异构巨型星座开放式敏捷架构设计

陈占胜[1],朱维各[2]

(1.上海航天技术研究院,上海 201109; 2.上海卫星工程研究所,上海 201109)

摘　要: 巨型星座的异构化是市场牵引、任务驱动未来天基系统的大趋势,如何发展好、用好、管理好异构巨型星座是行业内持续探讨的热点。针对异构巨型星座在体系设计、协同组网、灵活应用和系统运行等方面的问题,瞄准"动态协同、高品质服务、无感使用、易于管控"等需求目标,本文提出"联接、感知、智算、传输、研训、管控、应用"七位一体的异构巨型星座体系构建思路,应用开放式设计理念,实现快速、灵活、自主的星座资源整合与调度,支持模块化、可伸缩的多业务、多应用的按需服务。

关键词: 异构系统; 巨型星座; 开放架构; 敏捷组网; 无感服务

中图分类号: V 412.4　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.03.010

引用格式: 陈占胜,朱维各.异构巨型星座开放式敏捷架构设计[J].上海航天(中英文),2024,41(3):95-102.

Open Agile Architecture Design for Heterogeneous Mega Constellations

CHEN Zhansheng[1], ZHU Weige[2]

(1.Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;
2.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: The heterogeneity of mega constellations is a market-driven and mission-driven trend of space-based systems in the future, and how to develop, use, and manage heterogeneous mega constellations well is a hot topic of continuous discussion in the industry. In view of the problems of heterogeneous mega constellations in system design, collaborative networking, flexible application, and system operation, in this paper, the construction concept of a seven-in-one heterogeneous mega constellation system of "interconnection, perception, intelligent calculation, express transport, research & verify, manage & control, and convenient application" is proposed, aiming at the requirements of "dynamic collaboration, high-quality service, seamless service, and easy control". The open design concept is adopted to realize fast, flexible, and independent constellation resource integration and scheduling. he system supports modularization, scalable multi-missions, and multi-application on-demand services.

Key words: heterogeneous system; mega constellation; open architecture; agile networking; seamless service

0　引言

巨型星座具有空间覆盖范围广、遥感观测时效性强、信息保障服务无盲等优点,可在全球通信、应急救灾、环境监测、交通管理和国土资源规划等方面发挥重大作用[1]。以星链、OneWeb等为代表的通信星座、以Planet Labs鸽群光学成像星座、以Capella合成孔径成像和鹰眼360无线电监测等为代表的遥感星座在系统研究、部署和应用开发等方面走在前列。

在中国,商业市场驱动的巨型星座发展如火如荼。但同时需要看到的是,巨型星座的发展不是比拼发展了多少个系统、部署了多少颗卫星、单星造价高低,而是要全面考虑现实需求和实际约束的系统优化设计,以及综合化效能发挥。在当前国内商业航天快速发展的形势下,巨型星座的异构化是大趋势,如何发展好、用好、管理好异构巨型星座,一

收稿日期: 2024-04-09; **修回日期:** 2024-04-29

基金项目: 民用航天技术预先研究项目(D030101)

作者简介: 陈占胜(1970—),男,研究员,主要研究方向为空间飞行器总体技术。

直是行业内持续探讨的热点。

1 巨型星座及其异构特征

面向不同场景、不同任务目标的需求,国外提出并发展以星链[2]、OneWeb、“鸽群”、“鹈鹕”等为代表的星座;国内千帆通信星座、长光光学遥感星座和天目气象遥感星座等处于发展之中,但是类似前述的国内外网通信、遥感等星座由不同的单位推动建设,功能相对独立,满足用户的部分需求。

功能独立、专一的星座往往具有如下特点:

1) 专一功能星座,信息维度不丰富:一是专注于通信、物联网、光学成像、SAR成像和无线电监测等功能;二是单系统信息维度不全面,数据丰富程度、全天时可用性存在差距。

2) 跨系统协同能力比较弱:一是不同类型星座独立发展,专用性强;二是各自“烟囱式”发展,探测能力、探测模式、数据共享、联合管控等短期内难以实现。

3) 平台定制性较强,扩展能力受约束:一是针对异构载荷定制设计,接口差异较大,模块互换、便捷互联存在能力差距;二是异构载荷工作模式、能力等差异较大,应用集成较难。

