

LI Zhen, YAO Xiujuan, WANG Jing, GAO Xiang, LI Xue, MA Yuanhao, SUN Yunlong. Current Status and Development Trend of Frequency Resource Utilization in Cislunar Space (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(1): 163–174. CSTR:32142.14.cjss.2025-0018. DOI:10.11728/cjss2026.01.2025-0018

地月空间频率资源利用现状及发展态势*

李震 姚秀娟 王静 高翔
李雪 马元浩 孙云龙

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘要 频率资源是支撑航天行业发展的核心战略资源之一, 随着作为国际热点的月球开发利用逐渐朝着规模化方向发展, 频率资源的需求愈发迫切. 然而, 在现有国际规则框架下, 可提供给月球规模化开发利用的频率资源非常有限, 供需矛盾日益加剧. 本文围绕国际地月空间频率资源申请现状、工程任务规划与实施情况开展系统性数据分析, 研究当前地月空间频率资源与 SFCG (Space Frequency Coordination Group) 月球区域频率划分建议的符合度, 分析地月空间频率资源的利用态势, 同时, 利用自主开发的频率兼容性仿真平台, 对国际上的典型任务进行了量化干扰计算分析, 提出了后续地月空间探测、开发利用等领域的用频建议, 为相关工程任务的规范有序实施提供参考.

关键词 地月空间, 频率资源, 频率申请, 干扰分析, 频率规划

中图分类号 V476.3, V443.1

Current Status and Development Trend of Frequency Resource Utilization in Cislunar Space

LI Zhen YAO Xiujuan WANG Jing GAO Xiang
LI Xue MA Yuanhao SUN Yunlong

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Frequency resources, as non-renewable strategic assets, play a vital role in supporting aerospace industry development. With lunar exploration and resource utilization emerging as a global priority, demand for cislunar frequency resources has evolved significantly. Originally serving limited exploratory missions and space research, these resources now face growing demands from large-scale projects including space infrastructure construction, in-situ resource extraction, and sustained manned/unmanned lunar operations. However, current international regulations severely constrain the availability of frequency resources for extensive lunar development, resulting in an increasingly acute supply-demand imbalance. Systematic analysis of space networks (frequency application data, including advance publication information, notification information, etc.) is conducted for the planning and on-or-

* 太空探源系列科学卫星-环月低频射电天文台项目资助 (GJ11010502)

2025-02-04 收到原稿, 2025-07-07 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

bit cislunar exploration missions, and a correlation between space networks and cislunar exploration missions is established. It is found that far more frequency resources are declared by China and the United States than by other countries, while declared assignments concentrate within S-band and X-band ranges. By studying the conformity of the declared frequency bands with the Space Frequency Coordination Group (SFCG) recommendation for lunar region frequency allocation, we find that more than 96% of the space networks listed in this paper contain at least one SFCG-recommended assignment, and the declared link types (such as earth-lunar orbit link, lunar surface-lunar orbit link, *etc.*) are also included in the SFCG recommendation. Based on calculations conducted on the self-developed frequency compatibility simulation platform, the quantitative interference analysis of typical lunar missions is carried out. The simulation result reflects that the co-band interference of the lunar orbit to the lunar surface link at the south pole of the moon is serious, and it is difficult to avoid the interference through spatial isolation. Based on the current space networks of cislunar frequency resources and quantitative simulation results, the follow-up suggestions for utilization of frequency resources in the fields of cislunar exploration, development and utilization are proposed, which provide a reference for the standardized and orderly implementation of future missions.

