

服务天基感知业务的卫星互联网模拟验证系统设计与分析

陶滢^{1,2}, 刘伟^{1,2}, 张磊^{1,2}, 高梓贺^{1,2}, 周钠^{1,2}

(1. 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部, 北京 100094;

2. 天地一体化信息技术全国重点实验室, 北京 100086)

摘要: 提出具有遥感、星间星地组网、星载边缘计算功能的低轨卫星与地面云计算中心和天基、临近空间、空中、陆地、海面等各类型终端构成的卫星互联网总体架构, 给出包括资源层、虚拟化层、服务层、服务管理层及应用层在内的星载边缘计算功能架构。针对星载计算能力有限、天基网络拓扑高动态等典型特征, 在提出星载边缘计算模拟验证系统构建方法的基础上, 设计服务天基感知业务的卫星互联网模拟验证系统, 开展天基感知信息处理分发试验, 并根据不同信息处理与分发方式对网络资源占用和用户服务时延的对比, 分析不同能力条件下卫星互联网对天基感知业务服务的能力水平。

关键词: 天基感知业务; 卫星互联网; 星载边缘计算; 模拟验证

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024006

Design and Analysis of Satellite Internet Simulation and Verification System for Space Remote Sensing Services

TAO Ying^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, GAO Zihe^{1,2}, ZHOU Na^{1,2}

1. Institute of Telecommunication and Navigation Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

2. State Key Laboratory of Space Earth Integrated Information Technology, Beijing 100086, China

Abstract: The architecture of satellite Internet composed of LEO satellites with remote sensing/inter-satellite and satellite-earth networking, on-board edge computing functions, and ground cloud computing centers, and various types of terminals such as sky, near space, space, ground, sea terminals was put forward. The functional architecture of on-board edge computing, included resource layer, virtualization layer, service layer, service management layer and application layer was given. On the basis of proposed the construction method of on-board edge computing simulation and verification system, a satellite Internet simulation and verification system serving space sensing services was designed, and space-based sensing information processing and distribution experiments were carried out. According to the comparison of network resource occupation and user service delay with different information processing and distribution methods, the capability level of satellite Internet for space sensing services under different capability conditions were analyzed.

Keywords: space remote sensing service, satellite Internet, onboard edge-computing, simulation and verification system

0 引言

以通信卫星为基础的卫星互联网是地面互联网在空间的延伸, 同时也是天地一体信息网络的重要组成部分^[1]。6G 时代, 卫星互联网将与地面互联网和移动通信网络深度融合, 在系统架构、协议体制乃至空中接口协议上联合设计, 形成天地一体的融合网络^[2]。不过, 当前通信卫星主要承担的仍然是数据传输服务, 用户的业务请求需经通

信卫星传至地面应用服务中心进行处理, 然后地面的服务信息再经通信卫星反馈至用户。这种情况下, 星地链路的高传输时延将会带来较高的通信时延, 用户服务质量 (QoS) 难以得到可靠保障^[3]。

与此同时, 用于获取光学、雷达、电子等信息的遥感卫星与通信卫星独立发展, 各类遥感卫星获得的数据都需利用独立的数据传输通道传送到地面站, 然后再发送到数据处理系统进行分析 and 处理。在我国地面站建设数量较

收稿日期: 2023-08-01; 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2021YFB2900603)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900603)

少、传输带宽有限的情况下,难以满足大量遥感卫星用户对高速数据传输和应用服务的需求^[4]。为此,如何构建集感传算功能为一体的卫星互联网,用于承载并服务天基感知信息的高效处理和传输,成为业界研究的热点^[5]。

随着星间组网和星载计算能力的提升,在公开的研究中,通常以卫星作为靠近感知端的计算节点,充分发挥卫星在轨计算能力,为用户提供更高效的服务保障技术和方法^[6-9]。例如,美军太空发展局提出的“下一代太空架构(SDA)”将利用星上智能处理计算提供作战管理、导弹跟踪、时敏监视、导航授时等服务^[10]。2021年12月,作为“天算星座”的先期实验星,华为公司与北京邮电大学合作的实验卫星“宝酝号”成功发射并正常运行,其搭载了华为云开发的云原生边缘计算平台 KubeEdge 及边云协同人工智能(AI)项目 Sedna,不但初步验证了卫星边缘云的可行性,还搭载了中国移动研究院的 5G-Advanced 核心网实验单元,在轨开展了建设天地一体轻量级可定义核心网的尝试^[11]。

近年来以“星链”为代表的低轨互联网星座高速发展并为用户提供广覆盖、低时延、大容量网络服务的情况下,美国太空探索技术公司(SpaceX)于2022年12月提出“星

盾(Starshield)”项目,计划发射带有遥感载荷的卫星,进行对地观测并将处理后的数据直接发送给用户^[12-13]。这将进一步推动卫星通信与卫星遥感业务的融合,并创造更多的卫星互联网应用模式。

由此可见,为满足全球多样化用户的服务需求,保障未来卫星互联网中用户的 QoS,将星载边缘计算应用于卫星互联网,利用其独有的边缘处理优势,可实现降低网络时延、减小缓存、节省回传带宽等目标^[14],使得卫星逐渐从单纯的通信通道转变为靠近用户的智能处理平台。同时,结合地面云构成立体化的服务计算网络后,将进一步提高卫星互联网能力水平,实现服务模式的创新。

1 感传算一体卫星互联网的总体架构

图1给出了在卫星上部署遥感、星间星地组网、星载边缘计算设备后的感传算一体卫星互联网的总体架构。

图1中,天基网络由若干颗低轨卫星通过星间链路组网构建而成。每颗卫星上都部署遥感载荷,并可根据任务规划实时生成遥感数据。此外,由于每颗卫星上都部署边缘计算平台,因此卫星将成为服务的提供者,在靠近终端的一侧或者通过“边、端”协作提供信息服务,以减少网

