

“鹊桥”通导遥综合星座信息系统架构设计

陈朝基^{1, 2}, 程渤³, 张同光³, 何熊文², 阎耀保¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

3. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

摘要: 针对“鹊桥”星座系统超大时空尺度、极端空间环境和星载资源严重受限的特点, 以及异构功能融合与资源协同调度、链路断续连接下的智能自主运行和卫星之间互联互通与弹性组网等挑战, 从总体架构、硬件架构、软件架构和协议架构 4 个层面提出了一种基于多集群协同认知的星座信息系统架构, 以“感知-决策-执行”闭环为核心, 将实现星座系统的自适应拓扑管理、多源数据融合和自主运行, 有效提升地月空间信息交互与智能协同能力, 为未来“鹊桥”通导遥综合星座信息系统的设计提供参考。

关键词: 地月空间; “鹊桥”通导遥综合星座; 信息系统; 资源虚拟化; 多集群协同认知

中图分类号: V443

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)04-0422-13

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250083

引用格式: 陈朝基, 程渤, 张同光, 等. “鹊桥”通导遥综合星座信息系统架构设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(4): 422-434.

Reference format: CHEN C J, CHENG B, ZHANG T G, et al. Discussion on architecture design of Queqiao communication-navigation-sensing constellation information system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(4): 422-434.

引言

地月空间是指位于地球同步轨道以外, 但仍受地球和/或月球引力影响的宇宙空间, 通常包含近地空间、地月转移空间和月球空间^[1-2]。地月空间作为人类航天探索的关键区域, 近年来备受各国关注。随着各国月球探测计划的推进, 构建地月空间通信导航系统成为当务之急。美国、欧洲和日本相继提出了名为“月球网”(LunaNet)、“月光计划”(Moonlight)和“月球导航通信系统”^[3]的地月空间通信导航系统建设计划并积极实施, 俄罗斯^[4]和印度^[5]也都提出了自己的月球探测计划。面向支持未来深空探测任务需求, 中国提出了“鹊桥”通导遥综合星座系统的发展规划。

当前美国、欧洲、日本等的通信导航星座系统大多处于规划或初步实施阶段, 面临着技术验证和多国合作协调难等问题。经过多年发展, 中国在通信、导航和遥感卫星领域取得了显著成就, 但主要集中在单一功能或有限功能的集成上, 信息共享程度低, 难以满足未来复杂的深空探测任务对综合信息服务的迫切

需求。“鹊桥”通导遥综合星座系统存在超大时空尺度、极端空间环境、星载资源严重受限等特点, 以及异构功能融合与资源协同调度、链路断续连接下的智能自主运行和卫星之间互联互通与弹性组网等挑战。针对这些问题, 本文提出一种基于多集群协同认知的星座信息系统架构, 以“感知-决策-执行”闭环为核心, 借助资源虚拟化、多集群协同认知及地月一体化网络等技术, 可为地月空间各类卫星提供高效、智能、可靠的通信、导航和遥感服务。

本文首先对国内外地月空间通信导航系统及通导遥星座信息系统的发展现状进行调研, 总结了国内外研究进展和发展趋势; 接着阐述了“鹊桥”通导遥综合星座系统的组成和特点, 分析了其信息系统面临的挑战。在此基础上, 提出了“鹊桥”通导遥星座信息系统的总体架构、硬件架构、软件架构和协议架构, 为“鹊桥”通导遥综合星座信息系统的设计提供参考。

1 深空通信导航

1.1 地月空间通信导航系统

随着“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划的实施,

2020年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出一个可扩展的月球通信和导航架构——LunaNet的设想^[6],为月球探测提供网络通信、定位导航和科学应用等服务。2022年9月,NASA发布了月球到火星目标^[7],提出构建月球基础设施的发展规划。同年11月,美国发布了《国家地月空间科技战略》,包含了提高地月空间通信及导航能力等关键目标,旨在提升其地月空间科学、探索和经济等方面的竞争优势。在实施层面,2022年6月NASA发射了Artemis计划的“探路先锋”——CAPstone立方体卫星^[8],对月球近直线晕轨道的稳定性及地月空间的自主定位导航等技术进行验证。

为创建“月球通信与导航服务”(Lunar Communications and Navigation Services, LCNS)和相关基础设施,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)提出Moonlight计划倡议,LCNS网络系统示意图如图1所示^[9]。2024年10月,ESA正式启动该计划,旨在建立一个由1颗通信卫星、4颗导航定位卫星和3个地面站组成的绕月星座^[10],为未来的月球探测任务提供可持续的月球通信和导航服务。计划将分阶段实施,第一阶段将于2026年投入使用通信中继卫星“月球探路者”(Lunar Pathfinder),后续逐步引入其它服务,整个系统将于2030年全面投入使用。

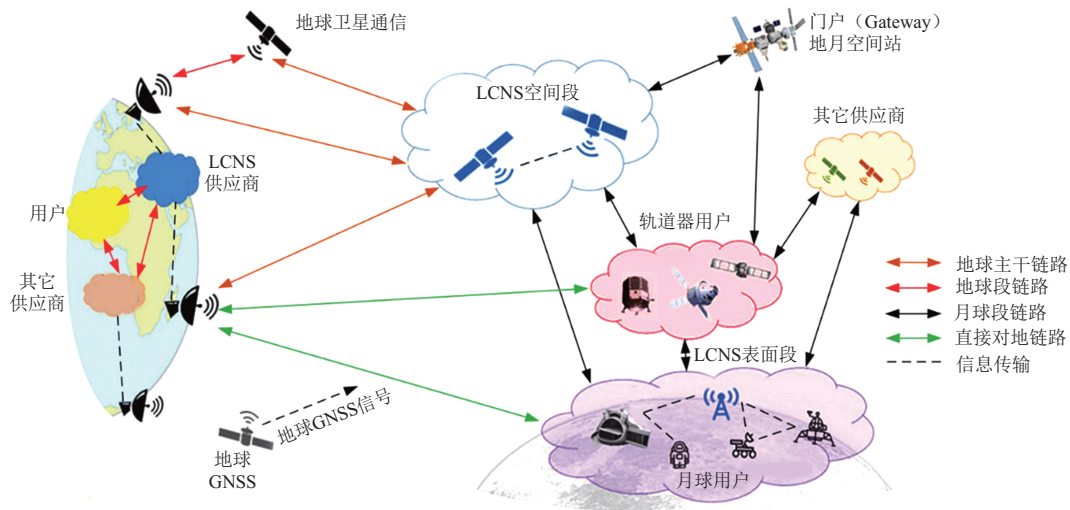


图1 ESA LCNS网络系统示意图^[9]

Fig.1 Schematic diagram of ESA's LCNS network system^[9]

2022年日本宇航局(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)提出通过至少8颗环月大椭圆冻结轨道卫星建立月球导航通信系统(Lunar Navigation Satellite System, LNSS)^[11],为月球南极探测器提供中继通信和定位服务。预计系统将在2028年进行在轨演示验证,2030年之后具备初步运行能力。

此外,ESA正在与NASA、JAXA合作建立月球通信和导航标准框架。Moonlight将遵守Lunaret标准并计划于2029年开展首次月球导航互操作性测试。

通过探月工程^[12]的实施中国已初步构建了地月通信导航系统。其中,“鹊桥一号”卫星首次在绕地月L2平动点实现了月球中继通信^[13]功能;“鹊桥二号”卫星为“嫦娥六号”月球背面采样返回任务提供了可靠的月球中继通信服务,同期发射的“天都一号”和“天都二号”试验卫星作为“鹊桥”通导遥综合星座系统的先导星^[14],验证了环月轨道高精