Key words Cislunar space, Frequency resource, Frequency application, Interference analysis, Frequency planning

0 引言

地月空间作为未来人类生存与发展的战略空间, 拥有独特的物质、能源、位置、环境等战略稀缺资源^[1,2], 是人类从地球走向深空的中转站。

本世纪 20 年代以来, 越来越多的国家加入月球探索的行列, 欧空局 (ESA) 在第 75 届国际宇航大会上提出, 未来 20 年将有超过 400 次月球探索任务^[3]. 月球探索任务涵盖月球飞掠、绕月、硬着陆、软着陆、采样返回直至载人登月, 难度逐步增加, 成为各国彰显科技水平和综合国力的竞技场. 通过对月球和地月空间的探索, 各国开展科学研究, 验证关键工程技术, 陆续提出了地月空间的规划发展设想, 例如美国国家航空航天局 (NASA) 和 ESA 共同发起的 LunaNet 及 ESA 月光计划、日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 的月球导航卫星系统等. 中国目前已圆满完成嫦娥工程“绕、落、回”三步走, 正朝着载人登月的新目标推进^[4,5].

根据现阶段的任务规划情况, 地月空间未来会有大量基础设施通过组网或星座的方式实现信息传输, 加剧对频率资源的需求, 业务类型也由空间研究拓展到通信、导航等多类型业务. Yang 等^[6]提出了中国地月空间基础设施体系架构与发展设想, Cong 等^[7]给出了地月空间航天器自主导航的关键技术, Qiao 等^[8]提出地月云网的概念, 实现地月空间星座和基础设施

之间的无线组网.

频率资源是支撑航天产业发展的重要战略资源之一, 资源总量有限且具有不可再生的特点, 是多类型探测器在轨测控、数传、导航、定位、遥感、时统等众多业务有序开展的必要条件. 作为航天工程任务实施必不可少的要素之一, 频率资源的合理划分与高效规范使用在一定程度上代表了该领域的软实力, 体现了多类型探测器在发射、入轨、试运行、正式运行到变轨、离轨、返回的全任务流程中的综合管理能力与支撑保障水平. 按照国际空间法、《国际电信联盟公约》等国际法规的要求, 各国在开展外层空间 (包括月球与其他天体) 探索与利用活动、向空间发射卫星时, 需要在国际申报频轨资源并进行空间物体登记. 其中, 向国际申请的卫星网络资料是卫星任务关联的频率轨道资源的信息载体, 由联合国下属的政府间组织——国际电信联盟 (ITU) 组织实施各成员国的申报协调和维护管理工作. 现阶段卫星任务频率资源的规划及在轨使用需遵循 ITU 面向全球发布的《无线电规则》. ITU 约每 4 年组织召开世界无线电大会 (WRC), 推动《无线电规则》的修订完善. 作为当前国际航天热点领域, 月球任务尚未形成成熟完备的月球区域频率资源划分和使用规范, 目前实际应用中主要参考地球高低轨空间的频率资源的划分方法, 需要与地球轨道卫星共享频率资源.

本文在系统分析国际上地月空间频率资源申请

现状、工程任务规划与实施情况的基础上,总结并展望了地月空间频率资源的整体利用态势,并利用自主开发的地月空间频率兼容性仿真平台,对国际典型任务进行定量化的干扰计算分析,提出了后续地月空间卫星任务的用频建议。

1 地月空间探索任务

按照国际规则,卫星在使用频率前须向国际电信联盟申报作为频率轨道资源载体的卫星网络资料,开展国际频率协调,后申报者不可对先前申报的卫星网络资料频轨资源造成不可接受的干扰。根据卫星任务关联的卫星网络资料是否经过协调程序,将卫星网络资料申报流程分为 A-N 程序与 C-N 程序^[9]。A-N 程序需要卫星操作者向国际电信联盟先申报提前公布资料(A 资料),后在规定时间内申报通知资料(N 资料);C-N 程序需要卫星操作者先向国际电信联盟申报协调资料(C 资料),后在规定时间内申报通知资料(N 资料)。通知资料被国际电信联盟审查合格后,享有国际认可的保护地位。此外,《无线电规则》第 11.25 款规定,通知资料应不早于该指配启用前三年送达无线电通信局,这里的指配是由主管部门授权于某一无线电台在规定的条件下使用某一射频或无线电频道的许可。

