

低轨卫星边缘计算关键技术综述

刘永福¹, 商科峰¹, 别佳¹, 刘言^{2,3,4}, 朱凯歌^{2,3,4}, 王玉稳⁵, 李科伟⁵

- (1.西南电子技术研究所, 四川成都610036;
2.上海卫星互联网研究院有限公司, 上海201210;
3.上海市卫星互联网重点实验室, 上海201210;
4.卫星互联网全国重点实验室, 上海201210;
5.中电云计算技术有限公司, 四川成都610041)

摘要: 随着航天技术发展及卫星互联网建设推进, 卫星应用日益广泛, 卫星边缘协同计算需求也随之增长。卫星边缘计算可下沉数据处理与任务执行, 缓解星地传输压力, 提升系统响应速度与可靠性, 但低轨卫星边缘计算仍面临星地网络中断、星间连接弱、单粒子翻转及节点故障等挑战。针对以上问题, 提出一种轻量化、高可靠的卫星边缘协同计算架构, 通过研究异构资源适配、分布式协同等关键技术, 为卫星智能化应用提供支撑, 并助力卫星互联网产业发展。

关键词: 卫星边缘计算; 轻量化架构; 高可靠性; 异构资源适配; 分布式协同

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025025

Survey on Key Technologies of Low Orbit Satellite Edge Computing

LIU Yongfu¹, SHANG Kefeng¹, BIE Jia¹, LIU Yan^{2,3,4}, ZHU Kaige^{2,3,4}, WANG Yuwen⁵, LI Kewei⁵

1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China
2. Shanghai Satellite Network Research Institute Co.,Ltd., Shanghai 201210, China
3. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201210, China
4. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201210, China
5. CECLOUD Computing Technology Co.,Ltd., Chengdu 610041, China

Abstract: With the development of aerospace technology and the advancement of satellite Internet construction, satellite applications have become increasingly widespread, and the demand for satellite edge collaborative computing has grown. Satellite edge computing can sink data processing and task execution, alleviate the pressure of satellite-ground transmission, and improve the response speed and reliability of the system. However, low-orbit satellite edge computing faces challenges such as satellite-ground network interruption, weak inter-satellite connections, single event upset, and satellite node failure. This paper proposes a lightweight and highly reliable satellite edge collaborative computing architecture, studies key technologies such as heterogeneous resource adaptation and distributed collaboration, to provide support for satellite intelligent applications, and facilitate the development of the satellite Internet industry.

Keywords: satellite edge computing, lightweight architecture, high reliability, heterogeneous resource adaptation, distributed collaboration

0 引言

随着航天技术的飞速发展以及全球卫星互联网建设的持续推进, 卫星在通信、遥感、导航等领域的应用日益广泛。传统卫星数据处理模式多依赖于地面中心站进

行集中计算, 这一模式具有数据传输时延大、带宽受限、网络易拥塞等突出问题^[1]。

引入边缘计算技术, 将计算任务下沉至卫星节点, 能够降低数据传输压力, 显著提升系统响应速度。但卫星运行环境具有特殊性, 极端空间辐射、复杂电磁干扰

以及星地与星间通信链路不稳定等因素,对卫星边缘计算架构的可靠性与轻量化提出了极高要求。

基于此,研究轻量化、高可靠的卫星边缘协同计算架构及关键技术,对于推动卫星应用发展、提升空间信息服务水平具有重要的现实意义。

1 卫星边缘计算技术挑战

1.1 星地间网络中断

卫星与地面站之间的通信链路受天气、卫星轨道运动等因素影响显著。在暴雨、沙尘等恶劣天气条件下,电磁波信号会因大气吸收、散射而衰减,从而导致链路质量下降甚至中断^[2];卫星沿轨道高速运行时,会频繁进入和离开地面站的可视范围,造成星地通信链路间歇性中断。这种不稳定的网络连接使得卫星难以实时、稳定地向地面传输数据,严重影响地面中心站对卫星计算任务的调度与管理,限制了卫星边缘计算能力的发挥。

1.2 星间弱网连接

卫星星座中各卫星节点之间的通信链路通常面临距离远、信号弱、干扰大等问题。星间链路需跨越数万千米的空间距离,信号在传输过程中会不断衰减,且易受宇宙射线、太阳风等空间环境因素的干扰。同时,不同卫星的相对运动导致链路拓扑动态变化,网络连接不稳定^[3]。弱网环境下,星间数据传输存在速率低、时延大、丢包率高的问题,使得卫星之间难以高效协同完成计算任务,无法实现资源的动态共享与灵活调度。

1.3 单粒子翻转

卫星运行在高辐射的空间环境中,宇宙射线中的高能粒子(如质子、重离子)能够穿透卫星电子设备的防护层,轰击集成电路中的敏感元件。当高能粒子撞击存储单元或逻辑电路时,可能会导致存储数据的状态翻转或逻辑功能的错误,即单粒子翻转^[4]。单粒子翻转会造成卫星边缘计算节点的数据错误、程序运行异常,甚至导致系统崩溃,严重威胁卫星计算任务的可靠性和准确性。

