

空天地海一体化算力资源管理技术研究及展望

田厉锋¹, 张佳宇¹, 李 昕¹, 曾德泽¹, 姜 楠²

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074;

2. 华东交通大学, 江西 南昌 330013)

摘 要: 跨区域、碎片化边端算力的整合与编排是推进算力基础设施高质量发展的关键环节。空、天、地、海等多样化的工作环境, 共同构成了一个复杂的异构算力资源网络。面对海量且多样的算力资源, 不同算力平台在硬件性能、资源分布及环境适应性方面存在显著差异, 传统的算力管理方式已难以满足高效、动态的资源调度需求。因此, 亟须建立一个“大一统”的管理框架, 以实现高效的感知、整合与编排调度。提出串联空天地海边端设备、打通区域算力壁垒的一体化算力资源管理架构。基于算力网技术的发展现状, 分析部署于太空、天空、海洋和陆地的边端设备的资源优势及环境特征, 构建纳管多区域边端算力设备, 包含多个逻辑结构的一体化算力资源管理架构。总结在算力资源管理架构构建过程中面临的资源感知与纳管、算力拓扑更新以及算力编排调度等挑战, 并提出相应的关键技术路径和研究展望。为边端算力基础设施的建设提供坚实的理论支持, 助力实现多环境下高效、动态的算力资源管理与优化。

关键词: 卫星组网; 在轨计算; 异构算力管理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025012

Research and Prospect of Integrated Computing Resource Management Technologies for Space-Air-Ground-Sea Networks

TIAN Lifeng¹, ZHANG Jiayu¹, LI Xin¹, ZENG Deze¹, JIANG Nan²

1. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

2. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

Abstract: The integration of cross-regional, fragmented edge computing resources is a key aspect in advancing the high-quality development of edge computing infrastructure. Diverse operational environments—encompassing space, air, ground, and sea—jointly form a large-scale network of computing resources. Given the vast scale and diversity of these resources, significant disparities exist across computing platforms in terms of hardware performance, resource distribution and environmental adaptability. Traditional management methods are increasingly inadequate to meet the demands of efficient and dynamic scheduling. Therefore, there is an urgent need to establish a unified management framework capable of enabling efficient sensing, integration, and orchestration of computing resources. We proposes an integrated resource management architecture to interconnect edge devices across space, air, ground and sea to break down regional computing barriers. Based on the current network technologies, we analyzes the resource advantages and environmental characteristics of edge devices deployed in these varied domains. An integrated architecture comprising multiple logical layers is constructed to manage edge computing resources across regions. This paper summarizes key challenges encountered in the development of such an architecture, including resource sensing and registration, computing topology updates, and resource orchestration and scheduling. It further outlines critical research directions, providing robust theoretical support for the construction of infrastructure and optimization of computing resources across heterogeneous environments.

Keywords: satellite networking, on-orbit computing, heterogeneous computing resource management

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62432015, No.62172375), 湖北省重点研发计划 (No.2023BAB065), 中国地质大学(武汉)“地大学者”科学研究基金 (No.2022179)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.62432015, No.62172375), Hubei Provincial Key Research and Development Program (No.2023BAB065), Scientific Research Foundation of “CUG Scholar” at China University of Geosciences (Wuhan) (No. 2022179)

0 引言

国家“十四五”规划明确提出加快数字化发展、打造数字经济新优势的发展目标^[1], 打造社会生产生活触手可及的算力服务框架成为构建算力基础设施的迫切需求。通过利用边缘和终端算力设备, 将任务从数据中心转移到网络边缘, 拉近数据源和用户的距离, 是提高数据处理速度和效率以及算力服务可靠性和安全性的重要途径。通过纳管海量边端设备, 基于分布式架构的边端算力网将极大地促进数字化、网络化、智能化的算力基础设施建设。

算力网作为集成和优化分布在不同地理位置和设备上计算资源的网络, 可通过高效的资源管理和协同工作, 实现计算资源的共享、调度和动态分配。太空、天空、陆地和海洋(简称“空天地海”)作为人类涉足的四大地理划分区域, 均可部署用途广泛、软硬件异构且数量庞大的边端算力设备, 整合纳管这些算力资源对于提升用户侧、边缘侧服务质量具有重要意义。但是, 目前的边端设备通常只担负着单一区域环境中的单一细分任务, 导致不同区域间资源在算力感知、数据通信上存在先天框架设计层面的不互通。此外, 现有研究主要聚焦于空天、空地、空海等复合区域的一体化算力感知与调度体系构建, 尚未提出覆盖空天地海全域算力设备的资源管理与任务调度的方案。

因此, 本文提出一种空天地海一体化算力资源管理架构, 其核心目标是打通各区域之间的通信壁垒, 将不同地理区域内的异构算力设备整合到一个算力网体系中, 通过高效的资源感知途径获知算力状态, 并依据资源的区域、性能、负载等信息归纳资源特征, 结合任务需求合理分配算力资源, 进行资源和任务的重定位与再分配, 实现算力的广泛可达和高效投送。该算力资源管理架构将不同自然区域下的异构边缘设备融合为信息与数据一体化的网络架构, 确保算力服务的广域覆盖, 为社会生产和生活提供可靠的数据支持。

空天地海一体化算力资源管理架构针对四大区域中边端算力资源分布场景广泛、软硬件异构、数据量庞大等特点, 通过高效灵敏的资源感知和整合处理, 构建算力信息的存储和检索机制, 并为不同需求的计算任务分析算力资源与任务的匹配程度, 进行碎片化的边端算力与多样化的服务任务之间的高效匹配, 实现空天地海算力的联合调动和任务处理。该架构将多场景、多规格的碎片化算力资源统一纳管, 实现计算资源的广泛接入和