1.1 在轨运行与规划的卫星任务

由于卫星网络资料的申报时间一般要比卫星任务实施时间提前 2~7 年,国际频率申报数据会较早地体现出在轨运行任务(在通知资料中体现)与规划任务(在提前公布资料中体现)的用频情况。截至 3035 期(2024 年 11 月 26 日)无线电通信局国际频率信息通报(BR IFIC),国际上申报的月球探索关联的卫星网络资料共 67 份(A/C/N 资料总数),其中包括正在实施任务的卫星网络资料、已申报至国际电联但任务处于规划中的卫星网络资料、工程任务已完成但未正式注销的卫星网络资料。上述统计中包括了 3 份搭载于 Artemis I 任务的立方星对应的卫星网络资料,但由于在猎户座飞船飞行过程中,这两颗立方星飞往深空^[10,11],故不在本文统计范围内。

本文通过卫星网络资料的名称、参考天体、地面站信息、申报日期与发射日期的关系、未来任务规划等信息将卫星网络资料与任务关联,得到现阶段已向国际申报频率资源的主要探月任务的用频情况,具体

网络资料名称和任务对应情况见表 1。

1.2 卫星网络资料关联任务分布态势

通过国际电信联盟(ITU)频率数据库及相关公开资料的分析统计,将已申报卫星网络资料的卫星任务的频率、轨道参数进行整理重构,相关通信链路的态势汇总如图 1 所示。大多数卫星网络资料申报了星地链路,图 1 中以平行于地月连线的黑色线条表征,少量卫星网络资料申报月球空间的卫星间链路(包含月轨月表间链路)。图 1 中绿色线表示中国卫星网络资料的星间链路,橙色线表示其他国家卫星网络资料的星间链路。由于部分中继星卫星网络资料申报的空间电台指代不明,这部分链路通过波束形式表征。

表 1 的月球探索关联的卫星网络资料对应的卫星任务分布于不同的空间位置。地月拉格朗日 L2 轨道包括鹊桥一号,直觉机器公司(Intuitive Machines)的中继星;地月拉格朗日 L1 轨道包括直觉机器公司的中继星;近直线月晕轨道(NRHO)包括 CAPSTONE 立方星和 Gateway 月球门户空间站;DRO 轨道包括 DRO A 星和 Orion 猎户座飞船(Artemis I 任务);月球椭圆轨道包括鹊桥二号,忒弥斯卫星(Themis),直觉机器公司的中继星与太阳系互联网星座(CelestNet)等;月球低轨道包括月球勘测轨道飞行器(LRO),探路者月球轨道器(KPLO),月船二号(Chandrayaan-2)轨道器和月球开拓者(Lunar Trailblazer)等;月表包括月船三号(Chandrayaan-3),白兔一号(Hakuto-R M1),白兔二号(Hakuto-R M2),Tenacious 月球车,月球探测智能着陆器(SLIM),拉希德月球车(Rashid rover),蝰蛇号月球车(VIPER),奥德修斯着陆器(Odysseus)和月球 25 号(Luna 25)等。

2 地月空间用频态势

按照国际无线电规则和使用要求,卫星任务在使用频率前需报送 A 资料或 C 资料;需在 A 资料或 C 资料被无线电通信局接收后的 7 年内完成 N 资料的报送并启用该频率,否则相关卫星网络 A 资料或 C 资料将被删除,且根据《无线电规则》的第 11.25 款,N 资料应不早于该指配启用前三年送达无线电通信局。由此可见,频率申报资料与实际任务进展之间存在一定的关联性,往往 A 资料申报数据反映了未来的规划任务情况,N 资料的申报数据代表已有实际工程

表 1 地月空间卫星网络资料申报与任务对应情况
Table 1 Correspondence of cislunar exploration missions and published space networks