1.4 卫星计算节点故障

卫星在长期空间运行过程中,面临着极端温度波动、空间碎片撞击以及设备自然老化等多重严苛挑战,这使得节点故障成为难以避免的问题。电子设备元器件在频繁的高低温循环应力作用下,性能会逐步衰退;而微小的空间碎片撞击则可能对卫星的关键硬件造成结构性损伤。一旦发生卫星节点故障,不仅会中断其自身的计算任务,更可能破坏整个卫星边缘计算网络的协同机制,导致数据处理流程中断,进而显著降低整个卫星系统的

服务质量和任务可靠性^[5]。

2 卫星边缘计算架构

为解决上述卫星边缘计算的各种挑战,在卫星资源受限的情况下,需设计具有轻量化、分布式、高可靠的卫星边缘协同计算平台架构,该架构依托低轨卫星承载的边缘节点构建,可适配星上弱网及异构资源环境。整体架构以控制面为核心管理单元,通过覆盖容器集群与节点管理组件实现资源调度及状态管控,支持轻量化容器运行时,以适配星上操作系统。

节点间通过星内/星间弱网链路连接并协同工作。上层扩展组件以容器化形式部署,涵盖轻量化集群管理、异构算力适配、分布式边缘调度、数据缓存等功能模块,同时搭配网络插件、监控、日志、多集群代理、应用商店管理及证书管理组件,共同构建完整的边缘计算生态,该架构可在卫星场景下实现资源高效利用、智能任务调度与数据处理,为卫星智能应用提供算力支撑与协同能力。整体架构如图1所示。

2.1 边缘轻量化技术

为实现边缘平台的轻量化,在设计集群管理组件与集群数据面组件时,需将中央处理器(central processing unit, CPU)、内存等资源占用情况作为重要评估维度,进行充分考量并优化。边缘平台的管理面与数据面程序需遵循以下原则,以满足轻量化部署要求。