高效协同, 并且能够高效匹配任务与资源, 有效消解由区域差异、设备差异、通信而引发的算力供需矛盾, 成为未来计算机网络基础设施的全新模式。

1 算力资源管理技术概述和挑战

1.1 边端算力技术的发展概述

算力基础设施对地球观测、城市管理、灾难应急等领域的快速发展至关重要。通过对计算资源的高效整合与利用, 扩大算力规模、提升算力效能已成为实现社会生产生活高质量发展的重要方向。截至2023年, 我国的算力总规模已达到197 EFLOPS, 其中智能算力所占比例不断增大, 智能算力规模已超过总算力的四分之一, 年同比增长45%, 增速比整体算力规模高出15%^[2]。与此同时, 我国光缆线路总长度已达到6 196万千米, 10 Gbit/s PON端口数量超过2 000万个, 全国互联网宽带接入端口总数达到11.1亿个, 全社会算力建设已进入高速增长状态。

边端算力的整体性能和规模在硬件升级与算力建设的推动下不断提升, 已成为不可忽视的庞大算力“富矿”。然而, 边端算力仍存在一些阻碍其进一步发展。首先, 地理位置、发展水平和人口分布等因素导致通信网络的部署极其不均衡, 通信设备性能的提升相对滞后, 导致算力与通信之间出现显著的不匹配, 严重阻碍了计算资源的全面利用; 其次, 多平台、多载荷、立体化和异构化的算力资源之间缺乏有效连接, 各种协议规范互不兼容, 妨碍了算力资源根据任务需求的合理分配。在数据中心强大算力难以覆盖的边缘工作场景中, 由于设备体系间不互通, 冗余算力资源普遍存在空置和浪费现象。

当前, 算力节点的分布从集中式逐渐向边缘和端侧延伸^[3]。从发展趋势上可以看出, 20世纪60年代, 将大批边缘算力节点“集中起来办大事”的分布式计算模式被提出^[4]; 随后, 历经50年的发展, 为了能在用户侧持续提供轻量化的算力服务, 满足时延敏感型任务需求, 以边缘计算^[5]为开端, 云原生^[6]、边缘原生^[7]技术相继被推出, 进一步地提升了边端设备在算力体系中的作用; 接着, 为了解决大规模异构计算资源隔离问题, 边缘原生、算力原生^[8]等成为研究热点。而作为算力原生的核心, 算力网将异构边端算力资源整合进一体化的网络中进行统一管理调度, 极大提升算力资源利用率的同时也减少了算力设施部署成本。算力资源管理技术的发展时间线与关键节点如图1所示。

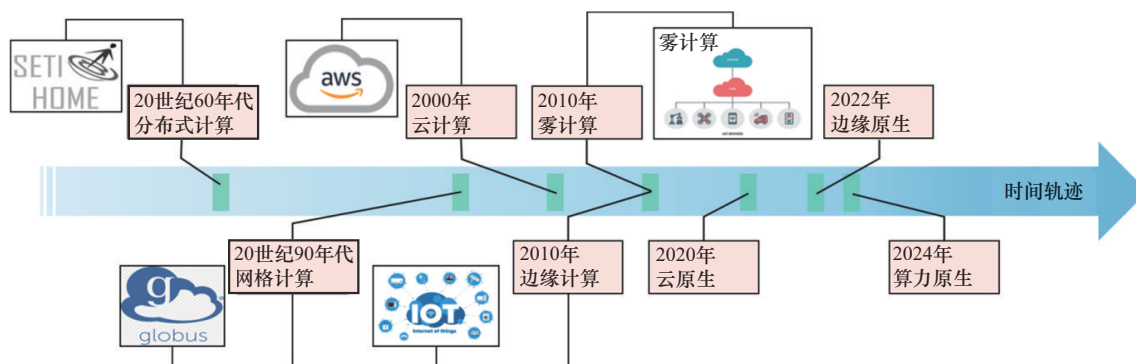


图1 算力资源管理技术的发展时间线与关键节点

1.2 空天地海算力资源概述

依据不同的自然环境可将空天地海区域包含的算力资源划分为天基算力、空基算力、陆基算力和海基算力4部分，它们各自具有显著的技术特点，且彼此间具有显著的环境差异。天基算力包含各种类型的卫星和相应的地面基础设施（如地面基站和控制中心）。根据不同的海拔高度，卫星可分为高轨（轨道海拔36 000 km）、中轨（轨道海拔2 000~36 000 km）、低轨（轨道海拔500~2 000 km）卫星。天基算力不受自然环境和地理位置的限制，可作为陆基网络强有力的延伸和补充；空基算力由飞艇、高空热气球、无人机等空中设备组成，它可提供与地面基站、海基网络之间的数据自动路由，也能与卫星层交换数据信息；陆基算力则囊括地面基站、物联网设备、地学传感器等设备设施，陆基算力沟通天基、空基和海基，是域间数据传输和直接数据获取的重要组成部分；海基算力通过水下传感器、浮标等设备实现海洋数据的采集与传输，或者由船载基站接收卫星信号，进而为周围小型船只提供网络服务。

目前，针对边端算力的一体化协同已有许多工作成果。星地算力方面，MaHSI^[9]聚焦遥感图像的星地联合处理，GBD^[10]、MHSP^[11]聚焦有限资源和动态环境下的空地计算和通信协同；空天算力方面，LOC^[12]、Online UAV Assisted^[13]等方案关注无人机多接入边缘计算的动态计算卸载和服务器部署；海洋算力方面，Satellite-UAV-Terrestrial Networks^[14]、IWSPT^[15]构建海空协作的高效低能耗通信策略；陆上边端算力方面，AdaptiveFog^[16]探究空地一体化框架下动态降低通信时延的方案。

然而，以上研究仅针对一至两个域间的算力设备互通和算力协作，或者着眼于通信质量、分配策略能效等单一目标优化，缺乏对于全域边端算力设备的资源纳管和任务调度。随着空天地海边端设备的数量和性能跃升，