国家	卫星网络资料名称	对应任务
中国	ABL_A, ABL_A_01, ABL_B, ABL_B_01	DRO探索任务
	DSLWP	龙江卫星
	CE-1, LUNAR CTDRS-1, LUNAR CTDRS-2, LUNAR KU-4 A, LUNAR L2 KU-4 A, LUNAR LANDER, LUNAR LANDER-4 A, LUNAR ORBITER-4 A, LUNAR ORBITER-A, LUNAR ORBITER-B, LUNAR OSCAR II, LUNAR ROVER, LUNAR S-SAT, LUNAR TES-1	探月工程系列卫星
	SPPOSS-PG-03	超长波天文观测阵列
美国	CAPSTONE	CAPSTONE立方星
	GATEWAY HALO	月球门户Gateway
	GATEWAY PPE	
	LRO	月球勘测轨道器
	LUNAR LTE DEMO	月球LTE/4 G通信实验
	LUNAR NODE-1	LN-1月球节点1导航演示器
	LUNAR TRAILBLAZER	月球开拓者
	ORION	猎户座飞船
	ORION MPCV	
	ORION MPCV II	
	THEMIS-LUNAR	THEMIS-ARTEMIS 任务
	USA-KHON-1	Intuitive Mechines中继星座
	USA-LUNAR-1	Intuitive Mechines公司卫星网络资料
	USA-LUNAR-2	
	USASAT-LUNAR-A	—
	USASAT-LUNAR-B	—
	VIPER	蝰蛇号月球车
英国	CELESTNET-LUNAR	太阳系互联网星座
	IOMSAT-HAL	—
	IOMSAT-L1	—
	LUNAR_PATHFINDER	月球探路者
	SPACECOMMS-L1	—
意大利	ARGOMOON	阿尔戈之月纳米卫星
印度	LMI	月船二号
	LMI3	月船三号
日本	HAKUTO-R-L1	白兔一号
	SLIM_LEV-1-2	月球勘测智能着陆器
韩国	KPLO	探路者月球轨道航天器
俄罗斯	LUNA-GLOB	月球25号
阿联酋	ELM-1	拉希德月球车
卢森堡	ISPACE_M2 R	白兔二号Tenacious月球车

注 “—”表示尚未检索到对应任务.

任务在轨使用或即将发射. 因此, 对国际上频率申报资料的数据整理分析, 对于掌握频率资源的规划使用和研判发展态势具有重要价值, 对于工程任务实施中的实际选频用频设计具有一定的指导意义.

2.1 卫星网络资料申报情况

截至 2024 年底, 各国向国际电信联盟申报的地月空间探索任务卫星网络资料情况如表 2 所示, 同名但类型不同的资料分类统计. 由表 2 可见, 中国申报的卫星网络资料 A 资料数量、N 资料数量及总数处于国际领先地位. 在申报 N 资料后, 若主管部门注销 A 资料与 C 资料不及时, 国际电信联盟会同时公示该卫星网络资料名称的 A/C/N 类型资料. 若剔除多类型资料导致的重复计数, 仅统计卫星网络资料名称数量, 中国仍持有最多的地月空间探索任务卫星网络资料. 根据目前国际上月球探索任务的合作情况, 可以

分为两个主要的阵营组织, 分别是由中国牵头有 13 个国家及多个国际组织加入的国际月球科研站 (ILRS)^[12] 计划和由美国牵头并有 53 个国家参与的 Artemis 计划^[13]. 对两个阵营的申请数量统计可知, Artemis 协定国申请的卫星网络资料共计 39 份, ILRS 参与国的卫星网络资料共计 25 份, 双方在申请的卫星网络资料的数量上体现出一定差距.