① 精简功能:相较于地面控制中心,仅保留核心功能,裁减不必要的功能和组件。

② 模块化设计:容器运行时、集群管理组件及集群插件可独立更新,且集群插件能按需安装和启停。

③ 减少依赖:精简中间服务和调用层级,避免引入过多间接依赖,降低资源开销。

④ 采用轻量技术栈:选用编译型语言技术栈,采用更轻量级的库和运行框架,对运行程序进行合并编译与打包,并以轻量级协程方式运行。

⑤ 增强可配置性:提供可配置选项,允许根据场景 and 用户需求启用或禁用特定功能。

⑥ 优化参数配置:结合运行环境的资源配给情况,降低资源池和并发处理规格。

⑦ 强化资源优化:采用更积极的垃圾回收策略以减少运行时的资源开销;通过数据压缩,降低存储开销、网络带宽占用及传输时延。

按照上述轻量化改造原则,可通过控制组件裁剪、整合编译、进程改协程、参数调优等技术方案,实现边

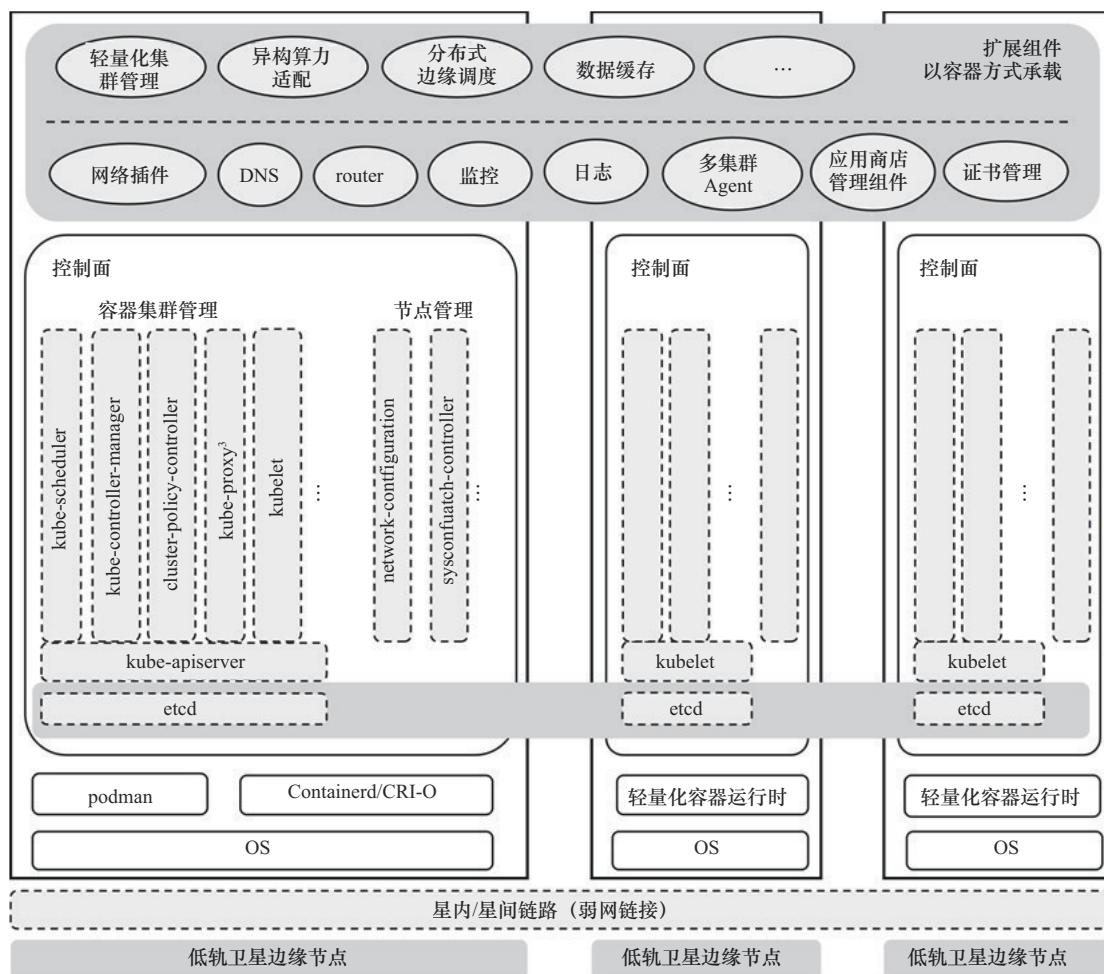


图1 卫星边缘计算架构

缘平台组件的轻量化，具体工作如下。

① 采用轻量容器运行时：使用专为 Kubernetes 设计的容器运行时接口-开放容器倡议（container runtime interface-open container initiative, CRI-O）。相较于传统的 Docker 及 Containerd 容器运行时，CRI-O 能减少中间组件依赖，避免引入过多间接依赖并减少资源开销。

② 优化数据面组件：数据面运行的 kubelet、CRI-O、kube-proxy 组件均采用 Go 语言编写，并编译为可执行的二进制文件。

③ 关闭未用功能：通过关闭未使用的功能减少资源占用，例如关闭 kube-apiserver 的 OpenAPI v3 能力或关闭 Kubernetes 中关于云服务提供商的控制器等。

④ 调整控制器规格：根据运行环境的资源配给情况，降低部分控制器服务的工作线程数，以此降低资源池和并发处理规格。

⑤ 轻量化集群管理组件：对集群管理组件进行合

并编译与打包，并以用户态轻量级协程方式运行。

⑥ 进一步参数调优：通过降低资源监控数据采集频率、关闭监控缓存等方式，进一步减少资源开销。

⑦ 统一资源回收策略：得益于全栈采用 Go 语言实现，在优化资源开销时，可统一使用更积极的资源回收策略。

⑧ 减小软件包与镜像体积：针对可执行文件，可剥离符号表和调试信息，尽量使用 Go 语言标准库等；针对容器镜像，使用体积更小的基础镜像，在构建时进行针对性优化（如减少镜像层、合并更新和清理操作等），且只包含必要的依赖项。

通过上述轻量化改造，边缘平台在功能规格和技术能力上进行了精简，移除了云资源弹性伸缩控制器、开放接口服务、接口级数据缓存以及云资源计量计费等非必需功能。尽管经过裁剪，边缘平台仍与地面控制中心保持统一的云原生架构，以及统一的资源管理、算力调

度和应用平台。这种架构的一致性确保上层应用能够在云边之间实现无缝部署和运行,无须进行额外的适配性改造。

2.2 异构算力资源适配

异构算力资源虚拟化及管理技术能够实现对 CPU、图形处理器 (graphics processing unit, GPU)、现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 等异构算力资源的虚拟化与管理^[6],该技术可对服务器上的 CPU、GPU、FPGA 等异构资源进行虚拟化处理,并向上层应用提供标准化的使用接口。其不仅有效提高资源的利用率,还显著增强系统的灵活性与可扩展性。通过该技术,不同类型的计算任务能够依据自身需求,灵活选择和使用最适配的计算资源,进而提升整个系统的性能与效率。此外,标准化接口降低了应用开发的复杂度,使开发者能更专注于应用逻辑的实现,无须过多关注底层资源的管理细节,如图2所示。

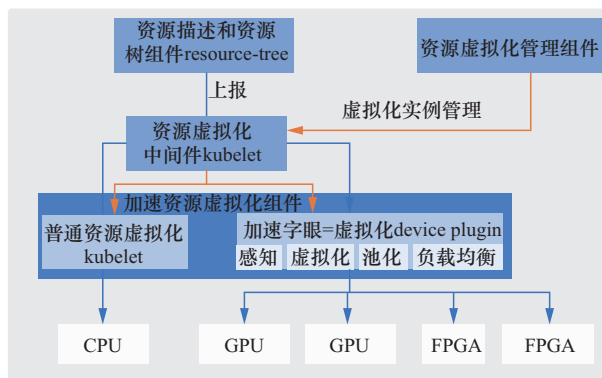


图2 异构算力资源适配

在资源发现方面, CPU 资源由资源虚拟化中间件的资源描述组件负责完成发现工作;对于 GPU 和 FPGA 等加速资源,资源虚拟化中间件通过调用各类型资源对应的设备插件实现资源发现。资源虚拟化中间件统一管理异构算力资源的发现工作,并将资源描述及资源树组件的资源量化信息进行上报。

由于异构资源各具特性,其描述方式和量化单位存在差异。其中, CPU 的最小量化单位为千分之一核(即毫核),应用和任务容器在创建时,可最小以毫核为单位申请 CPU 资源;而 GPU、FPGA 等异构加速资源,在资源申请和分配时多以整数为粒度。

