

卫星智能计算平台自主管控架构设想

高吉星¹, 徐志平¹, 丁文慧¹, 丁熙浩¹, 刘智鑫², 虞志刚¹, 陆 洲¹

(1. 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 北京 100041;

2. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100141)

摘 要: 为了满足移动物联网、智能物流等新兴应用服务质量要求, 随着空间与信息技术进步, 通过在卫星中部署智能计算平台进行在轨数据处理来缩短响应时间已成为主要方法之一。目前低轨卫星规模巨大, 经常处于难以直接测控区域, 而且工作模式较多, 需要具备自主管控的能力。首先在介绍卫星智能计算平台研究现状的基础上, 分析卫星智能计算平台的功能需求。然后在设计一套通用开放的卫星智能计算平台硬件架构的基础上, 提出卫星智能计算平台的自主管控软件架构设想, 对主控组件、管控组件以及协同组件的内部组成以及工作原理进行进一步的描述, 在此基础上分析自主管控软件相关的关键技术。最后对卫星智能计算平台自主管控软件的发展方向进行展望。

关键词: 自组织网络; 网络管理; 分布式网络代理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024041

Autonomous Control Architecture of Satellite Intelligent Computing Platform

GAO Jixing¹, XU Zhiping¹, DING Wenhui¹, DING Xihao¹, LIU Zhixin², YU Zhigang¹, LU Zhou¹

1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

2. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Science, Beijing 100141, China

Abstract: In order to meet the service quality requirements of emerging applications such as mobile Internet of things and intelligent logistics, with the progress of space and information technology, it has become one of the main methods to shorten the response time by deploying intelligent computing platforms in satellites for on-orbit data processing. At present, the scale of low-orbit satellites is huge, and they are often in areas that are difficult to directly measure and control, and there have many working modes, so they need the ability of independent control. Based on the introduction of the research status of the satellite intelligent computing platform, this paper analyzed the functional requirements of the satellite intelligent computing platform. On the basis of designing a set of general and open hardware architecture of satellite intelligent computing platform, this paper put forward the idea of autonomous management and control software architecture of satellite intelligent computing platform, and further described the internal composition and working principle of main control components, management and control components and collaborative components. On this basis, the key technologies related to autonomous management and control software were analyzed. Finally, the development direction of autonomous control software of satellite intelligent computing platform was prospected.

Keywords: self-organized network, network management, distributed network agent

0 引言

随着空间与信息技术进步, 卫星系统逐渐向着网络

化、智能化的方向发展。卫星网络具有广域覆盖的特点, 是偏远地区各类信息技术应用的重要支撑, 可以为用户提供泛在可靠的网络服务^[1]。

收稿日期: 2024-09-01; 修回日期: 2024-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62101585, No.62201534, No.61931017)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62101585, No.62201534, No.61931017)

为满足移动物联网、虚拟现实、智能物流、目标识别与跟踪等应用对响应时间和处理能力的更高要求,在卫星网络中部署计算平台已经成为全球各界研究人员关注的重要方向之一^[2-3]。卫星智能计算平台是在卫星上部署的一种集成网络与计算功能的信息处理载荷,各卫星智能计算平台通过星间链路进行组网,在卫星网络的基础上,利用虚拟化和边缘计算技术实现计算资源共享^[4-5]。

传统卫星在轨计算、存储资源能力极其有限,通常仅能对电磁信号进行物理层的弯管转发,无法对其承载的数据内容进行识别和处理。随着近年来电子信息及空间有效载荷技术的飞速发展,星载计算资源性能迅速提升,为构建新一代低轨星座通信网络边缘计算架构提供了前提条件^[6-8]。目前,越来越多的服务开始采用边缘计算的方式提供。在低轨卫星互联网中引入云计算技术,可以有效支撑天基用户的遥感数据处理等计算密集型业务^[9-11]。各国具有智能计算能力的卫星见表1。

表 1 各国具有智能计算能力的卫星

时间	国家	搭载计划	主要功能
2018年	美国	黑杰克	“作战管理、指挥、控制和通信”(BMC3)能力
2018年	中国	TFSTAR号	在轨图像处理
2019年	美国	小马快车1号	测试包括软件定义任务、多核处理器工作性能及先进卫星网络通信技术等
2019年	中国	吉林一号	星上AI处理的全球舰船信息收集、识别与监测
2021年	中国	北邮一号	在轨资源管理以及在轨AI计算

2018年4月19日,美国国防部高级研究计划局(DARPA)发布了“黑杰克”低轨星座项目。“黑杰克”卫星搭载了“Pit Boss”系统,利用全新高效的星上计算载荷在轨处理各类业务应用数据,并能在相邻卫星间进行数据自主传输和协同处理,构建面向未来军事任务需求的、覆盖全球的在轨边缘计算架构^[12]。“黑杰克”卫星架构如图1所示。

2018年12月7日,我国成功发射的TFSTAR号卫星搭载了由电子科技大学参与设计开发的第二代星上AI计算载荷,具备全球同量级商业卫星在轨图像处理的最强算力,其图像处理能力是同重量卫星的1000倍^[9],如图2所示。

2019年1月,我国发射的吉林一号光谱卫星集成了星上AI处理系统配合多光谱成像仪、红外相机等设备,可以每天搜集全球船舶信息,并实现舰船识别与监测,应急响应时间可控制在1 min以内^[13],如图3所示。

