

# 关于地月导航系统发展的思考

郭树人<sup>1,2</sup>, 李 罡<sup>1,2</sup>, 董 明<sup>1,2</sup>, 王慧林<sup>3</sup>, 杨 军<sup>3</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 智能空间信息国家级重点实验室, 北京 100094;

3. 中国卫星导航系统管理办公室, 北京 100034)

**摘 要:** 重点分析了全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 地月空间导航服务、月球卫星导航以及月球时空基准的发展现状及方向, 提出了面向地月空间服务的近地空间、地月转移、近月空间导航系统以及月球时空基准发展构想, 并提出了加强地月导航系统关键技术和体系化在轨验证、实现地月导航系统互联及时空基准溯源统一、加强导航和通信等多功能一体化设计、“先区域、后全月”分步建立月球空间基础设施的发展建议。

**关键词:** 地月空间; 月球探测; 导航定位授时; 时空基准; 导航通信融合

**中图分类号:** P208

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2025)04-0367-10

**DOI:** 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250074

**引用格式:** 郭树人, 李罡, 董明, 等. 关于地月导航系统发展的思考[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12 (4): 367-376.

**Reference format:** GUO S R, LI G, DONG M, et al. Reflections on development of cislunar satellite navigation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12 (4): 367-376.

## 引 言

地月空间是进出深空的门户, 具有巨大的科技、经济价值, 世界大国均将地月空间能力作为重大战略发展方向。随着月球南极水冰等资源探测的深入, 掀起了新一轮月球探测、开发利用的热潮<sup>[1-2]</sup>。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提出了“阿尔忒弥斯”(Artemis) 计划重返月球, 中国明确了月球无人探测、载人登月、科研站建设、资源开发利用等任务, 欧盟、俄罗斯、日本、印度等也提出一系列相关任务, 深空相关任务进入了快速发展阶段<sup>[3-14]</sup>。

随着地月空间任务数量大幅增长, 以及航天器巡航、掠飞、绕飞、下降着陆及月表有人、无人活动复杂度的提升, 对多任务高实时、高精度、高自主、低成本的导航手段提出了迫切需求。传统深空网手段越来越难以满足用户需求, 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的空间服务域 (Space Service Volume, SSV) 技术、星间链路技术, 以及月球卫星综合导航系统属于具有一定技术基础、可快速形成能力的可用类技术, 是当前地月空间导航技术发展的重要方向<sup>[15]</sup>。特别

是构建月球综合导航系统成为发展焦点和热点, 美国、欧盟、日本正积极发展月球导航和通信卫星系统, 中国也提出了建设月球通导遥一体化星座设想<sup>[16-23]</sup>。

地月空间任务空间跨度大、实施时间长, 通常覆盖近地空间、地月转移、近月空间的十余个任务阶段, 各任务阶段需要采用不同的卫星导航系统进行导航保障。近地空间、地月转移段主要依赖 GNSS 进行保障, 近月空间主要依赖月球卫星导航系统进行保障。由于地球、月球的重量分布、运行特征、重力场等差异较大, 各自时空基准也不相同。为确保地月空间任务精准实施, 地月导航系统的时空基准溯源和统一极为重要。

当前针对深空导航技术发展, 国内外大量文献对技术手段、发展路线、发展方向进行分析研究, 本文主要聚焦地月卫星导航系统建设发展进行研究, 并给出发展思路。针对地月空间任务导航保障需求, 在梳理近地空间、地月转移、近月空间卫星导航及地月时空基准的基础上, 重点就提升 GNSS 导航服务能力、构建综合卫星导航系统、建设月球时空基准等方面, 提出了发展构想和意见建议。

## 1 地月导航系统概览

地月导航系统主要利用 GNSS、月球卫星系统,覆盖近地空间、地月转移和近月空间,面向各类用户提供导航服务。覆盖区域如此划分主要是考虑三段导航需求与技术路线的差异性。地月导航系统其架构组成如图 1 所示。

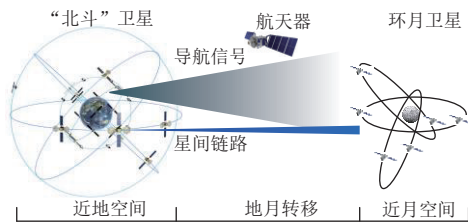


图1 地月导航系统架构示意图

Fig.1 Diagram of the cislunar satellite navigation system architecture

### 1.1 近地空间导航

近地空间导航用户规模大,可用的地面资源多。技术上主要利用地基测控网、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、Galileo、全球卫星导航系统(GLObal NAVigation Satellite System, GLONASS)等为各类用户提供高精度导航定位等服务。与GPS等国际卫星导航系统相比,在星间链路、天基时空基准、通导融合、星座运营等方面独具特色。系统空间段标称星座为3颗地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星+3颗倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星+24颗中圆地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星,共30颗卫星。卫星上部署了频率稳定度为 $10^{-14}$ 量级/d的高精度被动氢钟。卫星均配置了Ka频段星间链路载荷,在国内建立地面站的情况下,通过卫星之间的星间链路相互测量和数据传输,实现了全球星座的运行管理、全球高精度导航定位,并实现了全球随遇接入的短报文、全球返向链路确认的国际搜救等特色服务,以及基于星间链路远至地月空间的航天器测定轨服务<sup>[24-28]</sup>。此外,在地面系统故障等不可用情况下,具备一定的星座自主维持能力,可大幅降低对地面系统的依赖。系统支持优于10 m的全球定位精度、优于10 ns的全球授时精度。

