

“鹊桥” 通导遥综合星座系统发展思考

于登云¹, 何熊文², 李宪强², 贾雨琴², 陈朝基², 王丹²

(1. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100037; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 调研了国外美、俄、欧、日以及多边组织月球通导遥系统的发展态势, 给出了后续发展启示; 对于中国月球通导遥系统的现状进行了分析, 从支撑重大工程建设、支撑地月经济发展、服务航天强国建设、维护太空资产安全、促进深空国际合作方面进行了需求分析, 提出了中国应抓紧开展“鹊桥”通导遥综合星座系统方案深化和关键技术攻关, 积极推动以中国为主导的国际合作, 提升国际地位。在此基础上, 提出了中国“鹊桥”通导遥综合星座系统的发展设想, 包括建设目标、总体方案、发展步骤, 并针对后续星座建设, 提出了当前亟须解决的 9 项关键技术。

关键词: 月球; 通导遥; 星座

中图分类号: TN925+

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)04-0317-11

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250081

引用格式: 于登云, 何熊文, 李宪强, 等. “鹊桥”通导遥综合星座系统发展思考[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(4): 317-327.

Reference format: YU D Y, HE X W, LI X Q, et al. Reflections on development of Queqiao communication, navigation, and remote sensing integrated constellation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(4): 317-327.

引言

中国未来国际月球科研站、载人登月、行星探测等多项航天工程对深空通导遥基础设施建设提出了迫切的需求。美、欧、日近期已相继提出月球通信导航星座计划, 并将于 2029 年开展联合在轨试验。

“鹊桥”通导遥综合星座(以下简称“鹊桥”星座系统)是在地月空间和行星际空间长期运行、可扩展、可维护的深空通导遥信息基础设施, 其具备高速网络通信、精确定位导航、高效空间感知、按需信息服务等功能, 为人类深空探测、资源开发利用等活动提供通导遥综合的服务。

本文将深入分析国外的发展态势、国内现状及需求, 并在此基础上提出了“鹊桥”星座系统的发展设想, 梳理需突破的关键技术, 以期为后续星座建设及相关研究提供参考。

1 国外研究进展

当前, 各航天大国以及多边组织均高度重视月球

通信导航系统建设、关键技术开发和试验, 提出了相应的建设计划、标准规范, 正在加速推动系统建设, 并准备开展联合试验, 以主导后续月球通信导航系统发展格局。

1.1 美国月球通信导航系统发展态势

美国于 2022 年 11 月发布《国家地月空间科技战略》^[1], 以支持地月空间长期发展、扩展国际科技合作、拓展太空态势感知能力、构建通信导航基础设施作为国家战略目标。同时, 美国未来重点优先发展地月空间的态势感知能力, 将地月空间通信导航能力的实现, 上升为国家科技战略, 并正在加速基础设施的体系建设。

美国通过空间通信和导航(Space Communication and Navigation, SCaN)项目持续开展太阳系互联网及其第一步月球网(LunaNet)的研究, 太阳系互联网构想如图 1 所示^[2], 月球网架构如图 2 所示^[3]。在此基础上, 2023 年美国还制定了月球到火星的体系架构, 并在 2024 年细化了研究路线、发布了新的白皮书^[4-5], 为后续载人登陆火星及相关信息基础设施建设奠定了基础。

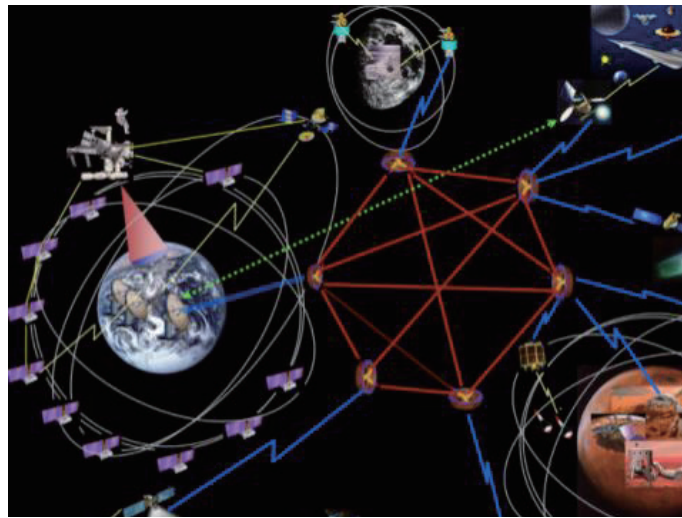


图1 太阳系互联网构想^[2]

Fig.1 Concept of solar system internet^[2]

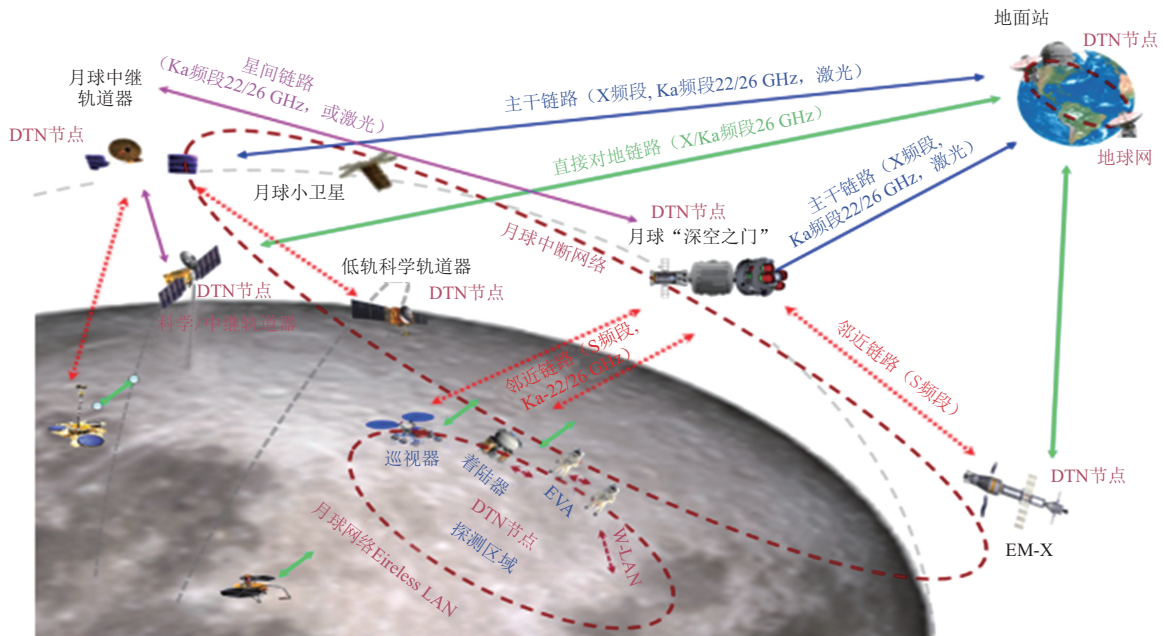


图2 月球网架构图^[3]

