

“鹊桥”通导遥星座频率发展策略研究

韩思远^{1,2}, 任俊杰^{1,2}, 高磊^{1,2}, 周国栋^{1,2}, 郭冠如², 谭伟³,
何熊文⁴, 黄磊³, 姚秀娟⁵, 张婷⁴

(1. 探月与航天工程中心, 北京 100195; 2. 深空探测实验室, 北京 100195; 3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
4. 北京飞行器总体设计部, 北京 100094; 5. 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 针对世界各国地月空间航天活动的增加和无线电业务的拓展, 伴随着频率资源日趋紧张的问题, 面向未来需求、继承频率资源、考虑新的划分、适应国际竞争、支持国际兼容等需求, 分析了频率发展态势, 提出了满足测控、通信、导航、遥感等多业务需求, 按照符合电联规则并相互兼容, 利于频率协调设计的思路, 指导工程频率设计论证和申报储备, 为中国深空探测前瞻性顶层设计提供支持。

关键词: 地月空间; 星座; 频率; 国际电联; 策略

中图分类号: V423.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)04-0444-07

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250098

引用格式: 韩思远, 任俊杰, 高磊, 等. “鹊桥”通导遥星座频率发展策略研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(4): 444-450.

Reference format: HAN S Y, REN J J, ZHOU G D, et al. Research on frequency development strategy of Queqiao integrated communication, navigation, and remote sensing constellation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(4): 444-450.

引言

当前, 越来越多的国家和组织开展了深空探测活动, 随着世界各国地月空间航天活动的不断增加和无线电业务的拓展、国际月球科研站的提出^[1], 月球频率资源日趋紧张。国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)也在不断研究和推出新的频率划分、规则和技术约束。这一新的形势对中国地月空间乃至火星探测的发展既是机遇又是挑战, 中国应从频率论证、设计、申报、协调、维护以及国际义务等方面认真分析和积极应对。

本文以面向未来需求、继承频率资源、考虑新的划分、适应国际竞争、支持国际兼容、做出中国贡献等为目标, 在分析频率发展态势的基础上, 提出了满足测控、通信、导航、遥感等多业务需求, 符合电联规则, 相互兼容, 利于频率的协调设计思路, 为工程频率设计提供参考。

1 国际频率发展态势

ITU制定的《无线电规则》频率申报相关程序^[2]规

定, 离地球距离小于 2×10^6 km的空间为近地, 大于或等于 2×10^6 km的空间为深空^[3]。虽然月球距地球较远(约 4×10^5 km), 但仍属近地空间范围, ITU仅对月球背面探测的使用频率做了规定。月球探测任务不适用深空探测有关规定, 需按照近地空间研究业务设计与之协调^[4]。其规则体系相对于实际系统的频率轨道资源应用需求存在一定的滞后性, 为帮助各国航天机构提前开展磋商及时采取有效措施以规避潜在干扰, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于1980年联合推动建立了空间频率协调工作组(Space Frequency Coordination Group, SFCG)^[5]。因中国、美国、俄罗斯、印度及欧洲等世界主要航天机构都借助SFCG平台交流、分享项目进展及未来计划, 共同分析、确定频率干扰协调诉求, 可在一定程度上提前规避、解决同频系统存在的潜在频率干扰, 以降低风险。

SFCG在其2023年更新的月球区域用频建议为月球表面无线网络划分了11段无线电频段, 具体见图1。其包括3段特高频(Ultra High Frequency,

UHF) 频段、3 段 S 频段、2 段 C 频段和 3 段 Ka 频段^[6]。其中, UHF 频段包括国际空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 邻近链路协议定义的前向频段 (435~450 MHz) 和反向频段 (390~405 MHz), 但限制在月球屏蔽区 (Shielded Zone of the Moon, SZM) 以外使用, 增加了 410~420 MHz 频段; S 频段分别对应于地面 Wi-Fi IEEE802.11b/g/n/ax 协议使用频段 (2.4~2.48 GHz) 和地面 TD-LTE 网络的室外频段 (2.503 5~2.655 GHz), 并增加了 3.5~3.8 GHz