区域间的任务需求与本地资源之间逐渐失衡，建立多工作场景、多设备组成的一体化的算力资源管理架构变得尤为重要。在构建这种资源管理架构的过程中，不仅需要考虑不同域间的资源互通和协作，还需要考虑跨域任务调度和资源优化配置，以满足不同计算任务对算力资源的需求。

1.3 空天地海一体化的算力资源管理面临的挑战

通过对国内外算力资源管理研究现状的调研，剖析当前算力资源管理中存在的技术问题，并提出解决方法，分析在空天地海一体化算力网中跨域网络的资源、功能、服务多要素的协同构建过程中存在的“广域资源感知困难、动态拓扑管理困难、资源编排调度困难”3个核心问题，其具体表现为以下3个方面的挑战。

（1）算力资源广域分布与设备异构对资源的感知与纳管提出挑战

空天地海一体化算力网中，设备的广泛分布、资源的异构性和资源的碎片化特征使得资源感知和整合成为关键。算力网往往由多种异构计算资源构成，包括：低轨卫星载荷算力、无人机的本机算力、地学传感器的存储容量、海洋浮漂传感器集群的通信资源等。由于硬件设备具有不同的性能、规格和适用场景，因此，如何在大规模、跨区域的网络环境中精准感知资源状态并高效进行资源纳管，成为迫切需要解决的问题。有研究提出融合网络体系与算力体系的网络架构，提升算力网络的感知、管理能力^[17-18]。然而，这些方法仍面临区域化感知精度不足和跨区域感知困难等问题，特别是在大规模、动态变化的全域算力网中，感知精度和效率更加难以保障。因此，如何赋予算力网强大的感知能力来实时监控和整合各种异构资源，准确发现和精准管理网络上每一个计算节点，以及应对节点之间软硬件的差异化，成为空天地海一体化算力资源管理面临的关键挑战。

(2) 全域异构算力节点动态变化对算力信息整合与拓扑更新提出挑战

将不同区域的算力设备连接在同一网络中,必须时刻面对资源负载、离线故障、通信质量等设备状态变化,这考验着算力网的信息整合与拓扑管理能力。有研究提出通过动态感知、智能调度、混合式算力度量等技术来应对算力网络中的节点动态变化和物理拓扑不确定性挑战^[19-20]。然而,针对设备异构性的研究缺乏整合不同节点的算力、存储、通信、兼容性等多维度信息的度量和整合能力。因此,如何在拓扑结构调整的过程中实现高效的冗余信息过滤,以及算力节点信息的高效更新与快速查找,成为空天地海一体化算力资源管理面临的又一关键挑战。

(3) 多样化的算力设备与服务需求对资源调度与任务分配提出挑战

空天地海区域内设备的资源特征不尽相同,如:天基卫星星座可实现大规模数据传输但星地传输受限于有限过顶时间;空基高空飞行器可担负通信中继和数据采集任务,滞空时间长但是载荷有限;陆基的地学传感器能收集、存储和传输地理信息但单个设备性能较低;海基的浮漂式传感器或者水下传感器可用于水文等数据收集和传输但受海洋恶劣气候影响较大。以上特征在进行空天地海跨域资源管理时更加显著,不同区域、不同类型算力节点之间的资源分配难以协调和优化,无法确保任务能够高效且按时完成,是对现有调度与编排策略提出的严峻考验。此外,不同域间的网络时延、带宽限制、设备能力和服务质量要求都可能导致任务调度的不确定性,进一步加大了调度决策的复杂性。因此,如何基于实时的资源与任务状态进行智能化的调度,优化任务分配,提高资源利用率,成为空天地海一体化算力资源管理中的关键挑战。

2 空天地海一体化算力资源管理架构概述

空天地海一体化算力网中的算力节点呈现出多区域、异构化、动态化的特点,基于此,在构建算力网的资源管理架构时,需要兼顾多区域碎片化算力设备的全面感知与高效整合,同时考虑算力硬件和服务请求之间复杂的供需状态。本节将系统地概述空天地海一体化算力资源管理框架的逻辑架构与物理架构,全面描述从全域资源感知到智能资源调度的完整技术体系。

2.1 空天地海一体化算力资源管理系统逻辑架构

通过分析不同地理区域内算力设备的作业环境、硬件配置与工作模式,本节将概述空天地海一体化算力资

源管理架构的系统逻辑架构。该架构可以高效地感知和管理空天地海区域的各种异构算力设备,高效地归纳算力的硬件信息并且根据计算任务的资源需求,智能地执行资源分配,在满足最大化利用多区域、多维度算力资源的同时兼顾任务请求的时延、准确率、兼容性等 QoS 指标,实现算力分配契合任务供需的“量体裁衣”。

为了实现以上功能设想,将空天地海一体化的算力资源管理逻辑架构解构为五大功能层,包括全域算力感知层、异构算力资源纳管层、任务需求整合分析层、算力资源—任务匹配调度层和算力服务应用层。这些层级之间通过协同工作,可实现对异构化、碎片化算力资源的精细化管理和高效利用,推动多区域算力协同感知与统一调配。该系统逻辑架构如图2所示。

(1) 全域算力感知层

在整个算力资源管理架构中,对于空天地海区域广泛分布的算力设备状态信息进行收集分析是维持算力网稳定的重要环节。因此,在算力资源管理架构的全域算力感知层,首先需要在太空、天空、陆地和海洋的边缘设备间部署一定数量的监测节点,实时监控各种设备的负载状态,并感知当前时刻硬件的新增或离线情况。这些信息还包含节点的多维度信息(如地理位置、资源类型、通信协议等),为接下来的资源整合管理提供数据依托。同时,为了打破区域之间的跨域信息整合问题,还需要建立面向全域算力设备的算力感知机制,并针对不同区域的通信状态特点(如星地通信关注过顶时间,空海通信关注飞行器轨迹编排等)设计对应的算力信息通告策略。