Fig.2 LunaNet architecture diagram^[3]

美国通过“阿尔忒弥斯”（Artemis）计划加速推进月球网的建立，从2030年后构建“月球通信和导航系统”（Lunar Communications Relay and Navigation Systems, LCRNS），前期将分为3个阶段发射月球通信导航卫星^[6-9]，同时开展区域服务，其架构如图3所示^[9]。

目前，美国已开展大量试验进行相关技术的验证。2024年，美国开展了深空超远距离激光通信试验，在距离地球约3.86亿km的航天器成功实现了激光通信，下行链路数据速率达6.25 Mbit/s。2025年3月美国开展了定位试验，使用“蓝色幽灵”（Blue

Ghost）月球着陆器，搭载月球全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）接收器实验（LuGRE）载荷，在月球表面成功接收了来自地球的GNSS信号^[10-13]。2029年美国还将联合欧洲、日本共同在月球南极进行导航技术试验。

同时，美国重视月球轨道、频率等稀缺战略资源的布局。在频率方面，美国已制定月球网频率计划，在X、Ka频段共申请资料52份。在轨道方面，美国提出将在地月及日地所有10个拉格朗日点等战略轨位永久安置资产。

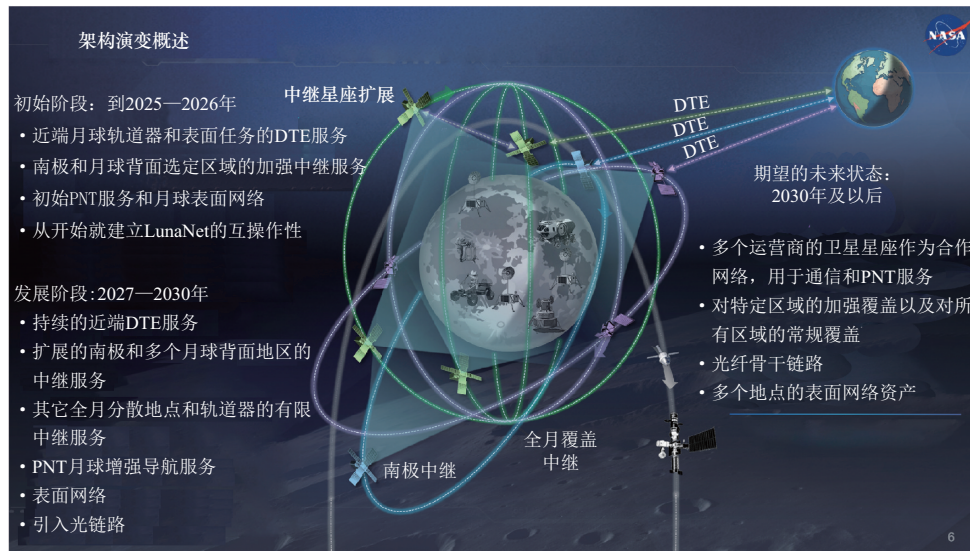


图3 LCRNS架构概况^[9]

Fig.3 Overview of LCRNS architecture^[9]

1.2 俄罗斯月球通信导航系统发展态势

2019年,俄罗斯发布了《月球综合探索与开发计划草案》,提出其构建地月通导系统的4个阶段目标。第1阶段(2025年前)实现地月通信,支持地月往返运输;第2阶段(2026—2030年)建设环月星座,保障月球全球通信和定位导航;第3阶段(2031—2035年)实现月面通信和导航,支持建造月球基地;第4阶段(2036—2040年)提供全月的月面导航服务^[14]。

1.3 欧洲月球通信导航系统发展态势

以Artemis计划为背景,2021年,欧洲航天局

(European Space Agency, ESA)公布了“月光”(Moonlight)^[14-16]计划,拟建立“月球通信和导航系统”(Lunar Communications and Navigation Systems, LCNS),如图4所示^[15],共分3个阶段进行建设:第1阶段在月球椭圆冻结轨道(Elliptical Lunar Frozen Orbit, ELFO)部署“探路者”(Pathfinder)试验卫星,验证LCNS关键技术;第2阶段通过部署ELFO的4个卫星,为月球南极提供通信和导航服务;第3阶段面向全月覆盖提供多维服务。

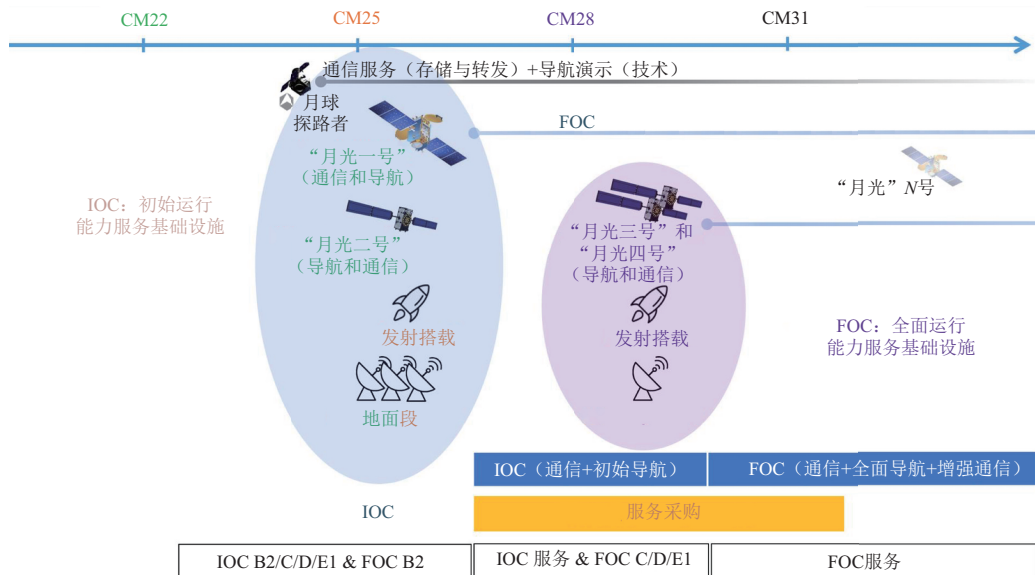


图4 LCNS计划实施阶段^[15]