从全局视角看空间段发展,异构巨型星座是必然的发展趋势,这些卫星可能包括通信卫星、遥感卫星、导航卫星、科学实验卫星等,它们各自具备不同的载荷和功能,共同工作以提供多样化的服务和数据。

面向未来泛在、综合化、个性化等业务需求,卫星之间协同工作需求强烈,例如,遥感卫星收集到的数据可以通过通信卫星迅速传回地面,或者导航服务可以用于增强遥感卫星的任务执行能力。分布协同的异构巨型星座系统已然成为天基系统的重要发展方向。

2 开放式天基系统设计理念

开放式体系架构是基于标准成熟的共性技术和规范,是实现构件的模块化、协议标准的开放化、规模可扩展化的系统架构,可实现软件与硬件解耦、开发与集成解耦,通过局部升级、改造和新技术快速嵌入,提升整个系统的运行效能,减少系统运行环境、设备维护等方面的制约[3]。

开放式架构在航天领域是一种重要的设计理念,通过定义一套标准化的接口和协议,使不同的系统能够更容易地集成和互操作。开放式体系架构的核心要素是开放式的“模块”和“接口”,核心目标是“即插即用”[4],设计核心要点在于以下几个方面:1) 开放式架构基于松散耦合和高内聚性的模块化设计,卫星系统各功能组件支持独立获取,可以极大简化系统的集成和测试过程,降低了开发成本。同时,有利于最大限度地利用已验证的硬件和软件系统,缩短开发周期的同时保障系统的鲁棒性。2) 开放式架构通过实践验证的技术引入和产品升级技术,支持在轨重构和局部无感升级,将极大延长航天器系统的生命周期和提高在轨服务能力。3) 开放式架构采用标准化、兼容性强的规范和接口等,具有较高的技术透明性,可利用标准的测试设备或模拟系统实现互联、互通能力验证,既降低了异构系统之间对接的难度,同时极大降低开发过程中的风险。4) 开放式架构设计软硬件的通用模式,硬件功能模块按需增减,软件功能可移植和可剪裁,实现异构卫星之间的互操作性,推动利用整个天基系统适应不同的任务需求和业务环境变化[5]。

总体上看,开放式设计将支持天基系统在研制、构建和应用等多环节的能力优势:1) 开放式技术创新,促进天基系统迭代升级:开放式架构鼓励各环节创新,允许差异化和多样性,规则约束下支持新技术模块快速集成到现有系统中,无须对整个系统进行大规模的重新设计,加速天基系统的更新换代。2) 标准化模块化设计,极大提高系统灵活性:系统能够更容易地适应不断变化的需求和任务,通过替换或升级特定的组件,系统可以更加灵活地应对新的挑战。3) 多层次多供应商入局,助力降低成本:开放式设计打破技术垄断,使得更多的供应商能够参与到航天系统的开发和建设中来,引入竞争机制,减少对单一供应商的依赖,进而降低采购和维护成本。4) 复用和重构技术赋能,缩短研发周期:开放式架构支持即插即用的模块化设计,促进了软硬件资源的共享和重复利用,新的功能和服务可以更快地被开发和部署,从而缩短研发周期。5) 促进不同机构之间的异构协作:提供了通用的技术标准和参考框架,便于不同单位的异构设备、卫星的高效协同,甚至支持不同国家和组织之

间的数据共享与合作，提升互联互通能力，为互操作性奠定基础，助力提高天基系统的整体效能。

3　异构巨型星座开放式敏捷架构设计

3.1　需求分析

面向异构巨型星座“动态协同、高品质服务、无感使用、易于管控”等需求目标，需要重点解决3个方面技术难题：1）异构巨型星座多任务高效协同：面向立体化分布的异构星座，亟须利用任务在轨智能规划、网络自主构建和维持、分布式节点动态互联等手段，提供多资源综合利用、多手段协同配合、多维度信息获取、多样化需求满足的能力，实现全球覆盖、高频重访、快速响应、无感用天的应用需求[6]。2）多源异构信息实时融合与智能处理：不同卫星传感器获取不同类型的数据（如光学、雷达、红外等），数据存在较大的时空特性差异、辐射校正需求、数据冗余差异等。面向各用户对数据的丰富性、可信度和时效性等方面的需求，要求天基系统具备在轨数据处理、多源数据融合和在轨目标检测和提取能力[7]。3）异构巨型星座实时运控和调度：卫星星座多、卫星数量增多，不同公司利用不同的测控和运管模式。面向天基系统的综合服务能力提升，要求监控实时状态、地面任务筹划、异构卫星调度和授权下的管控等能力，对地面系统的能力建设、星地协同的“孪生式”管控应用等提出迫切需求[8]。