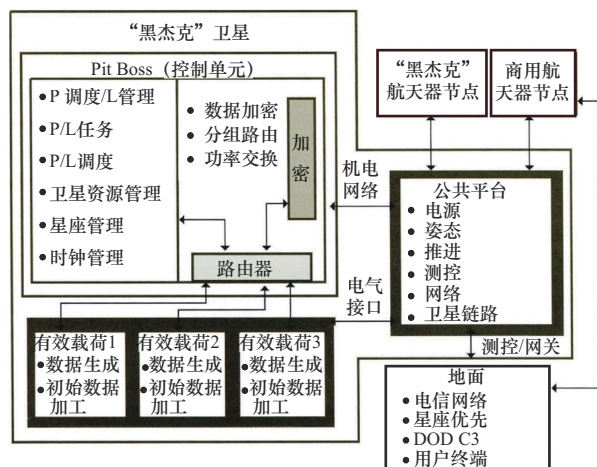


图 1 “黑杰克”卫星架构

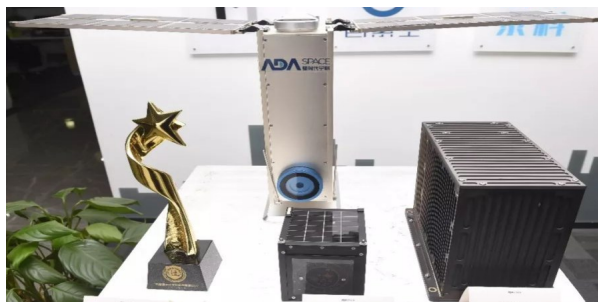


图2 TFSTAR号卫星



图3 吉林一号光谱卫星

由北京邮电大学、华为技术有限公司等单位联合研发的搭载“天算星座”计算平台的试验卫星已于2021年12月10日在轨稳定运行。该平台通过部署KubeEdge软件以及Senda机器学习框架,为天算星座提供统一的资源管理以及在轨AI计算能力。北邮一号卫星如图4所示。



图4 北邮一号卫星

在传统的卫星任务管理过程中，任务都是在地面规划好，当卫星经过测控区域时将指令上注。目前低轨卫星规模巨大，大部分时间可能处于难以直接测控区域，工作模式也多，需要具备自主管控的能力。

1 需求分析

1.1 异构计算资源的需求

随着天基网络中业务种类日益增加，对计算能力的要求呈现差异化趋势。根据数据计算方式，可以将计算任务分为逻辑运算任务、并行计算任务和神经网络计算任务。各类业务的计算任务类型见表2。

逻辑运算任务主要用于实现复杂的逻辑控制功能，需要通过通用的基础运算能力来完成。这类算力主要由CPU提供。CPU的结构主要包括运算器（Arithmetic and Logic Unit, ALU）、控制单元（Control Unit, CU）、寄存器、高速缓存器，采用冯·诺依曼架构，将计算分为取指、译码、发射、执行、写回等几个阶段，通过软件调度，可以完成任意任务的计算。当前CPU的架构已经相当复杂，并且真正有效的计算在CPU整体功耗比例中不到10%，因此CPU在大规模并行计算能力上极受限制，更适合控制逻辑复杂而计算密度不高的应用场景。

并行计算任务主要用于对大量的类型统一的数据进行批量处理，并行计算能力不但在图形图像处理领域大显身手，同时也适用于科学计算、密码破解、数值分析、

海量数据处理、金融分析等需要并行计算的领域。目前并行计算能力是一种比较通用的计算能力。典型的硬件芯片为现场可编程门阵列（FPGA），可以认为是细粒度可重构芯片，FPGA非常适合数据流驱动的计算架构，具有高空间并发和低时延的特点，理论上FPGA可以实现任意功能，但FPGA开发周期比较长，同时对开发人员的专业技能要求也比较高，这些都影响了FPGA的应用场景。

神经网络计算任务主要指AI神经网络、机器学习类密集计算型业务，需要一种用来对机器学习、神经网络等进行加速的计算能力。目前常用GPU处理神经网络计算任务，GPU采用的是SIMD/SIMT架构，虽然本质上还是冯·诺依曼架构，但减少了取指、译码开销，GPU具有很强的通用性，以NVIDIA为代表的GPU厂商，培养了非常好的GPU生态系统，为用户提供了非常方便的开发环境，因此GPU在高性能计算、图像处理和AI领域都有非常广泛的应用。近年来各厂商发布的AI类芯片皆为加速神经网络计算设计。如华为提出的NPU是专为人工智能计算加速而设计的芯片，该类芯片采用数据驱动并行计算的架构，可以将CPU、GPU处理器需要用数千条指令完成的神经元处理压缩到几条指令之内，在深度学习等AI计算方面的能效比有明显的优势。

1.2 资源智能管控需求

传统星载电子系统中通常根据任务需求专门配置计算资源，其“算力”被封闭在独立的计算模块内，不能彼此共享，不支持统一调用。现有的功能独立的封闭式的航天电子系统已经不能满足卫星在轨计算需求。因此，需要在提高单点计算能力的同时，采用“云”化计算架构，通过对硬件计算资源进行虚拟化，形成统一的计算资源池。通过对虚拟化资源进行统一的调度和管理可以实现计算资源共享，提升计算效率，平衡计算负载，提升航天器计算系统的计算能力，满足智能化计算的需求。