频段; C 频段对应地面 Wi-Fi IEEE802.11a/n/ac/ax 协议的频率范围 (5.15~5.835 GHz), 并增加了 5.855~5.925 GHz 频段; 月面的 3 段 Ka 频段与月面至地球链路所使用的频段 (25.5~27.0 GHz) 错开, 以避免两种链路的干扰。从 SFCG 的月面通信频建议可知, UHF 频段主要用于对当前月面器间通信主用的 CCSDS 邻近链路协议的向后兼容。S、C 频段的分配则在一定程度上体现了国际对于后续月面通信网络技术演进方向的考虑, 即地面已有网络技术在月面场景^[7]的应用。

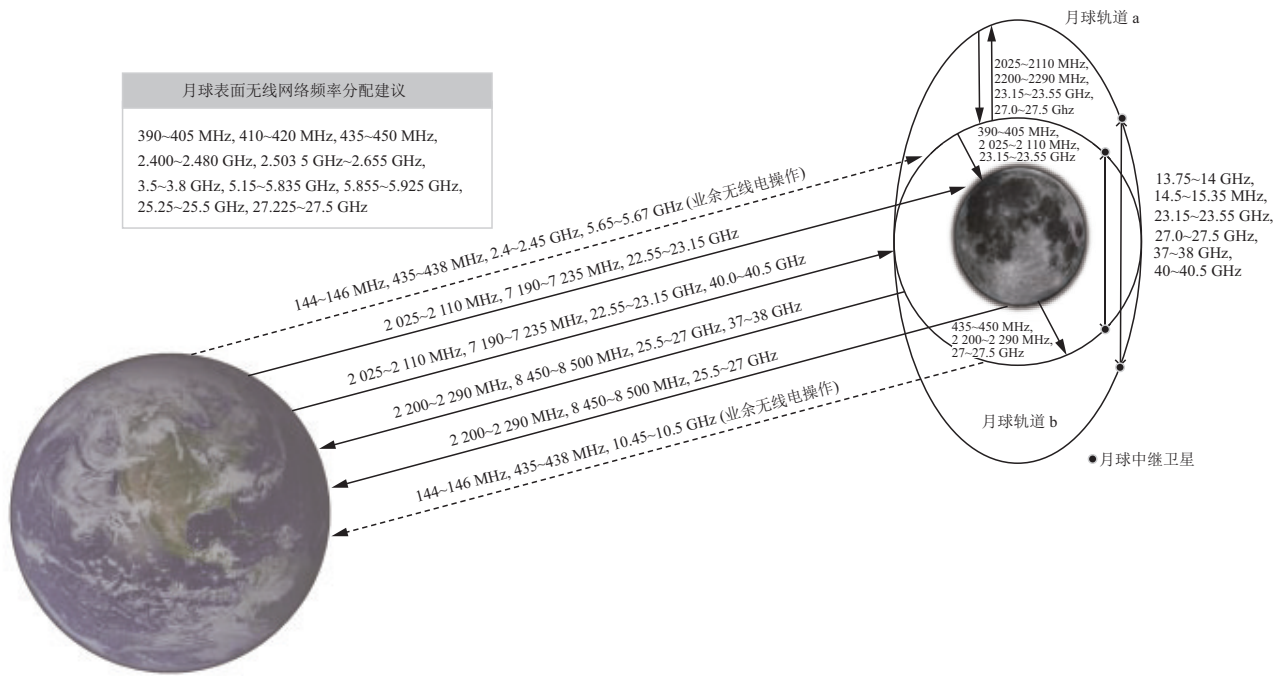


图1 SFCG 关于开发地月空间的用频建议

Fig.1 SFCG's recommendations on frequency usage for development of Earth-Moon space

2023 年世界无线电大会 (WRC-23) 将 “月球表面通信” 列为 2027 年 WRC 的重点议题^[8]。2024 年 8 月 28 日, ITU 发布了《无线电规则》的更新版, 新增了一条与月球探测相关的决议, 该决议综合考虑月球及月球探测的现状, 考虑到对在月球轨道和在月球表面进行科学发现和空间探索活动的兴趣日益浓厚, 无线通信技术发展日趋完善, 在地球得到广泛部署, 也可应用到月球通信; 月球表面用于科学或技术研究目的的点对点系统目前可使用空间研究业务 (Space Research Service, SRS) (空对空); 月球任务可能需要来自月球轨道卫星的月球区域精确定位、导航和授时 (Positioning, Navigation and Timing, PNT) 信号等。认识到月球附近需专用频率用于月球表面操作的系统