3.2　开放式敏捷架构构建思路

面向通信、导航和遥感等多类型业务和用户任务痛点需求，提出“联接、感知、智算、传输、研训、管控、应用”七位一体的异构巨型星座体系构建思路，全方位应用开放式技术理念，依托网状网多链路配置、软件定义、人工智能和数字孪生等技术赋能，实现快速、灵活、自主地星座资源整合与调度，形成模块化、可伸缩、可扩展的多业务、多应用的按需服务系统。异构巨型星座开放式架构的顶层思路如图1所示。

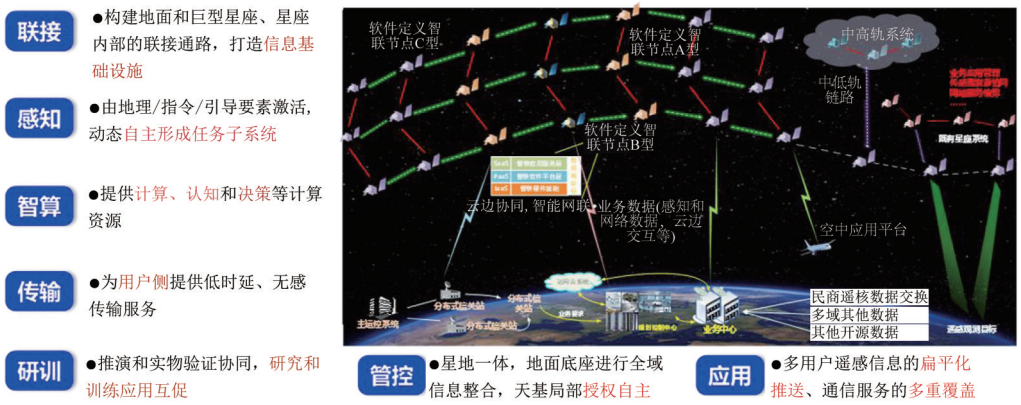

图1　七位一体异构巨型星座体系架构设计

Fig. 1　Architecture design of the seven-in-one heterogeneous mega constellation system

本架构思路涵盖了异构星座星间协同调度、星地协同管控、星端高效服务等多个方面[9]，“七位一体”的核心内涵如下。

1）联接：面向打造空间网络“新基建”，构建地面和巨型星座、星座内部和异构星座之间的高速、网状网联接通路，星间以激光终端为主，最高速率不低于5 Gbit/s。一方面，对于拓扑规则网络区，宽带长时互联，构建巨型星座星间互联互通、星地稳定的交互通路，形成空间基础设施；另一方面，面对卫星数量多、用户数量大、用户分布和运动特征差异大等难点，在高动态时变区域，利用星载自主规划能力，提供星载智能化链路管控，构建动态智联、按需交互的通路[10]。

2）感知：支持由地理网格区域、地面上注指令、星上引导要素等多模式的业务激活，强调动态自主形成协同星簇，在实施层面可以分成3个方面。① 态势感知：支持多类型载荷数据在轨智能处理、融合、理解和预测；② 任务感知：面向多个卫星智能体的自适应任务规划与自组织协同执行，以时间、链路、计算资源和任务策略等约束，实现资源向任务需求聚优流动，完成目标区域连续观测；③ 安全感知：瞄准长时间运行服务，要求系统具备在轨健康监测和故障预判、碰撞风险识别和响应等能力，支持长期自主运行。

3) 智算:巨型星座计算资源类型丰富、算力强大,配置CPU、FPGA、DSP和通用GPU、专用AI芯片等多种芯片形式,提供计算、认知,甚至在轨决策等计算资源。一方面,面向算力分布在各节点、空闲/占用状态时变、处理特点各异等情况,利用容器化资源管理和资源编排工具,实现异构高算力资源灵活选用,提供最优化的在轨高算力智能处理和分布式协同计算,支持多维特征融合。另一方面,支持模型驱动的在轨大数据关联推理分析,提供基于先验知识的未来行为趋势预测[11-12]。