表 2 各类业务的计算任务类型

业务类型	业务内容	计算任务类型
星载基站	对射频数据进行处理,在A/D、D/A转换的基础上进行空中接口协议处理与链路资源管理	逻辑运算任务;并行计算任务
星载核心网	进行会话管理,用户接入与移动性管理以及用户面的数据转发	逻辑运算任务;并行计算任务
卫星内容分发	控制星上缓存的数据分发给用户	逻辑运算任务
环境监测、数据采集	监测海洋、大气、空间等环境参数以及船舶、航天器位置,并进行初步的数据处理	并行计算任务
图像处理、智能识别	对采集的信息进行汇总,通过神经网络、深度学习等技术对数据进行分析,识别目标、生成航迹等	神经网络计算任务

相较于地面的计算平台,卫星智能计算平台上的业务与卫星所处轨道、姿态等信息有密切的关系。智能计算平台需要根据获取的时位姿信息进行任务管理,使任务在姿态、轨道位置符合要求时及时部署启动。同时由于星上能源有限,管控软件需要根据任务需求和当前卫星的轨道及能源状态对不需要工作的部分进行去电处理,以此控制计算平台的功耗。

在传统的卫星任务管理过程中,任务都是在地面规划好,当卫星经过测控区域时将指令上注。目前低轨卫星规模巨大,大部分时候可能处于难以直接测控的区域,无法实现工作模式快速切换、功能重构以满足业务敏捷响应的需求,需要具备自主管控的能力。目前的智能平台资源管控软件主要用于地面平台的计算资源管理,卫星智能计算平台资源管控软件需要进一步根据卫星上的姿态、轨道位置、网络以及能源情况对计算平台内部的硬件工作状态、计算资源与任务情况进行综合管理。

2 硬件架构设想

卫星智能计算平台采用开放式架构,硬件架构如图5所示。

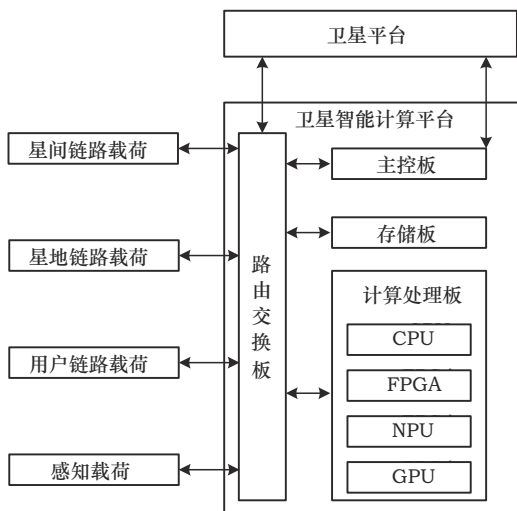


图5 卫星智能计算平台硬件架构

卫星智能计算平台通常包括主控板、路由交换机、存储板以及计算处理板,各板卡功能如下。

主控板主要用于实现其他板卡工作状态监管、数据调度、星务计算、时钟管理等功能,对卫星提供控制接口,用于获取姿态、轨道、遥控等信息,通常由FPGA、CPU组成。

路由交换板主要用于完成平台内外各板卡的数据交换和星间、星地链路之间的路由转发,对平台内部和外部提供传输业务数据的高速接口。通常由FPGA、CPU或交换芯片组成。

存储板主要用于为平台提供存储扩展,通常由FPGA、CPU以及SSD组成。

计算处理板主要用于完成星上的计算任务,由FPGA、CPU、GPU、NPU组成,可以满足批量数据处理、图像处理、AI计算等多种类型业务的算力需求,同时为计算平台的自主管控提供智能算力支撑。

卫星智能计算平台内部各模块之间设置有CAN、I2C等控制总线和以太网等数据总线,对外配置有用于收发控制信息CAN和RS422接口以及千兆、万兆以太网等用于高速传输的接口。

3 软件架构设想

3.1 软件架构

卫星智能计算平台软件架构包括平台驱动层、通信服务层、虚拟化层、平台管理层以及功能应用层,如图6所示。

功能应用层为平台承载的应用功能;平台驱动层与通信服务层共同组成试验载荷软件的基础运行环境:操作系统+驱动文件+库文件;虚拟化层分别利用不同的虚拟化技术对硬件计算资源进行虚拟化抽象,形成统一的计算资源池,以便实现资源的统一管理和协同调度;平台管理层包括遥测遥控信息处理、模块加/去电管理、存储文件管理、模块工作状态采集等基础管理功能,平台自主管控软件在基础管理功能的基础上增加虚拟化资源管理、任务调度管理、星间协同管理、工作模式管理等功能。

3.2 自主管控软件设计

卫星智能计算平台自主管控软件主要包括主控组件、管控组件以及协同组件,如图7所示。

主控组件主要用于实现计算平台的工作状态管理,分为主节点和从节点。其中,主节点部署于主控板,通过外部控制总线接收来自卫星平台的遥控指令,返回遥测信息的同时向资源管控软件提供时位姿信息;通过内部控制总线采集各板卡的电压、电流信息并根据资源控制组件的需求控制各板卡加/去电;主控组件从节点部署在各计算板的微控制单元(MCU)上,采集所在板卡的电压、电流以及温度情况并反馈给主控组件主节点,同时接受主节点发送加/去电指令并执行。