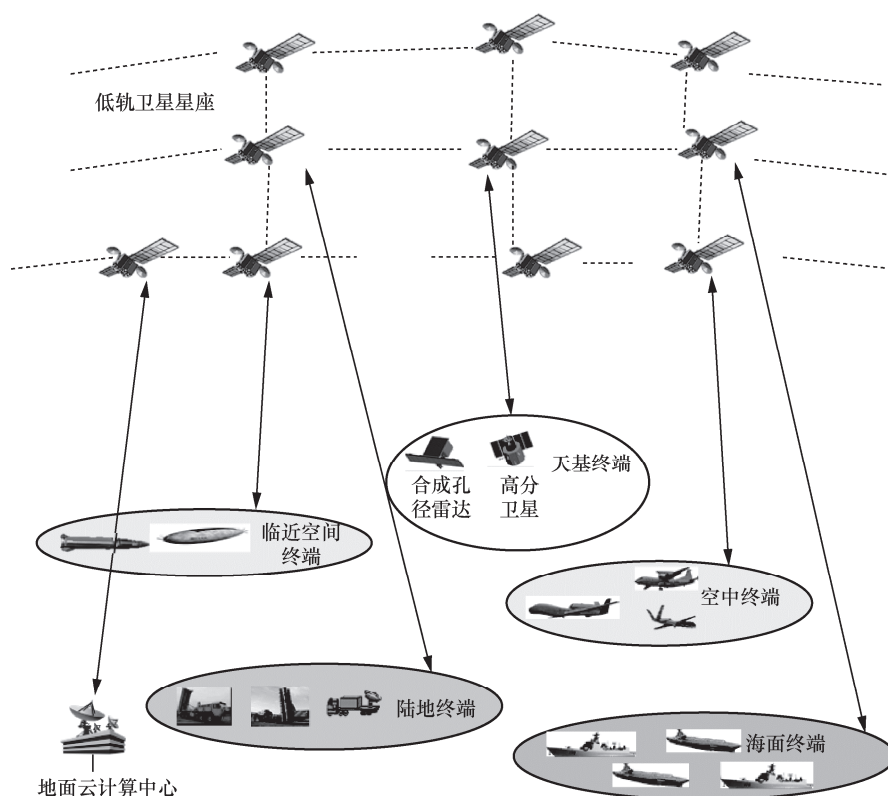


图 1 感传算一体卫星互联网的总体架构

络容量不足对数据传输和服务时效性的影响。

天基、临近空间、空中、陆地、海面等终端既可以是数据的使用者，又可以是数据的产生端，同时还可能具有弱处理能力（包括移动终端、探测器和物联网设备等）。

图 1 还给出了地面云计算中心。当服务无法或不适合在星载边缘计算平台实现时，可以通过星地链路传送给地面云计算中心处理。云计算中心同时还是数据汇聚池，所有边缘计算平台需要存储的数据都发回云计算中心进行存储，进而利用大数据技术深度挖掘数据价值。此外，在同时针对多个边缘计算的场景时，可由地面云计算中心提供一定的集群管理支持，并基于“云、边、端”的统一协作，为用户提供高质量、高可靠、高可用的应用服务体验。

2 星载边缘计算模拟验证系统构建方法

2.1 功能架构

考虑到天基网络通信、网络、存储、计算等资源受限及空间接入点快速移动等问题，在大时延抖动、间歇连通、周期移动切换的通信环境中，可基于微服务理念，通过虚拟化资源池实现异构资源的抽象、聚合及灵活划分，通过轻量级容器/虚拟机及服务组合实现集群资源的动态管理和灵活调度。

基于上述理念，提出如图 2 所示的星载边缘计算功能

架构，包括资源层、虚拟化层、服务层、服务管理层以及应用层。

（1）资源层

资源层主要包括卫星节点的计算、存储、通信和网络等资源，其中，计算资源包括中心处理单元（CPU）、内存、磁盘、网卡等资源以及专用处理器现场可编程门阵列（FPGA）和数字信号处理器（DSP）等。这些资源可通过虚拟化层抽象进而调度并分配给不同的微服务应用。

（2）虚拟化层

虚拟化层的目的是实现底层异构资源屏蔽（如屏蔽通用处理器 CPU 和专用处理器 DSP、FPGA 之间的差异），向上层服务管理层提供统一的应用程序接口（API），使得服务管理层无须关注服务运行的设备差异，而只关注服务及编排本身即可。

（3）服务层

各卫星节点依据服务职责单一、高内聚低耦合、服务粒度适中等划分原则，将自己的抽象资源划分并封装为统一接口标准的服务用于共享。最终，各节点的内部服务均部署在轻量级容器/虚拟机上进行管理，以便高效地实现服务发现、执行、组合、迁移等功能。

