

欧美月球 GNSS 规划现状分析综述

张 云¹, 钱九悦¹, 洪中华¹, 杨树瑚¹, 童小华²

(1. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306;

2. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘 要:月球是地球最重要的天然卫星,当前国际上正在迎来新一轮月球探索高潮,数十个机构和商业团队正在规划月球探索任务,并设想在未来实现航天员长期驻月,围绕月球的“太空竞赛”刚刚开始。月球 GNSS(基于现有的地球 GNSS 以及新的环月卫星通信导航基础设施的月球卫星通信导航定位技术)是空间基准科研的基础,能够提供航天器着陆定位以及月面(及其覆盖空间)定位、导航与授时等服务,同时可以将月球作为试验场,将导航工具包扩展到更远的目的地(如火星)。对欧美近期发布的月球 GNSS 规划进行了整理归纳,其中包括美国月球 GNSS 接收机实验(LuGRE)计划和欧洲月光(MoonLight)计划,以及美国中远期月球通信中继和导航系统(LCRNS)计划,这些计划可以为我国开展月球 GNSS 规划提供参考。

关键词:欧美月球 GNSS 规划;卫星导航增强;弱信号增强 GNSS 接收机;环月导航卫星网络;深空星际链路

中图分类号:P208 文献标志码:A 文章编号:2095-8110(2024)03-0001-15

Review of lunar GNSS planning in Europe and America

ZHANG Yun¹, QIAN Jiuyue¹, HONG Zhonghua¹, YANG Shuhu¹, TONG Xiaohua²

(1. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The moon is Earth's most important natural satellite, and currently, there is a new wave of lunar exploration worldwide, with numerous institutions and commercial teams planning missions to explore the moon and envisioning the possibility of astronauts living on the moon for extended periods of time. The space race around the moon has just begun. The significance of lunar GNSS (lunar satellite communication-navigation and positioning based on the existing Earth-based GNSS, as well as the new circumlunar satellite communication and navigation infrastructure) is the space reference scientific research foundation and can provide spacecraft landing positioning and lunar surface (and its coverage space) positioning, navigation and timing services. At the same time, the Moon can be used as a test site to expand the navigation toolkit to farther destinations (such as Mars). This review mainly summarizes the recent lunar GNSS plans released by Europe and America, including the American Lunar GNSS Receiver Experiment (LuGRE) program and the European MoonLight program, and the American mid-to-long-term Lunar Communication Relay and Navigation System (LCRNS) program. This review can provide technical reference for China's lunar GNSS planning

收稿日期:2024-02-01;修订日期:2024-04-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42271335);国家自然科学基金专项项目(42241164)

作者简介:张云(1974—),男,教授,主要从事导航遥感和深空月球 PNT 方面的研究。

通信作者:童小华(1971—),男,中国工程院院士,主要从事深空探测遥感与视觉定位导航方面的研究。

Key words: Lunar GNSS planning in Europe and America; Satellite navigation enhancement; Weak signal enhanced GNSS receiver; Circumlunar navigation satellite network; Deep space inter-planetary link

0 引言

月球是地球唯一的天然卫星,月球的地质活动没有地球活跃,因此对其表面陨石坑和玄武岩等的研究,可以探索宇宙的早期历史以及地球的起源和过往。当前,国际上正在迎来新一轮月球探索高潮,数十个机构和商业团队正在规划月球探索任务,并设想未来实现航天员长期驻月,围绕月球的“太空竞赛”刚刚开始。

月球的重力、月震及矿产资源等多种信息还需人类去探索和挖掘。到目前为止,计划中的登月任务已经有 100 多个,虽然不可能全部实现,但是肯定还会增加。与传统的登月计划相比,这些任务中有很大一部分由民间私人资本投资支持,并且涉及与传统意义上的航天部门等无关的参与者,例如以色列非盈利组织 SpaceIL 的“Beresheet 月球探测器”。2021 年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)宣布将对其载人航天办公室进行拆分重组,这一举动被解读为借助美国民间的商业航天资本,重振 NASA 传统的主业——载人登月和登陆火星。对于民间资本而言,盈利性将成为主要目标,且对成本会更加敏感。

登月任务数量增多的一个重要原因,相较于过去,现在脱离地球引力的成本更低,例如 SpaceX 能够以低廉的成本将卫星送入轨道,价格仅为 10 年前的十分之一。这些任务都需要通信导航,因此通信导航能力对于持续探月至关重要,但是到目前为止,月球没有类似地球的全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)和全球通信网络等基础设施,每个任务都必须提出自己的通信导航解决方案,这将极大地影响效率,增加成本,同时限制了有限的深空探测载荷空间。利用现有的地球 GNSS,并建立环月卫星通信导航基础设施,实现远月/近月/月面的卫星导航定位,可以降低每个任务的成本并提高效率,进一步调动民间资本参与的积极性。

月球(月面)高精度自主定位导航是实现月球战略的关键。为了挖掘月球南极附近的环形山,需要将宇宙飞船、月球车及钻井设备等准确送达可开采地点,但由于月球环境的限制,判断设备在月球

的降落点非常困难,因此必须实现在月球上的精确定位及持续导航,月球 GNSS(基于现有的地球 GNSS 以及新的环月卫星通信导航基础设施的月球卫星通信导航定位)成为了最新的科学问题,同时实际需求紧迫。月球环境给人类探月带来了许多挑战,例如对低月球轨道飞行器在着陆和降落前、着陆和上升之间高度动态场景的持续定位;或人类和月球车在月球表面移动的过程中,有一些区域没有地球视线,同时光照条件也十分苛刻,明暗之间存在可变且非常明显的过渡,因此“成像”并不能成为“月球导航”的通用方法。微波波段的信号不受环境和光照等影响,月球 GNSS 可能逐渐成为月球持续导航的通用技术。

由于月球被地球潮汐锁定,在月球绕地旋转一圈的同时完成一圈自转,因此月球始终以其正面朝向地球,在月球背面无法直接与地球通信。但利用月球卫星星座,探月任务即使位于月球背面,在无法直视地球的情况下仍可在月球上开展导航,支持科学设备在月球上的偏僻位置精确着陆,在月球极区的探索任务中保持与地球及月球基地之间的联络。环月卫星星座还可降低月球探索的成本,为更多国家开展月球探索任务提供可能。

月球 GNSS 是空间基准科研的基础,能够提供航天器着陆定位以及月面(及其覆盖空间)定位、导航与授时(position, navigating and timing, PNT)等服务,同时可将月球作为试验场,将导航工具包扩展到更远的目的地(如火星)。2019 年 2 月, NASA 磁层多尺度任务(magnetospheric multiscale, MMS)到达了距离月球大约一半的地方,能够持续接收到足够强的全球定位系统(global positioning system, GPS)信号并计算位置,创造了目前 GPS 信号接收的最远距离^[1],这个结果大大促进了月球 GNSS 技术的发展。目前欧美都已经提出了相关的月球 GNSS 计划,包括 NASA 的月球 GNSS 接收机实验(Lunar GNSS receiver experiment, LuGRE)计划^[2],欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的月光(MoonLight)和月球探路者(Lunar Pathfinder)计划^[3]。中国国家航天局副局长吴艳华在 2022 年 4 月 24 日航天日也提出了月球的中继通信导航的小星座系统,争取 2023 年

或者 2024 年发射中继通信卫星^[4]。

在此背景下,本综述主要对欧美近期发布的月球 GNSS 规划进行了整理归纳,围绕美国 LuGRE 计划和欧洲 MoonLight 计划进行了调查,详细介绍了两个计划的概要、具体内容、硬件配置及最终目标等,同时介绍了美国中远期月球通信中继和导航系统(Lunar communications relay and navigation systems,LCRNS)项目规划,最后对中国月球 GNSS 的发展作了总结与展望,为我国开展月球 GNSS 规划提供了有益的参考。

