类资源“云化”的关键,硬件层面由中央处理器(central processing unit, CPU)、图形处理器(graphics processing unit, GPU)、神经网络处理器(neural processing unit, NPU)、现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)和数字信号处理器(digital signal processor, DSP)等多样化星载处理资源构成;软件层面运行网络化、云化操作系统,一是通过标准化接口与通信载荷、导航载荷、感知载荷等进行互联;二是通过虚拟化技术,将分散在多颗卫星或航天器上的通信、导航、感知、计算等各类硬件能力抽象构建为一体化资源池,支持跨节点协同、能力共享,以及资源统一表征与智能管理;三是通过天基智算载荷搭载的智能算力以及部署的智能模型,对外提供基础设施即服务(infrastructure as a service, IaaS)、平台即服务(platform as a service, PaaS)以及软件即服务(software as a service, SaaS)等多种服务模式。

2.1.2 连接:高速星间链路

高速星间链路是实现卫星、航天器等各类节点之间网络化的关键,星间激光通信是当前空间激光通信的发

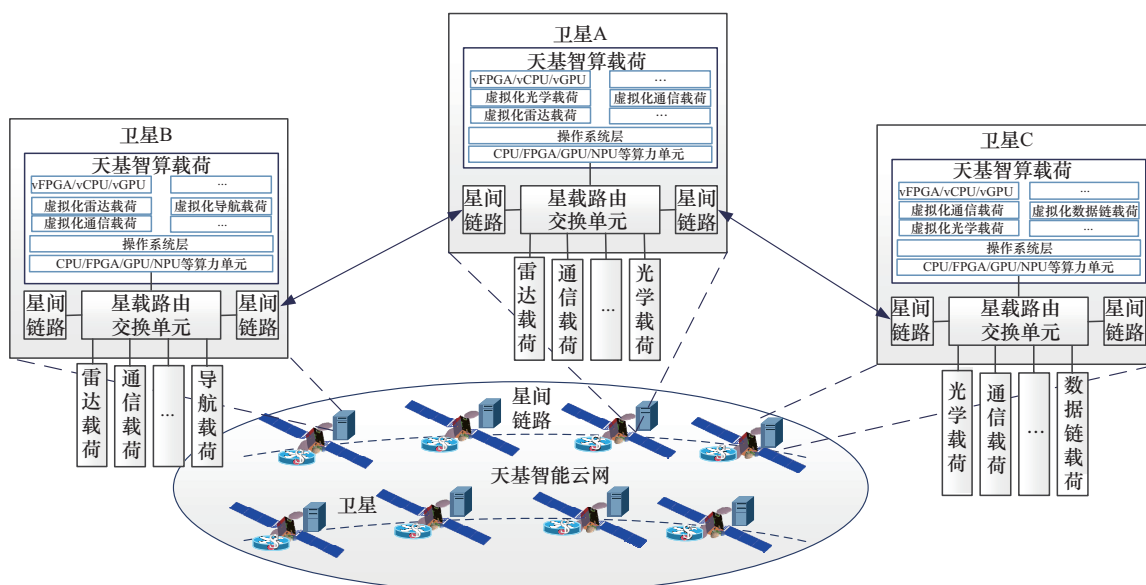


图1 天基智能云网物理架构

展热点,国内外纷纷尝试 100 Gbit/s 星间激光通信,为节点之间高速互联提供有效的带宽保障,然而由于卫星高速运动,其稳定性保障技术目前仍在持续攻关之中^[10]。当然,微波通信可以作为备选之一,其可以提供几 Gbit/s 甚至数十 Gbit/s 的传输速率。此外,在实现节点之间高速互联的基础上,构建一张低时延、大带宽的卫星网络仍然存在挑战,卫星之间距离远、高速移动甚至频繁切换等特性,导致卫星网络的可靠性、确定性与地面光纤链路仍然有较大差距。

2.2 功能架构

天基智能云网功能架构如图2所示,主要由天基智算载荷与天基云网操作系统两部分构成。

作为硬件基础,天基智算载荷强调高可靠性、高效能、实时运行、自主智能与弹性分布式部署等特性。天基智算载荷不仅提供智能算力、标准化接口与高速网络互联能力,还负责承载和运行云网操作系统,并为上层应用软件的开发与部署提供支撑。

天基云网操作系统作为软件核心与天基智能云网的“智慧大脑”,采用分布式分层架构,涵盖单机层、虚拟化层、云管层、框架层及应用层,实现对卫星系统的

感知、规划、控制等,并通过软硬件协同实现安全、实时、可扩展的自主运行与在轨数据处理及分发任务。

随着卫星智能化水平的日益提升,搭载天基智算载荷的卫星逐渐演化成为智能体卫星——具备高级认知与自主协同能力的新一代天基智能节点^[24-27]。与传统依赖地面预设指令或星上规则库的卫星不同,智能体卫星作为天基智能云网的重要组成部分,能够通过多源感知获取空间环境与任务状态信息,基于任务目标进行自主推理与决策,并动态规划、执行与之匹配的复杂行动序列,其核心特征表现为在轨认知、自主决策、协同演进与任务级自治,能够显著提升空间系统在动态、对抗性环境下的智能水平与韧性。