（4）服务管理层

服务管理层主要通过管理平台对分布式的集群进行管理，提供弹性伸缩、负载均衡及部署维护等重要功能。

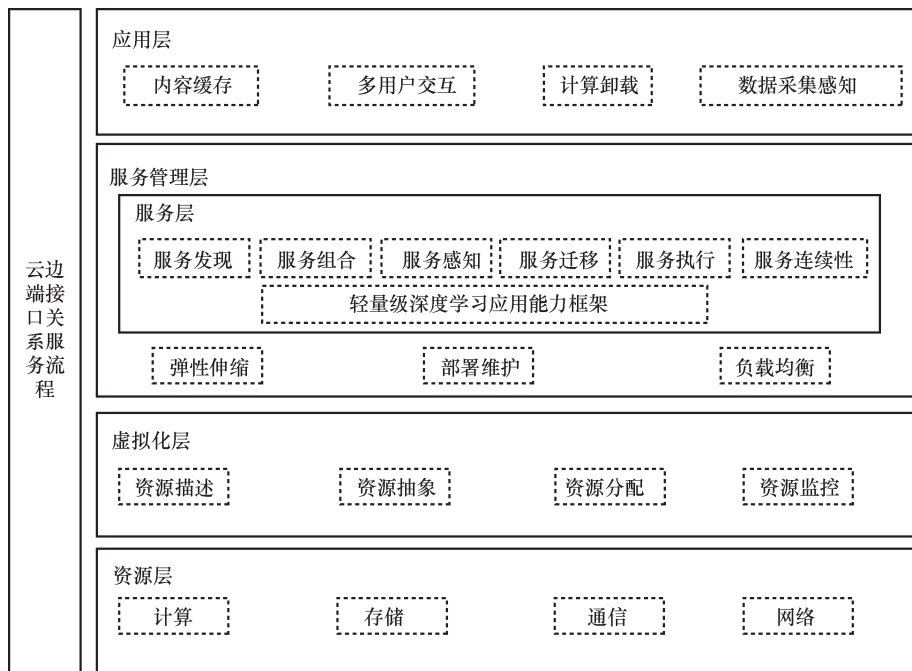


图 2 星载边缘计算功能架构

(5) 应用层

应用层通过调用或远程调用各卫星节点中的服务来实现星载处理功能。

此外，图 2 还给出了“云边端接口关系服务流程”，即通过云边端接口，可实现“云、边、端”的统一协作。

2.2 模拟验证系统构建方法

星载边缘计算模拟验证系统构建的核心是实现星载边缘计算功能架构中资源层、虚拟化层、服务层、服务管理层以及应用层的真实模拟。

2.2.1 资源层模拟

为构建星载边缘计算模拟验证系统，最基础的模拟是资源层模拟，主要包括星载边缘计算和天基网络的模拟。

(1) 星载边缘计算模拟

传统的星载计算机多由采用抗辐射加固工艺处理的专用定制处理器构成^[15]，在性能上比地面计算机滞后 1~2 代或更多，距离较强的边缘计算以及星载分布式计算需求仍有一定的差距。为了进一步满足星载计算需求，近年来，以美国国家航空航天局（NASA）和欧洲空间局（ESA）为代表的国外航天机构开始研制新一代星载计算机系统，除了高速数字信号处理类器件的广泛应用，高可用性的标准系列抗辐射环境单板计算机、面向目标跟踪和数据融合的高度并行计算机、可配置的多级分布式计算机、星载网络计算机等成为新型星载计算机的发展方向^[16-19]。此外，经环境适应性研究开发后，越来越多的商用机设计思想和商用现货产品（COTS）被应用到航天领域，实现了星载计算的更优性能^[20]。

为了模拟星载边缘计算资源，除了计算能力、存储能力、功率要求外，还需考虑核心处理单元的 Linux 操作系统支持能力、虚拟化支持能力、高速交互接口和多种星载总线接口扩展能力乃至 AI 算法框架支持能力等。此外，对于卫星环境，由于体积、功耗、散热等问题，一般的无法部署 X86 服务器，需要使用嵌入式硬件。因此综合来看，可选择商用高性能嵌入式计算处理单元进行星载边缘计算的模拟。

(2) 天基网络模拟

星载边缘计算资源利用星间链路互联组网后，可实现星载分布式计算，满足星载算力的横向扩展需求。与地面最大的不同就是天基网络具有网络拓扑动态、节点间传输距离长以及连接故障率高等问题。

目前，市面上存在一些网络损伤仪，能面向卫星链路提供带宽限制、时延、丢包、抖动、拥堵、报文乱序、报文重复、报文篡改等损伤模拟的能力，并具备全面的报文

过滤规则。但是，这些设备一般端口较少，很难模拟大规模星座情况下多卫星节点间的网络特性^[21-22]。

为了实现星载边缘计算节点在运行过程中的横向拓展，实现不同拓扑下动态路由变化导致的链路损伤效果模拟，以及根据网络情况进行节点动态或手动伸缩时星载边缘计算集群的网络特性模拟，可采用支持 Linux 系统的通用多端口服务器作为虚拟网络损伤仪，结合流量控制（TC）工具的工作方式，模拟实际的天基网络性能指标。

2.2.2 虚拟化层模拟

在虚拟化技术方面，虚拟机（VM）是把底层设备资源进行虚拟化后，在硬件上安装操作系统来实现的。虚拟机虽然可以隔离出很多“子电脑”，但占用空间更大、启动更慢，有些虚拟机软件还要支付费用（如 VMWare）。基于 Docker 的容器技术则直接建立在 Linux 系统内核之上，是一种操作系统级别的虚拟化技术，可以通过系统内部的进程将资源进行虚拟隔离，使 Docker 远比虚拟机占的空间小、启动时间快，对资源的利用率更高^[23]。

表 1 给出了虚拟机和容器技术的比较。

表 1 虚拟机和容器技术的比较

对比特性	虚拟机	容器技术
隔离级别	操作系统隔离	进程隔离
隔离策略	Hypervisor	CGroups
系统资源	5%~15%	0~5%
启动时间	分钟级	秒级
镜像存储	GB~TB 级	KB~MB 级
集群规模	上百	上万
高可用策略	备份，容灾，迁移	弹性，负载，动态

由此可见，对于相对资源有限的星载计算资源，虚拟化层的模拟可以采用基于 Docker 的容器技术。

2.2.3 服务层及服务管理层模拟

对于地面的云计算和边缘计算，特别是容器虚拟化情况下，服务层及服务管理层一般采用容器集群管理系统软件实现，包括 Kubernetes、KubeEdge、K3S、OpenYurt、SuperEdge 等^[24-29]。

(1) Kubernetes

Kubernetes 目前已成为云原生编排的事实标准，大多数新兴的云原生负载构建在 Kubernetes 之上。Kubernetes 还在朝着大规模、复杂场景的方向发展，与 AI、大数据、物联网（IoT）、垂直行业等领域的结合越来越紧密。

在边缘计算场景中有大量的异构设备，每种设备都有自己独有的特征属性，可充分利用 Kubernetes 提供的扩展

API 资源,对这些设备进行数据建模、数据抽象,从而进行统一管理。一般来说,在边缘部署 Kubernetes 存在两种架构选型:第一种是将整个 Kubernetes 集群部署在边缘;第二种是将 Kubernetes 的控制层部署在云端,以管理边缘的计算节点。

(2) KubeEdge

KubeEdge 是华为基于 Kubernetes 扩展、提供云边协同能力的开放式智能边缘平台。KubeEdge 重点要解决的问题是云边协同、资源异构、大规模、轻量化、一致的设备管理和接入体验。KubeEdge 架构上清晰地分为云端、边缘和设备层。前述“宝酝号”即搭载了 KubeEdge。

(3) K3S

K3S 是做了代码修改的特定版本的 Kubernetes,专为无人值守、资源受限、远端或物联网设备内部的生产负载而设计。K3S 默认使用本地 SQLite 数据库作为后端数据存储,通信效率更高。K3S 部署简单,并针对 ARM 进行了优化。K3S 的所有组件都运行在边缘,因此不涉及云边协同。如果 K3S 要进行生产,在 K3S 之上应该还有一个集群管理方案负责跨集群的应用管理、监控、告警、日志、安全和策略等。