之间以及月球轨道与月球表面系统的本地通信; 月球表面通信以及月球轨道与月球表面通信的未来发展, 应考虑为射电天文观测保留机会和空间研究传感器操作的需要等。

统计各主管部门 A/N (A: Advance Publication Information, 提前公布资料; N: Notification, 通知资料) 资料数量, 结果如图 2 所示, A 资料 42 份, N 资料 14 份, C 资料 1 份。中国申报的卫星网络资料数量总数最多, 美国总数位居第二。根据签署 “阿尔特弥斯” (Artemis) 计划协定的国家统计, 在现有卫星网络资料主管部门中, 除俄罗斯外, 共有 7 个主管部门可能与 Artemis 有关, 共计 32 份网络资料可能作为 Artemis 的卫星网络资料。

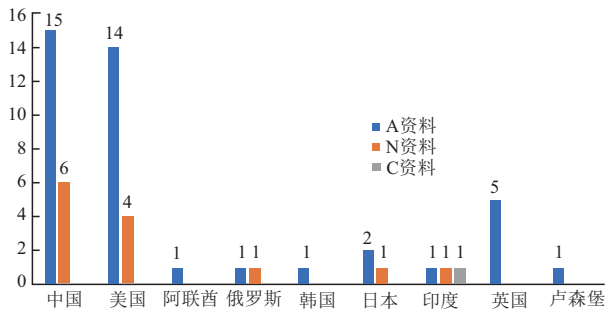


图2 各国卫星网络资料类型统计^[9]

Fig.2 Statistics on types of satellite network data from different countries^[9]

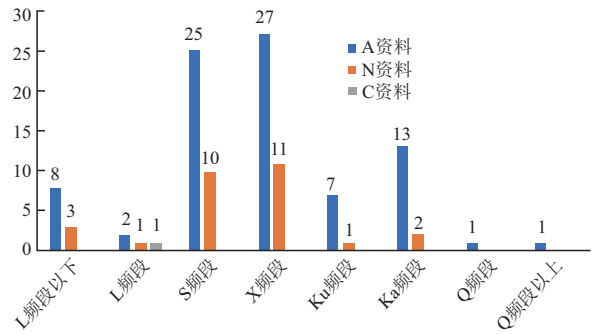


图3 卫星网络资料频段分布^[9]

Fig.3 Frequency band distribution of satellite network data^[9]

按照频段统计卫星网络资料数量,如图3所示。当前大部分卫星网络资料申报S(2 025~2 110 MHz、2 200~2 290 MHz)/X(7 190~7 235 MHz)、(8 450~8 500 MHz)频段频率;Ku和Ka频段网络资料数量增加迅速,各国主管部门均已启动Ku/Ka频段空间研究业务相关频率的申报;中国当前无Q频段及以上月球探索相关频率的申报。

LunaNet^[10]是Artemis长期任务的目标之一,旨在为月球和月球周围的用户提供可互操作的通信和导航服务,其频率规划如图4所示,涵盖地球与月表、地球与月球轨道、月球轨道间、月球轨道与月球轨道中继、月球轨道与月表等通信链路的用频设计,涉及L、S、C、X、Ka、Ku等频段,通过网络方式基本形成了进入月球空间的电磁封锁。