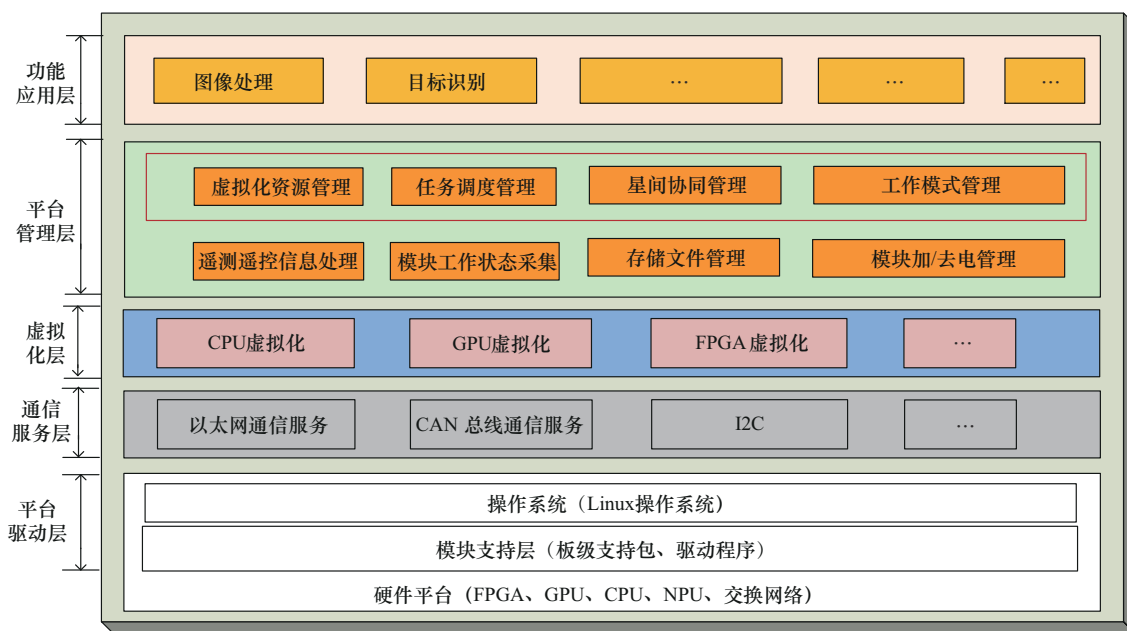


图6 卫星智能计算平台软件架构

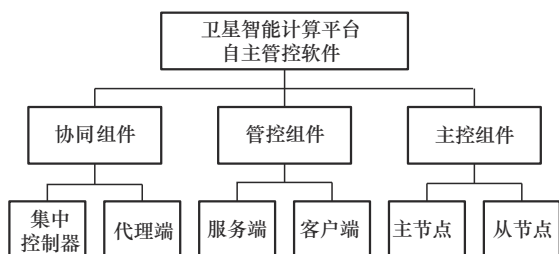


图7 卫星智能计算平台自主管控软件组成

管控组件主要用于计算平台的异构资源管理，分为服务端和客户端。其中，服务端部署在主控板，通过内部数据总线采集各板卡的资源状态并根据时位姿信息将任务调度到具体板卡，同时将边缘计算平台的资源状态发送给协同处理软件；客户端部署在计算板，根据分配的任务调用虚拟化资源，并向服务端反馈资源的状态。

协同组件主要用于计算平台之间的协同，分为代理端和集中控制器。其中，代理端部署在主控板，通过与资源管控组件交互采集计算平台的资源状态，并下发任务需求；通过星间链路将资源状态信息上报给位于高轨节点或地面的集中控制器并接收任务需求。