(4) OpenYurt

阿里巴巴将阿里云容器服务的核心能力开源,并向社区贡献了完整的边缘计算云原生项目 OpenYurt,其架构设计简洁,分别在云端和边缘增加组件,对 Kubernetes 进行零侵入式增强。OpenYurt 能帮用户解决在海量边、端资源上完成大规模应用交付、运维、管控的问题,并提供中心服务下沉通道,实现和边缘计算应用的无缝对接。

(5) SuperEdge

SuperEdge 是腾讯推出的 Kubernetes-native 边缘计算管理框架。相比 OpenYurt 以及 KubeEdge,SuperEdge 除了具备 Kubernetes 零侵入以及边缘自治特性,还支持独有的分布式健康检查以及边缘服务访问控制等高级特性,极大地消减了云边网络不稳定对服务的影响。

根据上述分析,现有的边缘云平台都或多或少地基于 Kubernetes 扩展边缘功能,实现边缘云能力。其中,KubeEdge、SuperEdge、OpenYurt 是完全去中心化的部署模式,管理面部署在云端,边缘节点无须太多资源就能运行 Kubernetes 的代理,云边通过消息协同。K3S 不是一个去中心化的部署模型,每个边缘都需要额外部署管理面,因此适合资源充足的“基础设施边缘”场景,并不适用于资源较少的“设备边缘”场景。此外,K3S 集群之间的网络需要打通,且需要叠加多集群管理组件。

从 Kubernetes 的角度看,“边缘节点+云端”是一个完整的 Kubernetes 集群。这种部署模型能够同时满足“设备边缘”和“基础设施边缘”场景的部署要求。

为了让星载服务能够继续与传统 IT 进行交互操作,兼容传统 IT,要求容器集群管理系统软件尽量能够在任何类型的架构(边缘、云或集中式硬件)中部署和扩展,以兼容异构的架构。因此,对于星载边缘计算的服务层及服务管理层,可考虑采用 Kubernetes 进行模拟。

2.2.4 应用层模拟

总体来看,对星载边缘计算应用大体上可分为遥感数据在轨处理、低轨星座网络边缘云服务、在轨任务规划与管控、卫星互联网应用等。其中,卫星互联网中的应用又包括了内容缓存、多用户交互、计算卸载、数据采集感知等天地一体综合智能应用服务^[30]。当这些应用服务小而专后,每个服务可以独立部署并运行在不同的运行环境中,互不影响。服务之间通过轻量级的通信机制进行交互,可满足天基服务聚合及资源的高效利用要求,实现服务的容迟容断与恢复重构。

为了进行星载边缘计算应用层模拟,特别是在卫星通信与卫星遥感融合提供创新服务的大背景下,可以设计两者深度结合的应用进行应用层功能模拟验证。

3 服务天基感知业务的卫星互联网模拟验证系统

3.1 总体方案

为模拟服务天基感知业务的卫星互联网应用,以上述“感传算一体卫星互联网的总体架构”为参考,可采用星载边缘计算模拟验证系统构建方法来模拟具备星间链路组网和星载边缘计算能力的多颗低轨卫星的功能,采用真实的遥感数据文件来模拟各卫星遥感载荷获取的数据。同时,为了模拟卫星互联网的应用和管控能力,还需要对用户节点、地面云计算中心以及全系统的管理控制功能进行模拟。具体模拟验证系统构成如图 3 所示。

图 3 中,1 台天基网络模拟器模拟星间和星地之间的动态网络特性。在具体实现时,提供给定的低轨卫星星座及卫星与地面节点的网络特性模拟。

1 台卫星遥感数据生成模拟器模拟生成遥感图像原始数据。在具体实现时,提供高分 1 号卫星和高分 2 号卫星拍摄的未经处理的原始遥感数据,在用户需要数据时根据相应的请求参数匹配合适的数据。

1 台用户节点模拟器模拟地面接入用户,发出任务请求并接收数据分发服务、展示电子地球底图上的目标特征

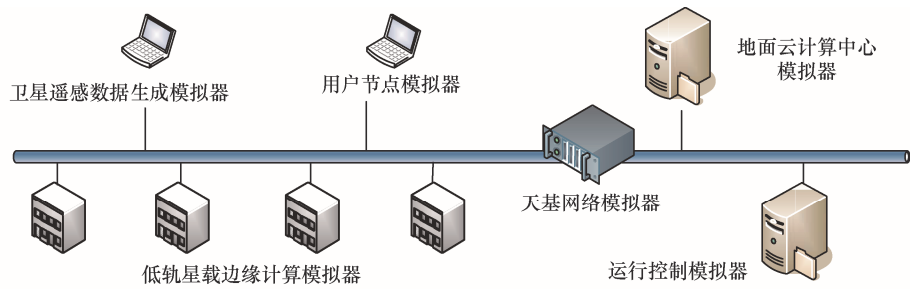


图 3 服务天基感知业务的卫星互联网模拟验证系统构成

信息。

4 台低轨星载边缘计算模拟器模拟实现动态天基网络情况下的星载边缘计算操作。具体实现过程中，既可以单星单独操作，也可以多星协同操作。

1 台地面云计算中心模拟器，同样可模拟实现遥感图像处理等所有功能。

此外，模拟验证系统中还包括 1 台运行控制模拟器，负责对整个模拟验证系统进行集中管控，包括系统组网、卫星节点和用户节点入退网控制、数据感知需求处理、感知数据下发策略处理、状态监控等，确保实现各节点之间、节点与运行控制模拟器之间管理协议互通，各项业务正常进行。

考虑到星载计算能力有限、天基网络拓扑高动态等典型特征，本模拟验证系统采用嵌入式设备模拟低轨星载边缘计算设备，采用高性能服务器模拟地面云计算中心，同时采用支持 Linux 系统的通用多端口服务器配合流量控制软件工具，模拟天基网络节点间的动态组网传输性能。

表 2 给出了模拟验证系统中各类模拟器的软硬件配置。

3.2 网络信息流程

以单个用户节点模拟器提出任务请求，多个低轨星载边缘计算模拟器与地面云计算中心模拟器、天基网络模拟

器、运行控制模拟器联合完成卫星遥感信息获取、处理和分发的任务为例，对服务天基感知业务的卫星互联网模拟验证系统进行试验验证。

具体实现中，星载遥感信息可以采用星上分布式处理分发、星上集中处理分发、落地地面云计算中心处理并经卫星分发等 3 种方式。这里，仅给出采用星上分布式处理分发方式的网络信息流程，如图 4 所示。