表 3 统计了 N 资料的收妥时间. 由于 LRO 的 N 资料进行了修改, 其收妥日期由 2007 年 10 月 3 日变更为 2021 年 7 月 9 日; THEMIS-ARTEMIS 的 N 资料收妥年份为 2010 年; 印度的 CHANDRAYAAN-1 的 N 资料收妥日期为 2009 年 6 月 12 日, 目前已经被国际电信联盟删除. 中国 CE-1 的 N 资料收妥日期为 2007 年 9 月 20 日, 在 2013—2019 年间中国又向国际电信联盟申请了 5 份 N 资料, 均比 Artemis 协定

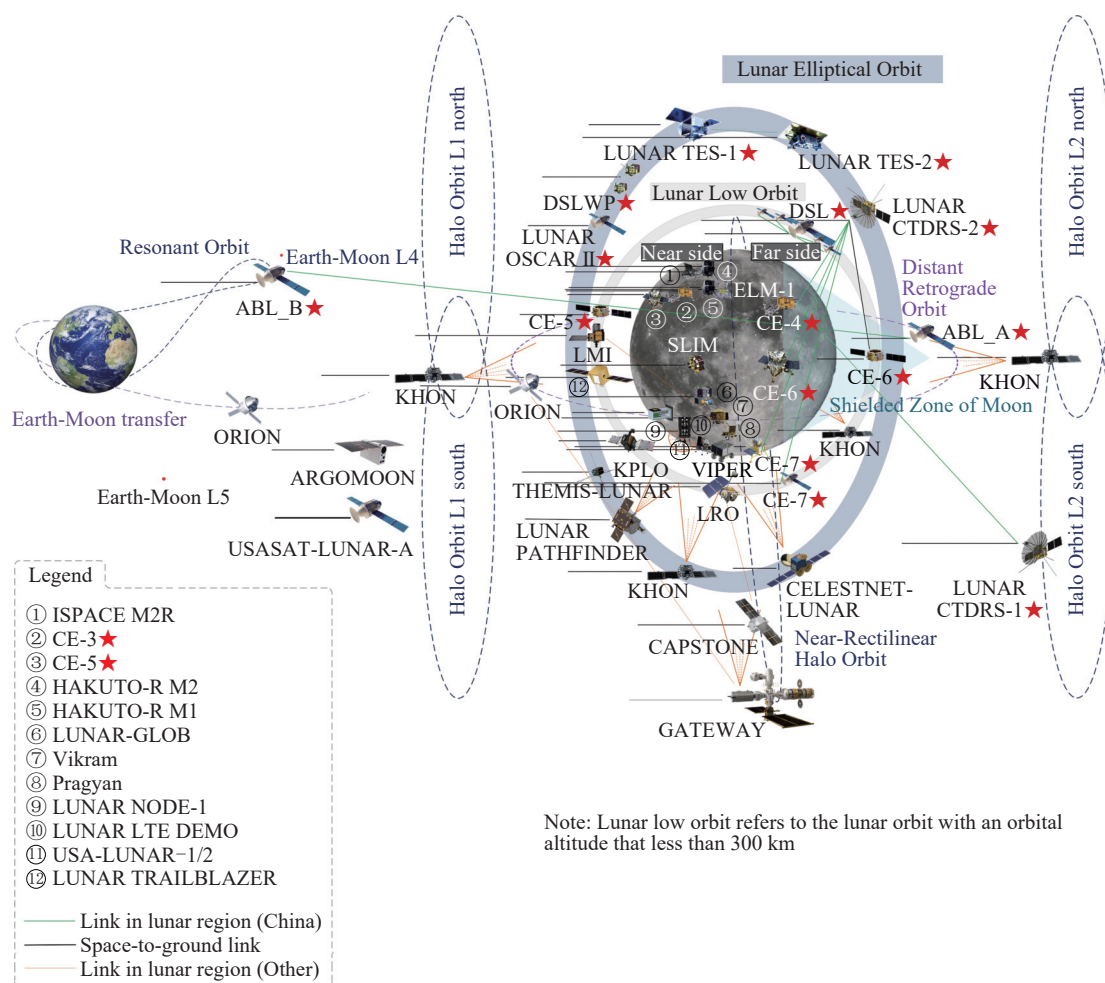


图 1 地月空间任务分布 (截至 BR IFIC 3035)