Fig.4 Implementation step of LCNS plan^[15]

1.4 日本月球通信导航系统发展态势

日本宇航局 (Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA) 于 2022 年提出“月球导航卫星系统” (Lunar Navigation Satellite Systems, LNSS) [17-18], 系统初期规模约 8 颗卫星, 运行在 ELFO 轨道, 布局如图 5 所示 [18]。其中 4 颗卫星配置激光星间链路载荷,

可为月球南极探测器提供 40 m 精度的定位服务及 10 Mbit/s~1 Gbit/s 速率中继通信服务。预计首颗卫星于 2029 年发射, 并计划与美国、欧洲于 2029 年进行首次月球定位、导航和定时 (Positioning Navigation, and Timing, PNT) 互操作性演示, 如图 6 所示 [15]。

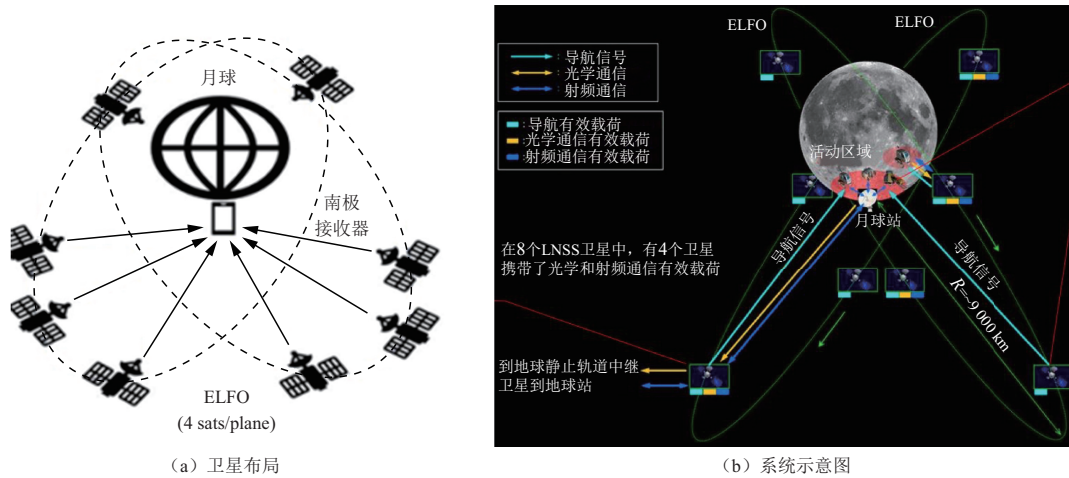


图 5 JAXA 月球导航卫星系统 [18]

Fig.5 JAXA Luna navigation satellite system [18]

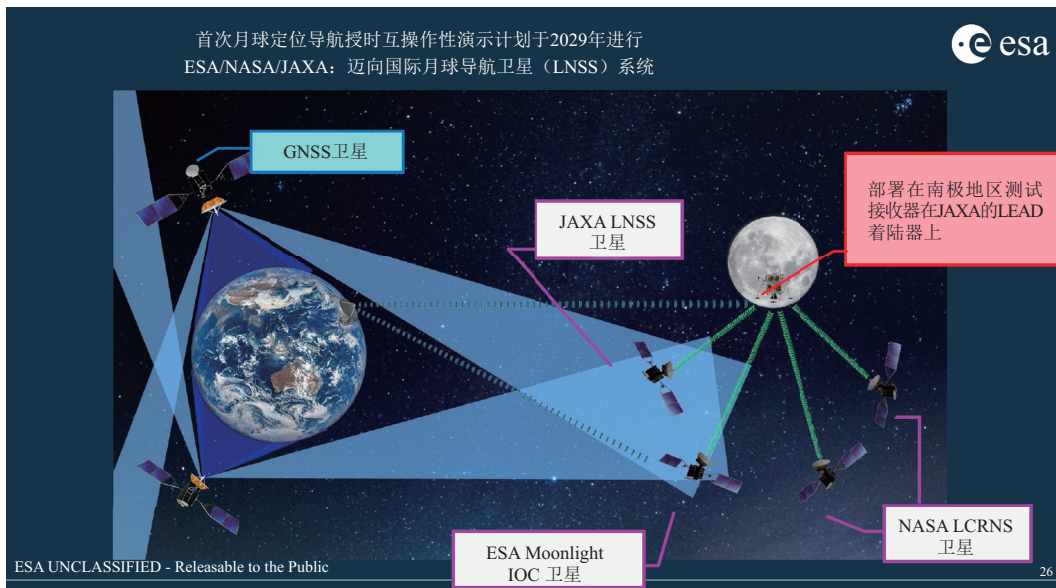


图 6 月球导航实验 [15]

Fig.6 Experiment of Luna navigation [15]

1.5 多边组织月球网标准制定

多边组织重视月球网标准制定, 各国积极参与和推广。月球和行星际探测的需求和计划是多边组织的研究热点。国际空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)、全球卫星导航系统国际委员会 (International Committee on Global Navigation Satellite Systems, ICG)、机构间

操作咨询组 (Interagency Operations Advisory Group, IOAG) 等在系统架构、体制协议、服务体系、频率资源协调、时空基准框架、兼容互操作等方面提出标准规范 [19-29]。美、欧、日积极推进标准规范的制定, 相关活动十分活跃。

1.6 启示

根据上述国外态势分析, 主要有如下启示。

1) 航天大国纷纷将地月空间通信导航系统的建设上升为国家战略

月球是国际深空探测的热点和焦点。为满足日益增多的通信与导航用户需求,美、俄等航天大国将地月空间通导遥基础设施建设上升为国家战略,欧、日等也纷纷制定了月球和深空网络的建设规划,促进深空探测、商业航天以及深空经济的发展。

面对后续月球探测任务对通导遥的持续性需求,未来10年将是构建地月通导遥基础设施的关键历史机遇期。

2) 各国均提出分阶段建设月球和深空网络的策略

月球和深空网络的构建和应用将是一个与人类深空探测进程同步配套的长期性活动,需结合人类探测的进程进行规划,既要满足服务需求,又要避免过度建设。国外系统的发展基本都遵循“从区域到全球,从单点到网络,从单一到融合,从专网到公网”的规律,以灵活可扩展的方式支持长期的分阶段发展。这一发展规律对中国月球和深空网络的建设规划具有一定的借鉴意义。

