

“鹊桥”通导遥综合星座系统 一体化组网关键技术

何熊文¹, 陈朝基¹, 于登云², 赵康健³, 乔奕¹,
贾雨琴¹, 陈亮², 吕泽竞¹, 裴楠¹

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 中国航天科技集团, 北京 100037;
3. 南京大学 电子科学与工程学院, 南京 210023)

摘要: 面向“鹊桥”通导遥综合星座系统多航天器之间的通信需求, 针对现有深空通信存在的时延长、链路中断频繁、协议不统一等难点, 提出了由地面网、地轨网、月面网、月轨网、行星表面网和行星轨道网组成的一体化跨域网络拓扑架构以及融合国际空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)、欧洲空间标准化组织 (European Cooperation for Space Standardization, ECSS) 和互联网工程指导组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 协议体系的分层网络协议架构以实现器间、器地和器内通信的统一协议配置。通过地月链路仿真实验表明, 束协议 (Bundle Protocol, BP)/利克莱德传输协议 (Licklider Transmission Protocol, LTP) 在高延迟、高丢包率的深空通信环境中有效吞吐量可达 90% 以上, 显著优于传输控制协议 (Transmission Control Protocol, TCP)、基于用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 的低时延的互联网传输层协议 (Quick UDP Internet Connection, QUIC) 和 CCSDS 文件传输协议 (CCSDS File Delivery Protocol, CFDP)。最后对架构设计与验证、网络信息服务、高可靠传送、智能高效路由等星座系统一体化组网的相关关键技术进行了展望。可为未来“鹊桥”星座系统的一体化网络构建提供技术支撑, 具有重要的工程意义。

关键词: 地月空间; “鹊桥”星座系统; 一体化组网; 拓扑架构; 网络协议

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)04-0328-08

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250080

引用格式: 何熊文, 陈朝基, 于登云, 等. “鹊桥”通导遥综合星座系统一体化组网关键技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(4): 328-335.

Reference format: HE X W, CHEN C J, YU D Y, et al. Research on the key technologies for integrated networking of the Queqiao communication, navigation, and remote sensing constellation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(4): 328-335.

引言

随着太空体系不断向外层空间扩展, 深空已成为人类活动空间探索的新疆域。通过在地月空间拉格朗日点及其它深空战略点位部署卫星, 并构建覆盖地球、月球乃至其它行星的行星际网络, 可有效地拓展深空探测范围从月球到火星乃至太阳系边际, 具有重要的战略意义。

月球网^[1]是行星际网络构建的重要步骤, 美国、欧洲、日本均提出了用于支撑月球网构建的月球通信导航系统规划并积极推进工程实施。20 世纪末美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Ad-

ministration, NASA) 喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 进行了行星际互联网^[2] (Inter Planetary Internet, IPN) 计划的研究, 该网络架构包括骨干网、行星网和外部网。在该架构下, 美国通过“阿尔忒弥斯” (Artemis) 计划加速推进月球网的建立, 并联合欧洲、日本共同建立了月球网互操作规范^[3], 用于相关系统的建设和互操作。其中, 涉及的系统包括美国“月球通信中继和导航系统” (Lunar Communications Relay and Navigation System, LCRNS)^[4]、欧洲的“月光” (Moonlight) 计划^[5]、日本“月球导航卫星系统”^[6] (Lunar Navigation Satellite System, LNSS)。美、欧、日还计划于 2029 年

开展月球定位导航授时 (Positioning Navigation, and Timing, PNT) 互操作性技术验证。此外,机构间互操作咨询组 (Interagency Operations Advisory Group, IOAG) 于2022年推出了月球通信架构^[7]。

中国通过探月工程已初步建立了月球通信服务体系。后续规划通过“嫦娥七号”“嫦娥八号”等构建月球南极的网络,借助载人月球探测工程构建月球正面的网络。中国正在论证的“鹊桥”通导遥综合星座系统(以下简称“鹊桥”星座系统)^[8-9],可为地月空间及深空各类航天器提供高效网络通信、精确定位导航授时、高效遥感感知、按需信息服务等能力。依靠“鹊桥一号”^[10]、“鹊桥二号”乃至后续的“鹊桥”星座系统将构建月轨乃至深空的骨干网络。

在网络协议研究方面,国内也持续开展了相关的研究和工程实践。中国空间技术研究院已整合了空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 定义的分包遥控,高级在轨系统 (Advanced Orbiting Systems, AOS)、空间包等多种航天器协议,建立了统一的空间子网与星载子网的分层次信息服务机制以及协议体系架构^[11],并以星载综合电子系统为载体,将标准协议通过硬件及软件予以设计和实现。南京大学在容延迟网络 (Delay Tolerant Networking, DTN) 协议、清华大学在IPv6空间应用等方面开展了许多研究工作,华为提出的NewIP协议架构并开始应用。此外,随着5G技术的日益成熟,卫星与5G的融合也引起了许多关注,业内的部分企业与研究组织也逐渐投入到星地一体化的研究工作当中。