各智能节点之间为了高效协同运作,可借助如模型上下文协议(model context protocol, MCP)、智能体网络协议(agent network protocol, ANP)或智能体间协议(agent-to-agent protocol, A2A)等先进通信协议^[28],实现高效的信息交互与任务协作,从而提升天基智能云网系统整体的智能性与协同效率。

2.3 天基智算载荷

天基智算载荷是天基智能云网的“硬环境”,主要由

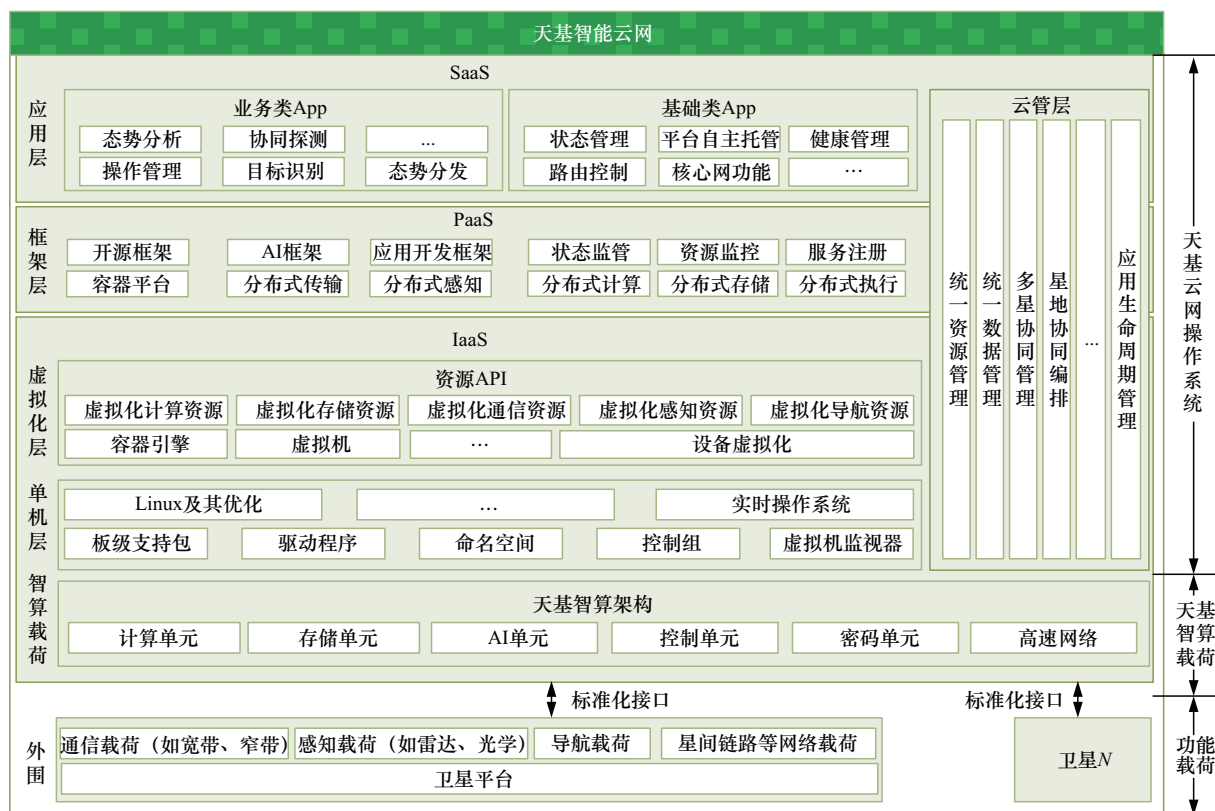


图2 天基智能云网功能架构

控制单元、计算单元、AI单元、存储单元、密码单元以及高速网络等组成,天基智算载荷系统组成如图3所示。其中,I2C指集成电路总线,RS422指差分串行通信接口标准,CAN指控制器局域网,SRIO指串行RapidIO高速互连接口。

2.3.1 主要特点

(1) 高可靠

天基智算载荷作为航天装备,需具备系统冗余、需求平滑扩展等特点。一方面,考虑到异构架构和系统冗余,利用多板卡实现系统解耦和备份;另一方面,采用多板卡分布扩展方式满足算力和接口要求。整体系统在云网操作系统的统一管理适配下,协同实现天基作战管理功能。

(2) 高效能

天基智算载荷作为航天装备需要具备高能效比的特点。一方面,航天装备重量、体积、功率、功耗受限,在设计阶段就要综合考虑各方面的约束条件及应用需求,选择能效比高的器件;另一方面,在系统运行过程中,需要能够根据实际工作状态按需启动相关计算资源或板卡,提高能效比。

(3) 智能化

天基智算载荷需具有自主智能的特性。随着航天信息支援服务更强调实时性、智能性,天基智算载荷需要具备星上目标识别、星上控制指挥、星上自主决策的能力,除通过装配智能计算芯片增强智能算力外,还需要部署智能化应用,形成天基智能化服务。

(4) 弹性化

天基智算载荷需具有弹性扩展特性。随着遥感数据处理、情报信息生成、天基指挥控制、自主管控等能力的提升,天基智算载荷算力、接口等需求都会增加。除提高芯片算力外,板卡也可复制,云网操作系统弹性适配硬件单元也可平滑拓展,达到提升算力、增加接口、完善功能的目的。