1 GNSS 技术特点

GNSS 是一种基于卫星的空间无线电定位系统,可为地球表面、近地表和地球外空任意地点的用户提供 24 h 三维位置、速率和时间信息^[5]。目前,美国 GPS、俄罗斯格洛纳斯(global navigation satellite system,GLONASS)、中国北斗(BeiDou navigation satellite system,BDS)和欧洲伽利略(Galileo satellite navigation system,Galileo)四大全球卫星导航系统全部构建完成,同时日本准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system,QZSS)和印度导航星座(navigation with Indian constellation,NavIC)等区域性卫星导航系统也已经基本建成。经过 50 多年的发展,GNSS 达到全球范围内的高程和水平范围 2.5~5 m 精度的定位(民用为 ± 10 m 级别),测速精度达到 ± 0.2 m/s,授时精度达到 20 ns 级别,可以实现全地球海、陆、空全方位的实时导航、定位和授时功能,具备全天候、高精度、自动化及高效益等显著特点,已经成为地球上最通用的室外定位导航工具,同时也广泛应用于近地轨道(low Earth orbit,LEO)航天器的定位导航^[6]。

为了进一步增强 GNSS 的导航性能,卫星导航增强技术逐渐受到了重视。目前,卫星导航增强系统根据增强信息传输方式分为天基(通过卫星通信链路)和地基(通过地基通信链路)增强系统;根据导航定位增强信息类型分为信息型增强和信号型增强^[7]。

1)信息型增强系统中,导航增强源作为中继网络节点给用户传输导航定位增强信息,从而提升卫星导航服务的可用性、可靠性和连续性,包括星基的美国广域增强系统(wide area augmentation system,WAAS),欧洲地球静止导航重叠服务(European geostationary navigation overlay service,EGNOS),日本多功能卫星增强系统(multi-functional satellite augmentation sys-

tem,MSAS)等(完好性增强目标)和日本的 QZSS 厘米级增强服务(centimeter level augmentation service,CLAS)、中国 BDS-3 的 B2b 分米级精密单点定位服务等(精度增强目标),以及地基的日本 GeoNet 网等。

2)信号型增强系统中,导航增强源能够产生测距信号并与现有 GNSS 信号进行联合定位,从而提升卫星导航服务的可用性、可靠性和连续性^[7],包括星基的 QZSS 和地基的罗兰(long range navigation,LORAN)等系统。

卫星导航增强系统的关键技术是:1)时空基准(相对较低精度时钟的时间基准的建立和维持);2)星座设计(包括信号覆盖性和星座设计);3)通导一体化信号设计(导航增强帧通过使用通信信号的部分时隙,实现与 Ka 通信信号的兼容)。

2000 年,美国公布了 GPS 可操作需求文件(operational requirements document,ORD),提出了空间服务空域(space service volume,SSV)的概念^[8],具备高增益接收天线(high gain antenna,HGA)的高灵敏度 GNSS 接收机可以接收来自地球同侧 GNSS 卫星的旁瓣信号或者地球另一面卫星的主瓣和旁瓣信号,适用于更高轨道(3 000 km)的航天器导航,因此月球也可以利用 GNSS 实现可靠的高精度定位和导航。月球 GNSS 定位原理和地球 GNSS 类似——接收多颗 GNSS 信号计算接收机位置。图 1 介绍了月球 GNSS 定位原理,月球表面接收机主要接收环月球导航通信卫星发出的导航信号,此外依靠 HGA 也可以接收到部分地球 GNSS 发出的导航信号,进行定位计算。相较于其他的自主导航技术,月球 GNSS 定位导航技术属于天基跟踪系统,主要优势在于:

1)增强了自主定位导航运行的能力,同时减少了传感器附件的数量;

2)利于月球空间大地测量测绘参考基站和锚固点的构建;

3)随着中国 BDS 等系统的发展,多个 GNSS 将在兼容共存、互为补充的基础上提供更好的卫星定位与导航服务。

月球 GNSS 的全天时和全天候可用性、设备独立性、操作通用性和 100 m 定位精度等性能可以满足月球持续导航的基本要求,因此可以期待月球 GNSS 成为月球上最广泛的导航技术。从图 1 可以发现,卫星导航增强技术将是月球 GNSS 的重要技术扩展,欧美

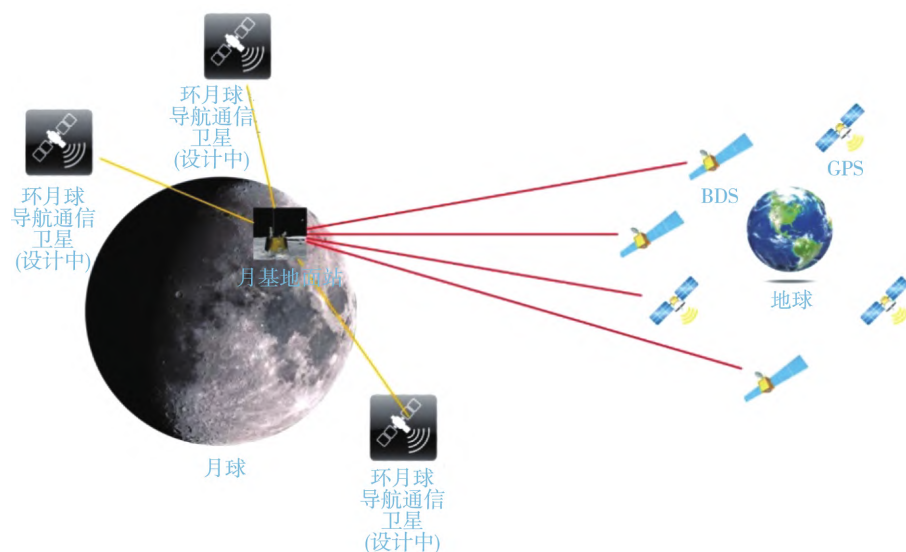


图 1 月球 GNSS 的定位原理

Fig. 1 The positioning principle of lunar GNSS

规划的月球 GNSS 实验也围绕着月球 GNSS(包含卫星导航增强)的 3 个关键技术(时空基准、星座设计和通导一体化信号设计)展开论证。

2 美国 LuGRE 计划

2.1 LuGRE 概要

为了研究在月球上实施 GNSS 定位和导航的可行性,NASA 与意大利航天局 (Italian space agency, ASI) 合作开发了 LuGRE 计划^[9]。LuGRE 是商业月球有效载荷服务 (commercial lunar payload services, CLPS) 中“19D”任务的 10 个有效载荷中的一个,该任务由美国德克萨斯州 Firefly Aerospace 公司提供服务。

NASA 原计划于 2023 年将 LuGRE 的有效载荷安装在 Blue Ghost 月球着陆器上(图 2),并将降落在月球危海(Mare Crisium)区域,在月球表面运行至少 12 个地球日^[10]。危海是位于月球正面东部危海盆地中的一座月海,位于 $560\text{ km} \times 420\text{ km}$ 范围内,面积近 17.6 万 km^2 ,表面极为平坦。LuGRE 预计在该区域的月球表面获得第一个 GNSS 定位结果,LuGRE 将接收来自 GPS 和 Galileo 的信号,收集到的数据将用于开发可操作的月球 GNSS 以及未来的月球任务。

2.2 LuGRE 技术积累

早在 GPS 尚处于论证和试验阶段时,美国洛克希德导弹与航天公司就明确给出了分析结论:在地球高轨卫星上使用 HGA 可以实现 GPS 导航。在



图 2 Firefly Aerospace 公司的 Blue Ghost 月球着陆器概念图

Fig. 2 A concept image of Firefly Aerospace's Blue Ghost lunar lander

(from <https://firefly.com/blue-ghost/>)

过去 20 年里,很多航天机构都进行了技术攻关,开展了利用 GNSS 支持更高轨道航天器导航的试验,取得了好的应用成果,包括 AMSAT-OSCAR 40 和其他人的初始实验、GOES-R 系列地球静止气象卫星以及目前运行的 MMS 任务,在近 50% 的月球距离处进行基于 GPS 的导航。