通过上述对国内外发展情况的调研可以看出:一方面国内外均开展了月球网乃至行星际网络的规划以及架构制定,并已通过相关工程开始部署和建设;另一方面,统一的协议架构是实现不同国家在月球乃至深空互联的关键,美国正力图主导制定月球乃至行星际网络的规范。

面向“鹊桥”星座系统的一体化组网通信需求,需突破如下难点:如何设计“鹊桥”星座系统的协议体系结构,使其可实现对载人月球探测、无人月球探测等重大工程的支持,并且兼顾实现与近地球空间已有的网络互联互通;如何验证协议体系结构的关键协议,使其可支持地月乃至深空的高效传输。

针对上述难点,本文提出一种融合国际空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)、欧洲空间标准化组织 (European Cooperation for Space Standardization, ECSS)

和互联网工程指导组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 等多种协议体系的“鹊桥”星座系统网络拓扑架构和协议架构,构建了基于星载智能网络单元的半物理实验平台并对协议架构中的传输控制协议 (Transmission Control Protocol, TCP)、基于用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 的低时延的互联网传输层协议 (Quick UDP Internet Connection, QUIC)、CCSDS文件传输协议 (CCSDS File Delivery Protocol, CFDP)、束协议 (Bundle Protocol, BP)/利克莱德传输协议 (Licklider Transmission Protocol, LTP) 在地月链路特性的性能进行了测试验证,最后对星座系统一体化组网的相关关键技术进行了展望。

1 “鹊桥”星座系统网络架构

“鹊桥”星座系统网络与当前已有或正在建设的民用地面通信网、近地空间网有显著差异,主要表现在通信时延由地面或近地通信的毫秒级扩展到几十分钟、通信速率由地面或近地的Gbp/s降为深空的Mbit/s甚至于kbit/s,组网卫星类型差异大。面向未来月球探测和行星际探测等任务需求,中国“鹊桥”星座系统网络的主要功能是实现跨行星域的通信、导航、遥感等领域航天器互联互通。

1.1 网络拓扑架构

“鹊桥”星座系统网络拓扑按空间布局可分为地面网、地轨网、月面网、月轨网、行星表面网和行星轨道网,如图1所示。考虑到深空行星轨道的动态变化及频繁遮挡,星座节点通过轨道预报提前计算可见窗口,并在中断期间利用容延迟网络等协议实现数据的存储转发,实现各节点之间的可靠通信。