在资源使用与管理上,应用和业务容器使用 CPU 资源时,根据容器资源虚拟化管理组件的实现特点,最终由操作系统的资源控制组完成对 CPU 资源的配额管理,

通过操作系统的命名空间技术实现 CPU 资源的隔离。

当应用和业务容器使用 GPU、FPGA 等加速资源时,容器资源虚拟化管理组件会将节点设备文件挂载到容器中,并依据加速资源驱动所定义的方式,将分配给容器的加速资源连接到容器命名空间内,以确保容器正常使用这些加速资源。

3 卫星边缘分布式协同

低轨卫星边缘计算的分布式协同,特指不同卫星上搭载的边缘节点之间的通信与协作。这种基于星间链路(inter-satellite link, ISL)的协同模式,能够充分利用卫星高动态运行的特点,实现分布式自主组网。通过自动协商,分布式节点可形成边缘集群,从而具备承载协同业务的能力,提供包括负载均衡和业务接续等的关键功能^[7]。

在天基边缘计算网络中,边缘节点借助主动发现机制实现彼此感应,并利用星间链路动态构建协同集群。该集群通过节点间的协商与协同,能够实现业务的跨节点无缝迁移、边缘资源的统一高效调度以及任务的协同处理。这种集群化架构显著增强了天基边缘计算网络的整体效能与系统韧性,为应对复杂的空间任务提供稳固基础^[8]。

3.1 边缘节点发现和自组网

为实现边缘节点的动态感知与自组网能力,系统在星间链路的基础上,采用基于用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)组播的轻量级通信协议。节点完成网络初始化配置(包括安全策略、路由规则及服务参数优化)后,通过周期性组播心跳报文实现邻域节点探测。所有节点均作为分布式注册中心,支持节点动态加入/退出,并实时维护全网拓扑视图,如图3所示。

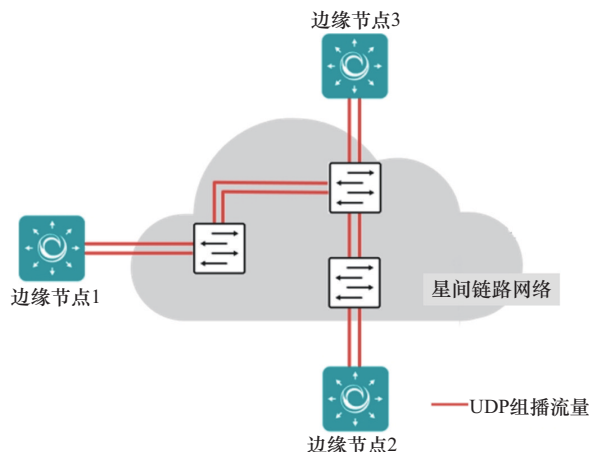


图3 边边协同网络拓扑视图

为提升系统的抗毁性，节点间采用一种分布式一致性算法实现主节点的选举与切换。主节点负责协调集群功能，并支持人工干预优先级配置，确保在卫星网络高动态场景下的可靠控制平面。

3.2 边边协同资源统一调度

当某个边缘节点被选举为主节点后，其管控模块将自动启动。其余从节点仅需向主节点上的管控模块注册，即可实现自动纳管。

边缘节点除定时上报心跳以维持存活状态外，还需详细报告自身的资源总量、可用分配量以及实际使用量。这些资源指标由边缘节点上的代理负责收集，并定期发送至主节点上的管控模块。

管控模块接收并汇总各节点的计算、存储、网络资源等实时数据，并形成直观且全面的资源管理视图报表，进而支撑资源的合理调度和优化。

3.3 边边任务协同处理

通过边边协同调度，任务可分解至多个边缘节点，这些节点通过网络互联互通，支持任务的跨节点协同处理。

任务分解主要采用以下两种调度方式：

基于资源的调度：根据边缘节点的计算能力、存储资源和网络带宽，动态调度任务并实现负载均衡，避免节点过载或空闲。

基于任务优先级的调度：依据任务的优先级和紧急程度进行调度优化。例如，高实时性任务可优先分配给计算能力强的节点处理，以确保及时完成。

拆解后的子任务，其数据共享和同步可通过共享存储、消息队列或分布式数据库实现。

此外，边边协同调度还支持故障容错与恢复机制：当某个边缘节点发生故障或失效时，系统能自动将任务重新分配给其他正常工作节点，从而保证任务的顺利执行。

3.4 边边协同服务自主迁移

边边协同支持服务的自主迁移能力，即服务能根据预设策略或实时条件，自动从一个边缘节点迁移至另一个边缘节点。这显著提高了服务的可用性、性能及资源利用率，以更好适应动态变化的环境和用户需求，如图4所示。

跨节点业务迁移操作管理涵盖迁移的规划、执行和监控全过程。在执行阶段，尤其需要考虑迁移资源的依赖跟随和优化。典型的依赖项包括认证权限、逻辑卷挂载信息、配置文件等。边边协同系统需自动识别业务所