2.2.1 AMSAT-OSCAR 40

2000 年,NASA 发射了 AMSAT-OSCAR 40 卫星,并利用这颗卫星对 GPS 接收机用于高地球轨道(high Earth orbit, HEO)/静止地球轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星自主导航进行了探

测性实验。实验在 1 000~58 800 km 高的大椭圆轨道上展开,采用 2 个 Trimble 接收机、在航天器近地侧安装 4 个普通 GPS 天线及在航天器远地侧安装 4 个高增益 GPS 天线。实验获得了大量的 GPS 导航信号数据,包括多普勒频移、信噪比及可观测卫星数量等。实验结果表明,在轨道远地弧段实际接收的 GPS 信号的信噪比能达到 40~47 dB·Hz,多普勒频移约为 ± 10 kHz,50 h 内能见导航卫星在 0~5 颗之间变化。AMSAT-OSCAR 40 的实验结果进一步证明了基于 GPS 的高轨飞行器定轨是可行的,并提高了未来高轨 GPS 用户对实际信号特征的理解^[11-12]。

2.2.2 山猫-1(Bobcat-1)LEO GNSS 实验

Bobcat-1 是由美国俄亥俄大学航空电子工程中心开发的 3 单元立方星(CubeSat),它被 NASA CubeSat 发射计划(CubeSat Launch Initiative, CSLI)选中,并在 2020 年 10 月 2 日的 31 号纳米卫星教育发射(Educational Launch of Nanosatellite, ElaNa)任务中发射升空,在轨道上运行约 9 个月。Bobcat-1 于 2020 年 11 月 5 日部署在国际空间站^[13]。部署后,开始收集 GNSS 数据,下传到俄亥俄大学的地面站。Bobcat-1 任务的主要科学目标是评估来自 LEO 星座间时间偏移估计的性能。Bobcat-1 上的主要有效载荷是多频、多星座 NovAtel OEM-719 GNSS 接收器,能够跟踪来自 GPS, Galileo, GLONASS, BDS 和 QZSS 的信号。LEO 的 GNSS 接收器的主要优点是低轨道高度(约 400 km)和短轨道周期(约 90 min),可以每天多次从多颗卫星获取数据,同时没有对流层延迟误差,多路径环境影响小。NASA 的太空通信和导航部门(space communications and navigation program, SCaN)将使用这些测量数据更好地了解 GNSS 的性能和运行状态,并进行数据质量分析,包括频谱观测、载噪比和残差求解,特别关注星座之间的计时差异^[14]。

2.2.3 GOES-R 系列地球静止气象卫星

美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的 GOES-R 系列地球静止气象卫星的高度是 22 300 英里(约 35 888 km)。通过全新系统设计实现的 GPS 接收系统,包括独特的 L1 GEO 天线、低噪声放大器(low noise amplifier, LNA)组件和能够跟踪 GPS L1 信号的主波束边缘和旁瓣的 12 通道接收机,最终性能结果符合 GOES-R 系列卫星的 100/75/75 m 的径向/轨

道内/跨轨道的轨道位置精度要求和 6 cm/s 的速度精度要求^[15]。

2.2.4 MMS 任务

2015 年, NASA 在 MMS 的 4 颗自旋稳定编队卫星上搭载戈达德航天飞行中心(Goddard space flight center, GSFC)研制的 Navigator 接收机^[16],在 2019 年 2 月进行了导航演示, MMS 到达了距地球 116 300 英里(约 187 167 km)的轨道最高点,也就是距离月球大约一半的地方。在这个高度, MMS 能继续接收到足够强的 GPS 信号以确定它的位置,打破了之前分别在 2016 年 10 月和 2017 年 2 月创下的记录。这表明 GPS 信号比预期延伸得更远,在未来的任务中,可以在极端高度下可靠地使用 GPS。

在以上介绍的 SSV 先前任务的研究成果基础上, 2018 年, 国际太空探索协调组(International Space Exploration Coordination Group, ISECG)发布了第三版全球探索路线图,将十几个主要太空机构的太空探索计划收集在一个综合路线图中^[17]。这一版反映了全球转向月球探索的重心,确定了未来 10 年即将进行的数十次登月任务,并将导航确定为主要的技术发展驱动力,目标是实现 100 m 的着陆位置精度。2020 年, NASA 的 Artemis 计划特别确定了基于 GPS 的月球导航以满足其需求。在此背景下,美国提出了 LuGRE 任务,目的是为了进一步验证利用 GNSS 技术支持月球探测器和登月航天员的定位导航的可行性。

2.3 LuGRE 载荷和接收机

LuGRE 的有效载荷由 1 个弱信号增强 GNSS 接收机、1 个高增益 L 波段贴片天线、1 个 LNA 和 1 个射频滤波器组成。接收机将跟踪 GPS L1 C/A 和 L5 以及 Galileo E1 和 E5a 信号,并将伪距、载波相位和多普勒测量结果返回地面。它还将验证最小二乘解决方案和基于卡尔曼滤波器的车载导航解决方案。此外,接收机还能够记录原始 I/Q 基带样本用于下行链路和地面处理。

LuGRE 的 GNSS 接收机是有效载荷的核心,目的是确保月球环境中 GNSS 信号采集、处理和数据管理的最大性能,同时尽可能降低尺寸、质量和功率需求。该接收机基于 Qascom QN400-Space GNSS 接收机定制开发,表 1 是 LuGRE 接收机的技术参数,表 2 和表 3 分别展示了 LuGRE HGA 和 LNA 的技术指标^[9]。

表 1 LuGRE 接收机的技术参数
Tab 1 Technical parameters of the LuGRE receiver

参数	值
质量/kg	1.24
功率/W	14 (max. operating)
外壳尺寸	19.0 cm×18.0 cm×3.95 cm
适用温度范围/℃	−35~50
接收信号	GPS L1 C/A and L5; Galileo Open Service E1 and E5a
弱信号捕获 跟踪阈值/(dB·Hz)	< 23
性能	针对月球的扩展卡尔曼滤波器;采集原始 IQ 样本;导航星历和通过遥控辅助数据上传
数据输出	最小二乘解算法;具有协方差的扩展卡尔 曼滤波器解算法;伪距观测、多普勒频率、载波 相位观测、追踪状态、 C/N_0 (载波噪声密度)、 原始 IQ 样本

表 2 LuGRE HGA 技术指标
Tab 2 LuGRE HGA technical indicators

参数	值
质量/kg	2.2
电源	被动
外壳尺寸	43.0 cm×43.0 cm×2.00 cm
适用温度范围/℃	−145~125
天线	无源平面天线阵列
极化	右旋圆极化
增益/dBi	≥ 14
工作频段 1	1 575.42 ± 12.276 MHz (L1/E1)
工作频段 2	1 176.45 ± 10.230 MHz (L5/E5a)
接口	1x SMA

表 3 LuGRE LNA 技术指标
Tab 3 LuGRE LNA technical indicators

参数	值
质量/kg	0.85
功率/W	0.7
外壳尺寸	9.3 cm×10.2 cm×1.8 cm
适用温度范围/℃	−35~50
工作频段 1	1 575.42 ± 12.276 MHz (L1/E1)
工作频段 2	1 176.45 ± 10.230 MHz (L5/E5a)
噪声/dB	≤ 3
接口	2x SMA

2.4 LuGRE 目标

LuGRE 制定了 3 个顶层目标,这 3 个目标共同完成了在月球上实现 GNSS 的 PNT 的总体目标。

1)目标 1:在月球上接收 GNSS 信号,返回数据并描述月球 GNSS 信号环境;

2)目标 2:利用在月球收集的 GNSS 数据演示导航和时间估算;