### 1.2 地月转移段导航

在地月转移段GNSS无法实现连续的导航覆盖,但此阶段的需求主要是航天器测定轨,在其动力学约束下可利用GNSS的SSV服务满足这一需求。特别是,系统还具备Ka频段星间链路,利用其波束指向调整精准、信号能量聚焦的优势,可为更远距离的地

月空间航天器用户提供测定轨、时间同步服务。

### 1.3 近月空间导航

在近月空间,GNSS信号已基本不能覆盖,需构建覆盖月面和近月空间的导航系统来满足导航定位等需求。该系统技术架构可参考GNSS。

月球导航卫星向月表播发导航信号,实现对月表特定区域4重以上的覆盖,提供导航服务。针对地月空间任务操控和载人活动安全性需求,部分卫星配置通信中继、空间环境监测等载荷。为提升月表的导航定位能力,可在月面部署导航增强综合信标以提升区域增强能力。

### 1.4 地月时空基准

时空基准是实现地月空间任务导航的基础。由于地球、月球在重量形状、空间位置、运行轨道、自转周期、引力场等方面的差异,近地空间、近月空间的时空基准各不相同,可通过溯源转换实现统一。地球协调时间基准目前以协调世界时作为公认的参考时间,对于月球时间基准是采用月面/环月轨道原子时还是采用月球自转的协调月球时目前尚未达成共识,但都采用原子钟的实现方式,可通过远程高精度时间比对实现地球与月球时间基准的溯源。地球空间基准以国际地球参考框架为基本参考,月球空间基准以国际月球参考系为代表,通过坐标转换与地球J2000.0惯性坐标系相连接,在此基础上通过惯性系与地固系的转换可建立与国际地球参考框架的连接。

## 2 地月导航系统发展现状分析

### 2.1 GNSS地月空间导航

在地月轨道转移阶段,航天器对导航的需求主要来自轨道确定以确保航天器按照设计的轨道飞行,目前主要利用地面深空网进行轨道确定保障。随着深空在轨任务的增加,地面深空网能力越来越难以满足不断增长的深空任务保障需求,急需发展自主定轨手段<sup>[29-30]</sup>。利用导航信号以及星间链路可实现更高精度的轨道确定和时间同步,也是当前重要的发展方向。

#### 2.1.1 基于导航信号的SSV服务

基于导航信号的SSV服务主要利用导航信号被地球遮挡之外的主瓣和副瓣为地月空间航天器提供定轨服务。GPS、Galileo、GLONASS均具备这一能力。以美国为主开展了导航信号接收和定轨在轨试验。美国“磁层多尺度”(Magnetospheric Multiscale Mission, MMS)任务卫星通过接收GPS卫星的导航信号,在距离地球16万km处达到约50 m的定位精度,在7.6万km处达到约12m的定位精度<sup>[31-32]</sup>。美国“蓝



### 2.2.2 月球通信中继与导航系统

美于 2021 年提出建设“月球通信中继与导航系统”(Lunar Communications Relay and Navigation System, LCRNS), 旨在构建可互操作的月球通信和导航空间基础设施<sup>[42-43]</sup>。目前计划未来 5 年分 3 个阶段实现初始运行能力: 第 1 阶段, 在南极地区至少部署 1 颗卫星广播导航信号; 第 2 阶段, 在南极地区至少部署 2 颗卫星播发导航信号; 第 3 阶段, 至少部署 4 颗卫星播发导航信号, 并满足几何精度因子要求。将服务于月球南极 75°~90°、空间 200 km 高度的空域, 每个月球日几何精度因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP) <6 的时间占比为 40%。在卫星广播导航信号的基础上, 支持与用户间的双向相干距离、多普勒测量, 通过短信息进行星座精密星历等信息传输。LCRNS 系统示意如图 3 所示<sup>[43]</sup>。