度定轨等关键技术。中国已成功构建由3颗卫星组成的地月空间三星星座^[15],将为深入探索地月空间远距离逆行轨道(Distant Retrograde Orbit, DRO)的规律特性、试验验证相关技术、开发利用地月空间提供科技支撑。

目前中国已启动“鹊桥”通导遥综合星座系统的论证^[16],预计2030年前后建成先导型星座,可服务于载人登月、探月工程四期和月球科研站等任务;2040年前后将实现区域导航,服务载人月球探测、国际月球探测以及火星、金星探测等;2050年前后可实现火星、金星以及更远深空的通信导航覆盖。与国外地月空间通信导航星座系统未明确具备遥感功能不同,“鹊桥”星座系统作为未来的深空通导遥基础设施,同时具备通信、导航和遥感功能。

1.2 通导遥星座信息系统

自21世纪起,美国相继推进星链、“黑杰克”

(Blackjack)及国防太空架构等系列项目,推动低轨星座系统从单一功能向多星协同的方向演进,构建低成本、高弹性的空间信息网络体系。

美国SpaceX公司于2015年提出由约4.2万颗卫星组成“星链”(Starlink)计划。目前已发射超过1万颗卫星,通过在近地轨道部署小卫星,构建覆盖全球的卫星通信网络,具有覆盖广、速率高、时延低、弹性抗毁等优势^[17-18]。卫星的信息系统主要实现灵活组网、星间路由、自主避碰等应用需求,预计单星上下行速率可达30 Mbit/s、200 Mbit/s,传输时延20 ms。2022年12月,SpaceX公司在“星链”基础上启动了“星盾”(StarShield)计划,通过对卫星载荷

的灵活配置,预计未来将在通信、导航和遥感等方面具备系统性的天基信息支援能力。

2018年,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)发起的“黑杰克”计划提出构建一个具备全球覆盖能力的低轨卫星星座,执行通信传输、对地监视等任务。如图2所示,该星座卫星的核心是作为星上控制单元的Pit Boss^[19],能快速自主完成目标识别、在轨数据处理、数据加密等任务,通过与其它卫星节点的自主合作,可实现任务级的长期星座自主运行。整星可软件定义,其信息系统提供一个开放和弹性的集成架构,可灵活快速地将通信、导航和遥感等多种载荷集成到卫星。

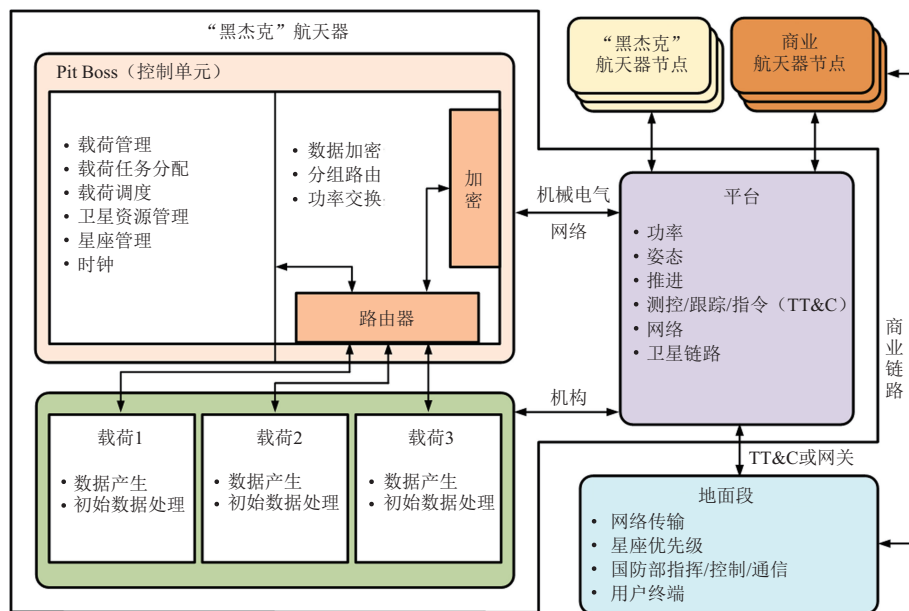


图2 “黑杰克”星座架构

Fig.2 Architecture of Blackjack constellation

2019年,美国太空发展局(Space Development Agency, SDA)提出构建由传输层、跟踪层、监控层、威慑层、导航层、管理层和支持层组成的“下一代太空体系架构”(National Defense Space Architecture, NDSA)^[20]。2023年该架构更名为“面向作战人员的可扩展太空体系”(Proliferated Warfighter Space Architecture, PWSA)^[21],通过快速开发和部署由小卫星组成的高度弹性化低轨卫星星座,为作战人员提供通信、侦察、预警、导航等天基作战管理能力,实现信息和情报的战术级分发和军商混合组网。利用分布式计算、人工智能和操作系统等信息系统先进技术构建具备全域感知、云端智能控制能力的天基网云体系,集成了通信、导航和遥感功能。

在通信领域,作为中国首颗全球高通量宽带卫星

的亚太6D卫星构建了以中心计算机为核心的分布式综合电子系统^[22],采用约20项在轨软件定义功能,实现了自主跟踪太阳、自主温控等功能,提升了卫星的在轨自主运行能力。“实践二十号”卫星采用模块化、全自主、智能化设计理念^[23]开展信息系统设计,大量采用自主星务管理、自主故障处置等自主管理功能。此外,“国网”和“千帆”星座组网卫星的成功发射,标志着中国卫星互联网计划进入了部署阶段。

在导航领域,2020年已建成“北斗三号”卫星导航系统,具备导航定位、全球短报文通信、国际救援等全球服务能力。“北斗三号”卫星构建了以中心管理单元为核心的分级分布式电子系统架构^[24],完成星座内信息的统一调度和综合处理,为用户提供稳定

可靠的服务。通过电子设备的高集成和轻小型化设计,与传统方法相比减重30%以上。“北斗三号”导航卫星兼具导航定位与短报文通信功能,通信导航融合度较高,在一定程度上有利于通导遥融合应用。

在遥感领域,中国低轨遥感星座建设发展迅速,“吉林一号”^[25]、“东方慧眼”^[26]等一批星座陆续组网建设。“吉林一号”是中国最大的商业遥感卫星星座,截至2025年5月已在轨部署135颗卫星,具备全球任意地点10 min内重访能力。“东方慧眼”星座预计到2030年将构建由252颗卫星^[27]组成的通导遥一体化天基信息实时服务系统,可实现全球任意位置5 min间隔的亚米级观测能力,其科学试验卫星——“珞珈三号”01星支持在轨灵活安装智能处理APP,具备多模、智能、互联和开放的特点,可实现在轨高精度定位与信息智能处理。

通过上述对国内外地月空间通信导航系统及通导遥星座信息系统发展的现状调研,可以看出:

1) 星座信息系统架构需支持国际合作需求,朝着开放化和标准化方向发展。美国的Artemis计划已与50多个国家开展合作,NASA、ESA和JAXA将合作建立月球通信和导航标准的框架并计划开展月球导航互操作性测试。要实现通导遥系统之间的互联互通和互操作,这对星座信息系统架构的开放性、标准性提出了更高的要求。除积极参与国际合作外,中国正在论证的“鹊桥”通导遥综合星座信息系统也应加强顶层规划,以支持未来的国际合作和商业合作需求。

2) 星座信息系统向多功能、弹性和智能化方向发展。星链、Blackjack及“国防太空架构”等项目均要求卫星信息系统具备高弹性、灵活组网和软件定义等特征,在通信、导航和遥感等方面具备系统性的天基信息支援能力。未来卫星信息系统将更注重多功能集成、弹性化部署和在轨智能化自主运行,以满足多样化的任务需求,人工智能、软件定义、分布式计算等先进技术将会极大促进卫星信息系统的性能提升。