4) 传输:侧重为车载端、固定终端等用户侧提供低时延、无感传输服务。实现层面:① 制订兼容性网络协议方案,提供异构网络的自适应组网,体系节点和功能按需扩容[13];② 打造无中心的低时延数据交互方式,以开放、开源的数据分发服务协议(DDS协议),提供主题消息的按需推送,将全部用户依据优先级开展分类、分权限随遇入网,在线发布或订阅消息,实现用户终端"无感用天"[14]。

在工作流程上,如图2所示:① 异构卫星、空海地遥感平台、用户终端等根据程控规则、自主任务规划等管控,形成面向任务的跨域自治系统,并动态维护。② 利用发布订阅的无中心交互机制,通过消息主题、服务质量(Quality of Service,QoS)规则等按需配置,实现从任务生成、发布、执行、处理和分发等全流程[15]。

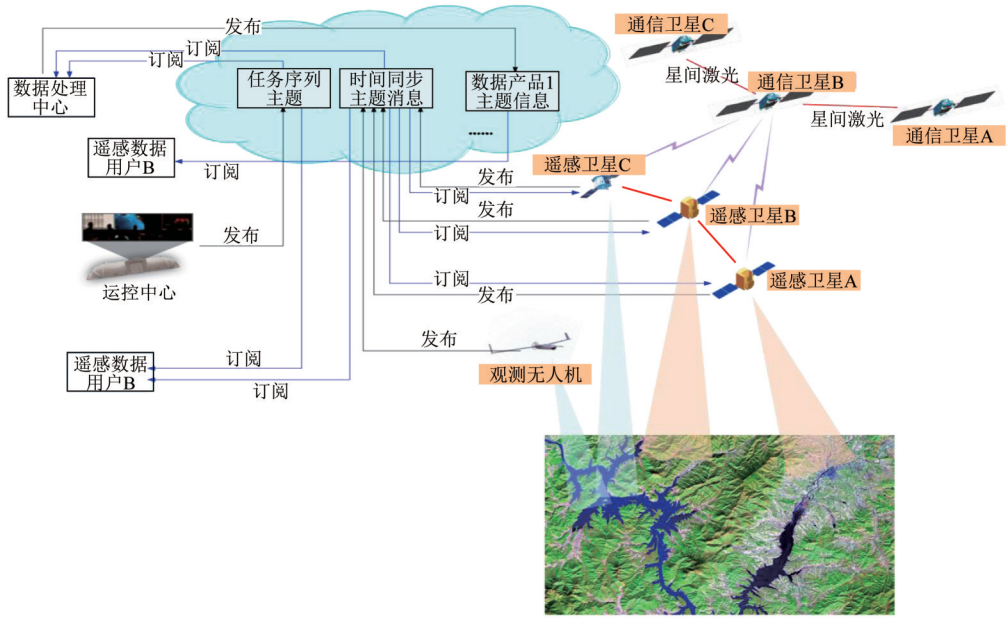

图2 多域数据的无物理中心传输

Fig. 2 No-physical-center transmission of multi-domain data

5) 研训:瞄准能力快速迭代和技术高效验证,用两种手段实现推演和实物验证协同、研究和业务应用互促[16]。① 仿真推演和实物验证相结合:结合业务场景需求,利用全数字软件仿真推演系统开展巨型星座能力分析和应用模式探索,同时构建半实物仿真系统实现真实场景下、多使用约束下的服务性能摸底[17];② 技术研究和实用业务服务相结合:构建开放式的在轨试验星簇,作为基础试验平台,设置安全隔离策略的基础上,及时将研究成果部署测试,推动示范能力的展示。

6) 管控:巨型星座的管理需要自主能力,但是地面管控依然是必不可少的关键环节。充分借鉴云边协同的设计理念,进行星地一体化设计,利用地面高性能能力底座进行全域信息整合,同时基于特定规则支持天基局部的自主授权[18]。在实现层面:① 利用人工智能赋能星地协同综合管控,依托地面底座提供全局管理和调度,在规则约束下实现天基自主控制的局部任务,充分发挥人机协同的优势,把复杂运算交给AI,把智力决策留给人工;② 开发或征集的多样化应用在地面完成训练,在轨快速部署,以小数据量的增量更新实现算法或者应用的批量上注,并控制有序更替。

以星地协同的组网调度和数据传输任务为例,采用"天基转发平面通用化、地面控制平面集中化和控制转发分离"的模式设计,实现网联、管控和数据应用的分离。在任务分工上,基于地面中心控制