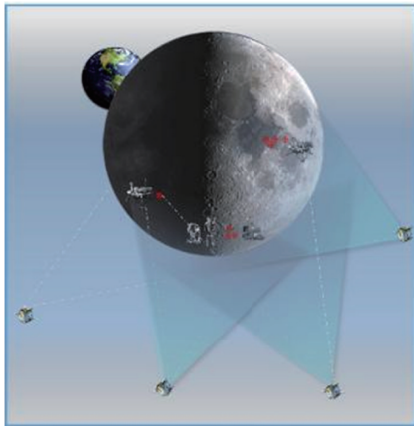


图3 LCRNS 系统示意图<sup>[43]</sup>  
Fig.3 Diagram of LCRNS<sup>[43]</sup>

### 2.2.3 月球通信与导航系统

欧盟于 2021 年发布“月光”(Moonlight) 计划, 目标是在 2030 年部署“月球共享通信与导航系统”(Lunar Communication and Navigation System, LCNS) 基础设施<sup>[44-46]</sup>。第一阶段, 计划 2026 年发射首颗“月球探路者”(Lunar Pathfinder) 试验卫星, 开展 GNSS、激光和 X 波段测距定轨等导航相关技术试验。第二阶段, 计划 2030 年构建“月光”月球通信与导航系统, 发射 5 颗偏心率冻结轨道 (Elliptical Lunar Frozen Orbit, ELFO) 导航卫星, 每天在月球南极提供至少 15 h 连续导航服务, 特定条件下二维位置精度 ( $3\sigma$ ) < 10 m (95%)。第三阶段, 计划于 2031 年构建“月面导航”系统, 在月面部署导航综合参考站, 提升月面导航定位精度至亚米级, 为月球参考框架和时间参考实现奠定基础。LCNS 系统星座示意如图 4 所示<sup>[44]</sup>。

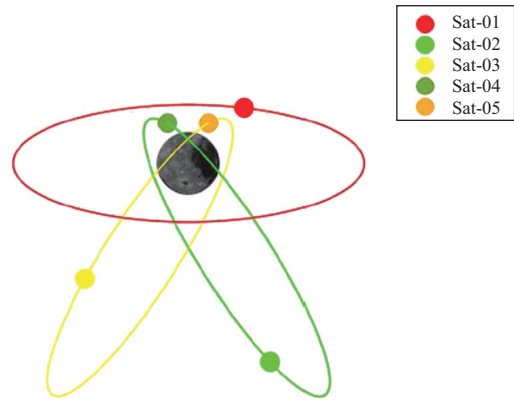


图4 LCNS 系统星座示意图  
Fig.4 Constellation of LCNS

### 2.2.4 月球导航卫星系统

日本提出了“月球导航卫星系统”(Lunar Navigation Satellite System, LNSS), 计划从 2028 年开始部署由 8 颗 ELFO 卫星构成的导航星座<sup>[47]</sup>。所有卫星均配置导航载荷, 其中 4 颗卫星增配激光和通信载荷, 向月球南极地区提供导航定位、通信等多样化服务。该系统利用 GNSS 弱信号实现月球 ELFO 卫星的自主定轨。初始运行阶段, 空间信号误差 (Signal-In-Space Error, SISE) 优于 20 m (均方根); 运行服务阶段, 空间信号误差优于 10 m (均方根), 在月球南极地区移动用户 3D 定位精度优于 20 m、2D 定位精度优于 10 m。LNSS 系统星座示意如图 5 所示<sup>[47]</sup>。

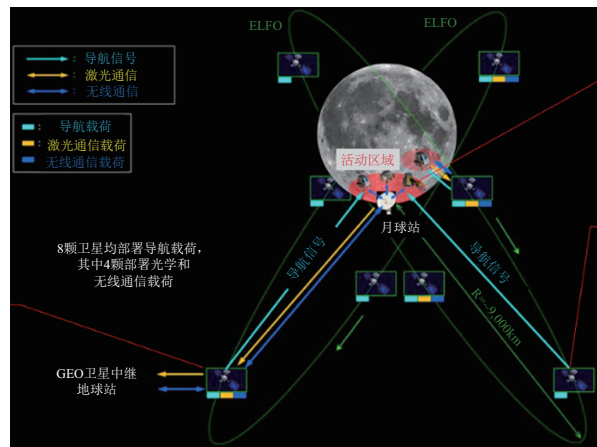


图5 LNSS 系统示意图<sup>[47]</sup>  
Fig.5 Diagram of LNSS<sup>[47]</sup>

### 2.3 月球时空基准

导航服务向近月空间延伸, 需构建月球时空基准, 并与地球时空基准建立关联, 以实现溯源、同步与对齐。

#### 2.3.1 时间基准

不同于地球时间基准, 月球时间基准是基于月球

自转周期和引力场特性建立的独立时间系统。由于月球重力较小,按照相对论原理,月球表面时间会比地球表面每天快约 $58.7\ \mu\text{s}$ ,并且由于自转不规则性带来额外的周期性和随机性误差。

为支持地月空间任务所需的数据传输、通信、导航保障和其它规模化月球活动,长期连续依赖地面时间保障,存在代价高、成本大、覆盖性不足等问题。构建月球时间基准是建设地月导航系统必须解决的基础性问题,也是确保地月导航系统内部时间统一和高精度定位授时的关键。

美国于2024年4月提出,月球时间标准化的实施原则主要包括4个方面<sup>[48]</sup>:应当与地球时间基准保持可溯源性,满足精密导航定位及科学研究的精度需求,在与地球失去联系时仍能独立正常运行,未来具备扩展至月球以外天体的能力。概括起来即可溯源性、精确性、稳健性和可扩展性。

### 2.3.2 空间基准

月球卫星导航系统的空间基准主要是月球参考系及相应的月面控制网。早在“阿波罗”(Apollo)登月时代,国际天文协会(International Astronomical Union, IAU)就建立了IAU 1971月球参考系。目前最新的国际月球参考系版本为IAU 2000平赤道坐标系,以月球质心为原点,Z轴指向J2000.0历元月球平赤道北极,该方向消除了月球赤道面物理天平动的影响;X轴指向平春分点方向,该方向由月球轨道参数升交点黄经定义,与地球J2000.0坐标系形成关联。面向绕月航天器精密定轨,中国“嫦娥工程”及NASA的LRO任务均使用月固坐标系(主轴系统),该坐标系与月球平赤道坐标系的转换关系涉及月球定向参数、天平动模型等。IAU工作组推荐使用与美国DE421一致的月球天平动参数,中国在“嫦娥五号”之后的任务与国际保持了一致。