3) 通导遥一体化已成为发展趋势。通导遥一体化服务指在卫星上集齐通信、导航和遥感三大功能,支持用户实现实时通信、高精度导航定位、全域感知等服务。如美国StarShield和Blackjack计划等星座均支持对多种载荷的灵活配置,通过一星多用实现系统整体效能的提升。美国扩散型作战人员太空架构(Proliferated Warfighter Space Architecture, PWSA)系统与中国“东方慧眼”星座在通导遥一体化实现模式方式相同^[28],即单星只具备通信、导航和遥感中的一种功能,由通信星座实现导航卫星和遥感星座的互联。

4) 构建多星协同的群体智能信息系统是未来通信、导航和遥感领域卫星发展的必然要求。在通信、导航和遥感领域,通过多星协同的形式,由多颗卫星搭载不同功能的载荷,按照物理分散、信息聚合、智能协同的原则构建星座系统,可为卫星带来更大的测量范围^[29]、更广的覆盖能力和更高的定位精度。星座内的卫星之间通过信息共享和任务协同,以群体智能的形式实现星座的灵活组网、协同感知和对动态任务的快速响应。

2 “鹊桥”通导遥综合星座系统

2.1 系统组成

“鹊桥”通导遥综合星座系统作为地月空间乃至行星际空间长期运行的深空通导遥基础设施,其主要功能是为人类深空探测、资源开发利用等活动提供高速网络通信、精确定位导航和高效空间感知服务。星座系统按所属空间可分为地球域、月球域、火星域和行星空间域等(系统组成示意如图3所示),地球域、月球域和火星域通过激光/微波链路与行星空间域互联。系统按照功能可分为骨干节点、接入节点、星球表面节点和地面运营系统,其中骨干节点包括地球域的地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)行星际中转站、行星空间域的骨干节点星(如图3中的节点1~节点3所示)和位于地面的激光站,各骨干节点之间通过激光/微波链路通信;接入节点包括月球/火星轨道接入节点星,与月面/火星表面卫星建立微波链路;星球表面节点包括月球、火星等表面的卫星,通过接入节点组成星球域网;地面运营系统与骨干节点、接入节点共同构建星地一体的运营运控系统并可与地面互联网连接。

2.2 系统特点

1) 超大时空尺度:星座包括地球、月球、火星等不同星球域及行星际空间的卫星节点,构成了前所未有的时空跨度,涵盖了通信、导航和遥感三大功能,卫星数量多、种类多,呈现出高度的功能异构性与集成性。与地面站到近地卫星的通信模式不同,星座中不同节点之间的距离非常远,例如火星与地球之间距离最近约为5 500万km,最远约为4亿km,消息的单程传播时延为3~22 min不等,而海王星距离地球的消息单程传播时延最高约4 h,导致数据通信有巨大的延迟。

2) 极端空间环境:深空通信节点在数据传输过程中容易受到如宇宙射线、太阳风暴等空间环境的影响,链路误码率高,难以保障稳定可靠的通信;链路

处于间歇性中断状态,造成可用连接时间不足,进而难以在大尺度空间形成连续的信息服务能力。例如深空地面站和火星卫星之间7 d内可见时间比例只有约

31.3%,而链路中断时间甚至大于10 h。随着距离的增加,为保障通信链路质量不变,探测器需付出数倍的代价。

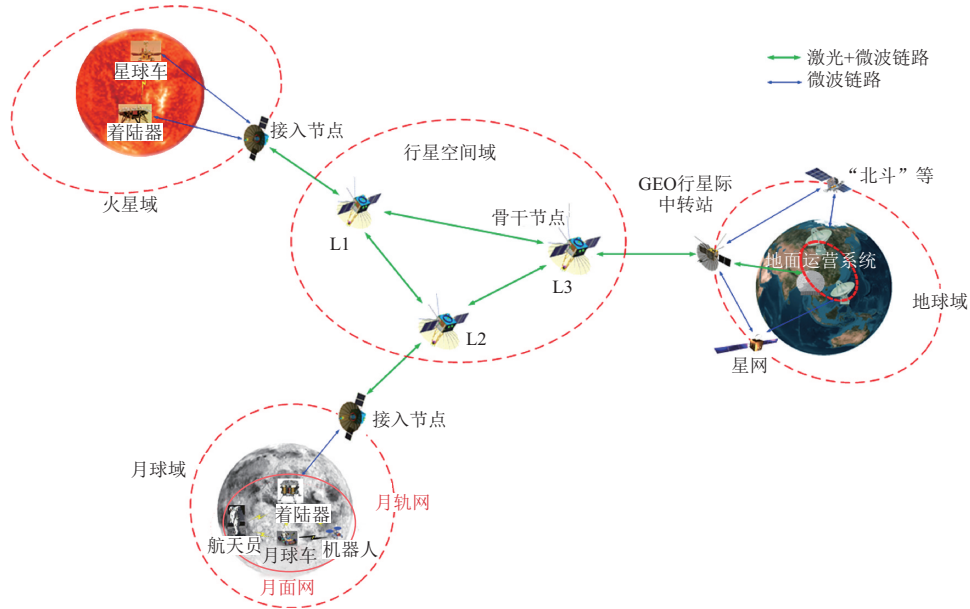


图3 “鹊桥”通导遥综合星座系统组成示意图

Fig.3 Composition of Queqiao constellation system

3) 星载资源严重受限:卫星平台的资源受限集中体现为重量、体积与功耗的严苛限制。受制于火箭承载能力、深空任务动辄数亿千米的航程以及长期运行的能源可持续性需求,迫使卫星必须在有限资源内集成通信、导航和遥感等核心功能,必须采用轻量化、小型化与低功耗设计原则实现资源的高效利用。深空探测器的发射功率与信号处理能力有限,会导致其通信速率受到较大限制。

2.3 面临的挑战

1) 异构功能融合与资源协同调度挑战

现有的通信、导航和遥感卫星系统各成体系、资源无法共享,导致信息分离、服务滞后,难以满足未来星座系统的智能化、多元化信息服务需求。通信卫星的遥感和数据传输能力有限,导航卫星宽带传输能力不足,遥感卫星资源利用率和星地一体化数据处理和实时传输能力不强。因此,亟需突破现有卫星通信、导航和遥感应“泾渭分明”的传统模式,将各类功能异构的卫星通过组网构成星座系统,通过跨功能的资源共享与跨任务的协同调度,实现多星协同工作、信息按需服务和通导遥融合应用,提升系统整体效能。

2) 链路断续连接下的智能自主运行挑战

深空探测任务具有超大时空尺度、通信链路质量难保障、星载资源严重受限和空间环境未知等与近地

任务差异显著的特点,传统基于地面测站的控制方式受限于较低的处理效率,无法满足探测器控制的实时性和安全性要求。为有效应对深空探测器任务执行期间的不确定性因素影响,深空探测器需在轨构建自主管理系统,自主完成探测器的任务规划、指令发送、健康状态监测和故障时的重构恢复等功能,确保探测器在轨长期自主安全运行。

3) 卫星之间互联互通与弹性组网挑战

当前各领域卫星存在的主要问题是各类卫星网络协议设计相互独立,网络互联方式复杂且种类繁多,星内、星间和星地接口协议不统一、软件和硬件紧耦合,形成了信息孤岛,难以支持未来星座系统的弹性组网、协同运行等功能。如何使各领域卫星按照统一的接口和协议进行开发,需要统一各领域卫星之间、星内和星地的接口和协议,设计一套适应于地月空间通导遥异构卫星互联的空间网络协议体系,屏蔽底层硬件与功能的差异,实现地月空间异构节点的即插即用与网络的自愈和弹性扩展,支持多星协同工作和用户多样化的智能应用。