除用户节点模拟器的入网、退网阶段（图 4 只给出了简化流程）外，用户任务阶段的信息流程如下。

① 用户节点模拟器向低轨星载边缘计算模拟器提出任务请求，低轨星载边缘计算模拟器确定主从工作模式。

② 卫星遥感数据生成模拟器生成观测目标的元数据，发送给主低轨星载边缘计算模拟器。

③ 主低轨星载边缘计算模拟器进行任务规划，将数据切分并分发给其他从低轨星载边缘计算模拟器。

④ 各低轨星载边缘计算模拟器处理元数据生成 1 级产品（包括图像去噪、去云去雾、几何校正、辐射校正等操作）。

⑤ 各从低轨星载边缘计算模拟器将 1 级产品发回给主低轨星载边缘计算模拟器。

⑥ 主低轨星载边缘计算模拟器将数据汇聚和图像拼接后，基于深度学习的方法进行目标特征识别，生成态势

表 2 各类模拟器的软硬件配置

设备	硬件	核心软件
天基网络模拟器	自研 8 网口设备（ARM Cortex-A7）	Linux NETEM、TC
卫星遥感数据生成模拟器	联想 Y7000P	MySQL、Fileserver、FTP
用户节点模拟器	联想 Y7000P	VS Code、CesiumJS、MySQL
低轨星载边缘计算模拟器	NVIDIA Jetson AGX Xavier	Kubernetes、Docker
地面云计算中心模拟器	华三（H3C）R4900G3	Node.js、yolo5
运行控制模拟器	联想 Y7000P	VS Code、MySQL、Cesium

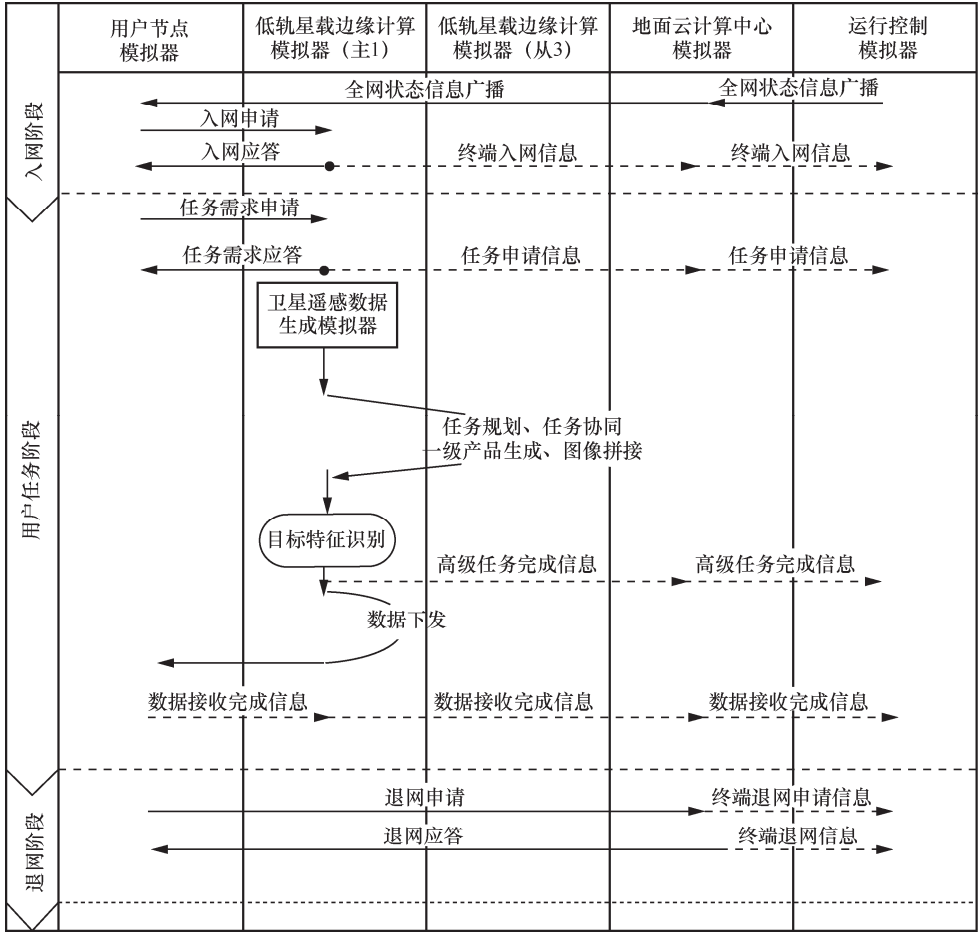


图 4 采用星上分布式处理分发方式的网络信息流程

信息产品。

⑦ 主低轨星载边缘计算模拟器将态势信息产品发送给用户节点。

⑧ 用户节点在本地的电子地球底图上展示态势信息。

这里，主低轨星载边缘计算模拟器相当于星载计算集群中的主节点，其他从低轨星载边缘计算模拟器相当于工作节点。低轨星载边缘计算模拟器共同实现了遥感图像处

理和目标特征识别等功能。

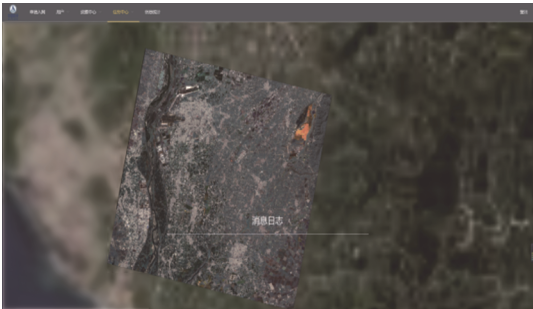
3.3 实际运行效果

采用星上分布式处理分发的网络信息流程的情况下，分别给出用户节点界面的用户任务申请、信息产品生成界面以及在运行控制模拟器界面的任务处理进度图，分别如图 5、图 6 所示。