Fig. 1 Distribution of the cislunar missions (as of BR IFIC 3035)

表 2 地月空间卫星网络资料类型统计
Table 2 Statistics on categories of satellite networks in cislunar space

国家/联盟	卫星网络资料类型数量				去重复后卫星网络资料名称数量
	A资料	C资料	N资料	共计	
中国	17	0	6	23	20
美国	16	0	5	21	17
日本	2	0	1	3	2
印度	2	1	1	4	2
英国	5	0	0	5	5
意大利	1	0	1	2	1
韩国	1	0	1	2	1
俄罗斯	1	0	1	2	1
阿联酋	1	0	0	1	1
卢森堡	1	0	0	1	1
Artemis协定国	29	1	9	39	31
ILRS参与国	18	0	7	25	21

表 3 地月空间任务的卫星网络 N 资料收妥时间
Table 3 Date of receipt of notification satellite networks in cislunar space mission

国家	卫星网络资料名称	国际电信联盟收妥日期
中国	CE-1	2007-09-20
美国	THEMIS-LUNAR	2010-05-11
中国	LUNAR LANDER	2013-03-05
中国	LUNAR ROVER	2013-03-05
中国	DSLWP	2018-04-03
中国	LUNAR CTDRS-1	2019-09-05
中国	LUNAR S-SAT	2019-09-05
俄罗斯	LUNA-GLOB	2020-08-04
美国	ORION	2020-11-26
意大利	ARGOMOON	2020-12-23
美国	CAPSTONE	2021-07-09
美国	LRO	2021-07-09
美国	ORION MPCV	2021-08-06
韩国	KPLO	2021-10-12
印度	LMI	2022-08-11
日本	HAKUTO-R-L1	2022-10-10

国的其他卫星网络资料申报时间早。

2.2 申报频段分布

按照国际规则,一份卫星网络资料可同时申报多个频段,因此在按频段统计卫星网络资料时,同一份卫星网络资料可能会被纳入多个频段统计范畴。表 4

给出了基于月球探索任务常用的空间研究业务频段按卫星网络资料类型的数量统计情况。

从 A 资料总数和 N 资料总数来看,各国当前规划中及在轨的探月任务仍以 S 频段和 X 频段作为主用频段。《无线电规则》将 S 频段与 X 频段部分带宽划分给空间操作业务、空间研究业务(非深空),这两种业务可用于地月空间探索任务。原因之一是 10 GHz 以下的频段具有较低的大气吸收损耗及自由空间损耗,对发射功率和天线增益等能源配置、工程工艺要求相对较低,因此被广泛使用。部分卫星网络资料已申报 Ku 及 Ka 频段,说明已有部分任务为了规避干扰拟使用高频段,反映了未来探月任务的用频趋势。此外,《无线电规则》频率划分表划分给 Ku 及 Ka 频段的带宽比 S/X 频段更宽,可满足高速数传需求。另外,有少量任务申请了其他频段,原因主要包括两个方面:一是工程上未遵守频率划分表,但设备已投产,申报使用频率时引用《无线电规则》第 4.4 款,“不对按照《组织法》、《公约》和本规则规定工作的电台造成有害干扰并不得对该电台的干扰提出保护要求”;二是月球微波探测类载荷申报的空间研究有源探测频段。

2.3 申报频段与 SFCG 规划的符合度

空间频率协调组(SFCG)创立于 1980 年,聚焦《无线电规则》分配给空间研究、空间操作、地球探测卫星及气象卫星服务的无线电频段的使用与管理,是具有国际约束力的非正式组织。组内成员提出上述业务无线电使用的前瞻性议题,经组内讨论一致,可

表 4 地月空间卫星网络资料空间研究业务频段统计数据

Table 4 Statistical data of satellite networks in cislunar space for space research service frequency band