3 “鹊桥”通导遥综合星座信息系统

针对上述通导遥综合星座信息系统的特点和挑战,面向星座系统各类卫星的通信、导航和遥感功能

需求,“鹊桥”采用资源虚拟化、多集群协同认知及地月一体化网络等技术^[30-32]构建一种星座信息系统架构,为用户提供互联互通、精准定位和实时态势感知等服务,具体包括总体架构、硬件架构、软件架构和协议架构4个方面。

3.1 总体架构

“鹊桥”通导遥综合星座信息系统采用基于多集群协同认知的云-域-端^[2]协同架构(见图4),从功能角度可分为空间段、用户段和地面段。其中,地面用户、地月飞行用户、月面用户及深空用户为端节点;各个相对独立的星球表面、环行星轨道卫星

节点以及行星空间卫星节点等组成的系统称为域,比如地球域、月球域、火星域及行星空间域等;各域互联后组成鹊桥星座的系统云网。基于数字孪生和人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术构建星地协同框架,各域卫星通过资源池化与动态功能加载实现自治与协同,依托多集群协同认知驱动跨域资源高效分配与功能动态适配,为端节点用户提供超高带宽数据通信、高精度定位导航与授时^[33]、高分辨率遥感与态势监测、边缘智能处理及高安全性保障等服务,满足星座系统节点的互联互通与高效信息交互需求。

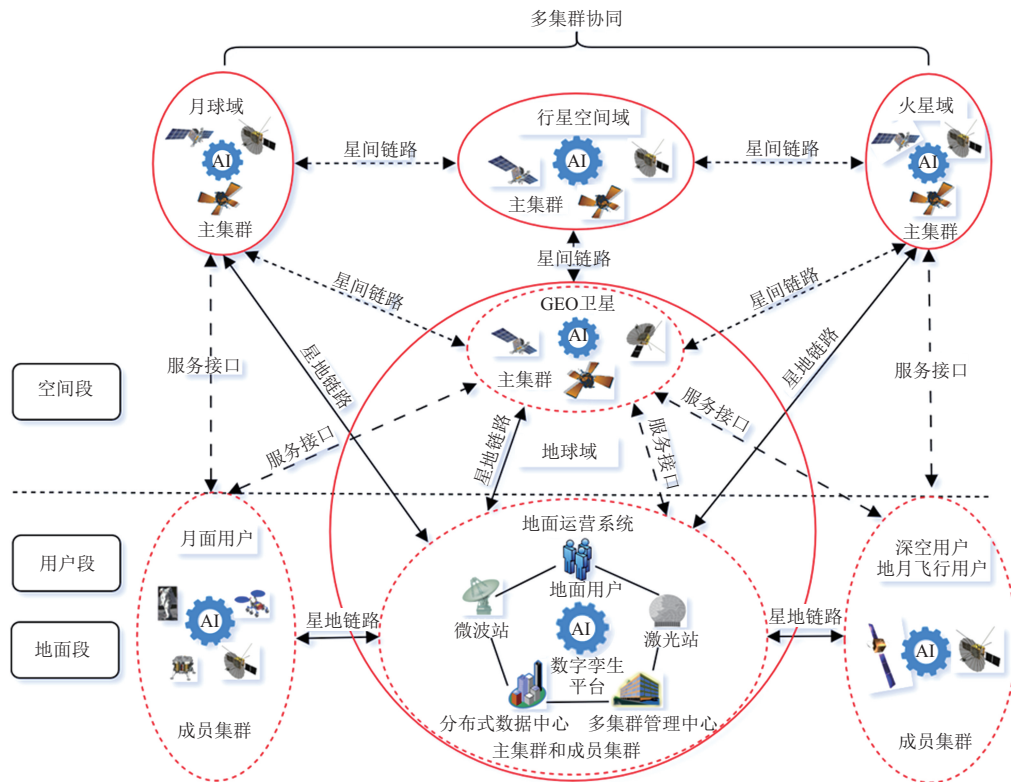


图4 “鹊桥”通导遥综合星座信息系统行星际空间域

Fig.4 Overall architecture of Queqiao constellation information system

“鹊桥”通导遥综合星座系统的多集群协同认知架构以“感知-决策-执行”闭环为核心,突破传统集中式调度架构的局限,通过星座主集群和成员集群之间的协同工作,实现多节点之间的自主协商与动态资源分配,具备全域感知、分布式决策^[34]和自主运行管理等特性。

1) 全域感知。融合系统多域异构信息(如星座通信信号、导航数据和遥感影像等),通过地面数字孪生平台构建时空基准统一、语义一致的态势表征,支持在轨节点的分布式感知。例如,在月球车避障过

程中,传感器采集并分析环境图像,进而生成月面全域态势。

2) 分布式决策。采用单节点-单集群-多集群层次化分布式决策框架,降低计算复杂度,提升实时性与鲁棒性,通过多智能体协同^[35]动态优化任务分配。例如,月球车本地AI生成导航修正和多集群管理中心协调星群任务等。

3) 自主运行管理。通过任务状态、节点行为、星群态势等多维信息,动态更新地面数字孪生平台模型,实现“感知-决策-执行”的闭环过程,支持多

节点通过自主协商分配计算、存储与通信资源。

传统架构依赖中央控制节点进行资源分配和集中式任务调度, 适合稳定、低延迟环境。但地月及深空

网络面临高延迟和通信断续的挑战, 通过多集群协同认知架构可实现节点间的自主协商式资源分配和分布式决策。两种架构的差异如表 1 所示。

表 1 星座信息系统传统架构与多集群协同认知架构对比

Table 1 Comparison of conventional architecture and swarm collaborative cognition architecture on constellation information system

项目	传统架构	多集群协同认知架构
架构理念	中央控制节点统一调度资源和任务	分布式节点自主协商, 基于多智能体系统形成星群级智能
感知方式	依赖中央节点收集和融合数据, 感知范围受限于通信延迟和带宽	全域感知, 分布式采集多域数据
决策机制	集中式决策, 中央节点基于全局信息规划任务	分布式决策 (单节点-单集群-多集群)
执行方式	中央节点分配任务, 节点被动执行	节点自主执行
资源分配	集中分配, 静态规划, 难以适应动态变化的情形	动态协商
容错性	单点故障风险高, 中央节点失效导致系统瘫痪	高容错性, 分布式节点通过存储转发适应通信断续连接
实时性	高延迟限制实时性, 指令传输依赖稳定链路	边缘计算和本地 AI 提升实时性
鲁棒性	对不确定性适应性差, 需手动调整	高鲁棒性, 预计算路由表和多通道信息动态优化
计算负载	中央节点承担高计算负载, 易形成瓶颈	分布式计算, 多容器协同处理, 降低单节点压力
扩展性	扩展受限, 新增节点需中央节点重新配置	高扩展性, 跨集群同步, 支持大规模星群
网络适配性	适合稳定链路, 但通信链路断续	适配高延迟和通信链路断续

为确保“鹊桥”通导遥综合星座系统的高效互联与智能化服务, 基于多集群协同认知的信息系统设计遵循 5 条原则:

1) 通导遥融合。通过软件定义技术实现^[36-37]通信、导航和遥感功能融合, 动态切换任务模式, 优化资源利用率, 提升多集群协同认知的跨域服务能力, 满足超高带宽通信、高精度定位和高分辨率遥感需求。

2) 星地协同运行。星上边缘计算支持实时任务处理 (如态势感知、路径规划)^[38-40], 地面运营系统融合多域数据, 构建语义化知识图谱, 通过多集群协同认知实现星地协同推理与决策, 增强系统智能性与响应效率。