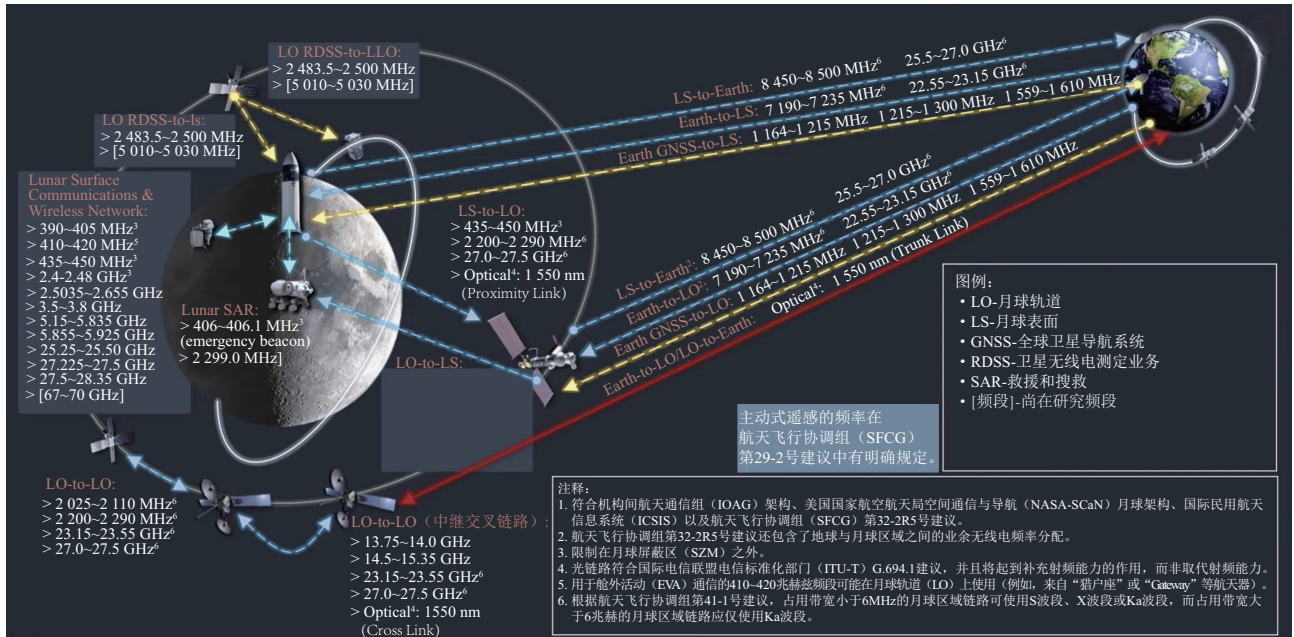


图4 LunaNet用频规划^[10]

Fig.4 LunaNet spectrum allocation plan^[10]

随着美国及欧洲开放并鼓励商业航天积极参与月球探索,围绕地月空间的频率轨道资源势必将进入白热化竞争态势^[11]。现行规则管理体系下,部分无线电频段资源在以地球为中心的空间活动竞争激烈,而针对相同应用的同频段资源,目前在以月球为中心的空间活动可较轻松地申报获取,国际电联体系在以月球为中心的频谱资源申报规则缺位,可能会导致各国商业航天公司的快速抢占性储备。这一规则真空期预计

不会超过5年^[12]。

近年来,ITU和SFCG持续推进月球频率使用规则及新的频段资源划分,中国需及时跟踪SFCG与ITU研究议题进展,及早储备相应资源;ITU规则也在不断演进,作为航天大国,中国既要遵守现有规则,又要积极参与规则制定,为工程任务争取规则支持,同时为国际做出应有贡献;美国等多个国家申报和储备了较多的月球频率资源,中国应在任务设计方

面,根据业务需求、频率规则的演进与现有频率资源,统筹规划,分批申报且方案设计与频率资源支持国际合作,开放互联^[13]。

2 中国月球星座与无线电业务设想

以上对国际月球及深空频率发展态势的分析表明,频率作为支撑未来月球探测、开发与利用的核心战略资源,其已日趋白热化。在此背景下,中国若不能及早布局明确主张,不仅将在未来的国际合作陷入被动,更可能因频率资源的缺失而制约“鹊桥”通导遥星座后续任务的实施。因此,基于对国际态势的深刻洞察与中国长远发展的战略需求,本节将提出月球通导遥星座规划,并系统分析中国的无线电使用需求,为后续频率设计提供基础。

2.1 星座组成及轨道

月球星座^[14]核心发展愿景是提供“全天时”“全空间”稳定通用的服务。“全天时”旨在突破地面站地理布局的约束和几何空间的遮挡,提供随时可接入的服务;“全空间”以全地月空间及全月面可达为设计目标,地月空间(含月面)任意位置的用户皆可享有服务。

面向“全天时”“全空间”覆盖的发展愿景,整合不同用户主要业务需求,星座在地面支持下,为月球轨道、月面用户提供稳定的多业务功能服务,具体包括通信、导航、信息服务和扩展功能。通信功能包括全天时测控通信、全月中继通信保障、转移轨道全迹测控通信、多目标同时通信、深空互联网、组网通信等。导航功能应包括单向/双向授时、有源/无源导航、多星导航、天基/地基增强导航等。针对系统本身,系统运行期间需建立和维护时空基准,导航功能具备定时与守时、自主定轨、地基测定轨和多源融合定轨等功能。信息服务功能包括信息处理、信息存储、信息订阅发布和信息安全,扩展功能为地月空间非合作目标的无源态势感知和定轨跟踪。