需依赖项，并在业务迁移的同时将其复制并同步到目标节点。

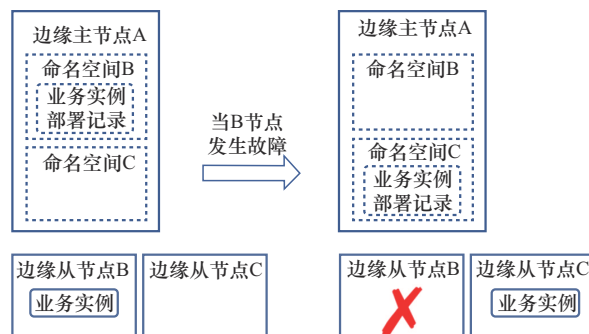


图4 边边协同服务自主迁移

迁移完成后，系统通过资源超分和自动扩缩容机制实现业务的资源调整优化。其中，超分机制是Kubernetes中的一种调度策略，允许在集群中为容器动态分配资源。通过为容器指定更高的CPU限制值，可让容器在需要时抢占CPU资源，从而实现资源的动态调整和优化。水平自动扩缩容则能根据CPU和内存使用率等实际负载指标，动态调整业务实例数量，确保业务在不同负载下均能获得适当资源。

4 弱网条件下星地协同

考虑到地面与卫星网络质量难以得到保证，可能出现断网或弱网情况。针对星地网络的特殊性，星地协同采用数据压缩、数据分级传输、网络带宽动态分配等技术^[9]，在窄带弱网环境下，可充分提高云边数据协同性能及带宽利用率。同时，通过数据自动标注技术对业务使用情况进行统计，自动对数据优先级进行分类和标注，再结合边缘高可用数据留存技术，提升在不稳定网络情况下的数据传输效能。窄带弱网条件下云边高效稳定协同技术主要包括以下两个方面。

4.1 星地协同模式自动感知及无缝切换

通过在边缘和中心间持续探测云边网络的连接状态和带宽质量，边缘和中心能够自动感知协同条件，完成星地协同和边缘自治模式的无缝切换，以保障在云边网络连接断续、窄带、时延抖动等情况下仍能实现有效协同，如图5所示。

边缘节点根据网络条件在多种模式之间切换：因其具备网络探测能力，会通过不停探测与地面控制中心的连接状态，并根据探测的结果情况实现在不同模式之间的切换。位于边缘云平台的云边网络嗅探监控模块与云

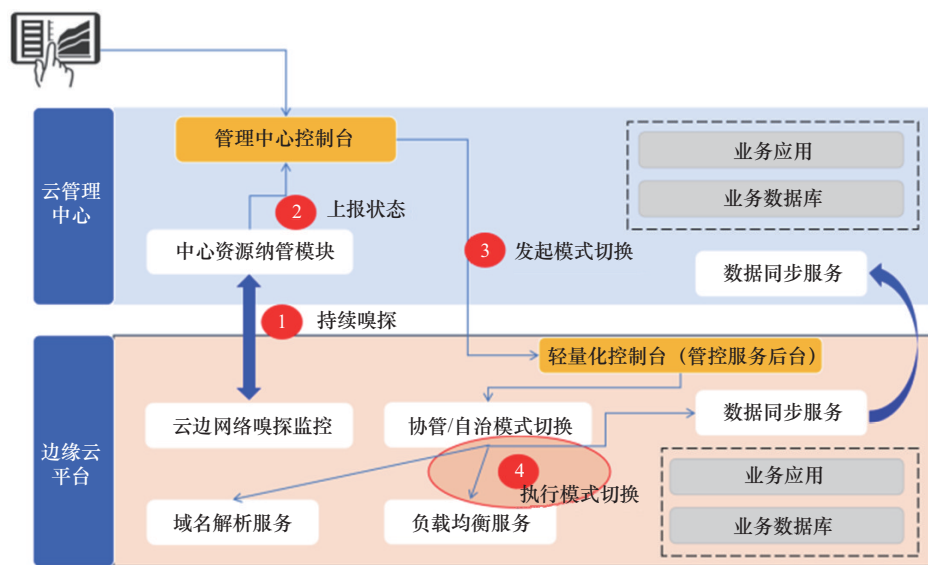


图5 星地协同模式自动感知及无缝切换

管理中心的中心资源纳管模块保持心跳连接, 如果连接断开则进行模式切换。

边缘节点上的代理会定期向地面控制中心上报心跳和节点资源使用情况, 如果心跳上报成功次数达到指定阈值, 自动切换到云边协管运行模式; 如果心跳上报失败次数达到指定阈值, 则自动将边缘节点切换到边缘自治模式。进行模式切换时, 除需要及时探测网络连接状况外, 切换后还需要做相应的配置变更。

(1) 云边网络探测

为确保边缘节点与地面控制中心间的高效协同工作, 边缘节点上的云边网络嗅探监控组件会主动定时探测、嗅探与地面控制中心网络的连通性。

当出现断网或弱网情况时, 边缘节点会主动触发从星地协同模式到边缘自治模式的切换。在边缘自治模式下, 边缘节点将利用本地资源和云服务, 维持应用服务的连续性和可靠性。

当网络恢复后, 边缘节点将重新向地面控制中心同步其状态和数据, 并平滑过渡回云边协管模式, 实现管理模式回切。

(2) 星地协同模式自动切换

在星地协同模式下, 地面控制中心向卫星边缘节点同步控制信息数据。星地网络嗅探持续运行, 当嗅探到异常、断网或弱网情况时, 边缘节点切换到自治模式。从星地协同模式切换为边缘自治模式时, 边缘节点需完成各种内部配置变更及管控组件拉起行为, 并更新域名解析服务和负载均衡服务配置, 从而完成协管模式向自