由于星间/星地以太网链路可能无法一直处于可用状态，管控组件可以独立地对平台上的任务进行调度。

3.2.1 卫星智能计算平台自主管控软件信息接口

自主管控软件的各组件之间通过智能计算平台的内部与外部接口交互信息，各组件的接口关系如图8所示。主控组件主节点和从节点之间通过平台内部的控制总线

交互信息；管控组件服务端和客户端之间通过平台内部的数据总线交互信息；协同组件集中控制器和代理端之间通过星间、星地接口交互信息。

3.2.2 主控组件

主控组件主节点由外部控制总线接口模块、内部控制总线接口模块、遥控指令处理模块、状态信息采集模块组成，如图9所示。

外部控制总线接口模块用于接收控制总线上的指令报文并对其进行解析，同时将采集到的状态信息打包成遥测信息报文并发送。

遥控指令处理模块根据接收到的控制指令对资源管控组件或计算板上的主控软件从节点发出相应的命令。

内部控制总线接口模块用于生成与解析内部控制总线上的控制与状态信息报文。

状态信息采集模块用于采集各板卡的工作状态和资源状态信息并通过外部控制总线接口模块发送出去。

平台主控组件从节点采集所在板卡的状态信息并反馈给主节点，根据主节点的命令完成板卡的加/去电。

3.2.3 管控组件

如图10所示，管控组件由管控组件服务端与管控组件客户端组成。其中管控组件服务端包括管理服务模块和调度模块。

管理服务模块负责对整个平台资源与任务进行管理，即对所有板卡的资源状态进行采集汇总，并根据任务的

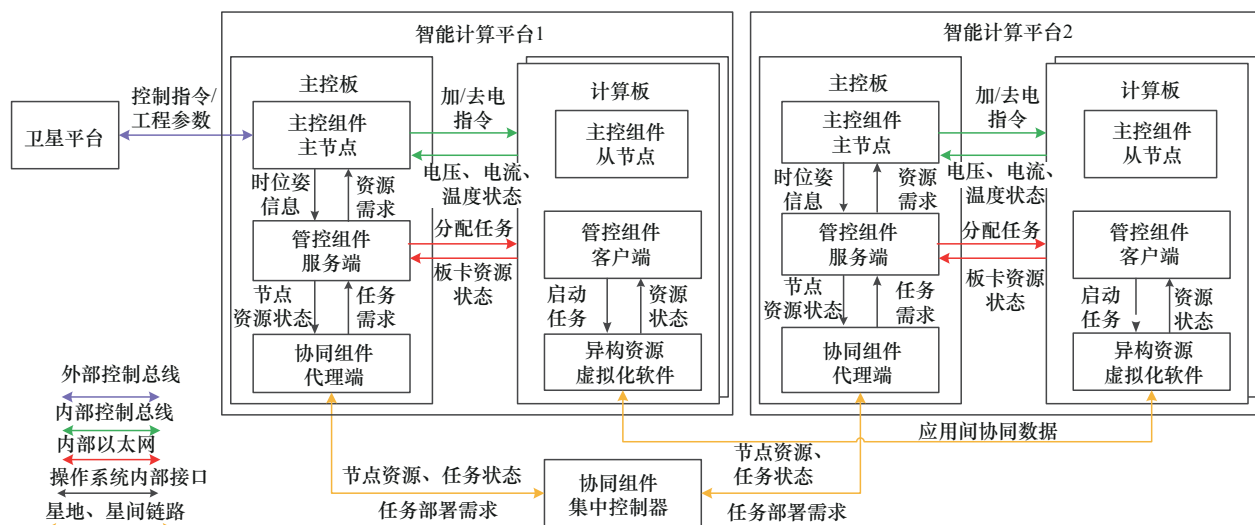


图8 卫星智能计算平台自主管控软件信息接口关系

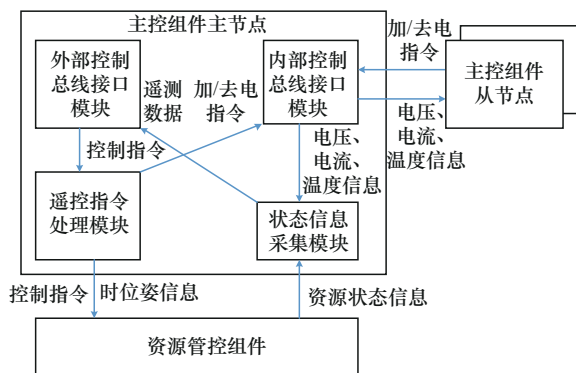


图9 卫星智能计算平台主控组件模块组成

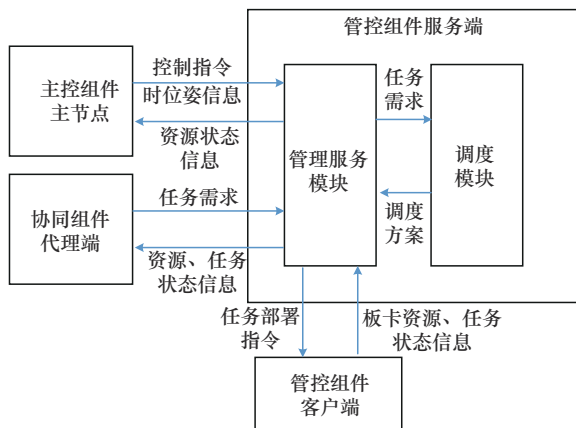


图10 卫星智能计算平台管控组件模块组成

需求和调度结果将任务部署到对应板卡上。

调度模块负责将待调度的任务按照特定的调度算法和调度策略确定任务要部署的板卡。

管控组件客户端包括 CPU Manager、GPU Manager、

FPGA Manager 等，分别与 Docker 等 4 类资源的虚拟化软件对接，用于监控和管理各个节点的异构资源、接收服务端请求申请资源并完成任务的创建与运行。

3.2.4 协同组件

如图 11 所示，协同组件由代理端和集中控制器组成。其中代理端部署在各计算平台上，目的是实时收集各节点资源信息和已部署服务的状态并发送给集中控制器，接收来自集中控制器的任务部署指令。集中控制器部署在高轨节点或地面节点上，用于汇总全网算力资源分布信息及已部署的服务信息，当有新业务处理请求到来时，基于汇总的信息，采用智能算法为业务选择合适的节点进行处理。

协同组件代理端有资源信息采集、任务管理两个功能模块。资源信息采集模块按周期从管控组件获取资源状态信息，并定时返回给集中控制器；任务管理模块根据集中控制器下发的任务部署要求向管控组件部署任务，同时采集边缘计算平台上的任务状态信息反馈给集中控制器。