(2) 异构算力资源纳管层

空天地海一体化算力网中包含海量的异构算力设备,为了实现多区域算力之间的高效协同工作,需要打造一个成体系的算力资源归纳管理机制。异构算力资源纳管层负责网络中算力节点的计算、存储,并对带宽资源进行识别和分类,以便统一管理和调度。该层需要一个适用于全域异构设备进行资源度量的统一量纲,可以将异构的资源集中概括为算力性能、通信带宽、网络时延、数据存储等。算力资源管理架构将依据信息通告、性能度量、业务支撑和硬件参数等指标将算力节点纳入资源池进行统一管理。

(3) 任务需求整合分析层

不同任务在不同硬件架构与运行环境中的处理效率差异显著^[18-21],横跨空天地海区域的跨域任务需求进一步提升了任务匹配和资源调度的难度。与异构算力资源纳管层提出的算力量纲互相对应,任务需求整合分析层

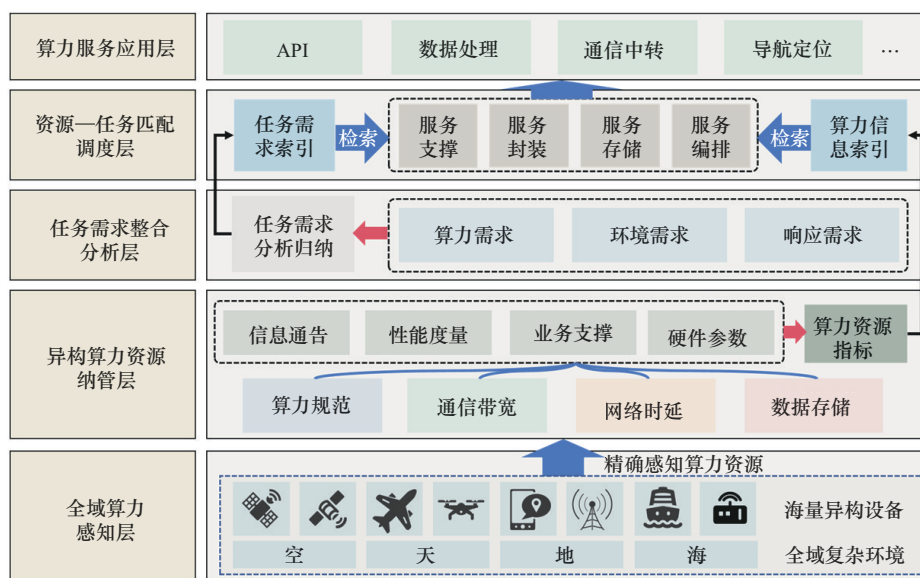


图2 空天地海一体化算力资源管理系统逻辑架构

对不同任务的资源类型需求、资源需求量、任务 QoS 要求和地理区域特征进行归纳，整合为算力、环境和时延等需求指标，为计算任务的编排调度提供量化参考。

(4) 算力资源—任务匹配调度层

空天地海一体化算力资源管理架构的异构算力资源纳管层和任务需求整合分析层提供算力资源量纲和任务需求指标，为跨区域的资源分配和任务卸载提供途径。算力资源—任务匹配调度层采取主动的任务卸载规划策略，通过更高效的算力信息索引机制获取算力资源的实时状态，降低资源分配过程中产生的性能冲突与负载不均衡，以最大化资源利用率。同时，该层更关注任务请求的运行效能，可以通过边端融合的容器存储规划和更高效的文件拉取策略缩短服务启动时间，提升算力网中计算任务运行的连续性和稳定性。

(5) 算力服务应用层

算力服务应用层提供面向多种业务的标准化接口和服务，使各种应用能够方便地接入网络，并能有效利用设备的计算和存储资源。通过标准化的接入点简化应用部署，支持应用的快速分发和加载，同时确保用户体验的稳定性和高质量。这种应用服务能够有效满足广泛的应用场景需求。

2.2 空天地海一体化算力资源管理系统物理架构

通过对边端算力节点的工作性质和作业环境进行划分，可以将空天地海一体化算力资源管理系统细分为天基算力、空基算力、陆基算力、海基算力等子区域，该划分方式将有助于算力网归纳节点资源特征，进行更加

高效的资源感知与纳管，其具体构成如图3所示。

(1) 天基算力

随着天基设备有效载荷的性能提升，以低地球轨道（Low Earth Orbit, LEO）卫星为首的卫星星座组网通过在轨计算减轻星地链路的数据传输压力，成为提升地球观测和空间科学等工作效能的重要算力资源。如 SpaceX 已部署超过 3 万台定制 Linux 计算机至太空，以增强其卫星网络的计算能力^[22]，许多研究^[23-25]也提出了卫星在轨计算框架和优化算法，以支持卫星上的计算任务。这表明卫星已能够支持更多的在轨计算任务，随着算力的提升和策略的优化，卫星组网可应用在灾害监测、目标跟踪等时延敏感任务中。天基算力摆脱了地形地貌对算力服务覆盖区域的阻碍，在空天地海一体化算力网中扮演着关键角色。

(2) 空基算力

以平流层飞艇、高空气球、低空无人机等为代表的无人飞行器，为高、中、低空域的计算和通信提供了高性价比的设备选择。高空飞行器（如 Loon 项目^[26]、HAUV 项目^[27]等）利用高海拔部署，有效摆脱部分地形限制，相比卫星短暂的过顶时间，高空飞行器凭借其长续航能力在计算和通信应用中展现出显著优势。中海拔高度运行的高空气球（如 GHAPS 项目^[28]、Gondola 平台^[29]等）则凭借较低的使用成本和快速部署等特点广泛应用于大气、天文和遥感观测任务。低空的无人机通过多机组网，在有限区域内提供性能可观、功能丰富的算力服务。空基算力共同为巡逻跟踪、搜救检测等任务提