(5) 异构化

天基智算载荷需采用异构计算架构。面向感知、通信、网络、计算多样化功能,以及态势生成、处理分发、多源信息融合、自主运行管理等多样化应用,现有单一芯片无法满足算力要求,需采用异构计算架构,如图像处理需要GPU、信号处理需要数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、机器学习模型需要NPU等。

2.3.2 系统组成

(1) 控制单元

控制单元强调高可靠性,主要负责天基智算载荷的状态监控、资源管理等任务,通常由若干宇航级CPU组成。国产宇航级CPU主要包括可扩展处理器架构(scalable processor architecture, SPARC)、无互锁流水线级微处理器(microprocessor without interlocked pipeline stages, MIPS)和高级精简指令集机器(advanced RISC machine, ARM)等三大架构。其中SPARC架构有航天772所研制的3803、3823、3883等系列和航天502所研制的SoC2012、SoC2018等系列;MIPS架构有龙芯中科研制的1E100、1E300、1E1000等系列;ARM架构有欧比特

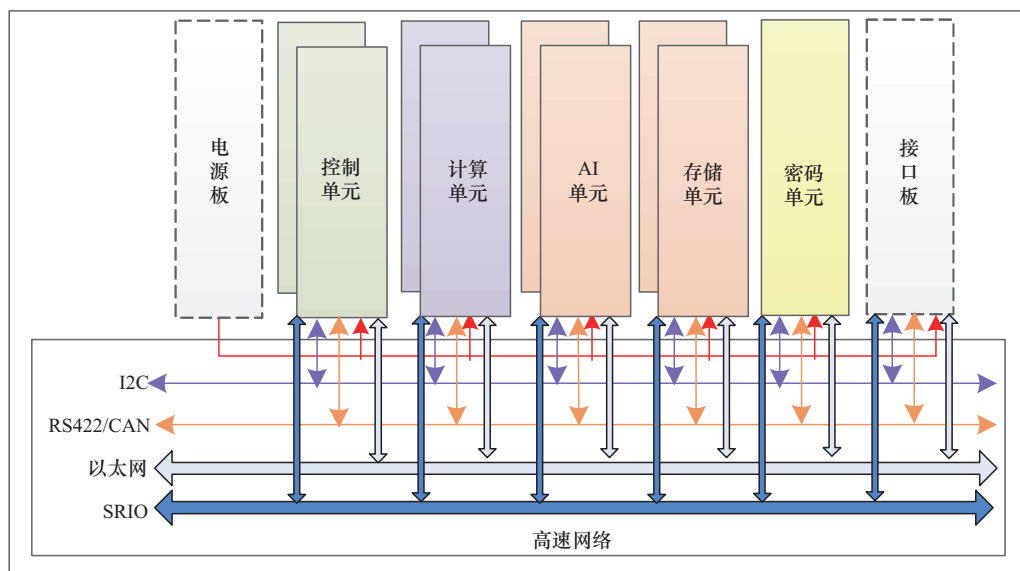


图3 天基智算载荷系统组成

研制的玉龙 810A 处理器。当前, 宇航级 CPU 已经逐渐告别单片机时代, 具有较强算力, 以玉龙 810A 为例, 其计算能力高达 16 TOPS, 可以为多样化、复杂化的任务控制提供基础^[12,28]。

(2) 计算单元

计算单元强调高性能, 通常由若干宇航级或工业级 CPU 组成。近年来, 商业货架器件在低轨卫星领域获得广泛使用, 极大提高了星载计算单元性能。工业级多核 CPU 芯片的单核主频高、计算能力强, 可满足相应功能的安全要求, 装载 Hypervisor、Linux 等内核系统, 管理软硬件资源完成任务调度, 用于执行卫星通信、网络及服务相关大部分核心算法, 同时整合多源数据实现任务规划、决策控制等功能。

(3) AI 单元

AI 单元强调高效能, 通常采用 CPU+AI 芯片, 其中 AI 芯片可选用 GPU、FPGA、DSP、NPU、专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC) 等。当前实现 AI 加速功能的芯片通常依赖 CPU 内核系统进行加速引擎及其他芯片资源的分配、调度, 通过硬件加速实现对多源传感器数据的高效处理与融合。目前, 国产 GPU 研发尚处于起步阶段, FPGA 有复旦微研发的宇航级 V5、V7 系列, DSP 有国防科技大学研发的 6678, NPU 有华为研发的昇腾 A310 等。

(4) 存储单元

存储单元强调大容量, 通常采用宽温、高性能、高可靠、低功耗存储的固态硬盘等, 最高存储速率可达 2.3 Gbit/s, 支持 NVMe1.3、PCIe3.0 等接口协议及多种操作系统。可通过本地高速交换网络响应各板卡的数据交互以及软件加载请求, 将对应的数据或软件进行分发。