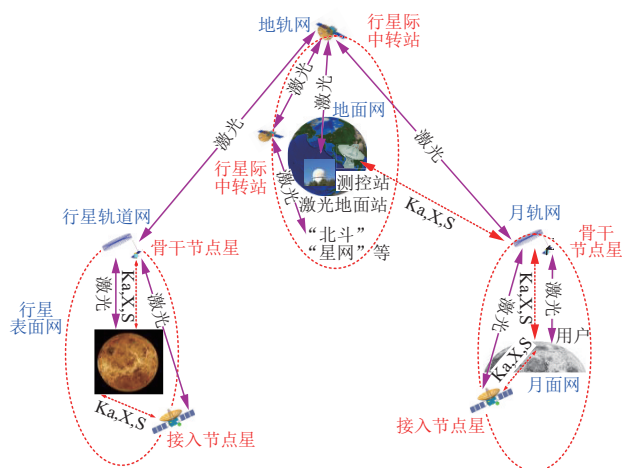


图1 网络拓扑示意图

Fig.1 Diagram of network topology

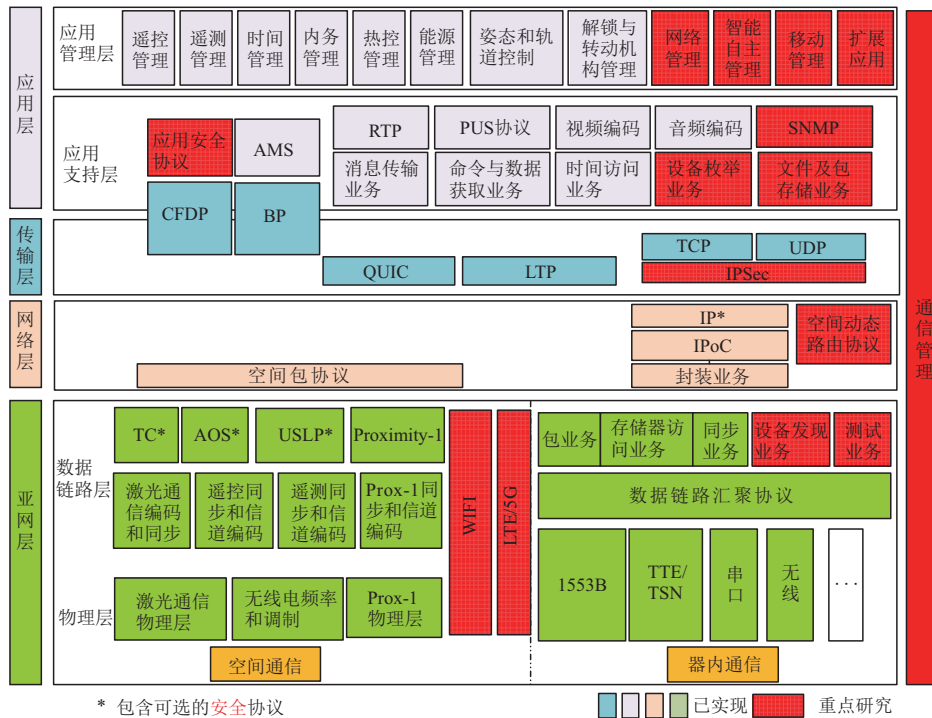
其中地面网由测控站、激光站、地面运营运控系统之间的网络组成；地轨网包括地球同步轨道 (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) 行星际中转站以及地轨其它与之连接的节点星网络；月面网由月球车、航天员、月面机器人、其它月面用户节点组成；月轨网包括“鹊桥”星座的月轨空间段以及探月四期等其它月轨用户节点组成；行星表面网由行星车、航天员、行星表面机器人和其它行星用户节点组成；行星轨道网包括“鹊桥”星座的行星轨道空间段及行星探测工程/国际合作/商业航天的行星轨道用户节点组成。

“鹊桥”星座系统网络按照功能划分，由骨干节点、接入节点和地面运营运控系统等组成。骨干节点包括位于地轨的 GEO 行星际中转站、位于月轨/行星轨道的骨干节点星和位于地面的激光站，通过激光进行高速互

联，具有高速、稳定、可靠等特点；接入节点包括多月轨/行星轨道接入节点星，与月轨/行星轨道用户、月面/行星表面用户建立微波/激光链路，具有全天时、覆盖广、多频段、多址、泛在接入、自适应等特点；地面运营运控系统与骨干节点、接入节点共同构建天地一体的运营运控系统，并可与地面互联网互联。

1.2 网络协议架构

为支持“鹊桥”星座系统与美、欧、日、俄等卫星进行在轨互操作，同时兼顾与国内其它星座系统间互联互通，“鹊桥”星座系统网络协议架构应具有开放、协议兼容等特性。本文提出一种融合 CCSDS、ECSS、IETF 等多个国际标准化组织协议架构的“鹊桥”星座系统网络协议架构，如图2所示。该架构按照分层化设计原则，以统一的网络层为基础，构建协调统一的传输层和亚网层，并优化了应用层。



* 包含可选的安全协议 已实现 重点研究

图2 网络协议架构

Fig.2 Network protocol architecture

1) 应用层：包含应用管理层和应用支持层，支持各类智能化应用。将任务相关部分与通用支持部分分离；任务相关部分轻量化，通过更改任务参数配置代替特定任务的编程；通用支持部分通过抽象和归纳形成完善和灵活通用服务支持机制，提供开放的扩展机制，满足任务特殊要求。

2) 传输层：支持多种服务质量 (Quality of Service, QoS)，通过 LTP 实现长距离、大时延的可靠传输，通过 TCP/QUIC 协议实现航天器内部及距离相对

最近的可靠传输，通过 UDP 实现不可靠传输，通过 IPSec (IP Security) 实现网络安全。

3) 网络层：兼容传统简单的空间包协议以及用于融合的 IP 协议，通过路由协议实现自适应路由。

4) 亚网层：空间通信支持多种数据链路层协议，后续通过统一空间数据链路协议 (Unified Space-data Link Protocol, USLP) 统一星地/星间数据链路层，月面/行星表面支持 5G/WIFI 协议，物理层兼容

微波和激光通信体制; 器内通信通过包业务及汇聚层协议屏蔽底层不同链路, 支持时间敏感网络 (Time Sensitive Network, TSN) /时间触发以太网 (Time Triggered Ethernet, TTE) 等多种高速链路及 1553B 等低速控制链路。