3) 资源动态分配。采用虚拟化技术将计算、存储和网络资源池化, 基于多集群协同认知动态分配资源, 适配地月网络高动态与资源约束环境, 提升系统的弹性与效率。

4) 功能动态加载。基于容器化微服务架构, 按需加载通信、导航和遥感等功能模块, 支持节点自主适配任务需求, 强化星群协同的灵活性与可扩展性。

5) 数字孪生支撑。构建地月空间云网的动态虚拟模型, 实时映射星座拓扑与环境状态, 支持任务仿真、故障预测及协同优化, 为星群认知提供全局态势的支撑。

“鹊桥”通导遥综合星座信息系统的空间段、用户段和地面段功能分别为以下几个方面:

1) 空间段涵盖地球域、月球域、火星域及行星空间域, 通过多轨道卫星协同运行实现地月空间全域覆盖。通过星间链路与星地链路实现地月空间一体化网络的信息传输, 利用软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 技术实现网络的动态路由与资源调度: 星间通信采用激光/微波通信链路, 利用软件定义无线电技术提升频谱效率, 支持多跳传输与低延迟跨域通信; 星地通信整合激光/微波通信链路, 采用网络功能虚拟化 (Network Function Virtualization, NFV) 技术优化带宽分配。依托地面数字孪生平台优化通信链路资源分配, 平衡星间与星地传输负载, 确保超高带宽通信、高精度导航及高分辨率遥感服务能力, 支撑地月空间高效信息交互。

2) 用户段涵盖地面用户、地月飞行用户、月面用户及深空用户, 通过多集群协同认知驱动的多样化终端提供高效、可靠的智能化服务。地面用户利用智能手机、虚拟现实 (Virtual Reality, VR) /增强现实 (Augmented Reality, AR) 设备实现超高带宽交互与态势感知; 地月飞行用户 (如飞船) 通过导航终端获取高精度导航数据支持; 月面用户 (月面着陆器、航天员和月面机器人等) 通过遥感载荷获取高分辨率遥感图像支持月面活动的自主执行; 深空用户 (探测器、中继卫星) 利用高可靠通信终端实现远距离通信与数据中继能力。用户端服务接口采用模块化、软件定义架构, 可动态适配通信、导航和遥感需求。多集

群协同认知支持遥感载荷在高动态、断续通信场景下的自适应工作; 通过卫星在轨分布式计算实现数据的离线处理与实时推理, 降低数据传输对星地链路的依赖。数字孪生技术为用户提供虚拟化场景仿真, 确保用户在复杂地月空间环境下的高效交互。

3) 地面段(即地面运营系统)构成地月空间信息系统的核心管理与数据处理枢纽, 依托多集群协同认知架构实现星座的高效网络管理与多源数据融合, 主要包括数字孪生平台、分布式数据中心、多集群管理中心和地面测控站等。其中, 数字孪生平台基于地面大模型的强大推理能力, 集成高性能计算硬件和智能化算法, 支持对星座信息系统状态的实时仿真、故障预测和任务优化, 确保系统的长期高效自主运行, 为通信、导航和遥感服务提供坚实支撑; 分布式数据中心融合通信遥测、导航数据及遥感影像, 基于容器

化微服务架构和高性能计算构建语义化知识图谱, 支持多源数据融合与实时模型迭代; 多集群管理中心通过集群技术实现节点跨域协同管理, 优化星地协同模型, 在保护数据隐私的同时提升多集群协同认知的智能性, 实现“鹊桥”通导遥综合星座系统的地面运营运控; 地面测控站包括微波站、激光站等, 支持采用高性能计算集群通过软件定义网络等技术实现星地链路动态管理。

3.2 硬件架构

“鹊桥”通导遥综合星座信息系统集成了通信、导航和遥感功能, 通过多集群协同认知实现智能化服务。如图5所示, 其硬件架构涵盖地球域、月球域、火星域和行星空间域等的各类卫星, 结合先进的软件架构实现星内高效协作与星间动态互联, 其设计理念包括以下几个方面:

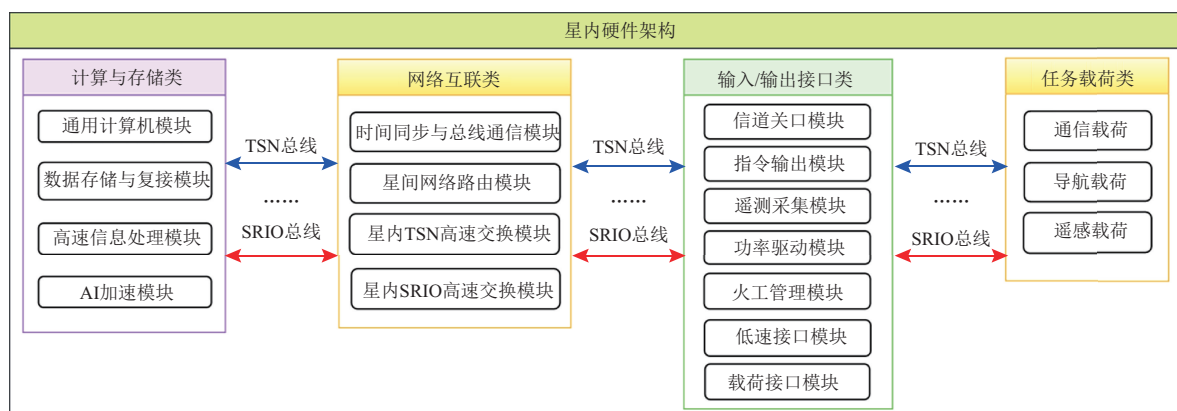


图5 “鹊桥”通导遥综合星座信息系统硬件架构

Fig.5 Hardware architecture of Queqiao constellation information system

1) 分布式协同计算, 通过星群内各卫星、地面设施与月面节点的协同计算与任务分配, 优化资源利用, 提升系统整体效能。

2) 模块化与标准化, 硬件组件采用统一接口与模块化设计, 支持快速组装、功能扩展与技术迭代, 适应地月空间多场景需求。

3) 智能自主管理, 在月面、星上与地面节点配备AI处理单元, 支持卫星节点的实时数据处理和智能自主管理等功能。

4) 多功能融合, 通过硬件资源虚拟化与软件定义技术, 实现通信、导航和遥感功能的高度集成, 降低系统的复杂度与功耗。

5) 高可靠性, 通过冗余设计和动态重构等技术, 确保星座系统在高动态、高时延的深空环境中长期安全运行。

硬件架构以星内模块化硬件为核心, 通过星间、

星地与地月一体化网络形成协同工作的智能信息处理体系。系统软件通过动态资源调度、AI智能推理和数字孪生技术, 驱动硬件的高效运行与智能化管理。每颗卫星的星内硬件架构均由多个功能模块组成, 功能模块主要分为计算与存储类、网络互联类、输入/输出接口类和任务载荷类4类, 各类模块通过时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)或高速串行接口(Serial RapidIO, SRIO)等高速星内总线实现信息交互。

1) 计算与存储类包括通用计算机模块、数据存储与复接模块、高速信息处理模块和AI加速模块等, 实现星内智能计算和存储功能。

2) 网络互联类包括时间同步与总线通信模块、星间网络路由模块、星内TSN高速交换模块、星内SRIO高速交换模块等, 实现星内和星间信息交互。

3) 输入/输出接口类包括信道关口模块、指令输

出模块、遥测采集模块、功率驱动模块、火工管理模块、低速接口模块和载荷接口模块等。其中,低速接口模块实现与其它卫星的低速通信功能;载荷接口模块用于提供各类载荷与卫星平台之间的通用接口。

4) 任务载荷类包括通信、导航和遥感载荷。各类载荷通过统一的接口模块实现与卫星平台之间的数据交互;载荷接口模块的软件通过任务调度算法协调各载荷优先级,动态适配星座系统的不同功能需求。