(5) 密码单元

密码单元确保信息安全, 主要为智算载荷与外部设备之间的信息交互提供网络防护和数据加解密服务, 需要综合考虑星载速率等方面的需求, 选择轻量化的加密算法与方案。

(6) 高速网络

高速网络负责天基智算载荷内部板卡之间的高速互联与交换, 常见的高速交换总线有 RapidIO、万兆以太网等, 低速交换总线有千兆/百兆以太网、SpaceWire 以及 1553 B、控制器局域网等。近年来, 随着汽车自动驾驶技术的发展, 已有学者提出将以太网供电(power over ethernet, POE)、时间触发以太网(time-triggered ethernet, TTE) 技术用于星载板卡之间的互联。

除此之外, 智能算力载荷还可以根据实际情况通过专门的接口板与通信、导航、感知等各类载荷进行互联。

2.4 天基云网操作系统

2.4.1 系统定位

天基云网操作系统是天基智能云网的“软环境”, 是实现卫星集群间“感、传、算、存”资源共享、硬件互助、任务自主迁移、容错抗毁与能力快速重建的一套分布式云网操作系统, 更是构建信息高度共享、资源高度整合、系统高度自治的天基智能云网的“智能大脑”。

传统星载单机操作系统与天基云网操作系统如图 4 所示。传统星载单机操作系统扮演的角色是底层星载硬件的抽象层^[29], 向下管理内存、CPU、FPGA 等星载计算机硬件, 然后把底层硬件抽象成易用的接口, 向上为应用层提供支持。国外的产品主要包括 VxWorks、QNX、RTEMS 等, 国内的产品主要有航天科技 502 所的 Space OS 以及翼辉信息有限公司的 Sylix OS 等实时操作系统。

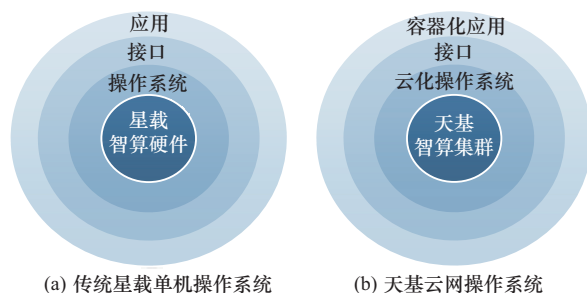


图 4 传统星载单机操作系统与天基云网操作系统

不同于传统星载单机操作系统, 天基云网操作系统向下管理的对象不是内存、CPU、FPGA 等硬件, 而是多个天基智算载荷组成的集群。而天基智算载荷本身具有自己的单机操作系统和硬件, 天基云网操作系统把这些天基智算载荷当成一张天基智能云网, 构建统一资源池统一管理, 向上为应用层提供支撑。

2.4.2 组成架构

天基云网操作系统主要由单机层、虚拟化层、云管层、框架层以及应用层构成。

(1) 单机层

单机层的重点是轻量级星载单机操作系统, 其主要面向天基智算载荷的不同板卡硬件环境, 选用适配的操作系统, 并进行定制化裁剪优化, 以形成轻量级的操作系统, 支持各类处理板卡及接口的底层驱动, 同时通过操作系统抽象层, 屏蔽不同操作系统之间的差异, 为上

层提供统一的程序开发接口及环境。

(2) 虚拟化层

虚拟化层的重点是多元异构硬件或外设的虚拟化软件或抽象软件, 向下对接硬件, 向上提供通信、导航、感知、计算、存储、网络、容器、镜像以及资源编排接口。面向异构资源分别采用不同的虚拟化技术方案: 一是面向星载计算资源, 利用硬件插件屏蔽底层硬件的差异性, 并将CPU/FPGA/NPU/存储等天基计算资源虚拟化为功能可重构的计算/存储资源池; 二是面向星载网络资源, 通过网络功能虚拟化(network functions virtualization, NFV)技术将基于硬件的网络功能以软件形式抽象至计算平台中, 并可根据业务需要进行扩容、缩容、迁移等操作, 实现网络功能的统一软件定义、软件调用、软件配置; 三是面向星载外围设备资源, 对如星载传感器(雷达、光学载荷等)、星载通信载荷、星载导航载荷、各类执行器, 以及通过无线链路接入的有人/无人机等各类外围设备进行抽象描述, 在本地、云端生成相应设备状态的映射, 支持本星/他星/跨域场景下对执行器的调用。

虚拟化层通过多样化的虚拟软件或抽象软件, 将本地的计算、存储、网络资源以及外围的传感器、执行器等硬件资源转换成天基智算载荷的虚拟器件或能力的延伸, 能够将本星/他星的资源和设备作为天基智算载荷的通用能力使用, 最终形成天基智能云网的统一硬件资源池, 支持硬件资源的按需分配和重新组合, 真正实现硬件资源的全局调用。天基云网“资源池”如图5所示。

(3) 云管层

云管层是云网操作系统的核心层, 向下调用虚拟化软件进行资源编排和调度, 向上通过框架层对应用层提供能力调用接口, 主要包括单星资源管理、多星协同管理、星

地协同管理等层级。同时, 云管层也是应用服务与云端的接口, 为云管服务运行提供基础支撑和保障, 可在该层部署服务监测、任务编排、服务调度等软件实体。

(4) 框架层

框架层的重点是通用开放的开发框架, 提供轻量级、开放、通用跨平台的开发框架, 以及良好的用户开发环境, 支持应用软件按需加载、第三方应用的开发部署, 提供应用服务与云端的接口, 为开发服务运行提供基础支撑和保障。框架层主要包括AI框架、UI框架、用户程序框架等, 其中, AI框架兼容TensorFlow、Caffe等多种主流学习框架, 用户程序框架为用户提供多语言的程序框架以及软硬件服务的对外多语言框架应用程序编程接口(application programming interface, API)。