	频段	频段区间/MHz	中国	美国	日本	印度	英国	意大利	韩国	俄罗斯	阿联酋	合计
A资料	L以下	400.15~401	3	—	—	—	—	—	—	—	—	3
		410~420	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	S	2025~2110	5	10	1	2	5	—	1	—	1	25
		2200~2290	5	11	1	2	4	—	1	—	1	25
	X	7190~7235	11	6	1	—	4	1	—	—	—	23
		8450~8500	12	7	1	2	4	1	1	1	—	29
	Ku	14800~15350	5	—	—	—	—	—	—	—	—	5
	Ka	22550~23150	7	2	—	—	2	—	—	—	—	11
		25500~27000	8	2	—	—	3	—	—	—	—	13
	Ka以上	37000~38000	—	—	—	—	1	—	—	—	—	1
		40000~40500	—	—	—	—	1	—	—	—	—	1
N资料	L以下	400.15~401	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
		410~420	2	—	—	—	—	—	—	—	—	2
	S	2025~2110	4	5	—	1	—	—	1	—	—	11
		2200~2290	4	5	—	1	—	—	1	—	—	11
	X	7190~7235	3	1	1	—	—	1	—	—	—	6
		8450~8500	5	1	1	1	—	1	1	1	—	11
	Ku	14800~15350	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	Ka	22550~23150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
		25500~27000	—	1	—	—	—	—	—	—	—	1
	Ka以上	37000~38000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
		40000~40500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0

扫除议题解决方案在国际生效的障碍. SFCG 发布的最新版本月球用频建议书 Rec 32-2 R6 《月球区域通信、定位、导航、授时频率指配和共享》, 给出月球区域多种链路类型的频率划分建议, 链路类型包括: 地球-月轨间 (E-LO and LO-E) 链路、地球-月表间 (E-LS and LS-E) 链路、月轨-月表间 (LS-LO and LO-LS) 链路、月轨间 (LO-LO) 链路、月球中继卫星交叉链路 (Lunar relay to lunar relay cross link)、月表无线网络 (Lunar surface wireless network)、地球-月轨间业余无线电操作 (Amateur radio operations: E-LO and LO-E) 链路、地球全球导航卫星系统-月表月轨间 (Earth based GNSS to LO and LS) 链路、基于月球原位无线电导航/测定卫星系统-月轨月表间

(In-situ lunar based RNSS/RDSS to LO and LS) 链路和月球搜索和救援信标 (Lunar search and rescue beacon). 该系列建议书最初发布于 2012 年 6 月, 截至目前, 共迭代 6 版, 同时也是 NASA 《LunaNet 互操作规范》^[14] 中频率划分的参考文件之一. 这些建议书对未来月球用频规划具有全球性的指导意义. 下面将对本文提到的卫星网络资料开展对 SFCG Rec 32-2 R6 链路用频的符合度分析.

结合卫星网络资料的申报频段、波束收发类型、任务信息、空间电台等多方面信息, 统计建议书中的各频段卫星网络资料数量, 汇总结果如图 2 所示. 图 2 中线条粗细表征该频段 A/N 资料总和, 若某频率划分下无对应的卫星网络资料, 则以虚线表