月球空间基准当前主要工作集中在数据融合处理、轨道交会对接等任务的空间基准统一、时变坐标系和控制网的构建等。

通过空间基准转换,“嫦娥四号”与NASA/LRO数据实现融合,使月背着陆点坐标精度提升至 $5\ \text{m}$ <sup>[49]</sup>。2024年中美欧联合发布了月球背面坐标系连接方案,实现“玉兔二号”与NASA/LRO数据的 $10\ \text{cm}$ 级定位一致性<sup>[50]</sup>。

围绕坐标系和控制网的构建,印度“月船3号”(Chandrayaan-3)增加了新的月面激光反射器,提高了月球控制网的覆盖性<sup>[51]</sup>。中国学者利用卷积神经网络分析月球重力场、地形高程等多源数据,动态调整

控制网节点权重,定位误差降低至 $3\ \text{m}$ <sup>[52]</sup>。美国马普实验室研究“重力回溯及内部结构实验室”(Gravity Recovery And Interior Laboratory, GRAIL)二期数据,分析了月球幔层不均匀性对坐标系稳定性的影响,为时变坐标系研究提供理论支撑<sup>[53]</sup>。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)构建了月球数字孪生平台,融合月面地形、重力场与温度场数据,实现空间基准数字化,支持未来月面规模化活动<sup>[54]</sup>。

## 2.4 发展趋势及关键技术

### 2.4.1 GNSS地月空间导航方面

优化导航信号的主瓣、旁瓣特性,增强导航终端对超远距离、弱信号的接收性能,可提升地月空间的SSV服务能力。关键技术包括面向地月空间的导航信号设计、宽主瓣导航信号实现技术、超远距离弱信号导航技术等。

进一步加强基于星间链路的定轨方法在轨验证以及自主定轨算法优化、精化。此外,由于激光星间链路波束更窄、能量更聚焦,更有利于地月空间超远距离测量和数据传输,可全面提升地月空间定轨和时间同步能力。关键技术包括近地、地月空间卫星不同场景下星间链路导航技术,超远距离、小型化激光星间链路实现技术、快速稳定捕获及高精度测量等技术。

### 2.4.2 月球卫星导航系统方面

结合月球各类任务需求以及工程建设代价,应先期构建面向月球区域服务的月球卫星导航综合系统。在月球区域星座优化、导航通信等多功能一体化、高精度轨道和钟差确定、“北斗”时空基准溯源与统一等方面加强研究。关键技术包括地月频率一体化设计、多功能导航综合星座设计、月球增强导航信号体制设计、高精度轨道与钟差确定、月球星座运行管理技术等。

### 2.4.3 月球时空基准方面

考虑到持续开展月球探测和未来月面活动的需求,重点在月球参考系的精化、月球空间基准高精度转换、月面控制网加密与精化等方面加大投入力度。关键技术包括高阶次重力场模型解算、高精度月球历表及天平动参数解算、多源异构测量数据处理技术、高精度坐标转换技术等。

应当结合深空探测、月球探测、载人登月等任务进行,围绕月球导航、通信和月面任务时间同步需求,自主构建月球时间基准。关键技术包括月球时间基准建立技术、高精度月球时间基准传递技术、地月高精度时间溯源技术、相对论影响误差建模等。

### 3 发展建议

中国已建成了覆盖全球的“北斗”卫星导航系统,是国家重大空间时空基础设施。将建设以下一代“北斗”为核心的国家综合导航定位授时体系,地月空间是导航能力拓展的重要方向。针对地月空间任务需求和特点,提出如下地月导航系统的发展构想及建议。

#### 3.1 发展构想

##### 3.1.1 提升“北斗”卫星导航能力

面向地月空间导航需求,下一代“北斗”系统应持续提升SSV、星间链路服务能力。SSV方面,应持续优化导航信号主瓣及旁瓣设计,以支持更远的地月空间用户使用。星间链路方面,进一步优化提升星间链路随遇接入能力,并开展面向超远距离的激光星间链路针对性设计。

##### 3.1.2 构建地月转移段卫星导航系统

在利用GNSS卫星导航信号提供SSV服务的基础上,进一步利用“北斗”星间链路为地月转移段航天器提供定轨、时间同步服务。

此外,L1、L2、L3、L4、L5平动点在限制性三体中相对地球、月球静止,可在其轨道长期驻留而几乎不需要维持,部分平动点可对地月转移段通视。在L1等平动点部署导航等多功能卫星,利用与“北斗”卫星相同的星间链路体制,为地月转移航天器用户提供定轨、时间同步等服务,有利于增加观测几何、提升定轨等服务效率。