治模式的切换。

在边缘节点自治模式下, 边缘节点独立自治运行, 涉及的业务数据、监控和日志数据均保存在边缘节点本地。云边网络嗅探持续运行, 一旦监测到网络恢复, 则边缘节点向地面控制中心同步数据。从边缘自治模式切换为云边协管模式时, 边缘节点需完成各种内部配置变更, 更新域名解析服务和负载均衡服务配置, 从而完成自治模式向协管模式的切换。

4.2 弱网持续交互和数据分级传输

通过弱网持续交互、数据压缩和分级传输技术^[10], 实现窄带弱网场景下的数据高效传输, 确保云边有效协同。

边缘同地面控制中心网络连接抖动、带宽不稳定是星地协同设计和实现需重点考虑的关键因素^[11], 为保证在弱网场景下云边数据的可靠性及有效传输, 采用如下技术。

(1) 控制命令通道重试重连

通过控制命令通道自动重试重连, 确保通道正常工作。

弱网场景下, 云边网络不稳定, 其连接可能会发生切换。边缘节点控制命令通道能够尽量保证边缘和中心的长时间连接。

当边缘平台注册到中心管控系统时, 即建立了中心和边缘平台的控制命令通道。其通过域名建立与管控系统的连接, 域名对应的具体IP地址可进行变化, 该IP地址为中心管控服务提供的可被边缘平台访问的IP地址。

控制命令通道建立后,会持续监测网络连接情况,当网络连接不稳定或临时断开时,位于边缘平台的客户端可持续发起请求,并能够在切换完成后立即恢复连接。

(2) 降低控制通道带宽需求

基于基础设施即代码(infrastructure as code, IaC),中心集群借助声明式API控制和管理边缘平台组件及服务,以降低控制通道带宽需求。

声明式API仅表明预期目标和最终状态要求,因此控制数据量极低,且整个业务逻辑实现和调谐过程在边缘平台自主完成,过程中不需要中心集群和边缘平台更多的接口调用及网络通信,从而降低对网络的要求和依赖。

(3) 数据本地缓存和持久化

在弱网或断网环境下,数据首先需要在边缘平台进行本地持久化存储。待网络状况良好后,系统将根据数据优先级及时高效地将其传输至中心集群。通过数据本地缓存机制,边缘平台服务可以直接从本地获取数据,从而提升服务效率,并降低从地面控制中心拉取或访问数据的频率,进而减少云边网络资源开销。同时,在窄带弱网的边缘自治模式下,平台监报告警、日志和镜像仓库等服务仍能持续运行。一旦云边网络恢复,这些数据将会自动同步至地面控制中心。

(4) 容器镜像分层传输和缓存

基于容器镜像分层传输,通过数据的切片传输和断点下载提升稳定性,具体方法基于内容可寻址存储(content addressable storage, CAS)技术将数据划分为小块,且已存在的小块不再重复传输。同时,在上述应用高可用和故障切换场景中,故障实例重启恢复流程下的镜像拉取是耗时较长的步骤^[12]。

若采用本地缓存的镜像数据,还能去除边缘对地面控制中心镜像仓库的强依赖,当应用重建、重启以拉起容器时,若本地有镜像缓存,则直接使用该缓存快速拉起容器,省去镜像拉取耗时。

(5) 数据压缩传输

在弱网环境下,网络带宽受限、时延抖动和链路中断是云边交互的主要瓶颈^[13]。为此,对边缘节点与地面控制中心间的数据进行压缩处理,可显著提升通信效率和交互质量。利用监控和日志等文本数据特性,压缩处理能大幅减少传输数据量。例如,边缘的日志和监控采集器在发送数据前进行压缩,地面控制中心接收后再解压,文本压缩率可高达90%,可将100 MB文件压缩至10 MB以下,从而显著降低网络传输耗时并节省带宽资源。然而,数据压缩并非没有代价。压缩和解压缩会消

耗卫星有限的CPU和内存资源,并引入额外的处理时延,可能对实时性要求高的任务产生影响。对于大文件或连续数据流,需要进行分块压缩和重组,增加了管理复杂性,并可能因部分数据块丢失而影响整体传输。当前,本文主要关注kB到MB级别的监控和日志等文本数据的压缩优化^[14]。

(6) 数据分级传输

通过数据分级传输,当网络不稳定、带宽降低时,能够提高网络通信效率、降低网络时延,在弱网情况下优先保证关键任务达成^[15]。

数据分级传输涉及数据裁剪和数据传输两个方面。

在数据裁剪方面,为减少边缘平台传输至中心集群的整体数据量,边缘平台主要设置以下默认策略规则,如图6所示。

- ① 边缘平台核心数据不会主动传输至中心集群,仅用于边缘平台自治。
- ② 边缘平台监控数据仅传输关键组件健康状态的关键指标至中心集群。
- ③ 边缘平台日志数据仅传输组件异常日志数据至中心集群。