根据月球多业务星座的基本目标、具体业务需求、地月一体化、对太阳系任务的支持要求、经费约束,月球多业务星座在轨道、卫星数量、卫星功能等方面有多种可选方案。结合月球探测的发展趋势,中国空间技术研究院提出了从月球南极到全月、从中继通信到月面导航的近月空间星座建设路线。该建设路线分为3个阶段,针对各阶段的建设目标进行了星座构型的多方案比较,形成了12个椭圆形冻结轨道(Elliptical Lunar Frozen Orbit, ELFO)+4个近直线晕轨道(Near-Rectilinear Halo Orbit, NRHO)+2Halo(晕轨道)+3个远距离逆行轨道 Distant Retrograde

Orbit, DRO)的21星构型方案,可实现全月100%的四重覆盖,并可提供长时间的高精度导航任务^[15]。

结合“鹊桥”中继星现有基础,适当降低覆盖要求,提出以下设想:面向月球南极的星座构型,主要选用1条南向NRHO轨道+2条ELFO轨道的星座构型;面向地月空间及月面的星座构型,包括L1点2颗南向Halo轨道共轨卫星+L1点1颗垂直李雅普诺夫轨道卫星+L2点若干颗南向Halo轨道共轨卫星+L2点1颗垂直李雅普诺夫轨道卫星+L4点1颗垂直周期轨道卫星+L5点1颗垂直周期轨道卫星。完整星座构型,考虑在面向南极的星座、面向地月空间及全月面的星座、“鹊桥二号”组成的星座基础上,增加1颗L2点北向NRHO轨道,多轨道协同,仅需10余颗卫星即可构成地月通信导航系统的完整星座,提升对北极区域的覆盖性能,满足高精度导航的同时可降低部署成本。

2.2 业务类型与频率需求

月球通导遥星座通过构建通信-导航-遥感一体化服务体系,形成地月空间全要素信息保障能力。目的在于建立一套为月球表面和月球轨道航天器提供通信导航及其它服务的月球通信网络,其服务类型包括通信、数传、定位、导航、授时和态势感知等,使地月交互网络与月面通信网络协作配合,互相辅助以提升通信效率。通过建立一系列通用化标准、协议和接口,来实现月球通导遥星座网络的国际化。

1) 地月测控通信与地月云网

为更好地发挥地月空间基础设施对各类用户的服务效能、构建跨域融合一体的地月空间网络,提出了地月云网概念,各星座/设施之间及其内部通过无线链路连接成网,并通过一体化网络协议实现地月空间组网。国际月球科研站论证中也提出了天地一体化网络的概念,将月面月轨设施、地面测控通信设施、运控运营网络组成一个统一的网络。

然而,地月云网具有高动态、大时延、强异构特点,这给地月空间组网带来了挑战。可通过构建适应地月空间特征及满足未来深空探测网络节点互联需求的地月云网协议栈,支持月球探测器的测控、科学数据回传及地面控制中心与月面设施的实时互联;通过部署地月中继卫星和月面通信中枢,形成覆盖月球正面/背面的多跳通信网络,上行支持50 Mbp/s指令传输,下行科学数据回传速率不小于3 Gbp/s,具有一体化、通用化、分层化、智能化、国际化的特点^[16]。

2) 月轨-月面通信

构建“轨道中继-月面中枢”分层网络,解决月球背面通信盲区问题,支持月面巡视器、着陆器、月

球车、机器人等与轨道器、月轨星座的实时信息。

月轨卫星和月面设施的通信系统定位为支撑月面探测设备、载人设备等与轨道器的实时交互,包含业务数据与中继数据,属于空-空业务,支持地月测控、数传链路的中继通信和下行高速数传通信。考虑未来月球业务的多样性,需满足多路不同带宽同时传输的能力。