3)目标 3:利用收集到的数据支持专门针对月球使用的 GNSS 接收机的开发。

表 4 列出了 LuGRE 的科学任务清单,完成该任务后能够达到 LuGRE 1 级科学要求,从而满足总体任务要求。LuGRE 将成为月球环境和月球表面 GNSS 信号接收和导航的首批演示之一,为未来的月球任务(如猎户座、空间站、机器人和人类着陆器)的操作使用铺平道路,最终,所有 LuGRE 科学数据都将发布到公共数据档案中,有利于推进太空 GNSS 的发展。

表 4 LuGRE 的预计科学任务清单
Tab 4 LuGRE's list of expected scientific tasks

目标	内容
	测量整个任务的信号强度,并根据经验评估链路预算模型
目标 1	确定整个任务期间的信号可用性 在整个任务期间测量多普勒频移和多普勒频率分布 在所有计划的操作期间测量可见卫星的伪距 在有足够信号可用的整个任务中计算和评估最小二乘解决方案 在整个任务期间计算和评估基于卡尔曼滤波器的导航解决方案
目标 2	将车载导航解决方案与外部资源(例如,地面测量处理、计划轨迹及 Blue Ghost 导航解决方案)进行比较 评估整个任务中的位置、速度及时间不确定性和收敛特性
目标 3	使用基于地面的工具处理 GNSS 可观测数据(例如,多普勒频率和伪距),以预测可实现的月球导航性能 使用 LuGRE 数据校准地面模型,并用于预测未来任务可实现的导航性能

3 欧洲 MoonLight 计划

3.1 MoonLight 概要

ESA 网站 2021 年 5 月 19 日报道,ESA 计划启动专门为国际月球探索活动提供通信和导航服务的 MoonLight 卫星星座计划^[18]。MoonLight 星座是一个通过企业联盟服务全球用户的月球通信和数据中继卫星网络。MoonLight 计划建立在 ESPRIT 通信模块和 Lunar Pathfinder 的基础上,并宣布资助 2 个企业团队开展相关概念研究,研究结果将提交 2022 年底举行的 ESA 部长级会议审议。MoonLight 原定计划在 2023 年全面启动,在 4~5 年内投入运行。

3.2 MoonLight 背景

ESA 正在为 NASA 的 Artemis 计划提供多个服务模块,包括用于月球空间站航天员居住区的 ESPRIT 通信模块等。同时,ESA 正在制定欧洲大型物流着陆器(large logistic lander, EL3)计划^[19],以提供不同类型的无人驾驶服务,从为 Artemis 航天员提供补给,到独立的机器人科学和技术演示任务,甚至是将样品带到地球实验室的月球返回任务。该任务设想从 2025 年以后开始定期发射,并持续到 2030 年。

拥有一个专门用于月球通信和导航的基础系统可以降低每个登月任务设计的复杂性,使任务能够更专注于其核心活动。降低月球探索的成本也可以使更多的 ESA 成员国能够启动自己国家的月球任务。在过去几年中,ESA 在内部与业界合作进行了多项可行性研究,以了解月球市场、用户和业务参数,并探索此类基础设施的技术可能性。对于通信中继服务,地球和月球之间的数据容量将逐渐超过每秒数百兆比特,从而使月球任务的数据容量可以与家庭电视和电影流媒体相媲美,预计 2028 年后对数据传输的需求将急剧增加。在此巨大商业背景下,ESA 提出了庞大的月球专用通信导航的 MoonLight 计划。

3.3 MoonLight 内容

MoonLight 的规划分为 3 个阶段^[20]。

(1) 阶段 1: MoonLight/Lunar Pathfinder-GNSS 在轨测试、开发月球高性能 GNSS 接收机

在这一阶段,Lunar Pathfinder 卫星计划于 2024 年发射,设计在月球椭圆冻结轨道上运行 8 年。Lunar Pathfinder 是实现 ESA MoonLight 的第一步,它拥有通信导航功能,将验证月球在轨 GNSS 的可行性,以及地月通信的可靠性。Lunar Pathfinder 将首次在月球轨道上演示对 GNSS 信号的接收。图 3 是 MoonLight Lunar Pathfinder 航天器简图。

Lunar Pathfinder 航天器拥有 S 波段和 UHF 波段 2 个通信信道,通信性能与卫星和用户设备的相对位置以及用户设备的通信模块能力相关,卫星在收到信号后立即通过 X 波段传回地球上的地面站^[21]。图 4 显示了 MoonLight Lunar Pathfinder 实验概要。除了通信服务以外,卫星还搭载了 ESA 和 NASA 选中的 3 项实验载荷:

1) ESA 的 GNSS 接收机,可探测 GPS 以及 Galileo 等地球 GNSS 基础设施的微弱信号,用于验证其在月球导航中的潜在作用;

2) NASA 的回复反射器,用于验证激光测距能力;



图 3 MoonLight Lunar Pathfinder 航天器

Fig 3 MoonLight Lunar Pathfinder spacecraft
(from <https://www.sstl.co.uk/what-we-do/lunar-mission-services>)

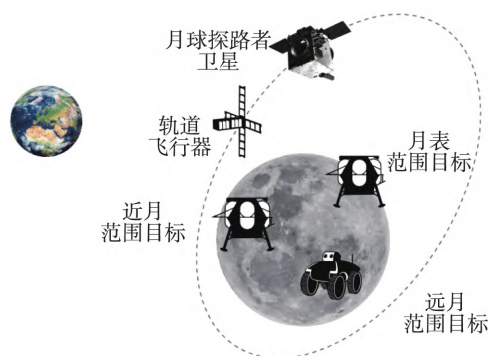


图 4 MoonLight Lunar Pathfinder 实验概要

Fig 4 Summary of the MoonLight Lunar Pathfinder experiment
(from <https://www.sstl.co.uk/what-we-do/lunar-mission-services>)

3) ESA 的辐射监测器,用于研究轨道的辐射环境。

高灵敏度 GNSS 接收机的主天线通过 ESA 的通用支持技术计划开发,GNSS 接收机采用 Navimoon 接收机,其主要单元通过 ESA 的导航创新和支持计划 NAVISP 开发。高灵敏度 GNSS 接收机将能够检测到比地球上接收到的信号弱数百万倍的极微弱的信号,自主研发的机载轨道滤波器将能够实现更加精确的定轨精度。Lunar Pathfinder GNSS 接收机接收可以跟踪 $15 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$ 的双频(L1/E1 和 L5/E5a)的 GPS 和 Galileo 信号^[22],预计可实现约 100 m 的定位精度,这比传统的地面跟踪更准确。

Lunar Pathfinder 计划采用高度稳定的冻结椭圆轨道,近点放在月球南部极点(未来探月主要目标),远近点在月球南极上空,以每天提供月球的南半球的长时间能见度,获得在地球和月球表面之间传输和接收数据的最大机会。轨道参数如下:

1) Aposelene 高度: 7 500 km;

2) Periselene 高度: 500 km;

3) 偏心率: 0.61;

4) 倾角: 57.8°。

(2) 阶段 2: MoonLight/月球通信导航服务 (Lunar Communications and Navigation Services, LCNS), 发射并建立初期环月星座

在这一阶段, MoonLight/LCNS 将部署环月通信导航卫星系统, 即创建一个为全月球用户提供服务的通信和数据中继卫星网络, 这些卫星还可以为月球探索提供导航数据, 同时提供月球共享通信与导航服务, 最终提供给政府和商业探月任务使用, 并采取商业服务的方式以降低探月任务的研制难度和成本。但在月球上提供通信和导航服务要面对一系列挑战, 例如月球有时会受到地球磁场的保护以屏蔽太阳辐射, 有时又在屏蔽层之外, 因此月球导航卫星必须准备好接受来自太阳的猛烈辐射,

此外, 卫星还要面对日益严重的太空垃圾问题^[23], 因而 MoonLight 的 LCNS 的具体技术仍在构思中。MoonLight/LCNS 计划于 2026—2028 年开展初始的 MoonLight 服务。