1.3 网络协议应用场景

上述网络协议架构适用于器内、器地和器间通信

的所有场景, 在不同场景下通过信息传输链路配置不同协议即可。针对“鹊桥”星座系统多个航天器之间跨域互联应用的场景, 具体协议设计情况如图3所示, 主要考虑支持地轨网的GEO卫星、月轨网的中继卫星和月面网的月面着陆器、航天员、月球车、月面机器人之间的相互通信, 支持月面节点的自主接入, 支持多跳可靠传输。

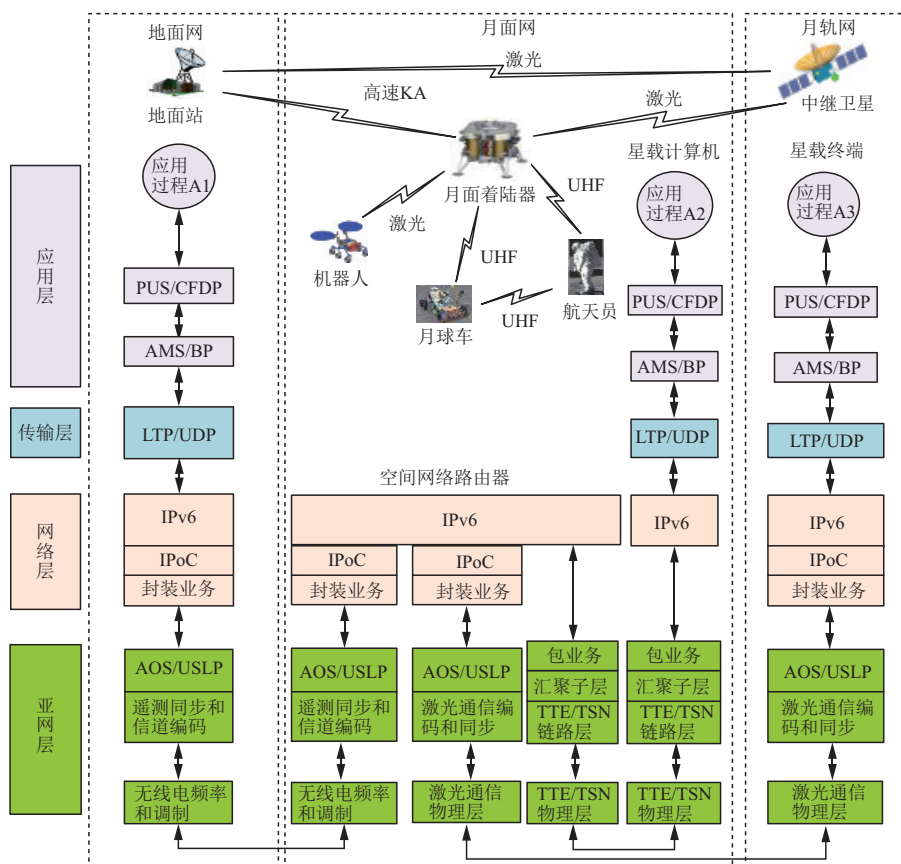


图3 多器间一体化通信协议配置方案

Fig.3 Protocol configuration for communication between multiple spacecraft

2 关键协议测试验证

“鹊桥”星座系统网络协议架构涉及多个层次多种类型的协议, 在不同的场景下, 不同协议的性能不同。在地面互联网场景中, QUIC为基于UDP的加密多路复用传输协议, 在弱网环境下性能优于TCP, 已成为HTTP/3互联网的标准传输协议; 而在高延迟和链路频繁中断的深空通信场景中, CFDP和BP/LTP凭借其异步确认能力和存储-转发机制, 性能显著优于TCP协议。前期项目组已通过多种验证系统对网络协议架构中的协议进行了验证, 本文重点针对TCP、QUIC、CFDP和BP/LTP等关键协议, 构建测试验证系统进行性能比较以及验证。

2.1 实验环境

为测试和评估协议在深空通信中的性能, 搭建了一个模拟地月链路的实验台, 采用三节点、两条串联的拓扑结构, 分别模拟月面着陆器、中继卫星和地面站的通信环境。月面着陆器节点和地面站节点是分别运行在同一台PC机上的两台虚拟机, 作为数据收发节点, 运行指定的协议栈 (包括DTN协议、TCP/UDP和QUIC协议), 并通过物理网络接口连接到中继卫星节点。中继卫星节点运行于实物星载智能网络单元如图4所示, 负责转发来自月面节点的数据并传至地面站, 同时也支持地面站数据的返回。



图4 星载智能网络单元

Fig.4 Onboard intelligent network unit

星载智能网络单元配置了完整的路由功能及协议栈，支持 DTN、TCP/UDP 和 QUIC 协议，并通过物理网络接口与月面和地面节点相连。其协议配置如图5和图6所示。该设备目前已在“鹊桥二号”进行了在轨应用。