由图 5、图 6 可见，在系统正常运行、有权限的用户



(a) 用户任务申请界面



(b) 信息产品生成界面

图 5 用户节点界面

序号	大状态	阶段说明	处理节点	是否完成
63	图像瓦片生成	瓦片切分完成，数据分发完成	iot_node_004	完成
62	图像瓦片生成	瓦片切分完成，数据开始分发	iot_node_004	完成
61	图像瓦片生成	开始瓦片切分	iot_node_004	完成
60	图像目标识别	目标识别完成	iot_node_004	完成
59	图像目标识别	开始目标识别	iot_node_004	完成
58	图像矫正	大图像矫正完成	iot_node_004	完成
57	图像矫正	开始大图像矫正	iot_node_004	完成
⋮				
序号	大状态	阶段说明	处理节点	是否完成
51	数据上传	合并完成	iot_node_004	完成
50	数据上传	图像开始合并	iot_node_004	完成
49	数据上传	上传结束，阶段完成	iot_node_001	完成
48	数据上传	上传结束，阶段完成	iot_node_003	完成
47	数据上传	通信链路建立，开始上传	iot_node_001	完成
46	数据上传	通信链路建立，开始上传	iot_node_003	完成
45	数据上传	请求上传数据	iot_node_001	完成
44	数据上传	上传结束，阶段完成	iot_node_002	完成
⋮				
序号	大状态	阶段说明	处理节点	是否完成
28	图像增强	图像增强去雾完成50%	iot_node_001	进行中
27	图像增强	图像增强去雾完成50%	iot_node_003	完成
26	图像增强	图像增强去雾完成25%	iot_node_001	完成
25	图像增强	图像增强去雾完成25%	iot_node_003	完成
24	图像增强	图像增强去雾完成50%	iot_node_002	完成
23	图像增强	图像增强去雾完成50%	iot_node_004	完成
22	图像增强	图像增强去雾完成25%	iot_node_002	完成
21	图像增强	图像增强去雾完成25%	iot_node_004	完成
20	图像增强	开始图像增强去雾	iot_node_001	完成
19	图像增强	开始图像增强去雾	iot_node_003	完成
18	图像融合	图像融合结束	iot_node_001	完成
17	图像融合	图像融合结束	iot_node_003	完成
16	图像融合	分片图像开始融合	iot_node_001	完成
15	图像融合	分片图像开始融合	iot_node_003	完成

图 6 运行控制模拟器界面的任务处理进度图

登录运行控制模拟器软件系统、网络正常互联互通后，用户节点提出任务申请，面向天基感知业务服务的卫星互联网模拟验证系统可以自动完成任务处理、资源调度并输出产品数据。

4 对比分析

通过构建不同模式下时延带宽消耗模型，可对上述星载遥感信息星上分布式处理分发、星上集中处理分发以及落地地面云计算中心处理并经卫星分发等 3 种方式进行性能比较分析。

首先假设低轨卫星轨道高度为 780 km，3 颗距离

4 500 km 的低轨卫星组成一个星载计算集群，地面用户/地面云计算中心距离服务低轨卫星 1 500 km。

星上分布式处理分发和星上集中处理分发两种方式下，假设星上最终获得的态势信息产品需经 4 跳（即跨 3 颗卫星）才能分发给地面用户。落地地面云计算中心处理并经卫星分发的方式下，遥感信息元数据经 4 跳发送给地面云计算中心，地面云计算中心生成的态势信息产品同样经 4 跳分发给地面用户。

同时，假设实现星上分布式处理所需的图像切分、拼接等时延为固定值 100 ms，各卫星处理生成的一级产品和态势信息产品大小为固定值 10 KB。此外，星上信

息处理时间与遥感元数据规模相关,并设 1 MB 星上遥感数据的处理时间为 1 000 ms,地面云计算中心的信息处理时间不计。

上述参数设置具体见表 3。

表 3 参数设置

参数	数值
低轨星间传播时延	15 ms
低轨卫星到地面用户/地面云计算中心的时延	5 ms
星上分布式处理所需的图像切分、拼接等时延	100 ms
一级产品和态势信息产品大小	10 KB
星上遥感数据处理时间	1 000 ms/MB

分析遥感图像规模、低轨卫星间和低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽不同情况下的服务时延、带宽资源占用情况。

(1) 遥感图像大小不变、低轨卫星间和低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽逐渐增大

设:遥感图像大小为 50 MB;低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽为 622 Mbit/s;低轨卫星间带宽为 155 Mbit/s、622 Mbit/s、1 Gbit/s、2 Gbit/s、5 Gbit/s、10 Gbit/s。

低轨卫星间带宽变化情况下的服务时延对比如图 7 所示。

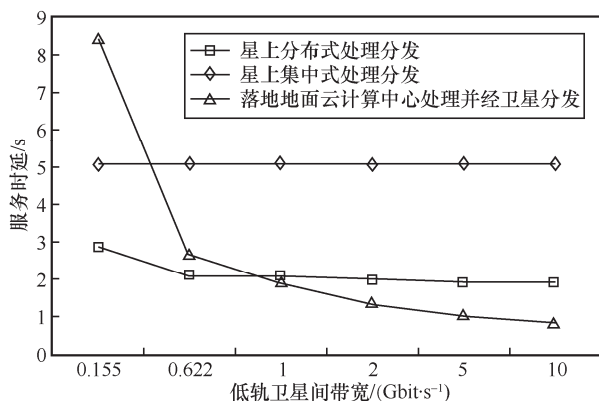


图 7 低轨卫星间带宽变化情况下的服务时延对比

设:遥感图像大小为 50 MB;低轨卫星间带宽为 1 Gbit/s;低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽为 45 Mbit/s、155 Mbit/s、622 Mbit/s、1 Gbit/s、2 Gbit/s、5 Gbit/s。

低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽变化情况下的服务时延对比如图 8 所示。

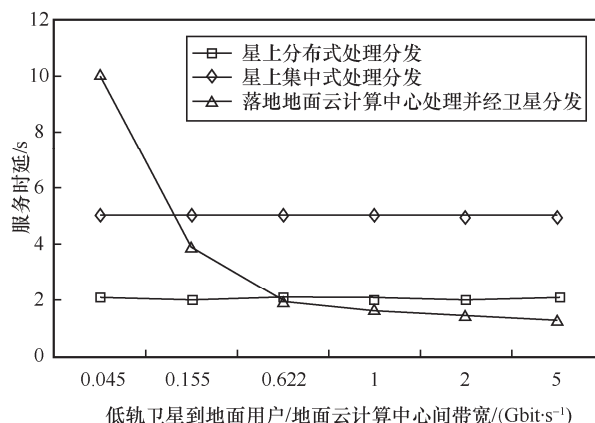


图 8 低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽变化情况下的服务时延对比

由图 7、图 8 可见,落地地面云计算中心处理并经卫星分发方式下,服务时延随着低轨卫星间带宽和低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽的增大而减小,并会低于星上处理的两种方式。这说明,如果采用地面处理的工作模式来服务天基感知业务,最重要的是增加卫星互联网带宽。同时,从上述两图还可以看到,由于星上分布式处理分发从总体上降低了处理时延,因此总的服务时延总是低于星上集中式处理分发。