##### 3.1.3 建设近月空间卫星导航系统

主要构建覆盖近月空间的导航等多功能一体化月球卫星星座系统,实现对月表的4重以上覆盖,提供导航定位授时服务。

考虑到当前月球任务主要聚焦区域、具有稀疏性等特点,月球卫星星座可采用分阶段部署思路,先期可部署月球区域星座,后续逐步扩展至月球全月星座。近月空间NRHO、ELFO、DRO轨道均具有轨道稳定性好、低能入轨代价小等优点,其中NRHO对月球南极覆盖性好、对地球持续可见,ELFO轨道对月球南极覆盖时间长,DRO轨道对月球赤道覆盖性好。月球南极主要采用NRHO、ELFO轨道卫星构建区域星座,月球赤道主要采用DRO卫星构建区域星座,根据任务需要扩展构建全月星座。

月球星座卫星在配置导航播发载荷的基础上,还需配置高精度原子钟载荷和星间链路载荷。根据月球任务需求,在部分卫星上配置通信、搜救、环境监测

等载荷。

月球星座系统的业务运行由地面星间链路运行管理系统实施,利用“北斗”卫星的星间链路对部分月球卫星进行高精度轨道确定和时间同步,进一步利用月球卫星之间的星间链路进行相互测量比对,实现全月卫星星座的高精度轨道确定和时间同步。此外,为提升月球卫星星座系统运行效率、降低维护代价,支持一定的基于星间链路的自主运行能力。

为进一步提升月面局域导航定位等性能,可在月面部署综合导航增强站,生成差分等导航增强信息,通过月球卫星或月面通信网络进行播发。

##### 3.1.4 构建月球时空基准

###### 1) 时间基准

考虑到月球时间基准建设的复杂度,月球时间基准可采用分阶段部署的思路,先期实现天基时间基准,后续再实现月面时间基准。

先期依托月球卫星星座系统构建,利用卫星部署的高精度原子钟,通过星间链路双向时频比对,构建月球天基时间基准,利用卫星播发的导航信号面向近月空间用户提供授时服务。进一步利用星间链路实现月球卫星与“北斗”卫星之间的双向时频比对,实现月球时间基准与“北斗”时间基准的溯源,进一步可实现与地球时间基准的溯源统一。

后续依托月面综合导航增强站等基础设施建设,在月面部署高精度原子钟组以及电源等基础设备,构建月面时间基准。配套建设月面有线或无线链路,面向月表用户提供授时服务,并配套建设与月球卫星进行时间双向比对的月面终端,通过月球卫星实现与“北斗”时间基准的溯源,进一步实现与地球时间基准的溯源统一。

###### 2) 空间基准

在全月重要点位部署激光反射器,自主建立“月面激光测量为主、遥感图形观测为辅”的综合控制网,精化月球历表位置以及天平动自转等参数,自主构建月球空间基准。

#### 3.2 建议

1) 当前加强地月导航关键技术研究 and 体系化在轨验证,支撑地月导航系统建设

地月转移及近月空间存在三体影响大、轨道混沌,信号传播距离远、接收信号弱,数据传输时延大、实时测控难度大,月球导航星座难以全时对地、运行维护复杂等特点。在星座优化设计、频率地月统筹、轨道确定与时间同步、导航参数表达、月球时空基准建立与精化、智能化运行管理等方面,建议持续

开展深化研究。此外,应加强下一代“北斗”星间链路、SSV服务能力提升设计,以更好地满足地月空间用户导航需求。建议当前结合地月空间相关任务进行载荷搭载,开展体系化的在轨飞行试验验证,为地月导航系统建设奠定技术基础。

2) 实现地月导航系统间互联互通,确保地月空间基准统一、时间基准溯源

地月空间任务阶段多、实施时间长。以“嫦娥五号”任务为例,需经历地月转移、近月制动、环月飞行、月面着陆、月面工作、月面上升、交会对接、环月等待、月地转移等11个任务阶段,各阶段任务实施均需地面系统支持。由于月球与地球重力场、轨道运行的不同,使得两者在时空基准方面存在差异,地月时空基准溯源和统一成为月球任务精准实施的关键。“北斗”系统已建立了覆盖全球的高精度时空基准,通过SSV、星间链路和月球卫星导航系统互联,可为时空基准溯源统一提供基础手段。此外,星间链路还具备一定的双向数据传输能力,可提供应急测控支持。

3) 加强导航、通信等多功能一体化设计,提升月球空间基础设施建设效益

地月空间任务具有高复杂性、高安全性特征,除需要通信、导航、授时等基本保障外,航天员登月等活动还需高能粒子监测预警、应急搜救等多功能支持。考虑到地月空间任务的稀疏性,多样化功能保障需求可在月球导航星座不同卫星部署差异化载荷予以满足。此外,基于月球星座卫星配置的高精度原子钟、星间链路等载荷,开展星座卫星间相互测量比对和数据传输,进而实现月球星座自主维持、导航参数自主生成、时空基准自主建立,可大幅降低星座建设成本、运行维护代价,全面提升月球空间基础设施智能化水平。