器灵活网络编排，支持网络资源按需调用[19]。各平面的功能如下。① 天基转发平面：用户星根据任务组建的空间子网，以传输为主；② 地面控制平面：地面、分布式控制系统；③ 应用平面：面向用户的网络管理、数据处理等[20]。星地协同的网络管控工作模式如图 3 所示。

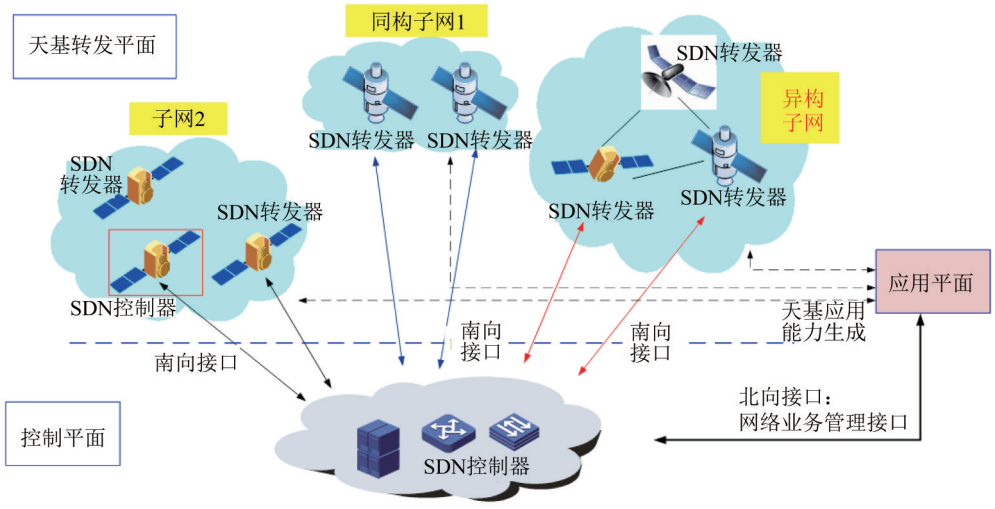

图 3　星地协同的网络管控工作模式

Fig. 3　Network management and control mode of satellite-ground collaboration

7）应用：可提供通信、导航和遥感综合化服务，支持多用户遥感信息的扁平化推送、通信资源的按需分配[21]。① 遥感应用中，天基系统根据用户端的请求提供探测感兴趣目标，经过在轨融合计算，直接提供可用数据产品；② 通导应用中，利用空天地联合组网，实现无缝的网络覆盖，支持将 5 G/6 G 移动通信网络的部分边缘能力、接入网等迁移到星座，提供低延迟服务[22]。其网络服务如图 4 所示。