协同组件集中控制器具备服务接口、任务编排、任务管理和资源信息采集 4 个功能模块。

服务接口模块负责接收用户任务申请，并向任务编排模块提出服务请求，同时接收来自任务管理模块的任务状态信息并反馈给用户。

任务管理模块根据任务编排给出的部署策略将任务部署需求发送给指定边缘计算平台的任务管理模块，同时从各平台的任务管理模块采集任务状态信息并反馈给任务编排的服务接口模块。

资源信息采集模块从各平台的资源信息采集模块收集资源状态信息并反馈给任务编排模块。

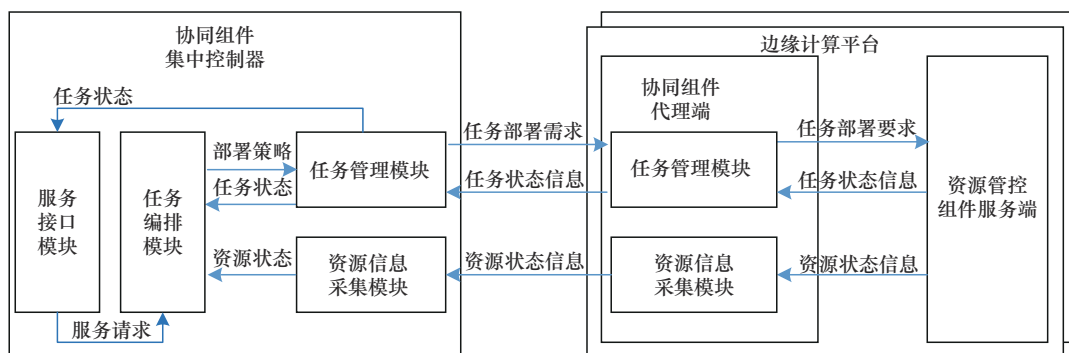


图11 卫星智能计算平台协同组件模块组成

任务编排模块从资源信息采集模块和任务管理模块获取各节点的任务和资源状态信息，利用强化学习算法根据各节点资源使用状况和全网链路状态，针对不同的业务构建不同的资源编排模型。该模块接收任务请求信息后，基于资源编排模型生成部署策略，并发送给任务管理模块。同时该模块还可以通过保存历史分配方案并评价分配结果信息来更新自身模型，完成模型的自学习、自演进。

4 关键技术

4.1 异构资源轻量级虚拟化技术

针对卫星网络中空间资源的异构性、有限性、动态性等特点，通过对空间异构资源对象进行分析，提出面向CPU/GPU/DSP/FPGA等星载异构资源的轻量化、高灵活性及高故障隔离度的虚拟化技术，对硬件计算资源进行虚拟化抽象，形成统一的计算资源池，以便实现计算资源的统一管理。

4.1.1 CPU虚拟化技术

目前主流的CPU虚拟化技术有全虚拟化技术（如VMWare）以及基于容器的虚拟化技术（如Docker）。VMWare虚拟机的Guest OS即为虚拟机安装的操作系统，它是一个完整的操作系统内核，利用一个完整的操作系统实现对资源的隔离和封装。Docker可以简单看成对Linux的NameSpace、Cgroup、镜像管理文件系统操作的封装，并没有和虚拟机一样利用一个完全独立的操作系统实现环境隔离，一个Docker容器相当于宿主机上的一个进程。

容器技术利用Linux NameSpace进行空间隔离，通过文件系统的挂载点决定容器可以访问哪些文件，通过Cgroup确定每个容器可以利用多少资源。此外，容器之间共享同一个系统内核，这样当同一个内核被多个容器

使用时，内存的使用效率会得到提升。

4.1.2 GPU虚拟化技术

GPU虚拟化可以实现多个用户对GPU的共享，GPU与用户之间的关系不再是一对一，而是一对多。从GPU资源的虚拟化实现路径看，主要有虚拟共享图形加速（Virtual Shared Graphics Acceleration, VSGA）、虚拟专用图形加速（Virtual Dedicated Graphics Acceleration, VDGA）、虚拟化GPU（Virtualized GPU, vGPU）3种技术方案。

（1）VSGA把物理的GPU分享给多个桌面用户分时复用，通过超级VGA（SVGA）驱动调用虚拟化的GPU驱动程序，再来调用GPU的运算能力。

（2）VDGA把物理GPU分配给一个指定的用户，资源专用，这种模式也称为直通模式，该方案具有比较高的性能优势，但成本相对较高。

（3）vGPU把一块物理GPU虚拟成多块vGPU卡，每个计算任务都独占一块vGPU，每块vGPU直接跟物理GPU对接。对于并行计算性能更加优越的GPU处理器，通过虚拟管理层将一块GPU板卡虚拟成多个GPU资源，提供给不同的用户使用，再通过将GPU设备和库挂载到虚拟GPU资源上，实现GPU资源访问。

4.1.3 FPGA虚拟化技术

在传统的FPGA开发模型中，用户通常使用硬件描述语言（HDL）对应用场景进行建模，然后通过特定的FPGA开发工具将硬件模型映射到FPGA上，最终生成可以运行的FPGA逻辑功能。这种开发模式下FPGA只能由单一用户开发和使用。对于一个对资源需求不大而且不需要连续运行的应用而言，大部分FPGA的硬件资源在大部分时间内都会闲置，很难在时空范围内对FPGA进行充分利用。