未来中国地月空间通导遥系统的发展路线既要结合国际发展趋势,也要符合中国的发展需求和实际基础,参考目前通导遥系统发展的规律,由简到繁,采用系统兼容的分步建设方式,动态扩展。

3) 各国加强开展地月及深空通导新技术试验,积极主导标准规范的制定

为支持地月通导遥系统建设,美国已开展近直线晕轨道(Near-Rectilinear Halo Orbit, NRHO)的测试和定位技术、火-地超远距离的激光通信技术等试验验证,并将于2029年联合欧、日开展对月球南极导航技术试验。同时,美、欧、日积极推进网络架构、导航信号体制、通信协议等技术规范的制定,已提出互操作性规范草案。

中国亟待针对后续探月四期、月球基地、载人登月及深空探测等任务的具体需求,形成顶层技术体系,开展各项关键技术攻关,实现在地月空间的跨越式发展。

4) 各国加速申报和占用作为稀缺战略资源的频率和轨位

地月空间的频率和轨位是开展深空探测活动的基础,国际已大量申报和占用月球多种频轨资源,且近期申报国家和数量都出现了较明显的增长。

中国应尽早部署频轨资源的申报,为后续地月空间的活动赢得先机。

5) 各国加强月球通导星座建设的国际和商业合作
美、欧、日拟联合共建月球通导星座,共同开始

技术验证,通过ICG、CCSDS等多边组织主导标准规范的制定。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与ESA都在通过公私合作伙伴关系或服务合同开发月球通信与导航网络,降低政府投入与承担风险。

2 国内发展现状与需求分析

2.1 国内发展现状

在月球通信系统建设方面,中国通过探月工程已建立了月球通信服务体系,通过“鹊桥一号”“鹊桥二号”“嫦娥四号”“嫦娥六号”实现了多个世界第一。在2018年5月,中国发射“鹊桥一号”^[30],运行在地月L2点的Halo轨道,为“嫦娥四号”提供通信服务,成为世界上首个服务于月背通信的中继星,目前仍在轨运行。2024年3月,中国发射了“鹊桥二号”月球中继星,为月球南极区域、月背部分区域提供通信服务,成为世界上首颗运行于ELFO轨道的月球中继星,规划工作寿命不小于8年,未来可支持“嫦娥七号”“嫦娥八号”等任务^[31-32]。

在地基系统方面,中国已建立了深空测控站+甚长基线干涉测量技术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)的地基测控定轨系统,几乎实现了24h连续覆盖月球,为月球任务提供测控及导航定轨保障。目前支持实时高精度月球导航的途径主要是相对自主导航,利用复合光学导航设备将着陆精度提高到百米级。

在技术试验方面,中国在地月空间已规划和开展了多项通、导技术试验。“鹊桥二号”计划开展VLBI、新型网络协议等技术试验。“天都一号”“天都二号”技术试验星与“鹊桥二号”同时奔月,开展了地月通导技术验证。中国科学院于2024年3月13日发射了DRO-A/B卫星,未来准备开展月球相对导航技术验证。在月球轨道再入返回飞行试验器(“嫦娥5T1”)任务装配了高灵敏度的GNSS接收机,进行了地月转移阶段接收地球GNSS信号的技术试验。

2.2 发展需求分析

1) 打造深空基础设施,支撑重大工程建设

国际月球科研站、载人登月、行星探测等重大工程提出了在月球南极高速激光中继、月球正面大范围移动导航、月球背面S/Ka、行星际中继等关键需求。针对新需求,需在现有成果基础上,构建深空通导基础设施,进一步增补S/Ka中继、高速激光中继、月面导航等关键功能,提升地月乃至行星际空间通信、导航、遥感、信息服务等核心能力。通过基础设施的分阶段建设,可满足登月无人飞行试验、2030年前

的载人登月任务、2030年后的国际月球科研站建设等国家重大工程任务需求,并可支撑中国深空能力的投射和作业范围从月球扩展到火星、木星乃至太阳系边际,从而有效拓展太空边疆。

2) 创新地月产业模式,支撑地月经济发展

国际宇航科学院等研究认为到2045年,进入地月空间任务规模将达10多万t级,可直接开发的资产高达万亿美元。月球原位资源开发与利用、月球商业探测和开发等将对全月通信和导航覆盖等提出旺盛需求。构建“鹊桥”星座系统将降低卫星、资源开发与利用装置等的通信、导航服务成本,推动月球探测商业化进程,催化全新地月空间产业发展模式,创造显著的效益,支撑地月经济需求。

3) 引领深空科技创新,服务航天强国建设

各航天大国均计划开展网络、导航、激光通信等服务及技术试验。通过地月通导系统的构建,可推动实现地月一体化组网与轨道设计、月球导航系统及体制设计技术、超远距离高速激光通信系统和体制设计技术等一大批关键技术的创新突破,引领深空科技前沿,加快迈向航天强国的步伐。

4) 开发地月空间资源,维护太空资产安全

月球轨道、频率属稀缺战略资源。应以未来地月空间活动为出发点,以通信、导航、遥感等能力需求为牵引,统筹考虑占频保轨要求。因此,通过“鹊桥”星座系统建设,有依据、有步骤地申报Ka、X、S等频率资料,快速布局平动点轨道、大椭圆轨道等多条战略轨道。轨道、频率资源的开发有利于更好地支持地月空间态势感知、导航授时等功能,服务和保护中国月球资产,有效提升战略威慑力,维护中国太空权益。

5) 推动建立国际联盟,促进深空国际合作

深空国际合作是目前的大趋势,深空通导遥基础设施也需进行共同建设。中国亟需建立“鹊桥”网(QueqiaoNet)国际合作联盟,按照共商、共建、共享原则,建立标准协议以支持互联互通及互操作。通过协议层互操作,可支持国际及商业组织共同构建系统卫星,并可为其它国家提供服务,塑造有利的航天国际合作新格局,推动构建人类命运共同体。

3 发展设想

3.1 建设目标

2050年前建成具备通信、导航定位授时、遥感、信息服务等能力的行星际通导遥综合星座系统,作为空间基础设施,服务范围覆盖月球、火星乃至太阳系边际,满足月球、火星探测等任务需求,支持国家太