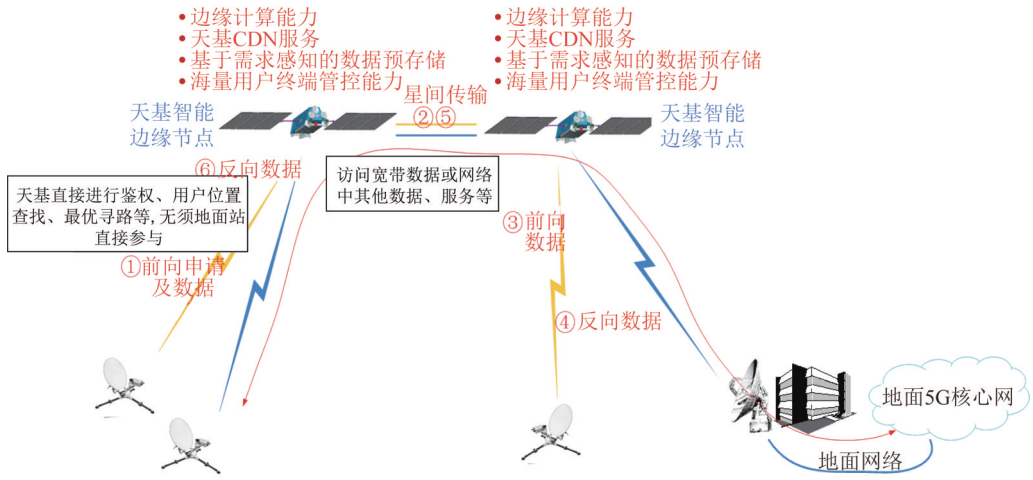

图 4　基于开放式架构的网络服务

Fig. 4　Network services based on the open architecture

4　开放式柔性化智联卫星新形态

4.1　开放式架构实现模式

异构巨型星座由不同类型、不同功能和不同轨道的卫星构成，面向系统级互联、单机互换、模块级即插即用等需求，可以从如下 3 个方面着手推动。

4.1.1　可扩展可升级的硬件设计框架

1）采用符合 SpaceVPX 等硬件设计框架，在背板协议互通兼容的基础上，支持配置不同数量的板卡，如高性能处理类、导航试验、大容量存储、网络

管控等。同时支持即插即用的协议,实现板卡的快速扩容[23]。

2) 采用可在轨重构的总体设计思路,在芯片选择、硬件板卡设计和软件策略设置等方面采用重构设计思路,通过对重构单元硬件进行相应的设计,保证具备重构数据通道、重构数据存储、重构数据管理以及重构数据加载等功能。

4.1.2 统一的软件接口框架和开发规范

1) 采用统一软件架构,支持多功能模块的并行快速开发。同时,利用软件定义设计思路,主要功能软件均支持在轨升级、增量更新和功能重定义。另一方面,为实现产、学、研多来源的优秀软件和算法成果集成应用,通过发布开放式软件开发包(Software Development Kit, SDK)规范,实现软件算法的快速集成。

2) 以软件升级为主的功能快速迭代,基于"星上操作系统+APP应用包"理念,利用软件版本升级、在轨上注方式升级卫星功能和多星协同效能。

4.1.3 构建兼容能力强的融合性网络互联协议和数据综合应用协议

1) 在协议设计和应用方面,面向跨系统兼容,通过制定和发布分层分级的信息接入协议群,建立外部异构系统相融合的开放式软件协议框架。

2) 在链路设计方面,每个星座提供灵活指向的链路配置,构建基于星间链路、业务服务链路和星地数据通路等互联互通的能力系统,以开放式兼容性网络架构提供敏捷的协同服务和传输能力。

3) 在内外部网络接口设计方面,推动制定统一互联接口,实现异构卫星的按需接入。

4) 面向异构巨型星座数据的综合应用,制定数据处理和应用规范,推动多单位共建的多维度遥感数据库,试行"区块链式"按贡献收费的数据交易和保护新模式。

4.2 开放式卫星架构应用实践

从星座、系统、单机软硬件等多个层级进行开放式、软件化设计,支持服务区域和业务能力的动态调整、指标性能的迭代升级和卫星本体软件的更新加固等。

4.2.1 模块化易扩展开放式软硬件系统设计

采用统一的硬件设备架构,按"规范化、标准化、通用化"进行单机功能模块化设计,模块分级自治,简化模块间连接关系,硬件产品层次由"分系统—单机—模块"三级压缩至"分系统—模块"两级。产品形态可由具体卫星需求确定为一台单机或多台单机。模块化标准化卫星信息系统思路如图5所示。

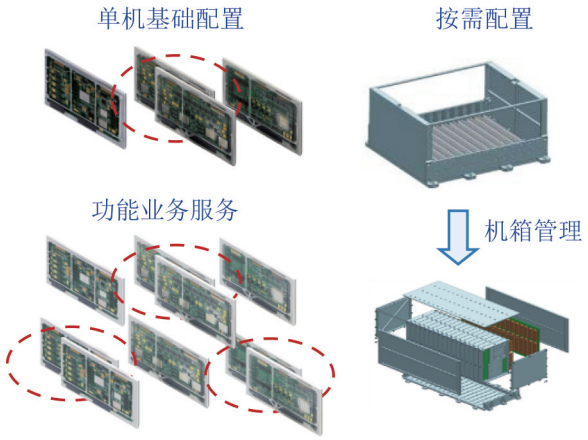

图 5 模块化标准化卫星信息系统思路

Fig. 5 Concept of the modular and standardized satellite information system

采用管理、控制、数据平面网络设计覆盖千比特每秒~百吉比特每秒带宽区间,星内高可靠、高带宽模块级互连,实现计算、存储、接口资源扁平化,通过功能迁移和数据重定向实现网内同类功能节点高效能利用,提高系统资源使用效率和可靠性[24]。开放式卫星的"三平面"管理架构如图6所示。