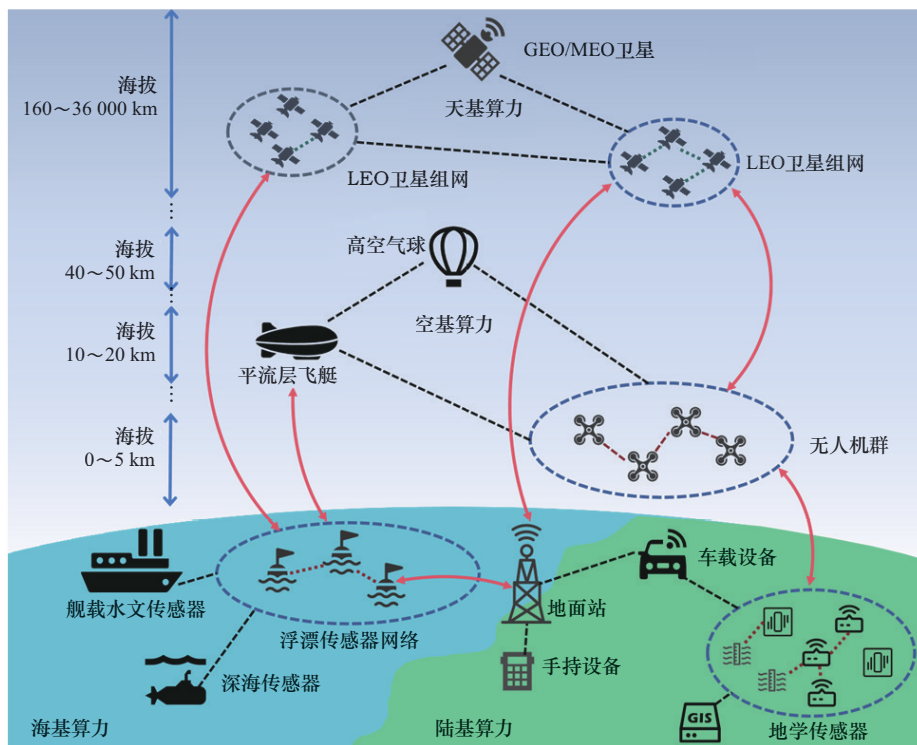


图3 空天地海一体化算力资源管理系统构成

供高时效、低成本的算力支撑。

(3) 陆基算力

广泛分布于河流山川的地学传感器、固定式边缘服务器和车载设备，是整个算力网中数量最庞大的组成部分。与传统的集成式算力中心相比，这些边端设备具备就近可达和成本低廉等显著优势。在如气象检测、森林火险监控等广泛的地学信息数据收集和灾害防治管控任务中，这类算力设备展现出了更为显著的性能优势。

(4) 海基算力

海基算力包括船载设备（如温盐深测量仪（Conductivity-Temperature-Depth System, CTD）^[30]）、洋面设备（如阿尔戈计划（Array for Real-time Geostrophic Oceanography, ARGO）浮标网络^[31]）、海底传感器（如DART海啸地震监测项目^[32]），在算力网中扮演着重要角色。由于海洋环境的严苛和复杂性，传统陆基数据中心的强大算力难以覆盖到海洋中设施密度极低的区域。因此，诸如海洋勘探和海洋环境监测等任务的第一手数据往往无法得到即时处理或传输。海洋算力通过距离优势与一体化算力网的协同作用，能够在数据的预处理和预筛选阶段发挥重要作用，从而有效降低海洋科考、救援任务中的数据处理和通信传输成本。

每个区域内的边端设备各有其优势和短板。空天地

海基端算力设备的关键参数和特征见表1。由表1可知，单一域内算力节点难以发挥整体系统的优势。构建一体化算力网的算力资源管理系统，通过地面边端设备与天基算力、空基算力、陆基算力和海基算力的配合，使全域边端设备不再受限于特定的工作场景，能够跨越地理限制和框架约束，充分挖掘算力设备的性能潜力。

3 空天地海一体化算力资源管理系统构建的关键技术

为实现算力网中对不同区域环境下设备资源的感知纳管，以及异构资源和服务请求的合理调度与高效编排，需针对空天地海算力网面临的关键技术展开研究。本节结合空天地海一体化算力网发展提出以下关键技术：①跨区域资源状态感知与大规模资源纳管技术，用于高效获取不同区域异构设备的资源信息并统一管理；②边端算力的信息整合与拓扑更新机制，用于更新算力节点状态与维护网络拓扑信息；③面向空天地海全域的任务分配和算力调度策略，用于合理分配任务执行所需资源，确保算力网高效运行和负载均衡。这些技术在继承算力一体化网络核心理念的基础上，结合新技术与架构设计，进一步增强空天地海一体化算力网在动态大规模环境中的感知、管理与调度能力，以满足复杂需求。

表 1 空天地海边端算力设备的关键参数和特征

参数	天基算力	空基算力	陆基算力	海基算力
设备间距离	最远	较远	相对近	较远
设备密度	极低 地理影响很小	较低 地理影响较小	最大 分布不均匀	较低 分布较均匀
设备能耗	较大 补给周期较长	较大 返航补充能源	适中 补充能源容易	适中 能源储备丰富
资源状态	实时获知 可预测	更新频率较高	更新频率较高	更新频率较低 且需要定期维护
通信方式	无线和激光通信	无线通信	无线和有线通信	声纳、无线和有线通信
通信时延	较大 且受轨道影响	随海拔高度 递减	整体较低 极不统一	较大 需要专门通信中继
网络拓扑	动态 可预测	动态 难预测	相对固定 较易改变	相对固定 较稳定