3) 地月 PNT

地月原位定位、导航与授时(Positioning Navigation, and Timing, PNT)系统建设的总体目标:首先解决区域性定位问题,从单中枢设施测距辅助定位、多中枢设施直接多边定位至月面中枢设施/近月星座联合定位的月面定位导航技术演进;然后以最小的代价获得较高精度的月球全球原位 PNT 服务系统;再者在地月平动点位置部署基准卫星,建立统一的地月时空参考框架,通过星间链路实现北斗系统向月球空间的时空基准延伸,时间基准与北斗时的同步精度可优于 $4\text{ ns}^{[17]}$,最后是与地球 PNT 系统形成一体化、连续的 PNT 时空服务体系。

将全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)导航直接应用到地月空间导航场景所能提供的实时导航能力有限,无法满足高精度导航应用的需求。通过仅增加一颗月球空间导航节点,在播发导航信号的同时,分别建立与地球 GNSS 导航星座和月球用户之间的双向时间同步链路,将钟差与位置误差进行解耦,实现月球用户的高精度实时三维绝对导航。该方法可大幅提升月球用户的几何精度因子,可获得优于 50 m 的实时定位精度^[18],具有很强的实用性。

在此基础上,建立适当规模的月球原位 PNT 系统,并完成与地球 PNT 系统时空同步,达到地月 PNT 建设目标。系统应具备与多目标同时通信能力、时空基准可向地面及北斗溯源、地月激光通信下行传输码率不小于 1 Gbp/s 、上行传输码率不小于 $20\text{ Mbp/s}^{[19]}$ 、单个月面通信网络终端数量不小于 100 个、传输速率不小于 100 Mbp/s 。

4) 遥感

部分卫星可以利用轨道特点与便利,搭载遥感设备,兼顾遥感功能,开展月壤成分分析、水资源探测和月震监测等。但一般情况下使用无源遥感,不增加频率资源,本文不再展开。

5) 国际互操作及频率适应能力

月球通导遥星座要成为开放的空间基础设施,既能支持中国探测器在月面、月轨的活动,又能支持国际任务,都需频率的兼容与支持。这就要求中国星座的频率设计符合国际电联划分,满足国际探测器通信

设备的频率应用范围。

如果中国星座希望通过国外卫星,引入时间或空间基准,或组成更大的国际月球通信网络,还需设计、申报国际合作频率,同时在设备层面,应开展相应的设计。

3 中国“鹊桥”通导遥星座频率设计策略

从以上月球通导遥星座的业务需求可看出,与地球卫星业务及目前月球探测任务相比,“鹊桥”通导遥星座频率需求具有业务类型多、卫星数量及用户数量少、频率组成复杂等特点。

3.1 设计思路

1) 面向未来需求,全面覆盖可能的业务类型与数据内容;根据任务目标,提出可能的技术路线和任务过程,对任务过程需要的频率资源汇总^[20]。

2) 继承现有月球频率资源,同时根据现有划分及 ITU、SFCG 和全球卫星导航系统国际委员会(International Committee on Global Navigation Satellite Systems, ICGNSS)的研究进展,新增 Ku、Ka 等频段。

3) 主要采用“统一载波测控/抑制载波测控+干涉测量”通信体制,兼容现有“鹊桥一号”“鹊桥二号”的通信体制,降低技术迭代成本。

4) 开放导航授时服务,遵循国际规则,兼容 ITU《无线电规则》对月球屏蔽区的保护要求,并符合 SFCG 最新频段划分建议。

3.2 用频策略

随着世界各国月球探测任务的持续开展, SFCG 在 ITU 的《无线电规则》基础上细化提出了《月球区域通信及定位、导航、授时频率分配和共享》建议,以协调各国在月球区域内的用频需求并支持国际合作。目前,主要航天国家和地区都基本遵循 SFCG 的建议开展月球区域通信频率的规划。

1) 地月测控通信与地月云网

地月间探测器测控系统充分继承现有深空测控网资源,使用 S、X 频段。S 频段天线波束宽,易于实现全向天线,可用于早期轨道段和探测器异常情况的遥测遥控。与日益拥挤的 S 频段相比, X 频段测控资源更丰富,轨道测量精度更精细,也易于实现星载测控设备的轻小型化。

Ka 频段链路较 X 频段链路可获得 6 dB 左右的平均增益,对于 S 频段还要比 X 频段再提高 11 dB 。因此,月球下行数据传输使用 Ka 频段。同时建立地月