各类载荷可根据需要独立配置或采用软件定义技术实现不同类型载荷的功能切换和按需配置。①通信载荷:与卫星平台中基于微波通信链路的低速接口模块不同,通信载荷作为实现地月空间信息高速传输的核心,当前主要采用激光通信链路实现星间、星地 Gbp/s 级的高速数据传输;②导航载荷:GEO 卫星配备高精度原子钟与信号生成器,提供地月空间高精度的导航服务;月球域/火星域卫星通过多星导航数据融合,提升定位精度,适配高动态轨道;行星空间域卫星提供广域导航覆盖,保障跨域服务。③遥感载荷:卫星配备多光谱成像仪等遥感载荷,支持高分辨率地月环境监测。月球域/火星域/行星空间域卫星集成红外传感器与深空探测设备,支持资源勘探与科学探索,数据经星上预处理后减少传输带宽需求。

星内通信由各类硬件模块通过星内高速总线与软件系统形成高效协同机制:①数据管理,遥感数据、导航信号与通信数据通过统一的数据总线传输至通用计算机模块,软件通过优先级队列管理数据流,确保高优先级任务优先处理;②任务协同,软件根据任务需求动态分配计算与载荷资源,例如在执行高分辨率遥感任务时暂停低优先级通信任务;③故障隔离,通用计算机模块通过软件监控硬件模块状态,若某一模块发生故障则隔离故障模块并切换至备份模块,通过多集群协同认知算法重新分配任务,保障任务连续性。

星间/星地通信是多集群协同认知功能实现的核心,硬件架构采用激光与微波通信相结合的方式,确保高带宽与高可靠性,通过4种设计方式实现星间高效通信:①动态拓扑管理,系统运行多集群协同认知算法,实时监控卫星位置与链路状态,动态优化网络拓扑,例如,当近月卫星进入月球背面,软件通过深空路由器切换至中继通信链路;②智能路由算法,采用AI驱动的路由优化算法,根据带宽、延迟与任务优先级选择最优链路,高优先级导航数据优先通过激光链路传输^[41];③资源调度,通过任务分解与负载均衡算法,动态分配星间通信资源,例如,在遥感数据

高峰期,软件增加激光通信带宽,暂停低优先级的控制指令传输;④容错与自适应,软件监控链路质量,若检测到激光通信中断,自动切换至微波链路,通过重传机制确保数据完整性。

3.3 软件架构

“鹊桥”通导遥综合星座信息系统的软件架构(如图6所示)包括5层:基础资源层、操作系统层、虚拟化层、容器管理层和业务层。

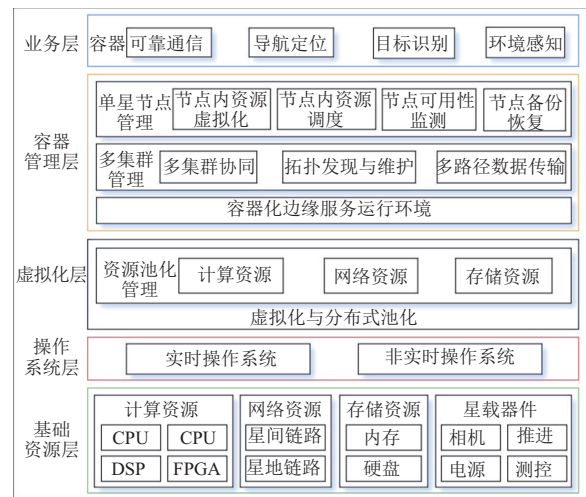


图6 “鹊桥”通导遥综合星座信息系统软件架构

Fig.6 Software architecture of Queqiao constellation information system

1) 基础资源层:提供包括计算资源、网络资源、存储资源和星载器件等各种硬件资源支撑。其中计算资源包括中央处理器(Central Processing Unit, CPU)、图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)、数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)等。星载器件通常指卫星平台上的专用硬件,如传感器、电源或天线等,用于支持通导遥功能。

2) 操作系统层:集成实时与非实时操作系统,提供内核、系统库与工具链支持等统一接口,屏蔽基础资源层的硬件差异。

3) 虚拟化层:支持资源池化管理,通过虚拟化与分布式池化技术整合计算、网络和存储等基础资源,并采用统一的资源表征方式对外提供服务,从而屏蔽硬件资源的物理差异。

4) 容器管理层:提供容器化边缘服务运行环境,支持单星节点管理和多集群管理,实现容器化应用的自动化部署与高可用管理。

5) 业务层:通过部署可靠通信、导航定位、目标识别和环境感知等容器化业务,实现星座系统的通

信、导航和遥感等功能。

其中, 虚拟化层通过统一的虚拟化资源表征方式将异构的物理资源抽象为标准化的服务对象, 确保上层(如容器管理层)可以通过标准化 API 访问资源, 实现高效的资源利用和故障隔离。①计算资源被抽象为虚拟机或虚拟计算单元, 如虚拟 CPU (vCPU)、虚拟内存 (vMemory) 和虚拟加速器(例如虚拟 GPU 或虚拟 FPGA), 允许动态分配和弹性扩展, 以支持多租户共享物理计算硬件。其中, 基础资源层中的星载器件主要对应于计算资源类别, 因为这些器件往往涉及信号处理、数据采集和实时计算(如 DSP 或 FPGA 类似的功能), 在虚拟化过程中被抽象为虚拟计算单元或专用虚拟设备(例如虚拟 I/O 设备或加速器), 整合进计算池中。若星载器件涉及数据存储(如缓冲遥感数据), 部分功能可映射

到存储资源, 但核心对应仍以计算为主。②网络资源表征为虚拟网络、虚拟交换机 (vSwitch) 和软件定义网络 (Software-Defined Networking, SDN) 组件, 提供逻辑隔离的网络拓扑、带宽分配和流量管理, 支持虚拟局域网 (Virtual Local Area Network, VLAN)。③存储资源表征为虚拟存储卷、存储池和虚拟磁盘, 通过块存储、对象存储或文件系统抽象, 实现数据持久化、快照和冗余备份, 屏蔽底层物理磁盘或闪存的差异。

3.4 协议架构

为解决探测器之间互联互通难的问题, “鹊桥”通导遥综合星座信息系统采用包含应用层、传输层、网络层和亚网层的 4 层^[42]标准协议架构(见图 7)。通过软件定义与多集群协同认知驱动实现地月空间异构网络融合与智能化服务。