3.1 跨区域资源状态感知与大规模资源纳管技术

跨区域资源状态感知与大规模资源纳管技术的核心目标是提升空天地海一体化算力网对复杂区域环境内异构设备的监测与感知能力，以及对大数量、多种类算力设备资源的高效统一管理。

(1) 基于资源传感与监测载荷的跨区域资源状态感知技术

资源状态感知是实现空天地海一体化算力网全域管理的基础，旨在对网络中各类计算与存储资源进行实时监控与动态感知，以准确掌握资源分布及状态。可采用“分而治之”的监测方案以实现高效的跨域资源监测感知。首先，基于算力感知监测范围规划感知节点的部署锚点，通过优化部署位置覆盖关键区域；其次，利用设备状态监测器实时收集算力节点的硬件状态、负载状态和通信状态，并通过边端网络向核心网关更新算力节点信息，形成动态感知的多维视图。

针对跨域大尺度场景中的数据分布复杂性，可采用区域聚类感知模型通过节点分布密度和通信频率动态调整区域划分策略。例如，针对如空海、空地等通信时延显著的跨域算力感知场景，区域可被划分为若干感知区域，每个区域配置感知节点负责数据采集与本地预处理。感知节点通过边端设备对资源状态信息进行聚合和筛选，剔除冗余或低价值数据，并生成精简后的关键信息。

(2) 面向全域互联的边端碎片化算力资源纳管技术

统一纳管是空天地海一体化算力资源管理系统的核心需求之一，其目标是将分布于不同区域、不同类型的算力设备纳入统一的全域管理框架。可采用基于“Kubernetes + K3S”两级联动的纳管架构，将空天地海算力设备直接整合进一套管理体系中。通过 Kubernetes 主集群对

全域设备进行集中管理，辅以 K3S 在区域内对边缘设备的轻量化管理，实现资源状态的快速采集和参数标准化，进而提供一致性资源服务。

为应对跨区域算力设备统筹中的信息协同问题，可采用全域统一管理协议，对空天地海区域的算力节点的状态采集与调度优先级进行优化。例如，通过协议定义算力节点的资源属性（如算力、存储、带宽）和状态更新规则，确保能够及时获知算力设备的状态变化，为跨域任务在同类设备间的无缝迁移提供可行条件（如直接由跨域的无人机集群对浮漂传感器的水文数据进行预处理）。

3.2 边端算力的信息整合与拓扑更新机制

空天地海跨域算力信息整合与动态拓扑技术旨在对碎片化算力资源进行统一度量，并根据设备硬件状态的动态变化实现算力资源的实时拓扑调整，以适应复杂多变的算力需求。

(1) 面向广域异构的边端算力信息整合机制

算力信息整合需要对不同环境中的边端设备特征统一描述，以适应空天地海算力节点碎片化的资源特征。现有算力量纲（如 FLOPS）在描述异构资源方面具有局限性，可考虑构建一个多维度、多层次的度量框架，综合考虑算力节点的多个关键性能指标（如算力规范、通信带宽、网络时延、数据存储等），形成一个统一的算力度量指标体系。通过综合信息通告、性能度量、业务支撑和硬件参数等对算力节点进行细致的性能评估，实现对算力节点能力的全面和立体度量，从而促进资源的有效管理和优化配置。

为进一步提升算力信息的整合效率与广域适用性，可采用动态整合与调度机制实现全域范围内算力信息的

高效检索与精准定位。可构建基于分布式存储的全域算力信息拓扑视图,优化算力信息数据的存储与更新效率。同时,可采用多级索引结构,结合区域级与全域级检索策略,确保算力信息在广域环境中的快速定位与高效调度。整合后的算力信息不仅能够为任务分配提供精确的资源支持,还可通过动态调度实现节点间资源的高效协同,全面提升空天地海一体化算力资源管理系统的任务响应速度与运行效率。

(2) 面向异构设备状态的算力网动态拓扑重构管理机制

空天地海一体化算力资源中边端设备的高度异构性和状态变化,导致算力信息拓扑结构难以保持稳定,直接影响资源利用效率与系统运行性能。针对这一挑战,可采用基于多类型算力时变策略的动态拓扑重构管理机制。该机制根据算力资源不同的变化频率(如LEO卫星运行轨道低频变化、浮漂传感器位置状态高频变化等)将其划分为不同的类型,并依据不同的资源类型动态调整算力信息拓扑重构的时间周期。动态拓扑重构管理机制能够满足算力网中不同子域和算力资源的更新需求,减少信息冗余,提高算力网络的通信效率。

此外,为满足计算任务所需算力资源跨域分配的准确协同,可以通过跨域网关联合维护算力资源信息数据一致性。跨域网关依据资源变化频率和任务优先级,优先对高频变化的关键算力资源进行重构,确保全域范围内该资源状态的及时更新。对于低频变化的算力资源,可以采用批量压缩与调度传输策略,在保证更新效率的同时减少跨域通信开销。在任务执行过程中,多个跨域网关可以根据区域资源状态与任务特性动态调整资源重构频率,优化资源调度路径,从而提升算力资源在多域协同任务中的匹配效率。这一机制能够显著提高算力资源管理系统在跨域场景下的通信性能和资源调度效率,并确保系统高效地运行。

3.3 面向空天地海全域的任务分配和算力调度策略

空天地海一体化算力资源管理系统的任务分配和算力调度策略的设计目标是通过优化任务编排降低任务请求的等待时间,同时根据任务需求合理分配资源以提升算力网整体能效。

(1) 基于时延敏感的任务请求编排机制

时延敏感任务在空天地海一体化算力资源管理系统中普遍存在,如高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System, ADAS)载具坐标数据、森林火险监测数据、卫星遥感目标跟踪数据,这些数据的传输任务需在严格的时间限制内完成,通常涉及实时数据处理、