激光链路,可满足未来月球科研站数据回传需求。

2) 月轨-月面通信

目前月轨和月面的前反向通信,通常采用X频段,目前ITU在《无线电规则》中无划分,且可能对地球接收方产生干扰,建议后续任务逐步向Ka频段转型。

3) 地月PNT

SFCG已确定2 483.5~2 500 MHz(S频段)为PNT服务的专用频段,该频段支持月轨星座向月轨和月面用户发送导航信号,同时需兼容ITU对SZM的保护要求。月球表面和轨道系统还可利用地球现有GNSS系统的频段,包括1 164~1 215 MHz、1 215~1 300 MHz和1 559~1 610 MHz。这些频段支持从地球到月球的导航信号传输,但需注意其使用仅限于接收地球发射的GNSS信号,而非在月球本地发射,以避免干扰SZM的射电天文观测。同时,5 010~5 030 MHz频段作为月球PNT服务的补充选项,SFCG正在开展研究,未来可能扩展月球PNT的能力。

4 频率管理协调机制

1) 国际频率划分和标准规范

《无线电规则》按照业务类型而不是按照任务类型对频率进行划分,如空间操作业务、卫星地球探测业务、卫星固定业务、卫星间业务等。按照国际电联定义,探月任务属于空间研究业务,划分给空间研究业务的S/X频段仅各有上下行约100 MHz的带宽。当前,已有部分国家申报大量S/X频段的空研究卫星网络资料。目前ITU对月球表面及月轨的通导遥业务暂无频率划分,各国主要依托SFCG相关建议开展频率设计。各国通过建议书、报告或决议的形式向ITU提供输入文稿,并争取将其纳入正式的ITU规则中。

2) 频率论证设计机制

工程任务特别是月球星座、月球科研站等多探测器、多国合作的综合性探测任务,业务种类多,通信节点多、轨道类型多、国际合作适应性要求高,工程技术方案与频率设计方相互制约、相互支撑。各探测器(通信节点)网络资料申报时间和协调程序还要符合ITU和国家主管部门(国家无线电管理局)的规定。因此,工程任务论证、研制必须与频率论证、设计同步开展,甚至频率先行。

3) 国内组织协调机制

由于频率设计与国际合作、载人登月、无人探月等密切相关,需国家无线电管理局及月球任务相关部门与企业联合设计、统筹规划,以满足各方需求、互相兼容、干扰可控并能相互协同。

频率的统一管理包含三个层面,一是国际ITU;二是国家,中国主管部门是国家无线电管理局;三是操作者,各操作者单位可能包括不同的任务、不同的研制队伍和总系统,但频率管理对象是操作者法人单位,各操作者应建立专门的多任务统一的申报人员、申报邮箱,避免人员邮箱众多,且频繁变化,给主管部门与协调单位带来困惑,甚至贻误申报协调事项与机会。

4) 国际合作和协调机制

月球多功能星座实施过程中,应积极参与国际事务,一方面遵循国际电联及国际机构制定的规定、规则;其次,依据规则开展积极的协调,争取中国权益;第三,发挥中国在无线电业务研究、规则制定等方面的建设作用,为人类航天事业做出贡献。

5 结论

本文系统梳理了月球探测频率资源发展态势,跟踪国际发展动向,总结了前期各国已申报频率和未来国际组织建议频率;从地月测控通信与地月云网、月轨-月面通信、地月PNT和国际互操作4个方面,对中国月球星座与无线电业务进行了分析。根据ITU规则与SFCG建议,基于中国现有资源,给出了频率设计策略,为后续月球星座等重大工程实施提供技术支持与频率管理参考。

参 考 文 献

- [1] 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, et al. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [2] 潘冀等.卫星频率轨道资源国际申报与协调[M].北京:人民邮电出版社,2024.
- [3] 杨会钦,杨永亮.月球与深空探测频率规划研究[J].飞行器测控学报,2008,27(5):9-14.
YANG H Q, YANG Y L. Study frequency planning in lunar and deep space exploration[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(5): 9-14.
- [4] 吴伟仁,李海涛,李赞,等.中国深空测控网现状与展望[J].中国科学:信息科学,2020,50(1):87-108.
WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network[J]. Scientia Sinica Informationis, 2020, 50(1): 87-108.
- [5] 毛林全,李健十,刘晋.空间站频率轨道使用国际规则研究[J].载人航天,2022,28(3):375-382.
MAO L Q, LI J S, LIU J. Study on international regulations for use of frequencies and orbits in space stations[J]. Manned Spaceflights, 2022, 28(3): 375-382.
- [6] 邵润通,刘昊容.月球通信频率使用研究现状与发展[J].中国无线电,2025(6):43-47.
- [7] 李炯卉,王存杰,白帆,等.月面通信导航基础设施总体架构与关键技术研究[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(3):30-42.