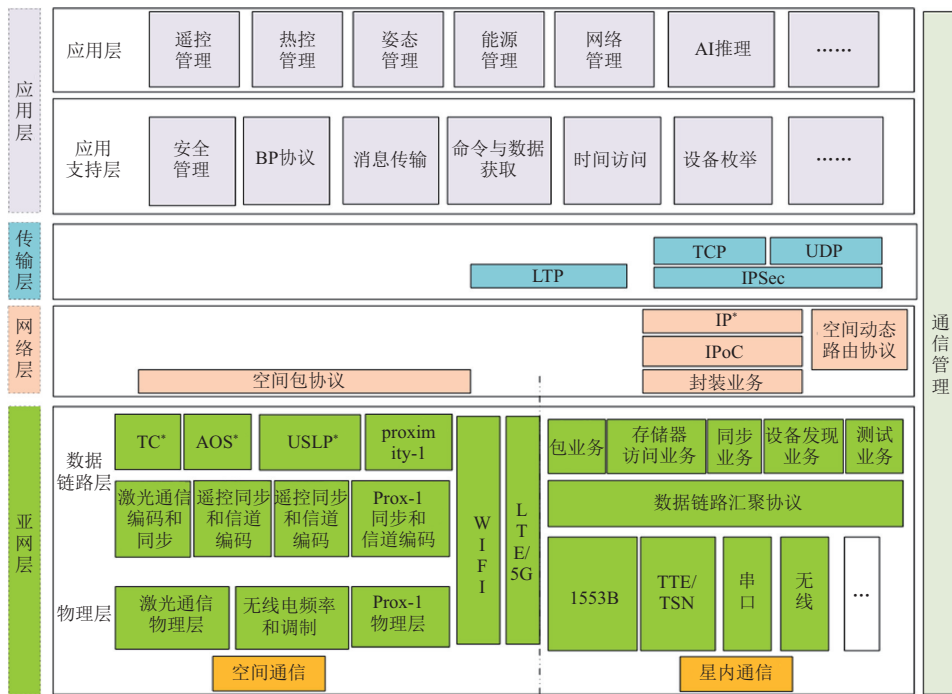


图7 “鹊桥”通导遥综合星座信息系统协议架构

Fig.7 Protocol architecture of Queqiao constellation information system

1) 应用层: 包含应用层和应用支持层, 将应用相关部分与通用支持部分分离, 持各类智能化应用。应用层支持遥控管理、热控管理、姿态控制、能源管理、网络管理、AI 推理等任务相关应用; 应用支持层为应用层提供安全管理、束协议 (Bundle Protocol, BP)、消息传输、命令与数据获取、设备枚举等通用服务支持。

2) 传输层: 支持实时通信与深空长时延场景, 通过利克莱德传输协议 (Licklider Transmission Protocol,

LTP) 实现深空环境的可靠传输, 通过用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 实现不可靠传输。

3) 网络层: 支持多集群协同认知驱动的空间动态路由与服务发现, 适配时变拓扑与大规模扩展。以 IPv6 为核心, 兼容传统简单的空间包等传统协议。

4) 亚网层: 包括数据链路层和物理层, 分空间通信和器内通信两部分。空间通信通过统一空间链路协议 (Unified Space Link Protocol, USLP) 协议统一数据链路层, 器内通信通过包业务及汇聚层协议屏蔽

底层链路。

4 结论

地月空间通导遥基础设施的建设已成为全球航天领域的研究热点。美国、ESA、日本、俄罗斯、印度等已有了系统规划并正稳步推进,中国也提出了“鹊桥”通导遥综合星座系统的发展规划。本文从总体架构、硬件架构、软件架构和协议架构4个层面提出了一种基于多集群协同认知的“鹊桥”星座系统信息系统架构,该架构通过通信、导航和遥感功能的融合,可实现星座系统的多集群协同和高效信息交互,为未来“鹊桥”通导遥综合星座系统信息系统设计提供参考。

参考文献

- [1] 包为民,汪小卫.地月空间探索与开发的思考[J].宇航学报,2022,43(6):705-712.
BAO W M, WANG X W. Some thoughts about cislunar exploration and exploitation[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(6): 705-712.
- [2] 杨孟飞,彭兢,李炯卉,等.地月空间基础设施体系架构与发展设想[J].中国空间科学技术,2024,44(3):1-14.
YANG M F, PENG J, LI J H, et al. Architecture and development en- vision of cislunar space infrastructure[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3): 1-14.
- [3] The White House. National cislunar science and technology strategy [EB/OL]. (2022)[2025-08-02]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/11/11-2022-NSTC-National-slunar-ST-Strategy.pdf>.
- [4] 范唯唯,杨帆,韩淋,等.俄罗斯未来月球探索与开发计划解析[J].科技导报,2019,37(16):6-11.
FAN W W, YANG F, HAN L, et al. Overview of Russia's future plan of lunar exploration[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(16): 6-11.
- [5] KUTHUNUR S. India wants to land astronauts on the Moon in 2040 [EB/OL]. (2023) [2025-08-02]. <https://www.space.com/India-land-astronauts-moon-2040>.
- [6] ISRAEL D J. LunaNet: a flexible and extensible lunar exploration communications and navigation infrastructure[C]//Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference.[S. l.]: IEEE, 2020.
- [7] National Aeronautics and Space Administration. Moon to Mars objectives[EB/OL]. (2022) [2025-08-02]. <http://extension://ngbkcgblmgl-gldjfcnhaiejecaccgfi/https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2022/09/m2m-objectives-exec-summary.pdf>.
- [8] FRAZIER S. CAPSTONE arrives to orbit at the Moon[EB/OL]. (2022) [2025-08-02]. <https://blogs.nasa.gov/artemis/2022/11/13/capstone-arrives-to-orbit-at-the-moon/>.
- [9] 王帅.国外地月空间通信与导航服务系统发展研究[J].航天器工程,2024,33(3):88-94.
WANG S. Research on development of foreign cislunar space communications and navigation service system[J]. Spacecraft Engineering, 2024, 33(3): 88-94.
- [10] ESA. ESA's Moonlight programme: pioneering the path for lunar exploration[EB/OL]. (2024)[2025-08-02]. https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/ESA_s_Moonlight_programme_Pioneering_the_path_for_lunar_exploration.
- [11] MURATA M. Lunar Navigation Satellite System (LNSS): mission, system overview, and demonstration[EB/OL]. (2022) [2025-08-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10184220>.
- [12] 裴照宇,任俊杰,彭兢,等.“嫦娥五号”任务总体方案权衡设计[J].深空探测学报(中英文),2021,8(3):215-226.
PEI Z Y, REN J J, PENG J, et al. Overall scheme trade-off design of Chang'E-5 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(3): 215-226.
- [13] 张立华,熊亮,孙骥,等.嫦娥四号任务中继星“鹊桥”技术特点[J].中国科学:技术科学,2019,49(2):138-146.
ZHANG L H, XIONG L, SUN J, et al. Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Change-4 lunar far-side exploration mission[J]. Scientia sinica Technologica, 2019, 49(2): 138-146.
- [14] 葛平,姜亦宸,孙宇,等.2024年深空探测进展与展望[J].中国航天,2025(1):28-38.
GE P, JIANG Y C, SUN Y, et al. Progress and prospects for deep space exploration in 2024[J]. Aerospace China, 2025 (1): 28-38.
- [15] 甘晓.中国构建地月空间三星座[N].中国科学报,2025-04-17(001).
- [16] 刘苏雅.中国深空探测任务有了“时间表”[EB/OL]. (2023-4-27) [2025-08-02]. <https://mp.weixin.qq.com/s/CzJUpI3x8mZ4qU9MHdPS-A>.
- [17] 张波,魏长春,黄金锋.“星链”军用潜力分析与发展[J].国防科技,2024,45(6):18-25.
ZHANG B, WEI C C, HUANG J F. Analysis and development re- search on the military potential of Starlink[J]. National Defense Tech- nology, 2024, 45(6): 18-25.
- [18] 左海,郭洋,吴洪亮,等.浅析“星链”卫星系统的发展及其影响[J].通信与信息技术,2022(S2):57-59.
ZUO H, GUO Y, WU H L, et al. Analysis of the development and im- pact for the “Starlink” satellite system[J]. Communication & Infor- mation Technology, 2022(S2): 57-59.
- [19] 李宗凌,龙腾,赵保军,等.巨型星座信息系统核心功能及发展研究[J].宇航学报,2024,45(11):1685-1700.
LI Z L, LONG T, ZHAO B J, et al. Research on the key functions and development of mega-constellation information system[J]. Jour- nal of Astronautics, 2024, 45(11): 1685-1700.
- [20] 任远楨,金胜,鲁耀兵,等.美国国防太空体系架构发展浅析[J].现代防御技术,2023,30(4):77-80.
REN Y Z, JIN S, LU Y B, et al. Analysis of American national de- fense space architecture development[J]. Modern Defence Technol- ogy, 2023, 30(4): 77-80.
- [21] 熊瑛,王晖,齐艳丽,等.美国“面向作战人员的可扩展太空体系”未来发展分析[J].战术导弹技术,2024(5):47-54.
XIONG Y, WANG H, QI Y, et al. Analysis of the future develop- ment of the US Proliferated Warfighter Space Architecture[J]. Tacti- cal Missile Technology, 2024(5): 47-54.
- [22] 魏强,廖瑛,石明,等.亚太6D通信卫星方案设计与技术特点[J].探测器工程,2022,31(1):10-17.
WEI Q, LIAO Y, SHI M, et al. APSTAR-6D communication satellite system design and technology[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(1): 10-17.
- [23] 李峰.中国新一代大型地球同步轨道卫星公用平台——东方红五号卫星平台[J].国际太空,2020(4):27-31.
LI F. China's new generation of large geosynchronous orbit satellite public platform—DFH-5 satellite platform[J]. Space International,