另外, 根据管理的通信、感知、导航、计算、存储等资源, 框架层提供的核心能力框架包括分布式感知、分布式计算、分布式传输等, 同时提供分布式硬件框架。

a) 分布式感知。通过虚拟化层将卫星网络中的星载传感器(包括雷达、光学载荷等)硬件资源抽象成一个统一的感知资源池, 可以根据感知任务的需求, 按需调用光学、微波等手段, 通过多星协同、星地协同, 全面提升天基感知系统的全球态势感知能力。

b) 分布式计算。通过虚拟化层将卫星网络中的星载计算资源(包括CPU/FPGA/NPU/存储)抽象成一个统一的计算资源池, 可以根据计算处理任务的需求, 按需调用各类计算资源, 通过多星协同、星地协同, 全面提升天基智能云网的弹性计算能力。

c) 分布式传输。为天基智算载荷之间以及各类虚拟化资源之间提供分布式“软总线”能力, 各类资源只需接入网络即可成为整个系统资源的一部分, 真正实现接入即用, 开发者或用户无须关心平台组网逻辑和底层协议。

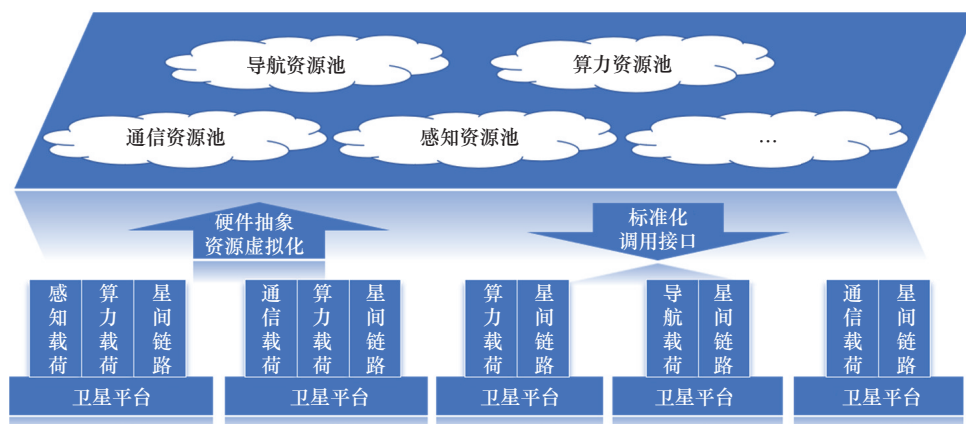


图5 天基云网“资源池”

d) 分布式数据管理。基于分布式传输提供的“软总线”能力,用户数据和应用程序/单一天基智算载荷分离,所有计算平台对数据访问具有一致性效果。

e) 分布式执行处置。通过虚拟化层将卫星网络中的星载执行器,以及通过数据链、空口接入的执行资源抽象成一个统一的执行器资源池,可以根据任务的需求,按需调用各类执行器资源,通过跨域协同,全面提升天基协同打击能力。

f) 分布式应用部署。采用云原生技术架构,使系统具备应用程序、算法模型等容器级、微服务级的在轨实时部署能力。

(5) 应用层

应用层的重点是面向具体的业务应用需求针对性地开发应用,主要包括系统应用以及第三方开发的非系统应用,包括态势生成、情报分发、目标跟踪等业务类应用。

2.5 系统运行范式

在天基智能云网的运行范式下,其与地面云网设施及地面控制系统的关系,呈现出一种动态协同、灵活配置的新模式,核心在于根据任务场景的不同需求,智能分配资源与决策权限。

(1) 与地面云网设施的关系:互补与延伸,而非替代

在应用层面,天基智能云网并非一个孤立的系统,它与地面云网设施共同构成“天地一体”的泛在算力基础设施。

a) 天基独立工作:针对应急救援地面设施损毁、远洋航行等高实时、强对抗及地面网络不可用的场景,天基设施可独立运行,实现“天数天算”与“星间协同”,确保关键服务不中断。

b) 天地协同工作:在日常运行或对算力需求极高的科研、大规模商业应用等的场景下,天基与地面云网通过天地链路深度融合。天基设施负责前端感知数据的在轨预处理与精简,地面中心则承担复杂模型训练与海量数据持久化存储,形成“星上预处理+地面深加工”的高效协作模式,延伸地面云网的服务边界与韧性。

(2) 与地面控制系统的关系:授权与托管,而非依附

在管控层面,天基智能云网改变了传统天基设施对地面控制的绝对依赖,实现了自治。

a) 自治模式:在常态运行或星地链路受限时,系统依托星上智能进行自主任务规划、资源调度和故障处理,实现高度自治,极大减轻地面测控站负担,并显著提升

系统响应速度与生存能力。

b) 代管模式:在系统升级、复杂策略制定或特定安全管控等场景下,天基设施可授权地面控制系统进行“代管理”。地面中心可上传新的智能算法模型、介入关键决策流程或实施集中式资源调配,体现了权限灵活可调的显著特征。