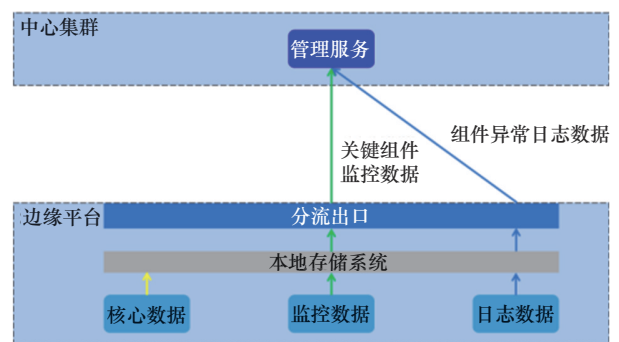


图6 监控日志数据传输

当需要在中心集群查看其他数据时(如查看边缘平台核心数据,对边缘平台进行调试配置等),采用中心集群主动从边缘平台拉取数据的策略。此默认策略规则可降低边缘平台对网络带宽的要求和依赖,提高边缘平台的适应性。

在数据传输方面,默认在中心集群面板中直接展示的数据均为关键的数据,其反映了边缘平台过去时刻的重要状态信息。虽然根据默认策略规则边缘平台的整体数据量已做优化,但当处于弱网、断网环境下时,为最大化且最优化利用网络资源,需要继续对边缘平台的关键数据做临时的缓存或更多的裁剪,待网络状态恢复后,

边缘平台再对数据进行重传处理。因此边缘平台的监控组件和日志组件设计了以下两项关键技术。

发送窗口：监控组件和日志组件中存在两种发送窗口：高优先级发送窗口和低优先级发送窗口。在网络正常场景下，数据均进入高优先级发送窗口。在弱网、断网场景下，组件会根据数据的阻塞状态标签将数据放入低优先级发送窗口。低优先级发送窗口设置有窗口大小，当数据超过窗口大小时，便丢弃最早进入低优先级发送窗口的数据，如图 7 所示。

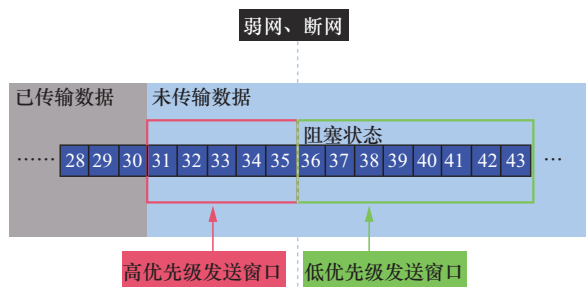


图 7 不同优先级发送窗口

控制器模式：监控组件和日志组件均采用控制器模式从高优先级发送窗口获取需要传输的数据并传输至中心集群。因为控制器模式采用调谐的设计模式，当传输数据至中心集群失败后，可以快速在业务层面将数据再次放入低优先级发送窗口，如图 8 所示。

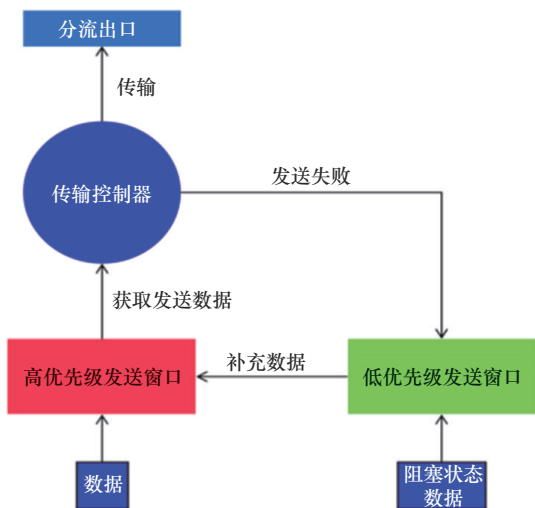


图 8 控制器模式

该模式可以保证最有效、最真实的边缘平台最新数据能够最大化利用网络资源传输至中心集群，而历史数据可以待网络空闲后再传输至中心集群，也可由中心集

群主动发出申请拉取历史数据。基于此，可以大幅度缓解在弱网环境下或网络恢复的短暂时期内，大量数据重传造成的网络资源消耗和网络拥堵，能够让真正真实且关键的数据被优化传输至中心集群。

5 结束语

本文对低轨卫星边缘计算领域的关键技术进行了深入探讨，针对该技术所面临的星地网络易中断、星间弱网连接、单粒子翻转及卫星节点故障等挑战，系统阐述了一种轻量化、高可靠的卫星边缘协同计算架构。本文详细探讨了该架构下的异构资源适配技术，旨在提升卫星有限资源的利用率和系统的灵活性。同时，深入分析分布式边缘协同的关键机制，包括边缘节点发现、自组网、统一资源调度以及任务和服务的跨节点协同与自主迁移，这些技术共同作用提升天基边缘计算的整体效能与韧性。此外，针对弱网环境下的星地协同问题，本文研究了数据压缩、数据分级传输、模式自动感知及无缝切换等技术，以确保云边数据的可靠与高效传输。

尽管低轨卫星边缘计算技术已取得显著进展，但仍处于快速发展阶段，未来仍面临诸多研究机遇与挑战。首先，需要进一步探索更高效的资源管理策略，以最大化利用卫星有限的计算、存储和网络资源，例如针对多任务和多用户场景下的动态资源分配和调度优化，或考虑实时性和功耗约束的算力自适应调整等^[16]。此外，如何构建更强大的容错机制以应对更复杂的空间环境事件，例如针对多种故障模式的预测与自愈合技术，或在极端情况下仍能保持系统鲁棒性的备份与恢复方案，均是提升系统可靠性的重要方向^[17]。最后，将人工智能、区块链等前沿技术与卫星边缘计算深度融合，将为卫星智能化应用提供更广阔的空间，例如通过联邦学习实现星上模型训练^[18]，或利用区块链技术增强星间数据传输的安全性与可信度^[19]，以适应日益复杂的卫星应用场景需求，共同推动卫星边缘计算技术向更高水平发展^[20]。

参考文献

- [1] 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.
- [2] WANG F, JIANG D D, QI S, et al. A dynamic resource scheduling scheme in edge computing satellite networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2021, 26(2): 597-608.