空权益维护及助推地月空间经济发展,为全面建成航天强国提供重要支撑。

3.2 总体方案

“鹊桥”星座系统包含功能架构、网络架构、物理架构三大架构,如图7所示。

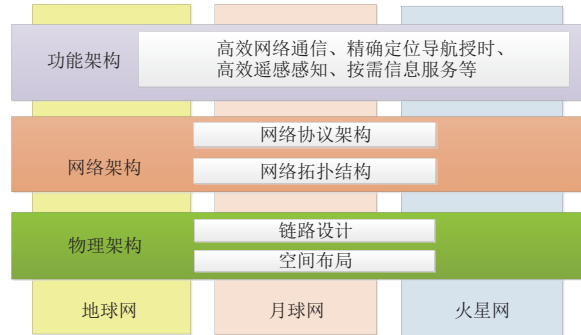


图7 “鹊桥”星座系统架构图

Fig.7 Queqiao constellation system architecture diagram

1) 功能架构

“鹊桥”星座系统功能架构:高效网络通信功能,实现全天时测控通信、全月中继通信保障、地月往返全迹测控通信等;精确定位导航授时功能,围绕有源无源结合导航定位、多星无源定位两种导航方案,实现测定轨、定位、授时等能力;高效遥感感知功能,实现高精度多源遥感感知监测能力,具备对月测绘、空间态势感知、空间环境监测、月表活动检测等;按需信息服务功能,信息处理、信息存储、信息订阅发布等。

2) 物理架构

“鹊桥”星座系统物理架构如图8所示,共分为地球段、月球段、火星段。

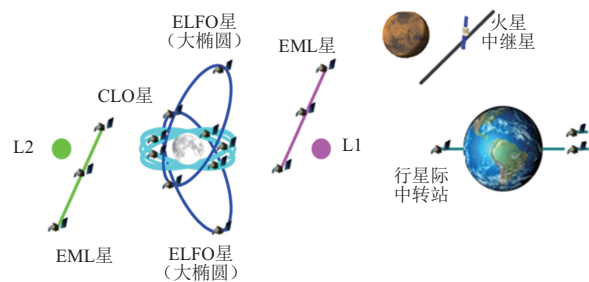


图8 “鹊桥”星座系统物理架构

Fig.8 Queqiao constellation system physical architecture

地球段:由若干个行星际中转站组成,通过行星际中转站实现“鹊桥”星座系统与通信、导航、遥感等其它星座互联。

月球段:物理组成上包括两类航天器。ELFO星/环月轨道(CircumLunar Orbit, CLO)星:部署在环月大椭圆冻结轨道/圆轨道的卫星,实现对月面、月

轨用户的通导支持; 地月平动点 (Earth Moon Lagrange, EML) 星: 部署在地月平动点轨道, 构建地月高速骨干链路, 提供通信、导航、信息服务、扩展应用综合服务。

火星段: 由火星的环绕探测器/中继星组成。

3) 网络架构

网络组成具体分为月球网 (含月面网、月轨网)、火星网等。各网络可通过行星际中转站与地球网 (包括北斗、星网、遥感卫星等) 互联, 如图9所示。

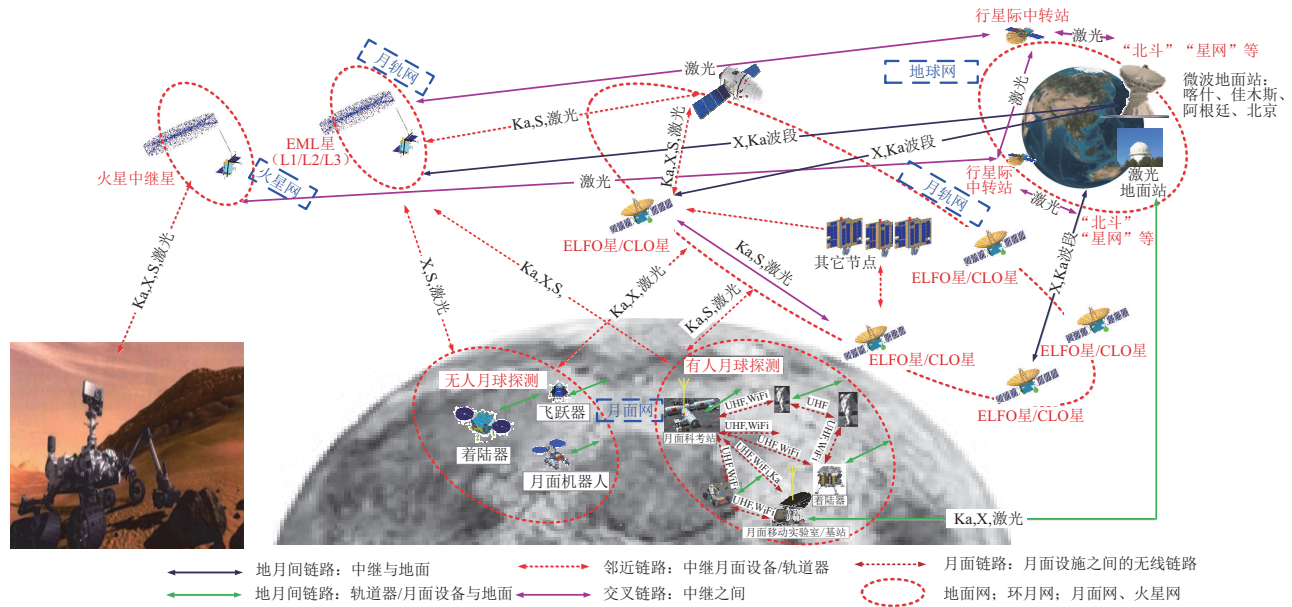


图9 “鹊桥”星座系统初步网络架构

Fig.9 Queqiao constellation system primary network architecture

地-月-火骨干网通过高速激光互联: 地球骨干节点, 行星际中转站; 月球骨干节点, 月球EML星; 火星骨干节点, 火星中继星。

网络协议架构融合 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) 等三大国际标准化组织的协议, 兼

容国际标准, 支撑构建一体化网络。

3.3 发展步骤

围绕2050年前构建覆盖月面、月轨、地月、火星乃至太阳系边缘的通导遥综合星座系统的总目标, 根据无人月球探测、载人月球探测等重大工程以及国际合作等主要节点, 总体发展设想分三期实施, 如图10所示。