总体而言,天基智能云网与地面设施构成了一个弹性、智能的有机整体,既能作为独立的功能实体应对极端场景,也能作为地面能力的延伸与补充实现天地协同;既能通过在轨自治提升效能,也能接受地面代管以确保控制。这种弹性灵活的协作关系,是其在未来空间信息基础设施中发挥作用的关键。

3 问题与挑战

天基智能云网在能源、云化、组网以及控制等方面尚存在难题。

3.1 能源受限难题

天基智能节点受限于卫星平台尺寸、重量与功耗,其电能供给与散热能力极为有限。例如,一个典型低轨卫星平台可能仅能提供数百瓦至千瓦级的持续功率,且必须依赖短暂的日照周期进行补给。然而,支撑云服务所需的高性能计算载荷(如处理高分辨率遥感影像的AI推理芯片)在峰值算力下的功耗可能高达数百瓦甚至千瓦级,这与航天级处理器通常追求的“低功耗、高可靠”设计原则存在根本矛盾。这对能源系统的高效管理、低功耗芯片设计及在轨动态功耗调配提出了极高要求,是制约天基智能云网服务能力的根本性瓶颈。

3.2 载荷云化难题

天基载荷种类繁多,通信、导航、遥感等设备在接口、数据格式、控制协议上差异巨大,且来自不同厂商的同类设备也存在显著异构性。要将这些异构载荷抽象为可统一调度管理的“云资源”,核心挑战在于如何屏蔽不同品牌、型号的硬件差异,将其功能(如对地观测、信号传输)封装成标准的、可复用的服务,并提供统一的调用接口。其技术本质类似于地面鸿蒙操作系统(HarmonyOS)通过“软总线”技术^[31],将不同品牌、型号的相机、传感器等外设抽象为统一的设备能力池,从而实现跨设备的无缝协同与资源调用。在天基场景下,目标是将不同厂商的同类载荷(如多种型号的合成孔径雷达或光学相机)抽象为统一的“感知能力池”或“通信能力池”,并通过标准化接口实现跨卫星的任务调度与功能调用。

这需要全产业链在接口规范、数据模型和服务协议上达成深度协同,是实现资源即插即用与灵活组合的关键。

3.3 稳定组网难题

卫星节点的高速运动导致网络拓扑持续剧变,空间链路易受遮挡;复杂空间电磁环境导致激光与微波通信误码率显著高于地面光纤通信误码率。更为严峻的是,星间/星地长距离传输带来的固有高时延(通常为毫秒至秒级)和显著抖动,与地面高性能计算和人工智能训练集群对网络的苛刻要求形成巨大差距。地面智算中心内部通过 InfiniBand 或 RoCE 网络实现互联,要求端到端时延低于 $1\ \mu\text{s}$ 、抖动控制在纳秒级、丢包率低于 10^{-12} ,以确保分布式训练的同步效率^[30]。天基智能云网当前技术指标与之相差数个数量级,构建一个能提供确定性服务品质(如带宽、时延保证)的天基智能云网是核心挑战。

3.4 最优控制难题

天基智能云网是由大量异构节点构成的复杂系统,其虚拟资源(计算、存储、带宽)分布广且动态变化。在此环境下,如何设计高效的多目标调度算法,协同分配计算任务与通信、导航等资源又是一大挑战^[32-33]。地面云数据中心已广泛应用 Kubernetes 等编排器进行容器化应用的自动部署与扩缩容,但其调度策略基于相对稳定的网络与能源供给。天基环境的高度动态性(如链路中断、能源波动)要求调度器必须具备更强的预测能力和自适应能力,从而在满足多样化任务需求的同时,实现系统整体效能(吞吐量、能耗、任务完成率)的最优。

4 关键技术

4.1 高效能源管理与智能功耗调度技术

针对天基智能云网节点能源受限的问题,亟须发展面向航天场景的高效能量管理与动态功耗调度技术。一方面,通过引入在轨能源自治管理系统,结合太阳能入射预测与负载感知技术,可实现对卫星能源供给的精细化调控;另一方面,需发展低功耗异构计算芯片与 AI 推理加速器,在保障任务性能的同时降低单位算力能耗。此外,可借鉴地面数据中心的“能量—算力耦合调度”思路,构建面向星座级的“能源—计算”联合优化框架,基于强化学习的资源分配方法^[34],在任务编排的同时考虑能量回补窗口、热约束与资源分布,为天基智能云网提供可持续的服务支撑。

4.2 多维异构资源虚拟化与云化封装技术

针对天基载荷接口、协议专用化、异构性强导致的

“资源孤岛”问题,亟须突破异构载荷虚拟化与云化封装技术,以天基云计算、虚拟化技术为抓手,将通信、导航、感知、计算、存储等不同功能模块抽象为统一的“能力服务单元”,通过轻量级容器化封装支持平台移植与部署,实现空间信息网络资源池化^[35]。同时,应构建统一的数据模型与接口描述语言,实现对异构设备的软总线式接入与能力注册,形成可编程、可编排的“天基能力池”,从而为能力服务化、跨卫星任务协同服务奠定基础。