为了提高FPGA的开发效率，更好地利用FPGA的逻

辑资源,方便FPGA的大规模部署和应用,需要将FPGA进行一定程度的逻辑抽象,使顶层用户不必太多关注FPGA硬件逻辑的实现方式与细节。FPGA虚拟化技术打破了时间和空间维度的限制,使用户能够轻松地在不同时间,对多个FPGA的各类资源进行充分的调度与使用。目前,3种主流的FPGA虚拟化技术分别为FPGA Overlay、部分重构与虚拟化管理器、FPGA资源池与虚拟化框架,其主要原理如下。

(1) FPGA Overlay:在物理网络架构的基础上,增加一层虚拟的网络平面,使得上层应用与底层物理网络相分离。这个虚拟的网络平面本质上可以通过隧道封装技术实现。

(2) 部分重构与虚拟化管理器:可以将FPGA内部划分出一个或多个区域,并在FPGA运行过程中单独对这些区域进行编程和配置,以改变区域内电路的逻辑,但并不影响FPGA其他电路的正常运行。

(3) FPGA资源池与虚拟化框架:为了实现多用户的支持,可以在单一FPGA芯片上使用动态重构技术划分多个可重构区域,也可以使用多个FPGA级联,使每个FPGA负责单个或少量用户,并通过一个整体的虚拟化框架完成系统的集成与资源调度。

经过虚拟化处理后,利用各类异构资源对应的软件插件提供集成接口,实现卫星网络资源的动态发现和共享。

4.2 异构资源智能调度技术

互联网的高速发展和大数据处理的迫切需求,使诸如Hadoop、OpenStack、Spark、Storm等云计算框架得到了快速的发展,各种云计算框架各有所长,各自着重针对某类计算问题进行处理。在云计算环境中,一方面,由于实际问题的复杂性,可能需要使用几种框架协作解决实际的应用问题;另一方面,不同类型的计算任务对不同种类的资源需求是不同的,计算密集型任务通常需要更多的CPU资源,I/O密集型任务则需要更多的内存资源。因此,在云计算领域中通常需要将多种云计算框架部署到同一个公共的集群环境中,以达到共享集群内的数据及资源并对集群内的资源统一地进行调度和管理的目的。在这样的背景下,软件定义数据中心的概念被提出,并由此诞生了一系列资源统一管理与调度平台,如Yarn、Mesos和Brog等。这些平台的核心即是使用合理的资源调度算法为提交到平台中的作业分配资源,因此资源调度器成为了它们最核心的组件。

目前资源分配算法主要集中在对单资源分配算法的研究上,单个资源的分配是公平且高效的。而对于多资

源分配的研究大多采用对单个资源进行抽象进而分配的方式。在多资源分配的环境中,需要对各种资源进行衡量,以解决多资源分配的公平性问题。主导资源公平(Dominant Resource Fairness, DRF)分配算法提供了在多种资源环境中的一种公平分配机制,是一种通用的多资源分配策略,因此得到了广泛的关注和应用。该算法将针对单资源分配的max-min公平分配算法扩展到多种类型资源的分配上,对主导资源所占份额应用max-min公平分配的方法来解决多资源分配的公平性问题。DRF分配算法较好地解决了多资源环境中资源分配的公平性问题,但是,在资源分配的过程中没有充分地考虑集群整体负载均衡问题。

4.3 空间异构分布式协同处理技术

由于单星的计算平台处理能力受限,处理复杂业务时,需要多节点协同处理完成。在多节点协同处理应用的场景中,需要多个计算平台进行协同处理。星载异构资源表征难度大、协同管控复杂,需要提出多节点间的分布式虚拟资源协同算法,通过构建统一完整的资源定义与表达,形成网络化分布式异构资源池,利用机器学习技术实现协同策略的自学习和自演进。

空间异构分布式协同处理中的一个核心问题是任务的调度。卫星网络中的任务调度是一个高度复杂且动态的过程,它基于任务的需求,将众多卫星节点上的多种异构计算、存储和网络带宽等在内的资源进行合理分配,确保各项任务能够按照约定的服务质量顺利完成。面对卫星网络不断动态变化的网络拓扑、资源状况以及广泛多样的任务需求,任务调度必须展现出极高的智能化和自适应能力。设计卫星网络任务调度策略时面临的挑战主要包括以下几个方面。

(1) 异构资源联合调度优化问题。卫星网络中的节点装备了多种异构资源,如CPU、GPU、FPGA等。任务调度问题可以建模为这些资源的联合优化问题,分析发现这是一个典型的NP-hard问题。传统的优化算法很难在多项式时间内找到解决方案,而一些启发式算法,如遗传算法、贪婪算法、博弈论算法等,在处理复杂的任务调度问题时可能会陷入局部最优解。

(2) 因素的动态变化问题。在持续运行的卫星系统中,节点资源、链路状态、任务需求以及任务的到来时间都在动态变化,因此,调度策略需要具备一定的自我优化能力,以便及时更新以适应这些变化。

(3) 计算任务的复杂、多变问题。不同计算任务对资源的需求不同,且任务中可能包含多个子任务,这些

子任务之间可能存在不同的逻辑关系。因此, 资源调度模型需要能够理解子任务间的拓扑结构, 以便更合理地子任务集分配合适的资源。

针对上述问题, 可以从以下几个方面进行关键技术攻关。

(1) 异构多层的空间智能计算模型与部署配置策略。通过异构资源虚拟化、分布式调度、统一用户接口等技术, 构建统一在轨空间智能计算新范式。面向垂直行业差异化需求及计算、存储、传输等虚拟资源多样化需求, 提出面向场景的最优虚拟资源配置。