LCNS 任务的初步目标设想如下:

1) 商业和机构任务, 开放接口, 兼容性, 2026 年以后运行, 可扩展性, 标准化;

2) 支持所有任务阶段, GNSS 服务范围为 1 000 km~70 000 km, 月球南极覆盖(到远端和全球);

3) 导航指标: 地球 GNSS 兼容, 精准定时(亚微秒), 定位精度(着陆: 100 m~30 m, 表面: 50 m~10 m), 测速精度(着陆: 0.5 m/s, 表面: 0.1 m/s);

4) 通信指标: 20 Mbps/用户到 50 Mbps/用户, 10 GB/h 到 100 GB/h, 加密服务, 时隙实时服务。

表 5 描述了导航服务的主要性能, 表中列出的性能是按范围提供的, 涵盖了初始阶段直至完整的 LCNS 部署^[24]。

表 5 导航服务的主要性能

Tab 5 Main performance of navigation service

基于单向服务的 LCNS 导航覆盖范围	对于轨道用户: 距离月球表面最大高度为 1 000 km 的每个轨道 对于月面、着陆器和用户: 南纬 75°~90°
LCNS 导航服务可用性	LCNS 单向导航服务将在南纬 75°~90°的月表服务可用性范围内提供, 24 h 内至少有 3~5 h 连续观测窗口, 24 h 内至少有 6~10 h 非连续观测窗口
LCNS 导航服务性能—LLO(近月轨道)	3D 定位精度: 100~300 m 3 σ 3D 速度精度: 0.5~1 m/s 3 σ 相对于 LCNS 时间的绝对时间精度: 15~50 ms 3 σ
LCNS 导航服务性能—下降和着陆	水平位置精度: 30~100 m 3 σ 3D 绝对速度精度: 0.5~1 m/s 3 σ
LCNS 导航服务性能—月球表面	水平位置精度: 10~50 m 3 σ 3D 绝对速度精度: 0.1~1 m/s 3 σ

(3) 阶段 3: 最终实现月球 PNT 服务

在这一阶段, MoonLight 计划可能发射额外的环月通信导航卫星, 最终能够覆盖整个月球表面提供 PNT 服务, 并提高月球轨道和月球南极的定位可用性和准确性; 同时提供安全完整的服务, 提高系统的自主性能。

4 美国 LCRNS 计划

4.1 LCRNS 概要

2022 年, NASA 的探索与空间通信 (exploration and space communication, ESC) 项目部建立了 LCRNS 项目, 现在尚处于早期阶段^[25]。LCRNS 的建立可以满足 NASA 月球通信和导航基础设施需

求, 并为未来前往火星及更远的地方旅行提供可扩展的解决方案。LCRNS 项目直接支持科学、技术和示范任务, NASA 的 Artemis 任务以及正在进行的月球网 (LunaNet) 的创建。

LCRNS 项目可以实现一种可互操作的方法, 使月球任务能够与地球地面站和其他月球用户设备进行通信, 使 NASA 可以在月球的任何地方执行任务, 包括南极和南极远端, 这将缓解着陆点限制, 提高载人任务的安全性, 增加科学任务的回报, 并允许人类和机器人探索者在月球表面的任何地方旅行。

4.2 LCRNS 规划

LCRNS 的目标是建立通信和导航基础设施,

降低月球新任务的进入门槛,并支持在月球上扩展机器人和人类活动。LCRNS 的构造如下。

1)地球站(Earth stations):升级深空网络(deep space network,DSN)和其他系统,包括商业站;

2) LunaNet: 开放、可互操作网络的标准框架——数据、PNT 和其他服务;

3)轨道中继器(orbital relays):连接月球用户与地球,多用户和多提供商的多样化、可扩展的星座;

4)月球轨道空间站(gateway):额外的中继能力。

表6概括了LCRNS的短、中、远期3个阶段的任务需求和执行内容^[26]。

表6 LCRNS 的阶段任务
Tab 6 Phase tasks for LCRNS

	短期	中期	远期
需求	1)远方科学任务 2)南极人类探索 3)PNT 服务	1)全月球覆盖 2)更长时间、更长距离、更复杂 3)更强的机动性	持续的月面和轨道服务
执行	1)现有的地面网络 2)初始中继能力 3)LunaNet兼容性	1)综合中继网络 2)月面通信和导航设备 3)完整的 LunaNet 服务	1)基础设施的演变 2)新技术的注入

4.3 月球轨道空间站(Gateway)

Gateway 是实现 Artemis II 的重要组成部分,计划载荷中包含用于导航定位的 GNSS 接收机,该 GNSS 计划将由 NASA 和 ESA 共同参与。目前为止,只有关于 Gateway 的 GPS 接收机的介绍及高仿真性能评估的公开介绍。

Gateway 的 GPS 将基于 MMS 导航系统,该系统由带有超稳定振荡器(ultra stable oscillator,USO)的 NASA GSFC 的 Navigator GPS 接收机和戈达德增强型车载导航系统(Goddard enhanced onboard navigation system,GEONS)扩展卡尔曼滤波器飞行软件组成,并增加了大约 50 cm 的 HGA,并可选择配备原子钟,目前在椭圆轨道上导航 4 艘 MMS 航天器,远地点在月球距离的 40% 处。仿真系统基于 MMS GPS,仿真结果显示,GPS 可以为月球 Gateway 提供简单、高性能、机载的自主导航解决方案,并可能适用于月球区域的其他任务^[27]。

4.4 LunaNet

LunaNet 作为 LCRNS 的重要组成部分,其目

的是在月球表面建立一个类似于互联网的网络^[28],由 SCan 程序开发独特的通信和导航架构。它提供通用标准、协议和实现互操作性的接口要求的框架。

表7总结了 LunaNet 服务的内容^[29]。月球将被用作 LunaNet 等技术的试验台,将有助于人类前往火星及更远的地方,因此,LunaNet 是朝着建立太阳系互联网迈出的重要一步。

表7 LunaNet 服务内容

Tab 7 LunaNet service content

网络服务(数据传输)	PNT 服务	短报、警告、无线电/光学科学
1)实时传输到地球的数据或以存储、存储转发模式聚合和传输的数据 2)月球用户之间的数据交换(避免往返地球) 3)多个中继设备可根据需要互换使用	1)各个节点可以生成交换 PNT 信息 2)各个节点可以共享 PNT 数据以支持和增强其操作	1)各个节点可以管理传感器,并发布太空天气警报 2)可以发布综合警报和科学测量

5 月球 GNSS 关键技术

5.1 月球 GNSS 的难点分析

由于较远的地月距离(平均距离 384 403.9 km)以及月球上各类未知环境的影响,月球 GNSS 与近地或低轨 GNSS 相比,存在着研发高性能 GNSS 接收机、提升 PNT 性能以及建立标准月球参考架等巨大的挑战。

5.1.1 GNSS 接收机的挑战

GNSS 信号在月球附近的信号强度大约比地面用户接收到的信号低 20 dB,同时由于 GNSS 星座的角度关系,只能大部分接收“漏信号”中下行天线的旁瓣辐射,导致信号能量小,同时月面上各类的未知因素(电离层等)可能进一步干扰 GNSS 信号的接收^[30],因此,需要设计针对月球环境下弱 GNSS 信号的捕获跟踪算法,研制带有 HGA 的高灵敏度接收机。

在欧美深空 GNSS 接收机研制方面,2.4 节中列出了 LuGRE 的 Qascom QN400-Space GNSS 接收机的具体参数指标;3.4 节中介绍了 Lunar Pathfinder 的 NaviMoon 接收机的具体指标;4.3 节中列出了 Gateway 的 GSFC Navigator 接收机的仿真性能。2014 年 10 月,中国在再入返回式探月飞行器(中国嫦娥五号探月飞行器 CE-5T1)上进行了初步 GNSS 定位实验,对高轨(6 000 km 左右)及高动态