4.3 高可靠天基组网与确定性传输技术

天基智能云网的稳定可靠组网是实现天基智能云网的关键,亟须攻关星间网络自适应拓扑感知与链路重构能力的自组织技术,通过结合动态拓扑预测模型与多域资源联合控制,在星间链路中断、日凌、遮挡或时延波动条件下维持服务连续性。同时,引入确定性传输机制^[36]与多路径智能传输技术,确保关键业务在高误码率和高抖动环境下仍具可预测的服务质量。此外,可利用强化学习和图神经网络等智能优化手段,实现路由与资源分配的实时自优化,为天基智能云网提供稳定、低时延的网络通信支撑。

4.4 多维资源智能编排与自适应控制技术

针对多节点、多任务、多约束的天基智能云网环境,亟须发展具备环境感知与策略进化能力的智能编排与控制框架,结合深度强化学习与多智能体决策方法^[37],实现对通信、感知、导航、计算、存储、能源等多维资源的动态联合调度^[38]。在此基础上,可引入预测式任务编排机制,利用轨道演化、能量供给与链路可达性预测结果,提前优化任务迁移与资源分配决策;同时,借鉴地面云原生技术(如 Kubernetes)的容器自动化与微服务理念,实现星地联合的“自部署—自调度—自恢复”闭环控制,显著提升天基智能云的自治性、鲁棒性与全局资源利用效率。

5 结束语

随着太空智能化进程不断加速,天基信息系统正由传统通信连接和数据获取平台,向融合通信、导航、遥感、计算、存储等多维资源的综合信息基础设施演进。本文以天基云计算与虚拟化技术为基础,面向未来天基信息系统对弹性扩展、资源共享、信息融合和服务敏捷的实际需求,提出了天基智能云网体系架构,并从物理架构、功能架构、天基智算载荷和天基云网操作系统等方面进行了系统阐述。总体来看,天基智能云网仍处于发展早期,动态组网、星地协同、高可靠计算、确定性

传输、多维资源智能编排等方面仍面临诸多挑战。未来有必要进一步加强参考架构、接口标准、资源抽象模型、在轨验证平台和产业协同机制建设,推动天基智能云网从概念设计走向工程实现。相关研究将为我国构建自主可控的空间信息基础设施提供重要支撑,并为未来空间信息体系中的技术创新、标准研制、试验验证与生态建设奠定基础。

参考文献

- [1] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.
Wang C T, Zhai L J, Xu X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.
- [2] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G 星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2024, 54 (5): 1177-1214.
Chen S Z, Sun S H, Kang S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Chinese Science: Information Science, 2024, 54 (5): 1177-1214.
- [3] 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.
Yu Z G, Feng X, Huang Z X, et al. Research on the architecture of space-ground integrated information network: integration of communication[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 11-29.
- [4] StarLink[EB]. 2025.
- [5] Amazon. Project Kuiper: delivering high-speed, low-latency broadband to unserved and underserved communities globally[EB]. 2025.
- [6] 新华社. 欧盟将开发 IRIS2 通信卫星系统[EB]. 2025.
Xinhua News Agency. EU to develop IRIS2 communications satellite system [EB]. 2025.
- [7] 科技日报. 俄将投巨资建“球体”卫星系统[EB]. 2025.
Science and Technology Daily. Russia to invest heavily in “Sfera” satellite system [EB]. 2025.
- [8] 王晓海, 李强. 巨型低轨星座发展现状及启示[J]. 中国航天, 2024(6): 10-15.
Wang X H, Li Q. Development status and implications of mega low earth orbit constellations [J]. China Aerospace, 2024(6): 10-15.
- [9] 中国知识产权报. 我国低轨卫星互联网技术取得新突破——历尽“千帆”逐梦天空[N]. 2025.
China Intellectual Property News. New breakthrough in China’s low earth orbit satellite internet technology — overcoming challenges and soaring into the sky [N]. 2025.
- [10] Qu Y Z, Zhang Q W, Wang Y Y, et al. Demonstration of a cost-effective double-clad fiber-coupled laser communication terminal for short-range inter-satellite optical wireless communication system[J]. Optical Fiber Technology, 2025, 93: 104271.
- [11] Rahim S, Peng L M. Intelligent space-air-ground collaborative computing networks[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2023, 6(2): 76-80.
- [12] 虞志刚, 冯旭, 陆洲, 等. 宇航级处理器发展现状与趋势[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(1): 50-58.
Yu Z G, Feng X, Lu Z, et al. Development status and trends of space processor[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(1): 50-58.
- [13] 虞志刚, 冯旭, 戴天, 等. 空间边缘计算: 需求、架构及关键技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(12): 4416-4425.
Yu Z G, Feng X, Dai T, et al. Space edge computing: requirement, architecture and key technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(12): 4416-4425.
- [14] 丁文慧, 高吉星, 虞志刚, 等. 空间算力网络初探[J]. 移动通信, 2022, 46(10): 41-46.
Ding W H, Gao J X, Yu Z G, et al. Preliminary exploration on satellite computing networks[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 41-46.
- [15] 虞志刚, 丁文慧, 陆洲, 等. 卫星云网: 一种云网融合的卫星网络体系架构[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4 (3): 23-30.
Yu Z G, Ding W H, Lu Z, et al. Satellite cloud network: a satellite network architecture based on cloud-network integration[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 3(3): 23-30.
- [16] Guimarães C, Netti A, Sauer M, et al. A survey on satellite computing: connecting the dots between networks and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 567-592.
- [17] 彭木根, 袁硕. 面向星地融合的 6G 云雾化自组网[J]. 电信科学, 2024, 40(3): 1-14.
Peng M G, Yuan S. Toward satellite-terrestrial integration: 6G cloud-fog collaborative self-organizing network[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(3): 1-14.
- [18] Starcloud. Official website of Starcloud (formerly Lumen Orbit) [EB]. 2025.
- [19] 北京轨道辰光科技有限公司. 轨道辰光完成首轮融资建设太空算力基础设施[EB]. 2025.
Beijing Orbit Morning Light Technology Co., Ltd. Orbit morning light completes first-round financing to build space computing infrastructure [EB]. 2025.
- [20] 中国新闻网. 探秘之江实验室三体计算星座: 展示国际协作生态[EB]. 2025.
China News Network. Exploring the SanTi computing constellation of ZhiJiang laboratory: demonstrating international collaboration ecosystem [EB]. 2025.
- [21] Space Development Agency. Proliferated warfighter space architecture (PWSA) Tranche 2 Tranche 2 draft solicitation[EB]. 2025.
- [22] Space development agency. Rolling out solicitations[EB]. 2025.
- [23] Scientific systems. Receives DARPA blackjack pit boss prime contract [EB]. 2025.
- [24] Zhang R C, Du H Y, Liu Y Q, et al. Generative AI agents with large language model for satellite networks via a mixture of experts transmission[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(12): 3581-3596.
- [25] Markaicode. AI agent deployment on satellites: solving 2025's low-earth orbit bandwidth limits[EB]. 2025.
- [26] Li Z P. Developing AI agents for satellite operations[J]. Journal of