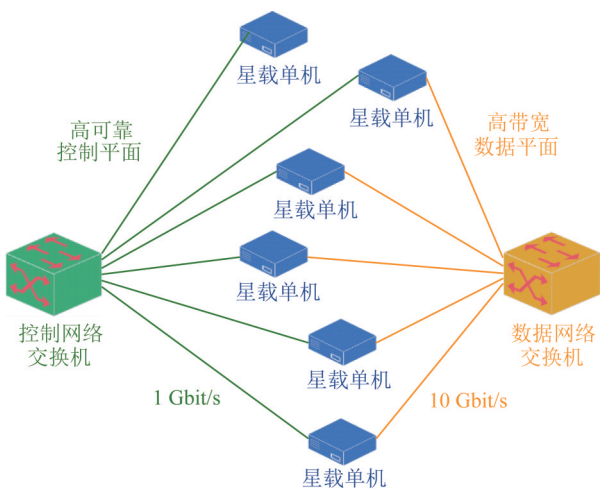

图 6 开放式卫星的"三平面"管理架构

Fig. 6 "Three-plane" management architecture for open satellites

在利用基于SpaceVPX标准的处理、存储、通信、测量、驱动、交换、电源等硬件模块灵活配置基

础上，基于高实时性网络化操作系统和软件应用构件柔性赋能[25]，可加载目标检测与识别、多源图像融合、网络调度等应用程序，具备动态迭代能力。开放式卫星的操作系统如图 7 所示。

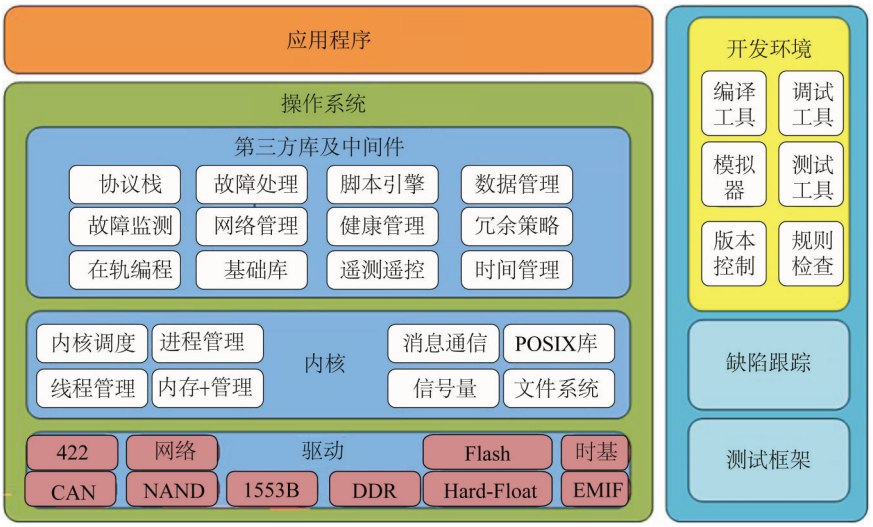

图 7　开放式卫星的操作系统实践

Fig. 7　Practice of the operating system for open satellites

4.2.2　面向开放式卫星的标准化软件生态模式

1）基于容器化手段实现星载轻量化智能处理算法封装，包括但不限于数据压缩、气象/环境/灾害监测评估、目标信息提取等，提供在轨出图出信息能力，改善卫星数据服务时效。2）设计应用接口规范、发布开放式工具链，形成天基智联应用开发生态。3）利用资源和服务调度工具、应用调度模型实现分布式能力协同[26]。星地协同的 AI 软件构建和部署如图 8 所示。

图 8　星地协同的 AI 软件构建和部署

Fig. 8　Construction and deployment of the AI software for satellite-ground collaboration

5　面临的问题与建议

本文研究了开放式天基系统的技术理念，提出了“七位一体”巨型星座系统架构设计思路。开放式架构在航天领域的应用虽然具备许多优势，但也面临着一些具体的挑战。一是系统兼容性和互操作性：确保不同供应商提供的模块能够无缝地集成和互操作是一个关键挑战，要求严格遵守开放式架构的标准和规范，同时也需要定期更新这些标准以适应技术的进步。二是安全性和健壮性：开放架构依赖于标准的接口和协议，这也意味着可能增加系统被攻击的可能性。需要从技术策略、规范和法规等方面联合部署，防止潜在的安全威胁。三是知识产权：多个供应商可能需要共享技术细节、共享数据等，可能引起知识产权问题。如何平衡开放性与