环境下的 GNSS 的可行性进行了分析,并验证了 GNSS 接收机的有效性^[31],在此基础上如果可以提升接收机 LNA 的能力,即可实现月面 GNSS 测量。

5.1.2 GNSS 定位性能挑战

由于月球远离地球,因此在月球上 GNSS 的定位环境比较恶劣,严重影响了 GNSS 的 PNT 性能,具体表现在:1)由于月面上 GNSS 的可见卫星数(number of visible satellites, NVS)相对近地或低轨 GNSS 较少,影响定位精度;2)月球位置已经远高于 GNSS 星座,可观测的卫星弧段窄,可见卫星变化频繁,影响定位算法;3)从月球位置来看,GNSS 星座分布在月球的同一个方向,星座布局和精度衰减因子(dilution of precision, DOP)受到影响;4)月面 GNSS 信号的已知或未知干扰源(如太阳辐射等)影响定位精度。因此,需要通过改善月球 GNSS 算法、建立环月导航卫星网络^[32]和深空星间通信链路以改善 GNSS 定位性能。

(1)改善月球 GNSS 的 PNT 算法

月球单 GNSS 的 PNT 可行性评估是月球 GNSS 的基础,通过分析 GNSS 系统组合方式、信号接收载噪比、天线辐射方向图、确定主瓣/旁瓣信号的空间分布和 NVS 分布,以及 DOP 等定位关键因素,对航天飞行器在月球轨道或月面利用多个 GNSS 进行组合时的可用性进行分析与论证。在 PNT 可行性分析的基础上,建立基于最小二乘算法的适用于月球 GNSS 的 PNT 算法,以及基于卡尔曼滤波的月球自主导航算法^[33]。完成该目标需要更多的实际在轨 GNSS 数据的支撑,美国的 LuGRE 和欧洲 Moon-Light 的 Lunar Pathfinder 都围绕着该目标开展任务。

(2)建立环月导航卫星星座

发射环月导航卫星,建立类似 GNSS 的环月导航卫星网络,是实现高精度月球 GNSS 定位导航的重要技术手段。卫星发射类似于 GNSS 的信号供月球用户使用,可以直接解决卫星少和 DOP 差的问题,实现高性能月球定位导航。主要研究内容包含环月导航卫星星座设计以及分阶段部署计划、每个阶段不同子星座的性能评估、基于 GNSS 信号仿真的定位误差评估以及系统的经济评估等。欧美的中远期 GNSS 规划(LCRNS 和 MoonLight LCNS)中都有类似发射环月导航卫星的计划。目前,关于环月导航卫星的研究还仅处于轨道仿真研究阶段^[34-36]。

(3)深空星间通信链路

深空星间通信链路是深空星联网的基本设施,

目前深空通信频段一般在 Ka 频段,Ka 频段星间链路信号的载波频率高,天线俯仰角和方位角相比下行导航天线的范围更广,可以为空间用户提供更强的信号,相比传统的地面 S 频段/频段测控更为灵活;相比 L 频段的 GNSS 下行导航信号具有更高的测距精度和通信性能^[30]。国内外的星间链路在近地卫星上已经有了成熟的应用,国外在深空星间链路方面也已经有了初步的运用。2018 年 5 月, NASA 的火星“Insight”着陆器搭载发射了 2 颗 MarCO CubeSats,在着陆火星前后的短时间内进行了通信和导航实验,验证了 CubeSat 在火星探测中的可行性^[37]。中国 BDS 设计了基于 Ka 频段的星间链路网络,可完成星间、星地高精度双向测量,并具有一定的数据传输能力,已成功应用于 BDS 的自主运行及测控管理^[38-39],但是还没有应用到深空探测中。深空星间链路属于深空通信导航的融合,与近地卫星间的星间链路相比,深空星间链路的通信距离更远,而且太阳风和其他星体的噪声对通信链路及信号的影响也非常大,因此深空星间链路通信信道设计和接收机天线设计等通信方面的研究以及星月组合定位等导航方面的研究将是今后的主要研究方向。

5.1.3 标准月球参考架挑战

目前还没有建立用于月球 GNSS 定位的标准月球参考架,不同的月球参考架对定位精度的影响不同,因此需要设计适用于 GNSS 定位的标准月球参考架,对月固参考架^[40](平地球/平旋转(mean-Earth/mean-rotation, MER)坐标系;主轴(principal axes, PA)坐标系)、惯性参考架^[41]以及国际天文学联合会/国际大地测量学协会(International Astronomical Union/International Association of Geodesy, IAU/IAG)定义的卫星动力学参考架等进行性能分析;通过建立月球空间大地测量测绘参考基站和锚固点等方式,利用月固参考架、惯性参考架和卫星动力学参考架(GNSS 星座历表)^[42]等地月空综合时空基准构建技术,构建地月空综合时空基准^[43]。

5.2 月球 GNSS PNT 关键技术

表 8 总结了目前月球 GNSS PNT 的 3 个关键技术。虽然单 GNSS 定位存在着不可避免的缺点,但是是目前为止最容易实现和评估的月球 GNSS PNT 技术,因此在 LuGRE 计划以及 Lunar Pathfinder 计划中,都以该技术为重点进行实际信号样本的 PNT 评估。环月导航卫星网络的工程量比较

表 8 月球 GNSS PNT 的 3 个关键技术
Tab. 8 Three GNSS PNT key technologies for the Moon

	单 GNSS	环月导航卫星网络	深空星间链路
技术特点	开发带有 HGA 的高灵敏度 GNSS 接收机,接收 GNSS 信号	建立专用月球导航卫星星座,增加 NVS 和 DOP,极大地改善定位环境	通导一体化融合,利用 GNSS 星间 Ka 测距链路比下行信号提供 stronger 的信号,具有更高的测距精度
缺点	信号质量差,NVS 少且切换快,DOP 差等问题严重影响定位的连续性和可靠性	工程量较大,月球周围恶劣环境对于环月卫星的定轨影响,发射费用、系统维护等问题	目前 Ka 波段通导技术在深空探测运用还处于研究阶段,需要专用 Ka 波段的 GNSS 接收机和天线
实现难度	简单	复杂	复杂

大,深空星间链路技术的可行性还需要进一步验证,因此这两项技术目前还处于仿真级别的研究,但是欧美均有这方面的中远期规划。

6 总结与展望

6.1 欧美规划总结

本文详细介绍了美国 LuGRE 计划、LCRNS 计划和欧洲 MoonLight 计划的项目规划以及执行目标,图 5 总结了欧美月球 GNSS 任务,其中 NASA 的 LuGRE 和 ESA 的 Lunar Pathfinder 是原定计划近 2 年执行的任务。表 9 总结了近期规划的美国 LuGRE 和欧洲 Lunar Pathfinder 的比较。从表 9 可以看出,NASA 的 LuGRE 是专门针对 GNSS 的实验性质载荷,GNSS 实验设计更完整、更全面,因此能够更准确地评估月球 GNSS 的整体性能;相较而言,ESA 的 Lunar Pathfinder 的长期在轨数据(8 年)对月球在轨 GNSS 分析(包含异常事件等)具有重要的作用,同时对将来的环月卫星导航星座的建立具有重要意义。

NASA 的 LCRNS 和 ESA 的 MoonLight LCNS

计划都属于中远景计划,同样都提出了建立环月通信导航网络,建立互操作网络的标准框架并向所有月球范围内的每个人提供中继、通信及 PNT 服务和探测、警报及科学服务的概念。从目前公开的内容分析,这 2 个计划存在较多的重复,也必将出现较多类似 GPS 和 Galileo 的冲突(如轨道、频段等)。可以预见,未来的月球将会存在类似地球 GNSS 的多个环月卫星导航系统共存的局面。