(2) 服务驱动的天基计算资源实时智能协同编排。根据天基边缘计算网络的算力可用性、网元与用户移动的异步性等时变特性, 构建算力与计算任务之间的映射模型, 在网联卫星群之间实现计算资源按需调度, 并实现面向复杂时效任务的高效协同。

(3) 面向容错及高服务质量用户移动性的弹性任务迁移。针对服务对象移动性或卫星网络集群自身故障引起的网络重构, 基于卫星集群带内或带外信令实时获取网络状态与各链路关键性能信息, 实现计算任务快速迁移, 保证服务连续性与信息分发有效性。

5 结束语

随着电子技术的进步, 星上处理芯片的集成度和计算能力不断增强。为了追求低成本和小体积以适应批量部署, 未来在一些微小卫星上, 可能会出现载荷来实现星务计算和智能计算功能的情况。这会使系统结构更加扁平化, 各模块间的数据带宽增加, 时延减小, 进一步提高整星姿态、功耗、计算等功能综合管理的效率。本文在分析卫星智能计算平台研究现状的基础上, 描述了卫星智能计算平台的自主功能需求, 并提出了软件架构设想, 在此基础上分析了自主管控软件关键技术, 最后对卫星智能计算平台自主管控软件发展方向进行展望。

参考文献

- [1] 庞勇, 李增元, 陈博伟, 等. 星载激光雷达森林探测进展及趋势[J]. 上海航天, 2019, 36(3): 20-28.
PANG Y, LI Z Y, CHEN B W, et al. Status and development of spaceborne lidar applications in forestry[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(3): 20-28.
- [2] RAAEN K, EG R, KJELLMO I. Playing with delay: an interactive VR demonstration[C]//Proceedings of the 11th ACM Workshop on Immersive Mixed and Virtual Environment Systems. New York: ACM, 2019: 19-21.
- [3] 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.
- [4] 张飞, 陈小前, 于帅, 等. 基于天基边缘计算的在轨智能技术[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(4): 19-24.
ZHANG F, CHEN X Q, YU S, et al. On-orbit artificial intelligence based on space edge computing[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(4): 19-24.
- [5] 陈占胜. 未来智能化网络化多功能卫星系统技术发展思考[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 63-67.
CHEN Z S. Consideration on the development of intelligent networked multifunctional satellite system technology in the future[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(3): 63-67.
- [6] 毛远宏, 马钟贺, 占庄. 航天器智能化发展趋势研究[J]. 战略研究, 2018(3): 14-16.
MAO Y H, MA Z H, ZHAN Z. Research on the intelligent development trend of spacecraft [J]. Strategic Research, 2018(3): 14-16.
- [7] 王兆魁, 方青云, 韩大鹏. 成像卫星在轨智能处理技术研究进展[J]. 宇航学报, 2022, 43(3): 259-270.
WANG Z K, FANG Q Y, HAN D P. Research progress of on-orbit artificial intelligence technology for imaging satellite[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(3): 259-270.
- [8] 刘旭光, 钱志升, 周继航, 等. “星链”卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J]. 通信技术, 2022, 55(2): 197-204.
LIU X G, QIAN Z S, ZHOU J H, et al. Thinking on the development of “starlink” satellite system and domestic satellite Internet constellation[J]. Communications Technology, 2022, 55(2): 197-204.
- [9] 屈盈. 低轨星座宽带网络边缘计算服务迁移策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
QU Y. Research on migration strategy of edge computing services in LEO constellation broadband network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [10] 胡锦涛. 基于边缘计算的在轨协同计算策略研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
HU J T. Research on on-orbit collaborative computing strategy based on edge computing[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [11] 岳兆娟, 秦智超, 李俊, 等. 面向天地一体化信息网络的在轨信息处理机制设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(6): 580-585.
YUE Z J, QIN Z C, LI J, et al. Design of in-orbit processing mechanism for space-earth integrated information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(6): 580-585.
- [12] 刘韬, 陈双. “黑杰克”之“赌台官”自主任务系统进展[J]. 国际太空, 2020(12): 32-37.
LIU T, CHEN S. Progress of “black jack” s’ gambling officer autonomous task system[J]. Space International, 2020(12): 32-37.
- [13] 贺小军, 李竺强, 秦小宝, 等. 吉林一号光谱卫星技术创新与应用成果[J]. 卫星应用, 2020(3): 18-26.
HE X J, LI Z Q, QIN X B, et al. Technological innovation and ap-

plication achievements of Jilin-1 spectral satellite[J]. Satellite Application, 2020(3): 18-26.

[作者简介]



高吉星 (1988-), 男, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为空间智能计算与空间网络技术。



徐志平 (1978-), 男, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院工程师, 主要研究方向为组网路由和嵌入式系统设计。



丁文慧 (1987-), 女, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。

丁熙浩 (1993-), 男, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院工程师, 主要研究方向为卫星网络仿真、路由算法。

刘智鑫 (1991-), 男, 军事科学院系统工程研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信。

虞志刚 (1989-), 男, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。

陆洲 (1972-), 男, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院研究员, 主要研究方向为卫星通信网络。