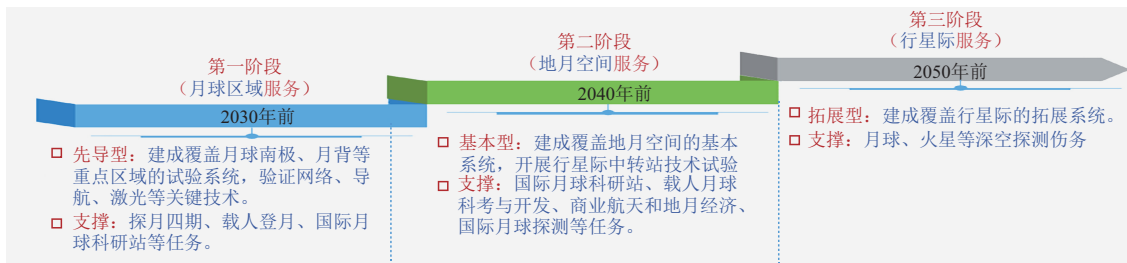


图10 “鹊桥”星座系统总体发展设想

Fig.10 Overall development concept of Queqiao constellation system

1) 一期 (Queqiao V1.0)

总体目标: 基本建成地月空间通信能力, 验证通信网络、导航、激光等关键技术。一期设想如图11所示。

2) 二期 (Queqiao V2.0)

总体目标: 建立地月骨干链路, 实现全月通信遥

感以及区域导航。二期设想如图12所示。

3) 三期 (Queqiao V3.0)

总体目标: 建成覆盖行星际的拓展系统, 实现火星通信导航覆盖。三期设想如图13所示。



图 11 “鹊桥”星座系统一期设想

Fig.11 Concept for first phase of Queqiao constellation system

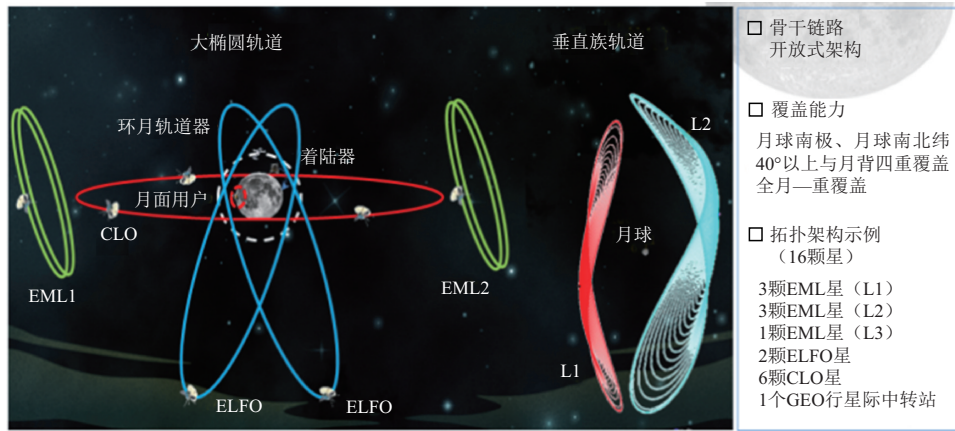


图 12 “鹊桥”星座系统二期设想

Fig.12 Concept for second phase of Queqiao constellation system



图 13 “鹊桥”星座系统三期设想

Fig.13 Concept for third phase of Queqiao constellation system

4 关键技术

为实现“鹊桥”星座系统的发展设想，需优先突破如下9项关键技术。

1) 地月一体化组网与轨道设计技术

“鹊桥”星座服务对象轨道类型多、服务范围变

化大、需求类型多、协议体制多，给系统网络架构设计带来了极大的挑战，亟需开展一体化网络架构总体设计，迭代确定系统网络总体架构。“鹊桥”星座的轨道是网络拓扑结构设计的关键，月球轨道有多种类型，需根据系统通导遥能力进行综合比较，得出相对

最优轨道方案。

该技术重点研究地月一体化组网架构与轨道方案设计、地月一体化协议架构、深空高效路由方法、深空高效传输方法、跨地月域组网安全技术、灵活接入方法、地月网络管理机制等,以支持未来地月互联互通和国际合作。

2) 测控与通导遥多业务频率综合优化设计技术

频率设计是“鹊桥”星座设计的必要环节,科学合理合规并可获得的频率资源是开展自身测控运营和通导遥业务的条件和基础。国际上划分给月球及深空探测的可用频段和带宽非常有限,美国、欧盟等开始大量申报月球轨道和频率,抢占地月空间战略资源,中国亟需开展深空任务频率相关的设计技术研究,结合任务需求对频率进行综合优化,提前设计、提前申报、及时启用。

该技术重点研究月球空间频率规则、测控通信导航多业务技术体制、通导遥多业务频率需求、通导遥多业务频率综合设计、国际协调策略与技术支持、月球与行星多功能星座频率仿真与试验验证、“鹊桥”星座频率申报策略等内容。

3) 月球导航系统及体制设计技术

当前月球空间航天器的导航以地面支持为主,其中地面测定轨需联合多个地面站进行长时间连续的观测,受地面测控资源的约束,实时性与自主性较低;GNSS信号对月球空间的服务能力由于信号弱、距离远、易受干扰等也存在局限性;以往的导航体系无法适用近月空间条件。亟需构建地月空间统一时空基准并设计可靠的月球空间用户服务体制,拟参考北斗的频段设计,结合地月空间需求进行优化。

该技术重点研究月球导航系统总体架构、月球导航服务体制、月球导航系统信号体制、导航电文设计及性能分析、月球导航系统时间基准建立及溯源、月球导航系统空间基准构建及转换、月球导航系统时空基准及服务体制验证试验等内容。

4) 星座智能自主管理与空间信息服务技术

地月通信时延长,“鹊桥”星座需具备自主运行和决策规划能力,亟需突破自主管理、故障监测和识别技术,实现对故障的在轨监测和自身健康维护。“鹊桥”星座距离地面远,仅依靠人工控制,往往无法实时捕获稍纵即逝的科学现象,亟需提高自主规划和决策能力,支撑平台自主运行、月面自主导航等自主能力。