- LI J H, WANG Z J, BAI F, et al. System architectures and key technologies of lunar surface communication and navigation infrastructure[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):30-42.
- [8] 国际电信联盟. 2023世界无线电大会最后决议[EB/OL]. (2023-12-27) [2025-05-30]. http://www.mitit.gov.cn/gxdt/sidt/art/2023/art_ec9664cb480746508f3b91bc6fcb20d7.html.
- [9] COSBY M, TAI W, et al. The future lunar communication architecture[R]. Washington, USA: Interagency Operations Advisory Group, 2022.
- [10] 包为民, 汪小卫. 地月空间探索与开发的思考[J]. 宇航学报, 2022, 43(6):705-712.
BAO W M, WANG X W. Some thoughts about cislunar exploration and exploitation[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(6):705-712.
- [11] 孙茜, 刘慧梁, 王冀莲. 面向地月空间开发的频率轨道国际规则与申报使用态势[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2024, 44(3):80-88.
SUN Q, LIU H L, WANG J L. International rules and utilization status of frequency and orbit resources for cislunar space exploration[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):80-88.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 乔梁, 李承昊, 王善澎, 等. 地月云网: 跨越融合一体的地月空间网络[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2024, 44(3):43-50.
QIAO L, LI C H, WAN S P, et al. Cislunar cloud network: the cross-domain integrated cislunar-spatial network[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):43-50.
- [15] 周会超, 郑晋军, 王海红, 等. 地月空间天基时空基准的构建与传递[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2024, 44(3):51-59.
ZHOU H C, ZHENG J J, WANG H H, et al. Construction and transfer of space-based spatial-temporal reference in Earth-Moon space[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):51-59.
- [16] 同钊, 朱向鹏, 陈素芳, 等. 基于地球GNSS和导航增强星的地月空间导航方法[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2024, 44(3):69-79.
TONG Z, ZHU X P, CHEN S F, et al. An Earth-Moon space navigation method based on the earth GNSS and navigation augmentation satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):69-79.
- [17] 张立华, 吴伟仁. 月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(6):497-505, 508.
ZHANG L H, WU W R. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6):497-505, 508.
- [18] 裴照宇, 任俊杰, 彭兢, 等. “嫦娥五号”任务总体方案权衡设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(3):215-226.
PEI Z Y, REN J J, PENG J, et al. Overall scheme trade-off design of Chang'E-5 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(3):215-226.

作者简介:

韩思远(1981-), 男, 研究员, 国家国防科工局探月与航天工程中心副主任, 主要研究方向: 航天领域工程、科研项目管理。

本文通信作者。

通信地址: 北京市海淀区东冉北街9号(100195)

电话: (10)88432099

E-mail: ren999@126.com

Research on Frequency Development Strategy of Queqiao Integrated Communication, Navigation, and Remote Sensing Constellation System

HAN Siyuan^{1,2}, REN Junjie^{1,2}, GAO Lei^{1,2}, ZHOU Guodong^{1,2}, GUO Guanru²,

TAN Wei³, HE Xiongwen⁴, HUANG Lei³, YAO Xiujuan⁴, ZHANG Ting⁵

(1. China Lunar Exploration and Space Program Center, Beijing 100081, China; 2. Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100195, China; 3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China; 4. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 5. National Space Science Center, Beijing 100190, China)

Abstract: Against the backdrop of increasing space activities in the Earth-Moon space by countries worldwide and the continuous expansion of radio services, frequency resources are becoming increasingly strained. To face future demands, inherit existing frequency resources, consider new allocations, adapt to international competition and support international compatibility, frequency development trends were analyzed. It will provide support for a forward-looking top-level design for China's deep space exploration.

Keywords: Earth-Moon space; constellation; ITU; Strategy

Highlights:

- Reviewed international development dynamics and trends of lunar frequencies, providing a reference for subsequent frequency planning.
- A multi-service lunar constellation architecture was proposed.
- Innovatively proposed frequency design strategies and a frequency management framework for multi-service lunar constellations.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]