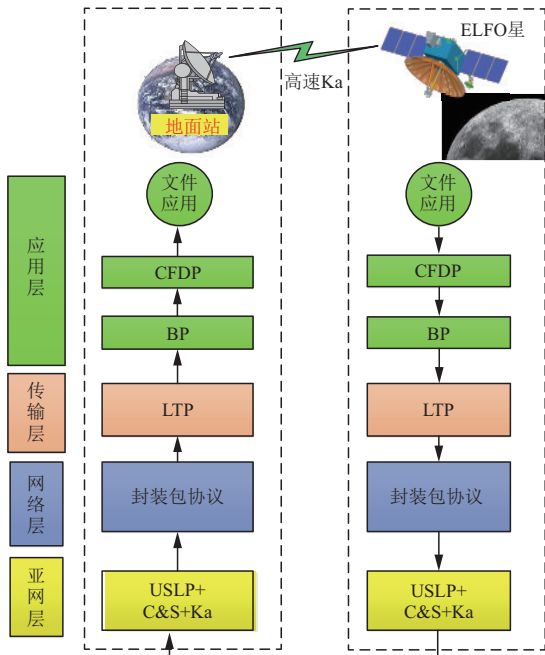


图5 星载智能网络单元协议配置1

Fig.5 Protocol configuration 1 of onboard intelligent network unit

为模拟地月链路的关键网络特性，使用 Linux tc-netem 工具在每个节点对网络链路进行限制和仿真，主要配置包括带宽、单向传播时延和随机丢包率，具体结果如表1所示。

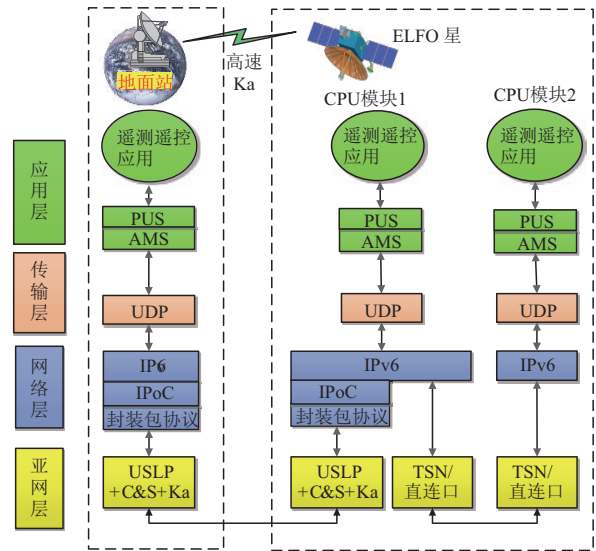


图6 星载智能网络单元协议配置2

Fig.6 Protocol configuration 2 of onboard intelligent network unit

表1 上下行链路配置条件

Table 1 Uplink and downlink configuration conditions

链路路径	低带宽/ (Mbit·s ⁻¹)	高带宽/ (Mbit·s ⁻¹)	单向传播 时延/ms	随机 丢包率/%
月面→中继卫星 (下行)	10	100	280	0~20
中继卫星→地面 (下行)	10	100	1 000	0~20
地面→中继卫星 (上行)	1	10	1 000	0~2
中继卫星→月面 (上行)	1	10	280	0~2

实验将地月通信信道的单向传播时延设定为 1.28 s，其中月面到中继卫星 280 ms，中继卫星到地面为 1 000 ms。根据卫星通信信道在速率上的非对称特性，实验将非对称比设定为 10 : 1，其中数据信道（下行）速率分别为 10 Mbit/s 和 100 Mbit/s，对应的确认信道（上行）速率则分别为 1 Mbit/s 和 10 Mbit/s。

为模拟地月通信中数据传输可能出现的丢包和损坏，本研究设置了5个误码率水平：0、10⁻⁶、5×10⁻⁶、10⁻⁵和2×10⁻⁵。Linux tc-netem 工具通过配置随机丢包率 (loss) 或误包率 (corrupt) 参数来模拟链路层的数据包损失。下行信道数据包大小 1 500 Byte。鉴于星上传输协议的 ACK (Acknowledgement) 数据包大小通常在 65~150 Byte，上、下行信道在不同误码率条件下对应的随机丢包率如表2所示。

表2 上下行信道误码率和丢包率对应关系

Table 2 Relationship between uplink and downlink channel bit error rate and packet loss rate