该技术重点研究星座智能自主管理与空间信息服务总体架构、月轨超级计算和存储、月轨信息处理与

服务、自主任务规划和决策、基于人工智能的卫星健康管理、星座智能自主管理与空间信息服务验证系统等内容。

5) 多频段复用轻量化微波系统与体制设计技术

“鹊桥”星座系统需要同时支持X、Ka等频段,地月微波通信速率达到100 Mbit/s以上。而地月距离远、服务对象多,对通信系统提出了超远距离、高动态、自适应、多目标等需求。另一方面,受到重量、体积和布局的限制,若采用现有技术则微波系统重量增加60 kg以上、整星高度增加不小于550 mm,较难实现波束扫描,且现有技术难以满足超大口径Ka频段型面精度保持的要求,亟需研究构建多频段可复用轻量化微波系统。

该技术重点研究微波通信系统架构、微波通信体制、轻量化柔性天线高精度控制、大口径柔性天线展开、多频段复用相控阵共口径、系统性能测试和验证方法等内容。

6) 超远距离激光通信系统与体制设计技术

构建覆盖地月间、月轨间、月轨与月面间的激光骨干通信系统,是“鹊桥”星座实现地月空间高速互联的关键。45万km的地月超高速激光通信面临难题和挑战巨大,国内外尚未实现Gbit/s量级地月在轨试验。空间损耗增加20 dB,接收光信号微弱,要求高性能的检测,以保证链路性能;光传输延时将增大10倍,近地激光捕获策略不适用,造成捕跟难度大幅增加,需采用新的捕获策略。同时,激光通信还需解决可靠性、稳定性、寿命、重量、功耗等工程化的挑战。

该技术重点研究地月激光通信系统和体制总体方案、地月超远距离高速光调制解调、地月链路捕跟稳定、光束平稳传输、星载激光载荷小型化集成、地月激光链路半物理试验系统等内容。

7) 地月空间遥感体系设计技术

“鹊桥”星座需具备遥感功能,包括地月空间态势感知、地月空间环境监测和预报、月表动态监测等。地月空间态势感知是掌握地月空间态势变化、保障地月空间资产安全运行的前提。地月空间环境监测和预报能为卫星安全运行、轨道转移、延长寿命等提供保障。月表动态监测能够掌握月表自然、人为活动状态,为高效开发和利用月球资源奠定技术基础。但目前尚欠缺遥感功能的顶层架构、机制等设计,亟需开展地月空间遥感体系设计研究。

该技术重点研究地月空间遥感体系设计、地月空间新型探测体制、地月空间复杂轨道目标快速探测与跟踪预测、地月空间等离子体分析、地月空间微弱空

间磁场探测、地月空间星际尘埃探测、月表动态监测等内容。

8) 超大尺度复杂异构星座运营运控一体化技术

“鹊桥”星座具有多行星际空间尺度、多时间尺度布局、用户类型各异等特点,星间、星地交互模式复杂,需根据用户需求设计运营和运控方案。此外,深空环境复杂不确定性强,星座业务复杂多样,星座稳定、健康运行及高效服务需实现运营运控数据有效组织管理和可视化监测评估与量化分析,亟需开展超大尺度复杂异构星座运营运控一体化技术研究。

该技术重点研究月球和行星际网络运营范式与能力生成、复杂异构系统任务运行管理、面向星座运营运控的多源数据管理及应用、复杂异构星座服务稳健性提升的健康管理、地面分布式深空测量通信系统多体制融合、运营运控一体化原型系统构建与仿真验证等。

9) 高精度地月空间轨道确定技术

“鹊桥”星座本身的高精度定轨是为用户提供通信与高精度导航定位服务的前提。现有地月空间对平动点、环月大椭圆等轨道的百米级测定轨精度尚不能满足需求,且未来地面资源紧张,“鹊桥”星座需具备自主高精度轨道确定的方法和手段。另外,地月空间与近地空间有许多不同的特性,亟需针对地月空间开展高精度轨道确定技术攻关。

该技术重点研究高精度动力学与长期精确递推、地基地月空间精密定轨增强、星基/月基测量地月空间精密定轨、多源数据融合精密定轨与精度评估、地月空间高精度轨道确定仿真试验等内容。

9项关键技术覆盖了组网架构、轨道方案、测控方案、时空基准、运营运控等基础技术,这些基础技术服务于通信、导航、遥感、信息服务等不同需求,从而实现“鹊桥”星座系统的整体建设目标。

5 结束语

当前,各航天大国以及多边组织均高度重视月球通信导航系统建设、关键技术开发和试验,中国应抓紧开展“鹊桥”星座系统方案深化和关键技术攻关,积极推动以中国为主导的国际合作,提升国际地位。

本文根据地月空间通导遥应用需求,结合国内外发展态势,提出了中国“鹊桥”星座系统的发展设想,开展了方案设计,给出了三步走的发展步骤,并提出了有待突破的关键技术,为后续研究提供参考。在后续工作中,应当认识到国际形势变化和关键技术的难度带来的挑战,明确计划稳步推进建设,制定预案防范风险。