(2) 低轨卫星间带宽、低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间的带宽不变,遥感图像逐渐增大

设:低轨卫星间带宽为 1 Gbit/s;低轨卫星到地面用户/地面云计算中心间带宽为 622 Mbit/s;遥感图像大小分别为 10 MB、20 MB、50 MB、100 MB。

服务时延和网络资源占用分别如图 9(a)、图 9(b)所示。

由图 9 可见,落地地面云计算中心处理并经卫星分发的方式下,相对较小的服务时延是以带宽占用为代价实现的;星上集中式处理分发获得的带宽占用收益以较大的服务时延为代价;星上分布式处理分发则实现了带宽占用和服务时延的相对均衡。

当然,上述分析对星上数据处理能力、信息传输跳数等都做出了一定的假设,获得结论却具有一定的普适性。

5 结束语

随着星载边缘计算能力的提升,卫星在天地一体化信息网络中扮演的角色将越来越重要,卫星将不再仅仅是通道,而是一个能够提供各类服务能力的综合处理平台。特别是随着应用需求的发展,将天基遥感信息在通过星载边缘计算生成产品后,利用天基互联网进行有效传输,并在应用层的支持下提供各类综合的应用服务,可使卫星互联

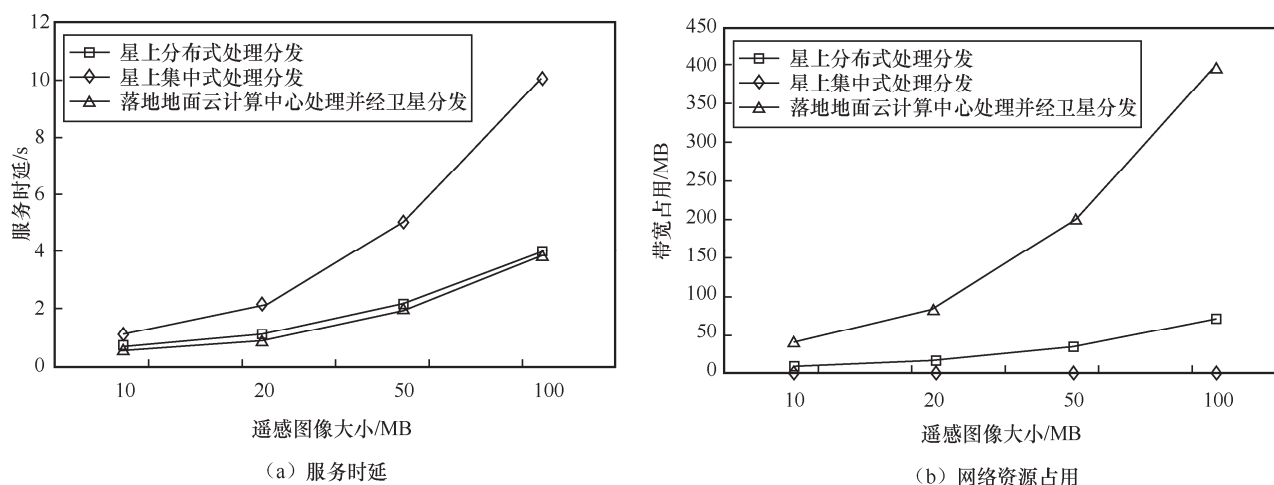


图9 遥感图像变化情况下的服务能力对比

网发挥更大的使用效能并最大化地提升用户的使用体验。谷歌、亚马逊、微软、洛克希德·马丁等公司基于地面云计算技术的积淀，参与天基云研发和构建。我国部分研究所、高校也已在星载边缘计算领域进行了技术攻关和探索部署，取得了一定的成绩，但天基边缘云的成熟平台和行业标准还远未形成，距离真正的大规模部署和实用还存在较大差距。本文构建的服务天基感知业务的卫星互联网模拟验证系统在一定程度上验证了星载边缘计算在卫星互联网中的应用能力，后续还需要进一步深入开展研究工作。

参考文献：

- [1] 王子剑, 杜欣军, 尹家伟, 等. 低轨卫星互联网发展与展望[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 49-52.
WANG Z J, DU X J, YIN J W, et al. Development and prospect of LEO satellite Internet[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 49-52.
- [2] 张更新, 王运峰, 丁晓进, 等. 卫星互联网若干关键技术研究[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 1-14.
ZHANG G X, WANG Y F, DING X J, et al. Research on several key technologies of satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 1-14.
- [3] 那振宇. 卫星互联网服务质量保障方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
NA Z Y. Research on QoS guarantee methods in satellite internet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [4] 王中果, 汪大宝, 张晓. 低轨高分遥感卫星Ka频段VCM星地数据传输性能分析[C]//第八届高分辨率对地观测学术年会, 2022.
WANG Z G, WANG D B, ZHANG X. Analysis of satellite-to-ground data transmission performance of Ka-band VCM, a low-orbit high-resolution remote sensing satellite [C]//The 8th Annual Conference on High Resolution Earth Observation. [S.l.:s.n.], 2022.
- [5] 柴英特, 王港, 张超, 等. 巨型感知星座星地一体化智能化资源管控体系架构[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 13-22.
CHAI Y T, WANG G, ZHANG C, et al. Satellite-earth integration intelligent resource management and control architecture of giant sensing constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 13-22.
- [6] 李诚成, 张亚生, 孙晨华. 低轨卫星互联网星载边缘计算卸载策略[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(3): 401-407.
LI C C, ZHANG Y S, SUN C H. Computation offloading for satellite-based edge computing in LEO satellite network[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(3): 401-407.
- [7] 唐清清, 李斌. 面向空天地一体化网络的移动边缘计算技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(1): 27-35.
TANG Q Q, LI B. Overview of mobile edge computing in space-air-ground integrated network[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(1): 27-35.
- [8] 沈永言. 5G广播和移动边缘计算时代卫星通信的挑战与机遇[J]. 卫星应用, 2020(2): 38-42.
SHEN Y Y. Challenges and opportunities of satellite communication in the era of 5G broadcasting and mobile edge computing[J]. Satellite Application, 2020(2): 38-42.
- [9] 张小林, 顾黎明, 吴献忠. 美国下一代太空体系架构的发展分析[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(6): 1-6.
ZHANG X L, GU L M, WU X Z. The development of the U.S. next-generation space system architecture[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2020, 36(6): 1-6.
- [10] 曹欢, 苏泳涛, 周一青, 等. 基于星地协同处理的资源管理技术研究[J]. 高技术通讯, 2020, 30(12): 1205-1214.