6.2 月球 GNSS 需求总结

月球 GNSS 规划与地球 GNSS 相同,属于国家投资、民间受益的商业模式。通过对欧美项目规划的研究,表 10 归纳了一部分地月空间活动应用 GNSS 的需求。

目前,月球 GNSS 的最终服务对象集中在登月任务的实体,未来可能扩展为深空探测的实体,而且随着月球探索的不断深入,以及民间化比例的不断提高,月球应用场景需求也会不断增加,月球 GNSS 必然会和地球 GNSS 一样,成为月球最广泛的导航工具,月球 GNSS 的应用范围也将会不断扩展。



图 5 欧美月球 GNSS 任务概括

Fig. 5 Summary of European and American lunar GNSS missions

表 9 LuGRE 和 Lunar Pathfinder 的比较
Tab 9 Comparison of LuGRE and Lunar Pathfinder

	NASA LuGRE	ESA Lunar Pathfinder
发射时间	2023 年	2024 年
发射任务	CLPS	Pathfinder
载荷	10 个(全部属于 NASA)	3 个(2 个属于 ESA、1 个属于 NASA)
GNSS 接收机	Qascom QN400-Space GNSS 接收机定制开发	ESA 通用支持技术计划的定制开发 NaviMoon
GNSS 接收信号	GPS/Gailieo	GPS/Gailieo
运行时间	飞行时间(4. 5 轨道、41 天) 月球轨道(2~12 天) 月球表面(12 地球日)	在轨 8 年
通信功能	—	S 波段和 UHF 链接月球和月面 X 波段链接地球
主要目的(PNT)	验证 GNSS 月球导航可靠性 (在轨、着陆、月面)	验证 GNSS 月球在轨导航可靠性

表 10 地月空间活动对应用 GNSS 的需求
Tab 10 Requirements of GNSS applications for cislunar space activities

活动	需求	归类	用户
在轨导航	实现在轨精准导航,月球导航	航天服务	任务执行者
登陆导航	可以在任何时刻任意地点进行月球定点导航着陆,摆脱对于“图像导航”的依赖	航天服务	任务执行者
月面探测	减少航天员或月球车设备负担,增加机动性,高精度时间同步,可以在任何时刻前往任何地方或返回,实现定点导航、遇险搜救、安全广播,提升探矿能力	科研服务	任务执行者 商业机构 科研机构
环月活动	地月空间站 PNT 精准服务和自主导航 未来环月 LEO 月面探测卫星的精密定轨和时间同步	科研服务	商业机构 科研机构
科学应用	设置月面测绘控制点,提高月球地理信息系统的水平; 双站差分扣除系统测量误差,提高测量精度和效率; 监测高频(一月、半月及更短周期)月球物理天平动,进而探索反演月球内部构造, 实现月震机理研究; 与 VLBI 联合测量,连接和统一天球参考框架; 利用双频测量,探测月球电离层及其变化特性; 利用导航信号干涉和散射特性,探测月球表面物质	科研服务	任务执行者 科研机构
月球科研活动	航天器上减少导航通信设备空间,装载其他必要的科研载荷	科研服务	科研机构
火星探测	利用月球 GNSS 进行更深空导航	航天服务	任务执行者
月面商业活动	矿产等资源调配、基础设施建设和维护、后勤保障服务中的导航通信功能	商业服务	商业机构
地球商业活动	虚拟和增强现实技术等,遥控月面航天员或与月球车	科研服务 商业服务	科研机构 商业机构
地球媒体、游戏等 增值活动	流媒体服务、拍摄; 游戏,包括信息娱乐和寓教于乐	商业服务	商业机构
月球教学活动	虚拟和增强现实技术等,月球教学	公益服务	教育机构 商业机构
军事活动	处理月球异常事件和突发事件	军事服务	政府机构

6.3 月球 GNSS 展望

从欧美规划的月球 GNSS 任务可以看出,月球 GNSS 的关键技术基本与地球 GNSS(包含导航增强系统)类似,相对比较成熟,这一点有利于月球

GNSS 技术的快速发展。但是,目前为止,欧美计划中仅提出了 GPS 和 Galileo 两个信号的兼容实验,BDS 和 GLONASS 没有纳入实验范围,这就导致我国必须独立进行月球 GNSS(特别是兼容 BDS)的相

关研究,目前在我国推进月球 GNSS 有以下两类机会:

一类是用嫦娥 7 号、8 号在月面设置 GNSS 测量定位控制点进行科学探测,收集近月轨道和着陆期间 GNSS 数据以及长期的月面 GNSS 数据,进行月球 GNSS 导航定位算法等科学研究,为将来月球空间大地测量测绘参考基站和锚固点的建设等做准备,也可以为下一步环月小星座系统的设计仿真提供月面实际数据支撑。

另一类是国家航天局副局长吴艳华在 2022 年 4 月提及的月球导航星座使用 GNSS 自主定轨维持,我国准备牵头论证一个月球的中继通信导航、一个小星座系统,该系统完成后可以最终实现月球卫星导航系统(lunar satellite navigation system, LNSS)的月球全覆盖,满足期待定位精度并完善完好性和自主性。2023 年 4 月 23 日,在 2023“中国航天日”主场活动的启动仪式上,计划搭载“鹊桥二号”中继星任务发射的 2 颗鹊桥通导技术试验卫星,分别被正式命名为“天都一号”和“天都二号”,双星将在月球轨道编队飞行,实施月球轨道通信导航新技术的验证^[44]。

我国拥有雄厚的航天基础储备和登月经验以及 BDS 的建设经验,相信一定能够成功建设中国版月球 GNSS。

参考文献

- [1] DANNY B. Record-breaking satellite advances NASA's exploration of high-altitude GPS[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/record-breaking-satellite-advances-nasa-s-exploration-of-high-altitude-gps>, 2019.
- [2] The lunar GNSS receiver experiment (LuGRE)[EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220002074>, 2022.
- [3] ESA lunar exploration[EB/OL]. <https://exploration.esa.int/web/moon/>, 2021.
- [4] 央广网. 国家航天局:正在论证构建环月球通信导航卫星星座[EB/OL]. [2022-04-24]. http://china.cnr.cn/news/20220424/t20220424_525804822.shtml China National Radio Network. The National Space Administration; is demonstrating the construction of the lunar communication and navigation satellite constellation[EB/OL]. [2022-04-24]. http://china.cnr.cn/news/20220424/t20220424_525804822.shtml (in Chinese).
- [5] 雷宇, 张宝军, 范一大. 卫星定位技术在自然灾害管理中的应用前景[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集(下), 2010.
- LEI Yu, ZHANG Baojun, FAN Yida. Application prospect of satellite positioning technology in natural disaster management[C]// Proceedings of 1st China Satellite Navigation Academic Conference, 2010 (in Chinese).
- [6] 秦奋, 杨军, 刘新宁. GPS 接收机快速热启动的分析与设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32(1): 19-21.
- QIN Fen, YANG Jun, LIU Xinning. Analysis and design of fast warm start of GPS receiver[J]. Modern Electronic Technology, 2009, 32(1): 19-21 (in Chinese).
- [7] 王磊, 李德仁, 陈锐志, 等. 低轨卫星导航增强技术——机遇与挑战[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 144-152.
- WANG Lei, LI Deren, CHEN Ruizhi, et al. LEO satellite navigation enhancement technology: opportunities and challenges [J]. Engineering Science in China, 2020, 22(2): 144-152 (in Chinese).
- [8] 王猛, 单涛, 王盾. 高轨航天器 GNSS 技术发展[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1158-1167.
- WANG Meng, SHAN Tao, WANG Dun. Development of GNSS technology for high orbit spacecraft[J]. Journal of Geomatics and Mapping, 2020, 49(9): 1158-1167 (in Chinese).
- [9] PARKER J J K, DOVIS F, ANDERSON B, et al. The lunar GNSS receiver experiment (LuGRE) [C]// Proceedings of 2022 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach, California, 2022: 420-437.
- [10] Firefly Aerospace. Firefly Aerospace is one step closer to landing on the Moon[EB/OL]. <https://firefly.com/firefly-aerospace-is-one-step-closer-to-landing-on-the-moon/>, 2021.
- [11] 云空. 卫星导航在空间服务区域中的应用及展望[J]. 卫星应用, 2013(2): 67-70.
- YUN Kong. Application and prospect of satellite navigation in space service area[J]. Satellite Application, 2013(2): 67-70 (in Chinese).
- [12] 荆帅. GNSS 空间服务空域性能评估及辅助增强技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- JING Shuai. Research on performance evaluation and auxiliary enhancement technology of GNSS space service airspace[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [13] European Union Agency for the Space Programme. Galileo is heading to the international space station on board the CubeSat mission BOBCAT-1[EB/OL]. http://www.esa.int/ESA/Space/Galileo/Galileo_is_heading_to_the_international_space_station_on_board_the_CubeSat_mission_BOBCAT-1