参考文献

- [1] WHITE HOUSE OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY. National cislunar science & technology strategy[EB/OL]. (2022-11) [2025-5-30]. https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/2023/TPs/Cislunar_Technical_Presentation_for_UNCOPUOS_-_Daniels_-_v2.pdf.
- [2] NASA. NASA's interplanetary internet, coming soon to a planet near you[EB/OL]. (2018-07-24) [2025-05-30]. <https://www.discovermagazine.com/nasas-interplanetary-internet-coming-soon-to-a-planet-near-you-1113>.
- [3] IOAG. The future lunar communications architecture[EB/OL]. (2022-01-31) [2025-07-30]. <https://ioag.org/documents/reports/>.
- [4] NASA. Moon to Mars architecture[EB/OL]. [2025-07-20]. <https://www.nasa.gov/MoonToMarsArchitecture>.
- [5] NASA. Moon to Mars architecture[EB/OL]. (2024-12-13). [2025-07-20]. <https://www.nasa.gov/moontomarsarchitecture-whitepapers/>.
- [6] NASA. LunaNet interoperability specification document: LN-IS V004[R]. USA:NASA, 2023.
- [7] NASA. Lunar Communications Relay and Navigation Systems (LCRNS) Lunar relay services Requirements Document (SRD) : 20250002698[R]. USA:NASA, 2022.
- [8] NASA. Lunar Communications Relay and Navigation Systems (LCRNS)[EB/OL]. (2025-07-02) [2025-08-01]. <https://esc.gsfc.nasa.gov/projects/LCRNS>.
- [9] NASA. Lunar Communications Relay and Navigation Systems (LCRNS)reference[R]. USA:NASA, 2025.
- [10] NASA. Successfully acquires GPS signals on Moon[EB/OL]. (2025-03-04) [2025-05-04]. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/nasa-successfully-acquires-gps-signals-on-moon>.
- [11] KHALIL J. NaviMoon project validates GNSS technology for future Moon missions[EB/OL]. (2024-11-22) (2025-04-30). <https://www.gpsworld.com/navimoon-project-validates-gnss-technology-for-future-moon-missions/>.
- [12] GRAYVER E, LEE D, MCDONALD E, et al. Testset for Cislunar communications and navigation[C]//Proceedings of 2025 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA:IEEE, 2025.
- [13] NASA. Lunar GNSS Receiver (LuGRE) missions and future moon navigation opportunities[EB/OL]. (2023-10-17) [2025-04-30]. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG-17>.
- [14] NASA. Moonlight.[EB/OL]. (2021-05-20) [2025-4-30]. https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Moonlight.
- [15] ESA. Lunar navigation plans: lunar Pathfinder & Moonlight[EB/OL]. (2022-09-26) [2025-04-30]. https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2022/ICG16/WG-B/ICG16_WG-B_05.pdf.
- [16] NASA. Moonlight: LCNS, and Lunar Pathfinder[EB/OL]. (2024-01-04) [2025-04-30]. https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2024/WG-B_Lunar_PNT_Jun24.
- [17] MURATA M, KOGA M, NAKAJIMA Y, et al. Lunar navigation satellite system: mission, system overview, and demonstration[C]//Proceedings of 39th International Communications Satellite Systems Conference. Stresa, Italy:IEEE, 2022.
- [18] JAXA. Japan Lunar Navigation Satellite System (LNSS) and its contribution towards lunar augmented navigation service[EB/OL]. (2024-01-05) [2025-04-30]. https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2024/WG-B_Lunar_PNT_Jun24.

- [19] CCSDS. CCSDS bundle protocol specification: 734.2-B-1[S]. Washington:CCSDS,2015.
- [20] CCSDS. Unified space data link protocol: 732.1-B-1[S]. Washington:CCSDS,2018.
- [21] CCSDS. AOS space data link protocol: 732.0-B-3[S]. Washington:CCSDS,2015.
- [22] CCSDS. TC space data link protocol: 232.0-B-3[S]. Washington:CCSDS,2015.
- [23] CCSDS. Optical communications coding and synchronization: 142.0-B-1[S]. Washington:CCSDS,2019.
- [24] CCSDS. RF and modulation systems-Part 1 Earth stations and spacecraft: 401.0-B-28[S]. Washington:CCSDS,2018.
- [25] CCSDS. Optical communications physical layer: 141.0-B-1[S]. Washington:CCSDS,2019.
- [26] CCSDS. CCSDS SOIS electronic data sheets and dictionary of terms for onboard devices and components: 870.0-G-0[S]. Washington:CCSDS,2017.
- [27] CCSDS. Spacecraft onboard interface services-specification for dictionary of terms for electronic data sheets for onboard components: 876.0-B-1[S]. Washington:CCSDS,2019.
- [28] LNIS. V005 LunaNet interoperability specification document[S]. Washington:LNIS,2023.
- [29] NASA. LunaNet signal-in-space recommended standard-augmented forward signal[EB/OL]. (2023-08-31) [2025-04-30]. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/09/lsis-afs-v1-draft-.pdf?emcr=33f92a>.
- [30] 于国斌,刘继忠,张立华. 搭建地月通信纽带的“嫦娥”四号中继星“鹊桥”[J]. 中国航天,2019(1):19-23.
- YU G B, LIU J Z, ZHANG L H. Queqiao relay satellite, a bridge between the Earth and the Moon[J]. Aerospace China, 2019(1): 19-23.
- [31] 周文艳,高博宇,董焜焜,等. “鹊桥”二号轨道与嫦娥六号任务匹配性设计和飞行实践[J]. 中国空间科学技术(中英文),2024(6):16-22.
- ZHOU W Y, GAO B Y, DONG T S, et al. Design and flight practice of the compatibility between Queqiao-2 orbit and Chang'e-6 mission [J]. Chinese Space Science and Technology, 2024(6): 16-22.
- [32] 徐进,王秋平,李耀,等. “鹊桥”二号中继通信载荷任务分析与设计[J]. 中国空间科学技术(中英文),2025,45(3):41-55.
- XU J, WANG Q P, LI Y, et al. Chinese space science and technology [J]. Chinese Space Science and Technology, 2025, 45(3): 41-55.

作者简介:

于登云(1961-),男,中国科学院院士、国际宇航科学院院士,中国探月工程(四期)总设计师,主要研究方向:空间飞行器系统工程等。

通信地址:北京市海淀区阜成路16号航天科技大厦(100048)

E-mail:yudyun@sina.com

电话:(010)68370292

何熊文(1982-),男,研究员,主要研究方向:天地一体化网络、航天器总体设计、航天器综合电子系统设计等。本文通信作者。

通信地址:北京市海淀区友谊路104号(100094)

E-mail:hexw501@hotmail.com

电话:(010)68370292

Reflections on Development of Queqiao Communication, Navigation, and Remote Sensing Integrated Constellation System

YU Dengyun¹, HE Xiongwen², LI Xianqiang², JIA Yuchen², CHEN Chaoji², WANG Dan²

(1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100037, China;

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

Abstract: First, the development trends of lunar communication, navigation and remote sensing (CNR) systems in the United States, Russia, Europe, Japan, and multilateral organizations were investigated, deriving insights for future development. Next, the current status of China's lunar CNR system was analyzed and development needs from multiple perspectives, including supporting major engineering projects, enabling cis-lunar economic development, contributing to building China into a space power, safeguarding space assets, and promoting deep space international cooperation, were examined. It was proposed that China should accelerate the detailed design and key technology development of the Queqiao Communication, Navigation, and Remote Sensing Integrated Constellation System (QCNRSICS), actively advance international cooperation under Chinese leadership, and enhance its global standing. On this basis, a development concept for China's QCNRSICS was proposed, covering construction objectives, overall architecture and development phases. Finally, nine critical technologies urgently requiring resolution for future constellation construction were identified.

Keywords: lunar; communication, navigation, and remote sensing; satellite constellation

Highlights:

- The design of communication, navigation, remote sensing and information service integrated constellation system was proposed.
- The development ideas for major projects such as unmanned lunar exploration, manned lunar exploration and international cooperation was proposed.
- Nine key technologies and research approaches were proposed.

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:宋利辉]