4) 后续根据地月空间任务需求,“先区域、后全月”分步建立地月空间基础设施

月球南极水冰等资源的深入探索,为月球科研站建设、人类长期驻留、月球资源开采及利用提供了基础条件,当前国内外月球长期任务均主要聚焦月球区域。随着月球多样化任务数量大幅提升,航天器交汇对接、低轨环月飞行、下降着陆以及月面活动,对提供高自主、高实时、高可靠、低成本的导航等保障需求迫切。环月ELFO等具有南极覆盖性好、轨道维持难度小、对地球可见时间长等特点,具有建设月球南极区域卫星导航系统的优势。环月DRO等具有全月覆盖性好、易于轨道维持等特点,为后续月球区域星座向全月星座拓展提供了技术途径。建议在下一代“北斗”系统按计划开展升级换代、提升地月空间服

务能力的基础上,根据地月空间任务导航保障需求逐步建设空间基础设施。

## 4 结束语

地月空间各类重大任务均对地月空间多任务高实时、高精度、高自主的导航保障提出了明确需求。当前近地空间GNSS卫星导航系统具备一定的地月空间导航能力,但针对近月空间航天器一系列复杂操控、月表有人及无人高效活动存在较大差距,急需提升GNSS面向地月空间服务能力、发展地月平动点及月球卫星导航系统。可充分借鉴中国“北斗”卫星导航系统发展技术基础,根据任务需求分步实施,逐步构建互联互通、时空基准统一溯源、导航通信等多功能一体的地月空间卫星导航系统,可为地月空间任务规模化、常态化提供高效的导航等综合保障,也为中国后续地月空间卫星导航一体化建设发展提供支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 魏勇,林宏磊,何飞,等. 深空探测科技制高点上的新焦点:月球水资源[J]. 中国科学院院刊,2024,39(5):899-906.  
WEI Y, LIN H L, HE F, et al. et al. New frontier in race far deep space exploration: lunar water resources[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 899-906.
- [2] 王超,张晓静,姚伟. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 241-247.  
WANG C, ZHANG X J, YAO W. Reseach prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 241-247.
- [3] SMITH M, CRAIG D, HERRMANN N, et al. The Artemis program: an overview of NASA's activities to return humans to the Moon[C]// Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2020.
- [4] GIORDANO P, GRENIER A, ZOCCARATO P, et al. Moonlight navigation service-how to land on peaks of eternal light[C]// Proceedings of the 72nd International Astronautical Congress. Dubai: United Arab Emirates, 2021.
- [5] FLETCHER L N, CAVALIÉ T, GRASSI D, et al. Jupiter science enabled by ESA's Jupiter icy moons explorer[J]. Space Science Reviews, 2023, 219(7): 53.
- [6] 张扬眉. 2023年国外深空探测领域发展综述[J]. 国际太空, 2024(3): 11-15.  
ZHANG Y M. A summary of the development of deep space exploration abroad in 2023[J]. Space International, 2024(3): 11-15.
- [7] 于登云,马继楠. 中国深空探测进展与展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(1): 17-27.  
YU D Y, MA J N. Progress and prospect of deep space exploration in China[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(1): 17-27.
- [8] 任筱强,吴伟仁,王洪雨,等. 月球探测发展与关键技术展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(2): 99-109.  
REN X Q, WU W R, WANG H Y, et al. Prospects of the lunar exploration development and key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(2): 99-109.