交互式应用和高频率响应需求。为满足时延要求,可采用启发式任务编排方法,通过任务权重计算模型综合评估时延需求、计算强度和优先级,并结合算力节点的实时负载和资源状态动态优化任务调度策略,保障高优先级任务的优先执行,同时提升全域资源的调度效率。

在跨域的任务响应中,任务编排面临多域资源异构性和动态性的挑战。可以通过多域资源联合编排调度,根据任务优先级和实时资源需求,结合全域算力拓扑状态,合理编排该任务至最低时延、高性能的算力节点。当局域资源不足时,可以使用跨域网关协调全域资源,优先满足时延敏感任务的执行需求,平衡任务响应的时效性和资源利用效率。同时,还可以优化任务迁移路径,减少跨域通信开销,进一步提升任务响应速度和全域调度的精确性。通过联合跨域协同与全域优化,进一步提升空天地海一体化算力资源管理系统在海量复杂计算任务场景下的整体性能。

(2) 基于算力任务匹配调度的资源分配方法

在节点分布复杂、硬件高度异构的空天地海一体化算力网中,如何同时满足任务需求多样化与算力资源动态变化是维护算力资源分配的重要议题。为实现高效调度,可构建任务算力匹配评估模型,通过分析任务的计算需求、数据规模和实时性要求,结合算力节点的算力信息,量化任务与资源的匹配程度。此外,可采用多目标优化的异构计算资源调度策略动态评估异构资源在不同任务场景中的适配效果,为任务分配提供精准依据,从而优化资源利用效率并提升整体系统性能。

此外,为进一步提升调度效率,可在任务需求调度环节采用分层调度机制,结合全域调度与局域调度的双层模型,结合全局任务优化与区域快速响应优势,实现任务资源的高效分配。全域调度负责跨域资源的整体优化与协调,确保算力资源在全域内的合理利用;局域调度则基于实时感知快速响应局部任务需求,优先处理突发任务。通过两级调度的相互配合,在兼顾全局资源效率的同时,有效满足局域场景下的实时响应要求。

4 结束语

4.1 研究展望

在空天地海一体化算力资源管理系统的构建和运维过程中,依然存在一些值得深入探讨和持续关注的研究方向,将在未来的算力网构建中不断完善与优化。

(1) 面向算力网稳定性的网络冗余设计

冗余设计是确保算力资源管理系统稳定性和持续服

务的关键。由于管理系统中纳管有大量不同负载、不同规格的异构算力硬件，因此维持算力节点的可靠性变得至关重要，需要采取更有效的故障应急处理机制、资源调度策略、成本效益均衡等手段，实现算力网物理硬件和网络架构的多层面冗余设计，提升整体运行的稳定性。

(2) 推进跨域算力设备的通信协议统一化

不同区域设备的通信需求多样（如星间通信与地面通信在通信技术、通信频段上有较大差异），这导致在整合后的算力资源管理系统中，各个在网算力节点之间存在大量不兼容的通信协议。通信协议的碎片化和兼容性问题制约了算力设备互联互通的首要阻碍。因此，为了满足算力节点在多样化应用场景中的通信稳定性，应关注标准化通信协议，以降低通信产生的开发和部署成本；同时应关注混合式通信方式的选择，以适应不同的网络环境和通信需求，满足不同工作环境中的数据传输需求。

(3) 全域设备互联引发的数据安全和隐私保障问题

不同工作环境中的算力设备的数据的隐私安全程度不尽相同，这导致跨区域数据传输时不可避免地存在数据隐私和安全隐患。因此，应建立适用于算力网全局的数据安全和隐私等级度量规范及保障协议，通过归纳所有数据的安全隐私层级，破除跨区域设备沟通的阻碍。

4.2 总结

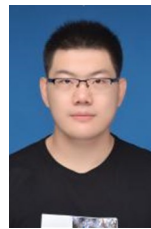
空天地海一体化算力资源管理技术为未来算力基础设施建设提供了理论支撑，结合太空、天空、陆地和海洋算力，实现了多源异构边端设备的软硬件资源的全面整合与高效管理。目前，针对空天地海一体化算力资源管理系统的构建和统一编排技术的研究仍处于探索阶段，未来的研究方向包括解决资源感知与整合、动态异构资源的网络拓扑设计，以及智能服务编排调度等。同时，空天地海算力网的统一编排还需考虑跨区域通信的算力设施管理划分等问题，打通不同设备之间的通信壁垒，实现真正的一体化算力网构建，推动社会生产生活向更高层次的数字化、智能化发展。