- CAO H, SU Y T, ZHOU Y Q, et al. Research on resource management technology based on satellite-ground collaborative processing[J]. Chinese High Technology Letters, 2020, 30(12): 1205-1214.
- [11] 华为云“云边一体”方案首次在太空验证,提升“天算星座”复杂任务能力[J]. 自动化博览, 2022, 39(2): 6.
Huawei's cloud “cloud edge integration” scheme was verified in space for the first time, which improved the complex task ability of “celestial constellation” [J]. Automation Panorama, 2022, 39(2): 6.
- [12] 郭凯, 崔潇潇, 钟江山, 等. SpaceX “星盾” 系统建设及应用浅析[J]. 航天电子对抗, 2023, 39(4): 55-58.
GUO K, CUI X X, ZHONG J S, et al. Analysis on the construction and application of SpaceX “Starshield” system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2023, 39(4): 55-58.
- [13] 田丰. “星盾”: 民用“星链”转身投军?[J]. 太空探索, 2023(2): 42-48.
TIAN F. “Star Shield”: The civilian “Star Chain” turned to join the army?[J]. Space Exploration, 2023(2): 42-48.
- [14] 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.
- [15] 吴生龙. 基于 COTS 的星载计算机硬件容错体系架构设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
WU S L. The design and implementation of fault-tolerant COTS on-board computer based on architecture[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [16] 李路. 基于多核处理器和 Linux 的通用高性能星载计算机系统研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院微小卫星创新研究院), 2023.
LI L. Research on universal high-performance on-board computing system based on multi-core processor and Linux[D]. Shanghai: Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [17] 孙树志. 面向微纳卫星的可重构星载计算机研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
SUN S Z. Development of reconfigurable on-board computer for micro-nano satellite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [18] 雷华舟. 低成本容错星载计算单元架构设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
LEI H Z. Architecture design of low-cost fault-tolerant on-board computing unit[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [19] 宁永康. 基于 COTS 器件的星载计算机多处理器仲裁容错设计[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院微小卫星创新研究院), 2023.
NING Y K. Fault-tolerant design of COTS-based multi-processor arbitration for on-board computer[D]. Shanghai: Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [20] 蒲卫华, 谢成清, 姜文志, 等. COTS 星载计算机容错设计及可靠性研究[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(3): 72-77.
PU W H, XIE C Q, JIANG W Z, et al. Fault-tolerant design and spatial application reliability of COTS on-board computer[J]. Aerospace Control and Application, 2020, 46(3): 72-77.
- [21] 郭晋炜. IP 网络损伤仪研究[J]. 电脑开发与应用, 2009, 22(2): 70-72.
GUO J W. Research of IP network impairment emulator[J]. Computer Development & Applications, 2009, 22(2): 70-72.
- [22] 张潇男, 张轩. 基于 Raspberry Pi 的网络损伤仿真仪设计[J]. 计算机与网络, 2021, 47(10): 59-61.
ZHANG X N, ZHANG X. Design on network damage simulator based on raspberry Pi[J]. Computer & Network, 2021, 47(10): 59-61.
- [23] 吴逸文, 张洋, 王涛, 等. 从 Docker 容器看容器技术的发展: 一种系统文献综述的视角[J]. 软件学报, 2023, 34(12): 5527-5551.
WU Y W, ZHANG Y, WANG T, et al. Looking at the development of container technology from Docker container: a perspective of systematic literature review[J]. Journal of Software, 2023, 34(12): 5527-5551.
- [24] 王仪. 基于 Kubernetes 的容器云平台资源调度策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
WANG Y. Research on resource scheduling strategy of container cloud platform based on kubernetes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [25] 黄倩, 黄蓉, 王友祥, 等. 开源边缘计算平台研究分析[J]. 邮电设计技术, 2021(10): 88-92.
HUANG Q, HUANG R, WANG Y X, et al. Research and analysis of open source edge computing platform[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(10): 88-92.
- [26] 龚正, 吴治辉, 闫健勇. Kubernetes 权威指南: 从 Docker 到 Kubernetes 实践全接触[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
GONG Z, WU Z H, YAN J Y. An authoritative guide to Kubernetes: from Docker to Kubernetes[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2021.
- [27] 赵航, 刘胜, 罗坤, 等. 面向 KubeEdge 边缘计算系统应用研究[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(1): 118-128.
ZHAO H, LIU S, LUO K, et al. Research on application of edge computing system based on KubeEdge[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(1): 118-128.
- [28] 刘忠. 基于 K3S 构建面向云原生应用的容器平台设计与实践[J]. 现代信息科技, 2021, 5(12): 22-25.
LIU Z. Design and practice of cloud native application container platform based on K3S[J]. Modern Information Technology, 2021, 5(12): 22-25.
- [29] 杨秋霞, 赵斌, 栗霖, 等. 云原生边缘计算产品与项目分析[J]. 信息通信技术, 2021, 15(4): 71-78.
YANG Q X, ZHAO B, LI L, et al. Analysis of cloud native based edge computing products and projects[J]. Information and Communications Technologies, 2021, 15(4): 71-78.

[30] 陶滢, 刘伟, 高梓贺, 等. 天地一体化信息网络中星载边缘计算应用与挑战[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(5): 763-772.

TAO Y, LIU W, GAO Z H, et al. Application and technical challenges of onboard edge computing in space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(5): 763-772.

[作者简介]



陶滢 (1974-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为卫星通信、天基信息网络等。



刘伟 (1994-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信。



张磊 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信。



高梓贺 (1983-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为卫星通信、天基信息网络等。



周钠 (1972-), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为卫星通信等。