- 2020(4):27-31.
- [24] 贾卫松,曾连连,李露铭,等.北斗三号卫星综合电子系统设计[J]. 宇航总体技术,2020,4(6):50-55.
JIA W S,ZENG L L,LI L M,et al. Design of Beidou-3 satellite avionics system[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*,2020,4(6):50-55.
- [25] 钟兴,安源,王栋,等.吉林一号商业航天遥感服务体系构建[J]. 卫星应用,2020(3):8-17.
ZHONG X,AN Y,WANG D,et al. Construction of the Jilin-1 commercial space remote sensing service system[J]. *Satellite Application*,2020(3):8-17.
- [26] 李德仁.从珞珈系列卫星到东方慧眼星座[J]. 武汉大学学报,2023,48(10):1557-1565.
LI D R. From the Luojia series satellites to the Oriental Smart Eye constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2023,48(10):1557-1565.
- [27] 武汉大学.东方慧眼智能遥感星座,构建全球遥感信息实时服务系统[EB/OL].(2024-11-29)[2025-08-02]. <https://luojia.whu.edu.cn/info/1013/5193.htm>.
- [28] 孙耀华,彭木根,赵亚飞,等.低轨卫星互联网:从星地融合迈向通导遥一体化[J]. 北京邮电大学学报,2024,47(6):69-98.
SUN Y H,PENG M G,ZHAO Y F,et al. Low earth orbit satellite network: from satellite terrestrial convergence to the integration of communication,navigation and sensing[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*,2024,47(6):69-98.
- [29] 陈占胜.天基跨域群智系统发展分析和技术展望[J]. 航天电子对抗,2022,38(1):1-5.
CHEN Z S. Development analysis and technical prospect of space-based cross-domain intelligent swarm[J]. *Aerospace Electronic Warfare*,2022,38(1):1-5.
- [30] 何熊文,李楠,徐勇,等.智能化探测器综合电子系统需求分析及体系架构探讨[J]. 探测器工程,2018,27(4):82-89.
HE X W,LI N,XU Y,et al. Requirements analysis of intelligent spacecraft avionics system and discussion of its architecture[J]. *Spacecraft Engineering*,2018,27(4):82-89.
- [31] 宫江雷,梁文宁,王亚坤,等.面向智能卫星的开放式综合电子系统技术研究[J]. 现代电子技术,2023,46(16):1-8.
GONG J L,LIANG W N,WANG Y K,et al. Research on open avionics system technology for intelligent satellite[J]. *Modern Electronics Technique*,2023,46(16):1-8.
- [32] 刘振星.面向遥感卫星的综合电子系统研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.
LIU Z X. Research on integrated avionics for remote sensing satellite [D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2021.
- [33] CHEN X,ZHENG Y,DU L,et al. The design and analysis of a lunar navigation smallsat for southern hemisphere Moon navigation[J]. *IEEE Access*,2024,12:91040-91052.
- [34] QIAO Y,TENG S Y,LUO J,et al. On-orbit DNN distributed inference for remote sensing images in satellite internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*,2025,12(5):5687-5703.
- [35] ZHANG T G,LIU C H,TIAN Q M,et al. Cloud-edge collaboration-based multi-cluster system for space-ground integrated network[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*,2025,43(1):40-60.
- [36] HU M L,XIAO M,HU Y,et al. Software defined multicast using segment routing in LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*,2024,23(1):835-849.
- [37] CHITI F,PICCHI R,PIERUCCI L. From Earth-to-Moon networking: a software-defined temporal perspective[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*,2025,12(1):369-380.
- [38] 徐帆江,周鑫,赵军锁,等.软件定义卫星技术概念及发展[J]. 北京航空航天大学学报,2023,49(7):1543-1552.
XU F J,ZHOU X,ZHAO J S,et al. Rethinking of software-defined satellite technology[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2023,49(7):1543-1552.
- [39] MAO S,LIU L,HOU X W,ATIQUZZAMAN M,et al. Multi-domain resource management for space-air-ground integrated sensing, communication, and computation networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,2024,42(12):3380-3394.
- [40] SHAN Z Y,WEI L H,LI J J,et al. Edge computing-enabled real-time resource allocation system based on satellite cluster[C]//Proceedings of 2024 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu,China:[s. n.],2024.
- [41] CIARAMELLA E,SPIRITO V,COSSU G. Designing high-speed GEO-to-Moon optical wireless communication links[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*,2024,16(1):21-28.
- [42] 何熊文,陈朝基,贾雨琴,等.载人月球探测一体化网络和协议架构设计与验证[J]. 宇航学报,2023,44(9):1411-1422.
HE X W,CHEN C J,JIA Y C,et al. Design and verification of integrated network and protocol architecture for China's manned lunar exploration[J]. *Journal of Astronautics*,2023,44(9):1411-1422.

作者简介:

陈朝基(1982-),男,高级工程师,主要研究方向:航天器总体设计、综合电子和天地一体化网络设计等。本文通信作者。
通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)

E-mail:shelfer@163.com

Discussion on Architecture Design of Queqiao Communication-Navigation-Sensing Constellation Information System

CHEN Chaoji^{1,2}, CHENG Bo³, ZHANG Tongguang³, HE Xiongwen², YIN Yaobao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

3. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A multi-cluster collaborative cognition-based information system architecture was proposed from four aspects: overall architecture, hardware architecture, software architecture and protocol architecture, in response to Queqiao constellation system's characteristics, such as super-large space-time scale, extreme spatial environment, and serious limitation of onboard resources, as well as the challenges of heterogeneous function fusion and resource collaborative scheduling, intelligent autonomous operation under intermittent link connection, and interconnection and elastic networking between satellites. With the perception-decision-execution loop at its center, it will effectively enhance cislunar space information interaction and intelligent collaboration capabilities, realize adaptive topology management, multi-source data fusion, and autonomous constellation system operation, and provide reference for the design of future constellation information systems.

Keywords: cislunar space; Queqiao communication-navigation-sensing constellation; information system; resource virtualization; multi-cluster collaborative cognition

Highlights:

- Through investigation of development status of cislunar space communication and navigation systems and satellite information systems at home and abroad, it is concluded that the development trend of future constellation information systems is mainly as follows: the system architecture needs to have the characteristics of openness and standardization to support international cooperation, and the function is to develop in the direction of multi-functional, and intelligent and the integration of communication, navigation and remote sensing. It is an inevitable necessity to construct a swarm intelligence system with multi-satellite collaboration.
- Aiming at the characteristics of super-large space-time scale, extreme spatial environment, and serious limitation of onboard resources, as well as the challenges of heterogeneous function fusion and resource collaborative scheduling, intelligent autonomous operation under intermittent link connection and interconnection and elastic networking between satellites, an information system architecture of Queqiao Communication-Navigation-Remote Sensing Constellation based on multi-cluster collaborative cognition is proposed from four aspects: overall architecture, hardware architecture, software architecture and protocol architecture, which has the characteristics of distributed decision-making and resource virtualization, etc.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]