参考文献：

- [1] 刘畅. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB]. 2024.
LIU C. Proposal of the central committee of the communist party of China on formulating the 14th five-year plan for national economic and social development and the long-range objectives through the year 2035[EB]. 2024.
- [2] 中国信息通信研究院. 科研能力权威发布白皮书[EB]. 2024.
China Academy of Information and Communications Technology. White paper on authoritative assessment of research capability[EB]. 2024.
- [3] 吴卓然. 什么是算力网络？为什么需要算力和算力网络？[EB]. 2022.
WU Z R. What is a computing power network? Why do we need computing power and computing power networks?[EB]. 2022.
- [4] ZHANG Q, CHENG L, BOUTABA R. Cloud computing: state-of-the-art and research challenges[J]. Journal of Internet Services and Applications, 2010, 1(1): 7-18.
- [5] SHI W S, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.
- [6] KRATZKE N, QUINT P C. Understanding cloud-native applications after 10 years of cloud computing - A systematic mapping study[J]. Journal of Systems and Software, 2017, 126: 1-16.
- [7] WANG J J, FENG Z Q, GEORGE S, et al. Towards scalable edge-native applications[C]//Proceedings of the 4th ACM/IEEE Symposium on Edge Computing. New York: ACM, 2019: 152-165.
- [8] 中国移动研究院. 面向智算的算力原生白皮书[EB]. 2024.
China Mobile CMRI. Native white paper on computing power for intelligent computing[EB]. 2024.
- [9] ZHU B T, LIN S Y, ZHU Y F, et al. Collaborative hyperspectral image processing using satellite edge computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(3): 2241-2253.
- [10] OUYANG Q L, YEN, GAO J, et al. Joint in-orbit computation and communication for minimizing download time from LEO satellites[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(5): 3950-3963.
- [11] ZHANG X Y, LIU J, ZHANG R, et al. Energy-efficient computation peer offloading in satellite edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(4): 3077-3091.
- [12] BAI Z Y, LIN Y F, CAO Y, et al. Delay-aware cooperative task offloading for multi-UAV enabled edge-cloud computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(2): 1034-1049.
- [13] DAI X X, XIAO Z, JIANG H B, et al. UAV-assisted task offloading in vehicular edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(4): 2520-2534.
- [14] WANG Y M, FENG W, WANG J, et al. Hybrid satellite-UAV-terrestrial networks for 6G ubiquitous coverage: a maritime communications perspective[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(11): 3475-3490.
- [15] YANG T T, CUI Z Q, ALSHEHRI A H, et al. Distributed maritime transport communication system with reliability and safety based on blockchain and edge computing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022: 1-11.
- [16] XIAO Y, KRUNZ M. AdaptiveFog: a modelling and optimization framework for fog computing in intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(12): 4187-4200.
- [17] 段晓东, 姚惠娟, 付月霞, 等. 面向算网一体化演进的算力网络技术[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 76-85.
DUAN X D, YAO H J, FU Y X, et al. Computing force network

- technologies for computing and network integration evolution[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 76-85.
- [18] 张宏科, 于成晓, 权伟, 等. 融算网络体系基础研究[J]. 电子学报, 2022, 50(12): 2928-2934.
- ZHANG H K, YU C X, QUAN W, et al. Fundamental research on computing integration networking[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(12): 2928-2934.
- [19] 刘泽宁, 李凯, 吴连涛, 等. 多层次算力网络中代价感知任务调度算法[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(9): 1810-1822.
- LIU Z N, LI K, WU L T, et al. CATS: cost aware task scheduling in multi-tier computing networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(9): 1810-1822.
- [20] 柴若楠, 郜帅, 兰江雨, 等. 算力网络中高效算力资源度量方法[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(4): 763-771.
- CHAI R N, GAO S, LAN J Y, et al. Efficient computing resource metric method in computing-first network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60(4): 763-771.
- [21] KAUSHIK P, RAO A M, SINGH D P, et al. Cloud computing and comparison based on service and performance between Amazon AWS, microsoft azure, and google cloud[C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI). Piscataway: IEEE Press, 2021: 268-273.
- [22] WANG C, ZHANG Y R, LI Q, et al. Satellite computing: a case study of cloud-native satellites[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Edge Computing and Communications (EDGE). Piscataway: IEEE Press, 2023: 262-270.
- [23] LI Y J, LI H W, LIU W, et al. A case for stateless mobile core network functions in space[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. New York: ACM, 2022: 298-313.
- [24] CHENG L, FENG G, SUN Y, et al. Dynamic computation offloading in satellite edge computing[C]//Proceedings of the ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 4721-4726.
- [25] WU C, LI Y, XU M, et al. A comprehensive survey on orbital edge computing: systems, applications, and algorithms[Z]. arXiv, 2023.
- [26] SERRANO P, GRAMAGLIA M, MANCINI F, et al. Balloons in the sky: unveiling the characteristics and trade-offs of the google loon service[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(6): 3165-3178.
- [27] LU D, XIONG C K, LYU B Z, et al. Multi-mode hybrid aerial underwater vehicle with extended endurance[C]//Proceedings of the 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [28] ORNABENE R, HOFFMAN M, ASTLER D, et al. Design status of Gondola for high-altitude planetary science: E-20154[Z]. 2023.
- [29] Current status of a NASA high-altitude balloon-based observatory for planetary science | AIAA AVIATION Forum[Z]. 2015.
- [30] DURAIBABU D B, LEEN G, TOAL D, et al. Underwater depth and temperature sensing based on fiber optic technology for marine and fresh water applications[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1228.
- [31] LU D, XIONG C K, LYU B Z, et al. Multi-mode hybrid aerial underwater vehicle with extended endurance[C]//Proceedings of the 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [32] Networking in oceans: a survey[J]. ACM Computing Surveys, 2021: 541.
- [33] SCHMIDT D, WILCOCK W, LEVEQUE R, et al. Earthquake and tsunami early warning on the Cascadia subduction zone: a feasibility study for an offshore geophysical monitoring network[J]. Geology, Engineering, Environmental Science, 2019.

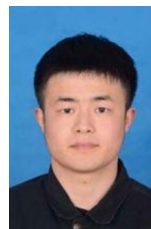
[作者简介]



田厉锋 (1993-), 男, 中国地质大学 (武汉) 计算机学院博士生, 主要从事分布式计算研究工作。



张佳宇 (2000-), 男, 中国地质大学 (武汉) 未来技术学院硕士生, 主要研究方向为低地球轨道卫星边缘计算。



李昕 (1998-), 男, 中国地质大学 (武汉) 未来技术学院硕士生, 主要研究方向为卫星边缘计算。



曾德泽 (1984-), 男, 中国地质大学 (武汉) 计算机学院教授, 主要从事边缘计算、云计算等领域的研究工作。



姜楠 (1981-), 男, 华东交通大学信息与软件工程学院教授, 主要从事人工智能、物联网等领域的研究工作。