误码率	链路	数据包大小/Byte	等效丢包率/%
10^{-6}	下行/数据	1 500	1
10^{-6}	上行/确认	65~150	0.1
5×10^{-6}	下行/数据	1 500	5
5×10^{-6}	上行/确认	65~150	0.5
10^{-5}	下行/数据	1 500	10
10^{-5}	上行/确认	65~150	1
2×10^{-5}	下行/数据	1500	20
2×10^{-5}	上行/确认	65~150	2

2.2 实验结果

对 TCP、QUIC、CFDP 和 BP/LTP 这 4 种协议的有效吞吐量、文件传输时间、可靠性、传输效率及协议参数优化等进行仿真验证。给出各协议在模拟地月链路不同丢包率条件下的有效吞吐量性能情况。低带宽场景（下行 10 Mbit/s，上行 1 Mbit/s）和高带宽场景（下行 100 Mbit/s，上行 10 Mbit/s）下 4 种协议测试结果如图 7 和图 8 所示，随着随机丢包率的增加，所有协议的有效吞吐量均呈现下降的趋势。

1) 无论是在低或高带宽场景下，TCP 协议的有效吞吐量均远低于链路带宽上限。这表明在高延迟、高丢包的地月链路环境，TCP 协议的传统拥塞控制和重传机制难以有效工作，导致其几乎无法进行高效的数据传输。

2) QUIC 协议内部采用的拥塞控制算法、优化数据传输等措施，在两种带宽场景均表现出优于 TCP 的性能但其性能仍有提升的空间。这是由于 QUIC 协议的拥塞控制算法未针对地月高延迟、高丢包的网络环境进行专门优化。

3) CFDP 协议在两种带宽场景下的表现与 QUIC 较为相似，但有效吞吐量性能略高于 QUIC。CFDP 作为专为空间通信设计的协议，虽然也提供可靠传输，但 CFDP 的 NAK (Negative Acknowledgment) 模式和选择性重传机制更适合处理高丢包率的情况。

4) BP/LTP 协议在两种带宽两种场景下的测试结果均展现出最佳性能。在低带宽低丢包场景中，其有效带宽利用率甚至能达到 90% 以上；即使在丢包率高达 20% 的情况下，BP/LTP 仍能维持相对稳定的数据传输，显著优于其它协议。

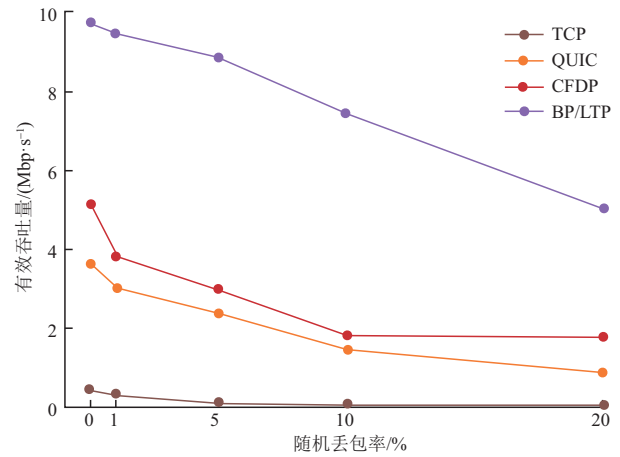


图7 低带宽场景有效吞吐量

Fig.7 Throughput in low bandwidth scenario

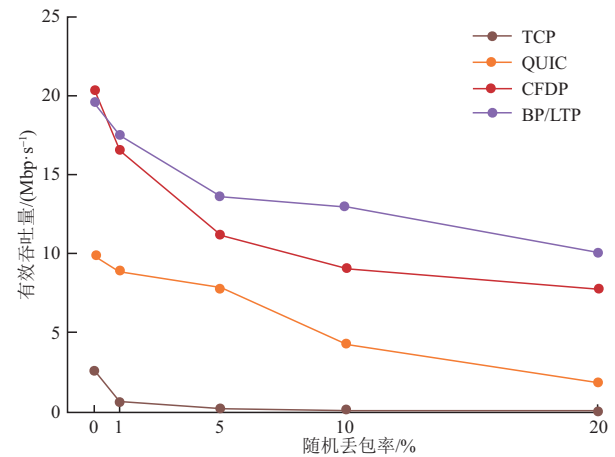


图8 高带宽场景有效吞吐量

Fig.8 Throughput in high bandwidth scenario

BP/LTP 协议通过存储-携带-转发机制和逐跳可靠托管传输，在长延迟、易中断的深空环境中实现了端到端的可靠通信。BP/LTP 优异的性能证明了其作为专为深空通信设计的协议栈，能够很好地适应地月通信的特殊环境，在保证数据可靠传输的前提下，最大程度地提高有效吞吐量。相比之下，TCP 协议在两种带宽场景下均表现出对大时延和丢包的极度敏感，不适用于地月通信。QUIC 和 CFDP 虽然在某些情况下也能提供较高的有效吞吐量，但在高丢包率下的性能仍不及 BP/LTP 协议。