- tps://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/galileo-heading-international-space-station-board-cubesat-mission-bobcat-1, 2020.
- [14] CROISSANT K, JENKINS J, MCKNIGHT R, et al. Bobcat-1, the Ohio University CubeSat: preliminary data analysis[C]// Proceedings of 2021 International Technical Meeting, ION ITM, 2021.
- [15] CHAPEL J, STANCLIFFE D, BEVACQUA T, et al. Guidance, navigation, and control performance for the GOES-R spacecraft[J]. CEAS Space Journal, 2015, 7(2): 87-104.
- [16] 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 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, Oregon, 2017: 1114-1126.
- [17] NASA. 2020 Artemis plan [EB/OL]. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/artemis_plan-20200921.pdf, 2020.
- [18] 韩淋. ESA 启动 MoonLight 月球卫星星座建设[J]. 空间科学学报, 2021, 41(6): 846.
HAN Lin. ESA launches MoonLight lunar satellite constellation construction[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(6): 846(in Chinese).
- [19] European large logistic lander[EB/OL]. http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/European_Large_Logistics_Lander
- [20] GIORDANO P, MALMAN F, SWINDEN R, et al. The Lunar Pathfinder PNT experiment and MoonLight navigation service: the future of Lunar position, navigation and timing[C]// Proceedings of 2022 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach, 2022.
- [21] SSTL. SSTL Lunar Pathfinder mission [EB/OL]. <https://www.sstl.co.uk/what-we-do/lunar-mission-services>
- [22] GIORDANO P, GRENIER A, ZOCCARATO P, et al. Orbit determination and time synchronisation in lunar orbit with GNSS-Lunar Pathfinder experiment [C]// Proceedings of International Astronomical Congress. Dubai, 2021.
- [23] 刘霞. 月球上开展导航电信服务欧空局欲“首吃螃蟹”[N]. 科技日报, 2021-05-25.
LIU Xia. The European Space Agency to develop navigation and telecommunications services on the Moon[N]. Science and Technology Daily, 2021-05-25 (in Chinese).
- [24] SCHÖNFELDT M, GRENIER A, DELÉPAUT A, et al. Across the lunar landscape: exploration with GNSS technology[J]. Inside GNSS, 2020, 15(5): 32-37.
- [25] OVERVIEW: lunar communications relay and navigation systems (LCRNS)[EB/OL]. <https://esc.gsfc.nasa.gov/projects/LCRNS>
- [26] Lunar communications relay and navigation systems (LCRNS) preliminary lunar relay services requirements document (SRD)[EB/OL]. <https://esc.gsfc.nasa.gov/static/2fbc056474937c4e3ecfdb1dc595f06/ee60f0dad02-2948b2e8ce03e6e86a2f0.pdf>, 2022.
- [27] WINTERNITZ L B, BAMFORD W A, LONG A C, et al. GPS based autonomous navigation study for the lunar gateway [C]// Proceedings of 42nd Annual American Astronautical Society (AAS) Guidance, Navigation and Control Conference. Breckenridge, CO, 2019.
- [28] LunaNet: empowering Artemis with communications and navigation interoperability[OL]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/lunanet-empowering-artemis-with-communications-and-navigation-interoperability>, 2021.
- [29] PARKER J J K. Lunar GNSS utilization: from vision to reality[C]// Proceedings of PNT Advisory Board Meeting, 2021.
- [30] 陈雷. 高轨飞行器 GNSS 定位技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
CHEN Lei. Research on GNSS positioning technology of high orbit aircraft[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016(in Chinese).
- [31] WANG M, SHAN T, MA L, et al. Performance of GPS and GPS/SINS navigation in the CE-5T1 skip re-entry mission[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 56.
- [32] SCHÖNFELDT M, GRENIER A, DELÉPAUT A, et al. Across the lunar landscape: towards a dedicated lunar PNT system [J]. Inside GNSS, 2020, 15(6): 30-37.
- [33] YANG Y, XU T. An adaptive Kalman filter based on sage windowing weights and variance components[J]. The Journal of Navigation, 2003, 56(2): 231-240.
- [34] DOVIS F. Precise orbit determination techniques for a lunar satellite navigation system[D]. Turin: Politecnico di Torino, 2021.
- [35] MURATA M, KAWANO I, KOGURE S. Lunar navigation satellite system and positioning accuracy evaluation [C]// Proceedings of 2022 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach, California, 2022: 582-586.

- [36] 薛树强, 杨元喜. 最小 GDOP 组合 Walker 星座构型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3): 380-387.
XUE Shuqiang, YANG Yuanxi. Walker constellation configuration with minimum GDOP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(3): 380-387(in Chinese).
- [37] National Aeronautics and Space Administration. Mars Cube One (MarCO) [EB/OL]. <https://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-cube-one-marco>, 2018.
- [38] 唐成盼, 胡小工, 周善石, 等. 利用星间双向测距数据进行北斗卫星集中式自主定轨的初步结果分析[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(2): 89-99.
TANG Chengpan, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, et al. Preliminary results analysis of centralized autonomous orbit determination of Beidou satellite using inter-satellite bidirectional ranging data[J]. Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2017, 47(2): 89-99(in Chinese).
- [39] 肖洋, 李理敏, 常家超, 等. 基于北斗 Ka 星间链路的地面用户导航方法[J]. 宇航学报, 2019, 40(3): 320-326.
XIAO Yang, LI Limin, CHANG Jiachao, et al. Navigation method for ground user based on Beidou Ka inter-satellite link[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(3): 320-326(in Chinese).
- [40] ARCHINAL B A, ACTON C H, A'HEARN M F, et al. Report of the IAU working group on cartographic coordinates and rotational elements; 2015 [J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy: An International Journal of Space Dynamics, 2018, 130(3): 22.
- [41] LÖCHER A, HOFMANN F, GLÄSER P, et al. Towards improved lunar reference frames: LRO orbit determination[C]//Proceedings of International Association of Geodesy Symposia. Springer, Cham, 2014.
- [42] PARK R S, FOLKNER W M, WILLIAMS J G, et al. The JPL planetary and lunar ephemerides DE440 and DE441[J]. The Astronomical Journal, 2021, 161(3): 105.
- [43] LAURENTI M, STALLO C, BELLARDO V, et al. Reference frames analysis for lunar radio navigation system[C]// Proceedings of 2022 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach, California, 2022: 606-615.
- [44] 新华网. 我国将发射“天都一号”“天都二号”探月卫星[EB/OL]. [2024-02-03]. <http://www.news.cn/tech/20240203/6c6c9e721d2445a89571e5b1c558bcd2/c.html>
Xinhua Net. China will launch “Tiandu-1” and “Tiandu-2” lunar exploration satellites[EB/OL]. [2024-02-03]. <http://www.news.cn/tech/20240203/6c6c9e721d2445a89571e5b1c558bcd2/c.html>(in Chinese).

(编辑: 孟彬)