Space Operations & Communicator, 2025, 21(3): 1-9.

- [27] Markaicode. A2A vs MCP: Compare AI agent communication protocols[EB]. 2025.
- [28] 魏肖彤, 许浩博, 尹春笛, 等. 天基计算芯片: 现状、趋势与关键技术[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(9): 2963-2978.
Wei X T, Xu H B, Yin C D, et al. Space-based computing chips: status, trends, and key technologies[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(9): 2963-2978.
- [29] 于登云, 李宗凌, 宋桂萍, 等. 我国巨型星座操作系统发展研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54 (3): 449-460.
Yu D Y, Li Z L, Song G P, et al. Development research of operating system for mega-constellation in China[J]. Science China: Information Sciences, 2024, 54(3): 449-460.
- [30] ZTE Corporation, China Unicom Research Institute. White paper on high-performance networks for intelligent computing scenarios [R]. Shenzhen: ZTE Corporation, 2025.
- [31] Huawei Technologies Co., Ltd. HarmonyOS: a distributed operating system for the internet of everything era [EB]. 2025.
- [32] 李双博, 张艳松, 李德仁, 等. 我国天基信息系统发展现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(1): 127-132.
Li S B, Zhang Y S, Li D R, et al. Development status and future prospects of China's space-based information system[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(1): 127-132.
- [33] 李宗凌, 宋桂萍, 汪路元, 等. 巨型星座高效管理及智能应用关键技术研究[J]. 航天器工程, 2023, 32 (1): 1-7.
Li Z L, Song G P, Wang L Y, et al. Research on key technologies of high efficiency management and intelligent application for mega-constellation[J]. Spacecraft Engineering, 2023, 32 (1): 1-7.
- [34] Li Z, Jiang C, Lu J. Distributed service migration in satellite mobile edge computing[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2021: 1-6.
- [35] Ding W, Guo B, Xiong Z. Virtualized computing and communication service provision in large-scale software defined satellite networks[C]//2024 IEEE CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2024: 1157-1162.
- [36] Yang D, Gong K, Zhang W, et al. enDRTS: deep reinforcement learning based deterministic scheduling for chain flows in TSN[C]//2023 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). IEEE, 2023: 239-244.
- [37] Lin Z Y, Ni Z Y, Kuang L L, et al. Satellite-terrestrial coordinated multi-satellite beam hopping scheduling based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 10091-10103.
- [38] Sun J C, Chen X, Jiang C X, et al. Distributionally robust optimization of on-orbit resource scheduling for remote sensing in space-air-ground integrated 6G networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025, 43(1): 382-395.

[作者简介]



虞志刚 (1989-), 男, 博士, 中国星网网络创新研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



李朕 (1996-), 男, 博士, 中国星网网络创新研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



章扬 (1980-), 男, 博士, 中国星网网络创新研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



龚恺 (1995-), 男, 博士, 中国星网网络创新研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



李果 (1995-), 女, 硕士, 中国星网网络创新研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



朱雪田 (1975-), 男, 博士, 中国星网网络创新研究院有限公司研究员, 主要研究方向为卫星通信网络。