3 一体化组网需突破的关键技术

未来“鹊桥”星座系统实现一体化组网需重点关注组网架构设计和验证、组网信息服务、组网高可靠传送和深空网络智能高效路由等关键技术。

3.1 组网架构设计和验证技术

“鹊桥”星座系统具有跨行星域超大时空尺度的特

点,通过其网络拓扑架构的设计构建地月及深空一体化组网系统,实现深空各类卫星之间的通信导航和信息服务等功能。组网架构设计系统复杂、耦合因素多,需重点解决深空互联网顶层规划和协议架构设计问题。

在组网架构研究的基础上,需考虑如何对一体化组网系统进行高保真评估。针对大尺度深空一体化组网系统集成验证的需求,采用仿真、模拟和实物相结合的方式,开展半物理仿真验证系统的总体方案设计,研究大尺度深空互联网络场景下系统仿真框架、构建以及效能评估的方法,对组网协议架构、技术指标及相关机制和算法进行测试验证。

3.2 组网信息服务技术

深空通信有限的带宽资源、超长的传输延时,对各类跨域通信节点之间的信息共享能力提出了更高的要求。针对地月节点之间的信息共享服务需求,基于异步消息传输^[12-13]共享交互机制,解耦信息产生者和使用者在空间、时间、通信链路的固定关系,实现多种类信息的管理和维护、大范围分发和按需共享。

“鹊桥”星座系统网络受限的带宽和处理资源,导致深空网络节点间通信效率不高,各国学者都在研究深空通信效率的提升技术。中国也开展了相关的研究,以异步消息传输技术为核心构建信息共享交互机制是提升深空通信效率的有效解决途径,目前该技术已经过了大量地面验证。后续研究的重点主要包括远程跨域内容主题管理、远程消息传输网关和信息分发服务质量等。

3.3 组网高可靠传送技术

“鹊桥”星座系统网络具有距离远、链路频繁中断的特点,导致通信过程容易出现数据的丢失,如何保证在深空场景下数据的可靠传输是各国学者的研究热点。深空通信的极长时延适合接力式的端到端传送方式,对传送路径各节点的资源预留和调度能力提出了更高的要求。

中国学者也在这一领域积极探索,在深空节点资源分配及优化策略、网络拥塞控制机制等方面进行了技术探索并开展了地面验证。后续可重点从深空中继资源调度^[14]、网络拥塞控制和链路可靠传输等方面开展研究。

3.4 深空网络智能高效路由技术

“鹊桥”星座系统网络涉及各行星域以及行星内部节点之间的通信,合理的路由机制是实现跨行星域互联互通的核心技术,特定场景的多QoS路径选择、不稳定路径的抗毁策略等方法能够在一定程度上提升深空互联网的路由效能,中国也进行了深入研究和工

程实践。

针对“鹊桥”星座系统网络系统中各节点动态变化且稀疏分布、网络时延长、变化范围大的挑战,后续可重点通过分布式路径选择方法、资源自适应分配策略^[15]等技术开展深空网络高效路由技术研究,从而建立起高动态、大跨度环境下面向网络容量优化的新型路由方法。

4 结 论

“鹊桥”星座系统可为人类深空探测、资源开发利用等活动提供通导遥综合服务,其服务范围将覆盖地球、月球、火星、金星乃至太阳系边际等深远空间,在支撑国家重大工程建设等方面具有重要意义。