- [9] 裴照宇,刘继忠,王倩,等.月球探测进展与国际月球科研站[J].科学通报,2020,65(24):2577-2586.  
PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24):2577-2586.
- [10] 王赤,林杨挺,裴照宇,等.月球科研站的关键科学问题[J].中国科学基金,2022,36(6):830-840.  
WNAG C, LIN Y T, PEI Z Y, et al. Key scientific questions related to the lunar research station[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6):830-840.
- [11] 周诚,高玉月,覃文波,等.月球基地建设的发展趋势、目标体系与政策路径[J].科学通报,2025,70(21):3460-3469.  
ZHOU C, GAO Y Y, TAN W B, et al. The development trend, objectives, and policy path of lunar base construction[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(21):3460-3469.
- [12] 张崇峰,许惟扬,王燕.载人月球探测月面活动发展设想[J].上海航天(中英文),2021,38(3):109-118.  
ZHANG C F, XU W Y, WANG Y. Development ideas of manned lunar surface exploration[J]. Aerospace Shanghai(Chinese & English), 2021, 38(3):109-118.
- [13] 刘建忠,李雄耀,朱凯,等.月球原位资源利用及关键科学与技术问题[J].中国科学基金,2022,36(6):907-918.  
LIU J Z, LIU X Y, ZHU K, et al. Key science and technology issues of lunar in situ resource utilization[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6):907-918.
- [14] 裴照宇,王琼.国际月球科研站资源利用发展路线战略构想[J].宇航学报,2024,45(4):625-637.  
PEI ZH Y, WNAG Q. Strategic concept of resource utilization development route of the international lunar research station[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(4):625-637.
- [15] 李罡,解放,吴一凡,等.深空导航技术发展展望[J].测绘学报,2025,54(3):397-409.  
LI G, XIE F, WU Y F, et al. Prospects for the development of deep space navigation technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2025, 54(3):397-409.
- [16] 张云,钱九悦,洪中华,等.欧美月球GNSS规划现状分析综述[J].导航定位与授时,2024,11(3):1-15.  
ZHANG Y, QIAN J Y, HONG Z H, et al. Review of lunar GNSS planning in Europe and America[J]. Navigation positioning and timing, 2024, 11(3):1-15.
- [17] 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(6):88-94.  
WANG S. Research on Development of foreign cislunar space communications and navigation service system[J]. Spacecraft Engineering, 2024, 33(6):88-94.
- [18] 王晓伟,詹亚锋,谢浩然,等.通导一体化环月星座设计初探[J].系统工程与电子技术,2023,45(1):241-249.  
WANG X W, ZHAN Y F, XIE H R, et al. A preliminary study on the design of constellation orbiting the Moon with the communication and navigation integration[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1):241-249.
- [19] 陈诗雨,倪彦硕,彭兢.近月空间星座轨道设计方法[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(3):15-29.  
CHEN S Y, NI Y S, PENG J. Orbit design method of near-lunar space constellation[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):15-29.
- [20] 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(中英文),2024,44(3):1-14.  
YANG M F, PENG J, LI J H, et al. Architecture and development envision of cislunar space infrastructure[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):1-14.
- [21] BHAMIDIPATI S, MINA T, SANCHEZ A, et al. Satellite constellation design for a lunar navigation and communication system[EB/OL]. (2023-09-01)[2025-07-24]. <https://navi.ion.org/content/70/4/navi.613>.
- [22] CHEN G, WU S, YOU J, et al. Communication-navigation integrated satellite constellation for lunar exploration: frozen-orbit-based HyInc walker[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(5):1436-1452.
- [23] GRENIER A, GIORDANO P, BUCCI L, et al. Positioning and velocity performance levels for a lunar lander using a dedicated lunar communication and navigation system[J]. Navigation: Journal of the Institute of Navigation, 2022, 69(2):513.
- [24] 杨长风.进入全球服务新时代的北斗系统[J].卫星应用,2022(4):8-9.  
YANG C F. BeiDou system entering a new era of global service[J]. Satellite Application, 2022(4):8-9.
- [25] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821.  
GUO S R, CAI H L, MENG Y N, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7):810-821.
- [26] LI G, GUO S R, GONG W B, et al. The communication and measurement architecture of BDS-3 global operations and services[J]. Discover Applied Sciences, 2024, 6(4):180.
- [27] LI G, GUO S R, LV J, et al. Introduction to global short message communication service of BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Advances in Space Research, 2021, 67(5):1701-1708.
- [28] LI G, GUO S R, HE Z H, et al. BDS-3 SAR service and initial performance[J]. GPS Solutions, 2021, 25(4):134.
- [29] 黄逸丹,黄勇,樊敏,等.基于地基测量数据的月球DRO轨道定轨精度分析[J].深空探测学报(中英文),2024,11(4):405-413.  
HUANG Y D, HUANG Y, FAN M, et al. Analysis of cislunar DRO orbit determination accuracy using earth-based simulated observations[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4):405-413.
- [30] ALESSI N, CAINI C, DE COLA T, et al. DTN performance in complex deep-space networks[C]//Proceedings of 2018 9th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 15th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). [S. l.]: IEEE, 2018.
- [31] WINTERNITZ L B, BAMFORD W A, PRICE S R. New high-altitude GPS navigation results from the magnetospheric multiscale spacecraft and simulations at Lunar distances[C]//Proceedings of the 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, Oregon: Institute of Navigation, 2017.
- [32] WINTERNITZ L B, BAMFORD W A, PRICE S R, et al. Global positioning system navigation above 76,000 km for NASA's magnetospheric multiscale mission[J]. Navigation: Journal of the Institute of Navigation, 2017, 64(2):289-300.
- [33] FAN M, HU X G, DONG G L, et al. Orbit improvement for Chang'E-5T lunar returning probe with GNSS technique[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(11):2473-2482.
- [34] 孟轶男,樊士伟,李罡,等.利用GNSS星间链路对中高轨航天器测