- [3] 陈书恒, 莫嘉倩, 莫小欣. 机载低轨卫星通信发展及关键技术综述[J]. 电讯技术, 2024, 64(1): 149-157.
CHEN S H, MO J Q, MO X X. Review on development and key technologies of airborne low earth orbit (LEO) satellite communication [J]. Telecommunication Engineering, 2024, 64 (1): 149-157.
- [4] 周国昌, 赖晓玲, 朱启, 等. 一种改进的基于时钟沿的单粒子翻转自检纠错方法[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(5): 716-720.
ZHOU G C, LAI X L, ZHU Q, et al. An improved error detection and correction method for single event upset with clock edge[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(5): 716-720.
- [5] SMITH J, CHEN L. Reliability analysis of on-board computing systems in low-earth orbit satellites[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2023, 60(2): 345-358.
- [6] 张万才, 张楠, 杨文清, 等. 基于虚拟化的GPU异构资源池平台架构设计、关键技术及应用研究[J]. 电信科学, 2024, 40(9): 162-175.
ZHANG W C, ZHANG N, YANG W Q, et al. Architecture design, key technologies, and application research of GPU heterogeneous resource pool platform based on virtualization[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(9): 162-175.
- [7] 栾政旻. 低轨道卫星高动态载波同步技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
LUAN Z M. Research on high-dynamic carrier synchronization technology for low earth orbit (LEO) satellites [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [8] LI P, ZHANG H, WANG Y. Dynamic cluster formation and resource management for satellite edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 4859-4872.
- [9] 上官博屹, 刘威, 乐鹏, 等. 一种面向空间信息网络的星地协同计算迁移方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(3): 459-466.
SHANGGUAN B Y, LIU W, YUE P, et al. An approach of spatial information network oriented satellite-ground collaborative computing migration[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(3): 459-466.
- [10] 关敏, 张勇, 李云, 等. 我国风云气象卫星发展现状与未来展望[J]. 地球科学进展, 2025, 40(2): 138-154.
GUAN M, ZHANG Y, LI Y, et al. Current development and future trends of Fengyun meteorological satellites[J]. Advances in Earth Science, 2025, 40(2): 138-154.
- [11] HUANG X, LI J, ZHANG Y. A robust data transmission scheme for satellite-terrestrial integrated networks under variable channel conditions[J]. Journal of Space Engineering, 2020, 35(4): 211-225.
- [12] LIN H, ZHANG Y, CHEN J, et al. Multi-grained trace collection, analysis, and management of diverse container images[J]. IEEE Transactions on Computers, 2024, 73 (7): 1698-1710.
- [13] ZHANG Y, CHEN J, LI W. Optimizing cloud-edge collaboration under unstable network conditions[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(8): 2457-2470.
- [14] ZHANG P, LI Z, WANG Y. A lightweight data compression scheme for resource-constrained edge devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(12): 9456-9469.
- [15] 马文臻, 邹自明, 黎建辉, 等. 空间科学卫星数据处理框架研究与系统实现[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(7): 1605-1618.
MA W Z, ZOU Z M, LI J H, et al. Space science satellite data processing framework research and system implementation[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(7): 1605-1618.
- [16] ZENG D, CHEN Z, CHEN J. A multi-objective Optimization approach for resource allocation in multi-task edge computing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3241-3250.
- [17] HU X, ZHENG Y, LIU Y. Resilient and fault-tolerant architectures for satellite swarm systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(1): 38-51.
- [18] POKHREL S R, SAHOO S R. Blockchain for the Internet of things: a comprehensive survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 182: 103049.
- [19] KHAN L U, KUMAR N. A survey on federated learning in vehicular networks: challenges and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2824-2859.
- [20] 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.
WANG P, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Low earth orbit satellite intelligent multi-access edge computing networks: requirements, architecture, opportunities and challenges[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 35-46.

[作者简介]

刘永福 (1982-), 男, 硕士, 西南电子技术研究所架构师, 主要研究方向为云计算、大数据、卫星互联网、智能计算等。

商科峰 (1987-), 男, 硕士, 主要研究方向为卫星网络、天基边缘云、在轨智能应用等。

别佳 (1987-), 男, 硕士, 西南电子技术研究所工程师, 主要研究方向为云计算、卫星互联网等。

刘言 (1985-), 男, 博士, 主要研究方向为卫星网络、人工智能应用、天基边缘云等。

朱凯歌 (1993-), 男, 博士, 主要研究方向为卫星网络、天基边缘云等。

王玉稳 (1993-), 男, 硕士, 主要研究方向为云计算及边缘计算等。

李科伟 (1987-), 男, 硕士, 主要研究方向为云计算、边缘计算及应用管理等。