保护知识产权依然需要关注。四是性能和可靠性:天基系统资源宝贵,在关键任务和应用中需要确保系统的性能和可靠性。五是标准和协议制定:开放式架构能否真正推广,很大程度上取决于标准和协议的制定。需要权威部门牵头,并由行业内的多个利益相关方共同开发和认可,往往需要较为长线的迭代过程。

异构巨型星座开放式敏捷架构是未来天基系统的总体发展趋势,但依然需要产业链中用户单位、卫星研制单位、产品配套单位、应用开发机构、服务保障等单位的共同努力和探索。

参考文献

[1] 崔瑞飞,赵治,陈治科,等.低轨巨型星座正在深刻影响世界航天[J].国际太空,2022(11):42-46.

[2] 郭语,朱立东."星链"低轨巨型星座的发展与应用[C]//中国通信学会.第十九届卫星通信学术年会论文集.北京:中国通信学会卫星通信委员会,2023:1-7.

[3] 刘青春,周庆,李兵飞,等.开放式航空电子系统架构标准研究与实践[J].航空标准化与质量,2022(4):1-5.

[4] 王兴龙,董云峰.即插即用模块化卫星体系结构研究[J].航天器工程,2012,21(5):124-129.

[5] 石剑琛.开放体系架构在海军信息系统应用模式研究[J].舰船电子工程,2016,36(9):5-8,26.

[6] 贺波勇,曹静,周庆瑞,等.对地协同观测混合星座多目标优化设计[J].西北工业大学学报,2021,39(1):224-232.

[7] 李刚,刘瑜,张庆君.多源卫星数据在轨智能融合技术[J].中国科学基金,2021,35(5):708-712.

[8] 柴英特,王港,张超,等.巨型感知星座星地一体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.

[9] 王密,仵倩玉,肖晶,等.低轨巨型星座遥感信息"云-边-端"智能服务关键技术[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(8):1256-1263.

[10] 孙智立,李天儒.大规模低轨星座卫星通信网发展展望[J].中兴通讯技术,2021,27(5):48-51.

[11] 白保存,张越,陆洲,等.一种开放式架构的天基网络化计算平台体系设计[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(9):900-904.

[12] 方海,赵扬,王显煜,等.6G时代卫星算力网络发展思考[J].空间电子技术,2023,20(2):8-14.

[13] 张佳鑫,常朝阳,张易隆,等.巨型星座路由技术综述[J].天地一体化信息网络,2024,5(1):2-13.

[14] 杨鑫辉,张慧翔.基于DDS的异构网络数据分发方法研究[J].计算机技术与发展,2014,24(11):57-60,64.

[15] 李大超,孙帷胜,张志涛.DDS发布订阅通信节点自动发现机制与改进[J].航空电子技术,2023,54(1):20-28.

[16] 章恩韬,司一童,张威,等.低轨巨型星座发展及其测控方法探析[J].无线电通信技术,2022,48(5):857-864.

[17] 曹雪蕊,张学艺,彭开香,等.基于数字孪生的小卫星健康预测技术[J].南京航空航天大学学报,2022,54(增刊1):35-42.

[18] 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.

[19] 龙欣健.异构计算中资源调度与优化的关键问题研究[D].北京:北京邮电大学,2023.

[20] 田瀚.面向小卫星群的灵活组网与资源编排技术[D].西安:西安电子科技大学,2021.

[21] 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.

[22] 宋雅琴,徐晖,刘险峰,等.面向6G星地融合的云边协同网络架构和关键技术[J].天地一体化信息网络,2023,4(3):3-11.

[23] 康旭辉,连剑,赵雪纲.基于SpaceVPX架构的星上高速载荷数据实时处理平台设计[J].航天器工程,2018,27(4):98-103.

[24] 陈金涛,梁俊,郭子桢,等.软件定义卫星网络多控制器部署策略[J].西安电子科技大学学报,2022,49(3):59-67.

[25] 翼辉.信息发布面向万物互联的智能边缘计算操作系统EdgerOS[J].自动化博览,2022,39(2):8.

[26] 刘宏娟,黄炜,李文吉,等.基于Kubernetes的卫星遥感数据容器云平台[J].计算机测量与控制,2022,30(1):209-214,220.