- 定轨的可行性研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(4): 445-449.
- MENG Y N, FAN S W, LI G, et al. Orbit determination of medium-high earth orbital satellite using GNSS crosslink ranging observations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(4): 445-449.
- [35] 曹建峰, 满海钧, 王文彬, 等. 地月空间探测器星间链路定轨能力分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 637-646.
- CAO J F, MAN H J, WANG W, et al. A simulation study of orbit determination capability for cislunar space probes using ISL data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(4): 637-646.
- [36] 樊士伟, 孟轶男, 高为广, 等. 航天器测定轨技术发展综述[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(6): 549-554.
- FAN S W, MENG Y N, GAO W G, et al. Summarizing on the development of spacecraft orbit determination technology[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(6): 549-554.
- [37] HESAR S G, PARKER J S, LEONARD J M, et al. Lunar far side surface navigation using linked autonomous interplanetary satellite orbit navigation (LiAISON)[J]. Acta astronautica, 2015, 117: 116-129.
- [38] THOMPSON M R, FORSMAN A, CHIKINE S, et al. Cislunar navigation technology demonstrations on the CAPSTONE mission[C]// Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Long Beach, California: Institute of Navigation, 2022.
- [39] TURAN E, SPERETTA S, GILL E. Autonomous navigation performance of cislunar orbits considering high crosslink measurement errors[C]// Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). [S. l.]: IEEE, 2022.
- [40] GARDNER T, CHEETHAM B, BOLLIGER M, et al. CAPSTONE: an ongoing demonstration of navigation and autonomy technologies in the cislunar domain[C]// Proceedings of 38th Annual Small Satellite Conference. Utah State: Utah State University Press, 2024.
- [41] 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. [S. l.]: IEEE, 2020.
- [42] GRAMLING C J. Plans for NASA contributions to position, navigation, and timing at the Moon[C]// Proceedings of Institute of Navigation Joint Navigation Conference. [S. l.]: Institute of Navigation, 2022.
- [43] CRENSHAW J, CALDWELL E. Overview of LCRNS Position, Navigation and Time (PNT) Services[C]// Proceedings of Joint ICG-IOAG Multilateral Cislunar PNT Workshop. [S. l.]: NASA, 2025.
- [44] KAPOOR R, SABATINI R, GARDI A. Analysis of small satellite-based lunar navigation service availability and accuracy on the surface and in low orbit[C]// Proceedings of 2024 11th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). [S. l.]: IEEE, 2024.
- [45] MANGIALARDO M, JURADO M M, HAGAN D, et al. Autonomous navigation for Moon missions: a realistic performance assessment, considering Earth GNSS signals and LCNS constellation[C]// Proceedings of 2022 10th Workshop on Satellite Navigation Technology (NAVITEC). [S. l.]: IEEE, 2022.
- [46] PÖHLMANN R, STAUDINGER E, ZHANG S, et al. A joint look on lunar satellite and cooperative surface PNT[C]// Proceedings of ICASSP 2024-2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). [S. l.]: IEEE, 2024.
- [47] 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 (ICSSC 2022). [S. l.]: IET, 2022.
- [48] PRABHAKAR A. Policy on celestial time standardization in support of the national cislunar Science and Technology (S&T) strategy[R]. Washington D. C., USA: Office of Science and Technology Policy, 2024.
- [49] LIU J, REN X, YAN W, et al. Descent trajectory reconstruction and landing site positioning of Chang' E-4 on the lunar farside[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4229.
- [50] WANG Y, LIU J, LI C, et al. Autonomous navigation and positioning of Yutu-2 rover on the lunar farside: Integration of visual odometry and orbital data[J]. Science Robotics, 2022, 7(66): eabj6660.
- [51] KALAHASTI K, RAJASEKHAR R P, DAGAR A K, et al. Lunar laser ranging enhancements from Chandrayaan-3's retroreflector array: implications for lunar geodesy and control networks[J]. Nature Astronomy, 2024, 8(5): 567-574.
- [52] ZHANG Y, LIU X, WANG H. Noise-resilient lunar control network construction via deep learning-based weight optimization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 1-12.
- [53] WIECZOREK M A, NEUMANN G A, NIMMO F, et al. Lunar gravity field and interior structure from GRAIL mission data: implications for coordinate system stability[J]. Nature Astronomy, 2023, 7(8): 789-798.
- [54] BAGNALL P M. Lunar terrain modeling using stereo photogrammetry for autonomous navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(2): 1234-1245.

#### 作者简介:

郭树人(1972-), 男, 研究员, 主要研究方向: PNT 体系、卫星导航。

通信地址: 北京市海淀区北清路26号院

E-mail: gsr888@tom.com

李罡(1982-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 卫星导航、深空导航。本文通信作者。

通信地址: 北京市海淀区北清路26号院

E-mail: ligang8212@126.com

## Reflections on Development of Cislunar Satellite Navigation System

GUO Shuren<sup>1,2</sup>, LI Gang<sup>1,2</sup>, DONG Ming<sup>1,2</sup>, WANG Huilin<sup>3</sup>, YANG Jun<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

2. National Key Laboratory of Intelligent Spatial Information, Beijing 100094, China;

3. China Satellite Navigation System Management Office, Beijing 100034, China)

**Abstract:** The development status and trends of GNSS (Global Navigation Satellite System) cislunar navigation services, construction of lunar satellite navigation system, and lunar spatiotemporal benchmarks were analyzed in detail. A development concept for near Earth space, Earth-Lunar transfer, near Lunar space satellite navigation, and lunar spatiotemporal benchmarks was proposed. Additionally, suggestions are made about strengthening the research of key technologies and systematic in-orbit verification, achieving interconnectivity of cislunar satellite navigation system and unified traceability of spatiotemporal benchmarks, enhancing the integrated design of navigation and communication functions, and gradually establishing lunar space infrastructure in a “regional first, full Moon second” manner.

**Keywords:** cislunar space; lunar exploration; positioning, navigation, and timing; spatiotemporal reference; navigation communication fusion

### Highlights:

- The trends of CisLunar satellite navigation system and Lunar spatiotemporal benchmarks were analysed.
- Development Concept of GNSS, libration point and lunar satellite navigation system in CisLunar navigation service were proposed.
- Development concept of lunar spatiotemporal benchmarks was proposed.
- Suggestions for development of cislunar satellite navigation system were made.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]