针对“鹊桥”星座系统的一体化组网需求,在调研分析当前国内外研究现状的基础上,本文提出了一种融合CCSDS、ECSS、IETF等种协议的“鹊桥”星座系统网络拓扑架构和协议架构,并给出了该架构下多器间一体化通信应用的场景,基于星载智能网络单元构建了半物理协议验证平台,其测试结果反映了关键协议在模拟地月链路的性能差异,验证了BP/LTP协议在深空环境下的优越性,最后对架构设计与验证、网络信息服务、高可靠传送、智能高效路由等一体化组网的关键技术进行了展望,可为未来“鹊桥”星座系统的组网设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] ISRAEL D J, MAULDIN K D, ROBERTS C J, et al. LunaNet: a flexible and extensible lunar exploration communications and navigation infrastructure[C]//Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2020.
- [2] 王昱霖,张更新,张威,等.深空探测与行星际互联网[J].国际太空,2012(8):36-40.
WANG Y L, ZHANG G X, ZHANG W, et al. Deep space exploration and inter planetary internet[J]. Space International, 2012(8): 36-40.
- [3] NASA. Lunanet interoperability specification document: LN-IS V004 [R]. Washington, DC: NASA, 2022.
- [4] NASA. Lunar communications relay and navigation systems [EB/OL]. (2025-07-02) [2025-07-27]. <http://esc.gsfc.nasa.gov/projects/LCRNS>.
- [5] ESA. ESA advances its plan for satellites around the Moon [EB/OL]. (2021-05-20) [2025-07-27]. http://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/ESA_advances_its_plan_for_satellites_around_the_Moon.
- [6] MASAYA M. Lunar Navigation Satellite System (LNSS) [EB/OL]. (2025-02-11) [2025-07-27]. https://bsgn.esa.int/wp-content/uploads/2024/12/Masaya-Murata_Lunar-Comm-Nav-Session.pdf.
- [7] IOAG. The future lunar communications architecture [EB/OL]. (2022-01-31) [2025-07-30]. <https://ioag.org/documents/reports/>.
- [8] 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.
- [9] 北京日报. 我国深空探测任务有了“时间表”[EB/OL]. (2023-04-26)[2025-06-30]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-04-26/doc-imyrvfx4295071.shtml>.
- [10] 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 Chang'e-4 lunar far-side exploration mission[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, 49(2):138-146.
- [11] 何熊文. 一种航天器综合电子系统业务及协议体系架构设计[J]. *航天器工程*, 2017, 26(1):71-78.
- HE X W. Service and protocol architecture design of spacecraft avionics system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(1):71-78.
- [12] THOMAS M R. A multi-center space data system prototype based on CCSDS standards[C]//*Proceedings of 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA:IEEE*, 2016.
- [13] KAZZ G, BURLEIGH S C, KAR-MING C, et al. Evolution of the mars relay network end-to-end information system in the Mars human era (2030–2040) [C]//*Proceedings of 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA:IEEE*, 2016.
- [14] 王敏. 基于随机网络演算的空间网络性能分析[D]. 长春:长春理工大学, 2017.
- WANG M. The performance analysis of space network based on stochastic network calculus[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
- [15] 李箭蛟. 基于网络编码的卫星网络路由算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- LI S Q. Research on routing algorithm based on network coding for satellite network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

作者简介:

何熊文(1982–),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:地月一体化网络、航天器总体设计、航天器综合电子系统设计。本文通信作者。

通信地址:北京市海淀区友谊路102号院(100094)

电话:(010)68113117

E-mail:hexw501@hotmail.com

Research on Key Technologies for Integrated Networking of Queqiao Communication, Navigation, and Remote Sensing Constellation System

HE Xiongwen¹, CHEN Chaoji¹, YU Dengyun², ZHAO Kanglian³, QIAO Yi¹,
JIA Yuchen¹, CHEN Liang², LV Zejing¹, PEI Nan¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100037, China;

3. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: To address the communication requirements among multiple spacecraft in Queqiao communication, navigation and remote sensing constellation system, and to tackle the challenges existing in deep space communication, such as long communication delays, frequent link interruptions and non-uniform protocols, an integrated cross-domain network topology architecture, consisting of ground networks, geostationary orbit networks, lunar surface networks, lunar orbit networks, planetary surface networks and planetary orbit networks, and a layered network protocol architecture integrating CCSDS, ECSS, and IETF protocol systems were proposed, achieving unified protocol configuration for inter-spacecraft, spacecraft-to-ground and intra-spacecraft communications. Simulation experiments of the cislunar space link have shown that the BP/LTP protocol achieved an effective throughput of over 90% in high-latency and high-packet-loss deep space communication environments, significantly outperforming TCP, QUIC and CFDP protocols. Finally, prospects for key technologies related to the integrated networking of constellation systems, such as architecture design and verification, network information services, high-reliability transmission and intelligent and efficient routing, were discussed. This study can provide technical support for future network system construction of the Queqiao communication, navigation and remote sensing constellation system and has significant engineering implications.

Keywords: cislunar space; Queqiao constellation System; integrated networking; topology architecture; network protocols

Highlights:

- Proposed an integrated cross-domain network topology architecture consisting of ground networks, geostationary orbit networks, lunar surface networks, lunar orbit networks, planetary surface networks, and planetary orbit networks.
- Proposed a layered network protocol architecture that integrates CCSDS, ECSS, and IETF protocol systems, achieving unified protocol configuration for inter-spacecraft, spacecraft-to-ground, and intra-spacecraft communications.
- Simulation experiments of the cislunar space link have shown that the BP/LTP protocol achieves an effective throughput of over 90% in deep space communication environments, significantly outperforming TCP, QUIC, and CFDP protocols.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]