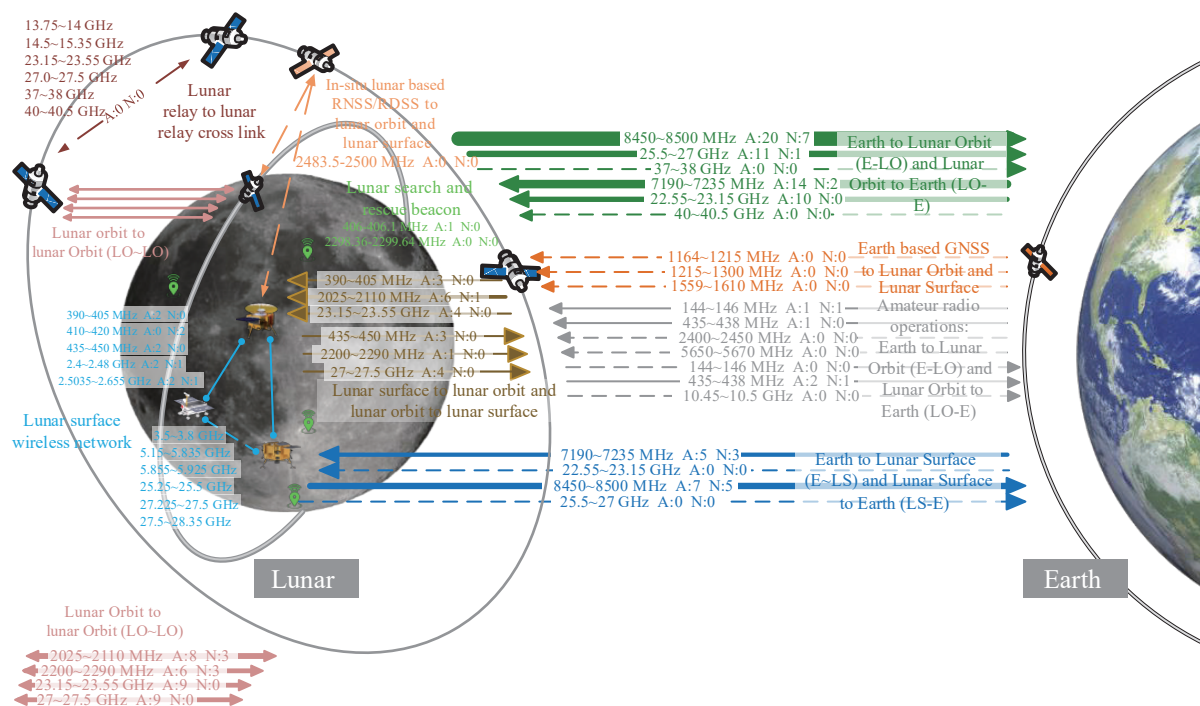


图 2 符合 SFCG Rec 32-2 R6 建议书的地月探索任务卫星网络资料统计

Fig. 2 Satellite network data statistics for cislunar exploration missions in compliance with SFCG recommendation Rec 32-2 R6

示. 需要指出的是, IOMSAT-HAL, IOMSAT-L1, SPACECOMMS-L1 三份卫星网络资料部分信息缺失, 无法准确确定关联卫星及空间电台的位置 (月轨或者月表), 故不在本文统计范畴中.

统计过程中发现, 本文涉及的 64 份卫星网络资料中有 62 份都包含符合 SFCG 建议书频段规划的指配频段, 且申报的链路类型也包含在建议书提及的链路类型中. 结果表明, 链路类型集中在地球-月轨间链路、地球-月表间链路、月轨间链路和月轨-月表间链路四种类型. 地球-月轨间链路与地球-月表间链路数量最多, 表明星地通信链路仍然是通信的主要链路; 月轨间链路与月轨-月表间数量次之, 原因是部分月球中继星座申报包含月球区域的星间链路的 A 资料, 另有部分探月任务申报包含轨道器与着陆器、巡视器之间通信链路的卫星网络资料. 目前申报的月表无线网络链路均为着陆器与巡视器间的通信链路. SFCG 建议书规划的其余链路受限于当前应用场景、技术难度、资金成本等因素, 卫星网络资料数量较少. 图 2 中以线条的粗细表征的各频段申报数量, 也反映出第 2.2 节申报频段的数量特征. 上述 64 份卫星网络资料有 60 份的初次申报时间晚于 SFCG 建议书的发布时间,

结合申报频段、申报数量及链路类型的统计结果, 可见该系列建议书对月球探索用频规划起到了指导作用.

总体上看, SFCG 建议书对频段的规划与《无线电规则》的频率业务划分一致, 但建议书中少数频段不满足《无线电规则》的业务类型划分, 例如月轨-月表间的 390~405 MHz 和 435~450 MHz 段、月表无线网络的 390~405 MHz 和 5150~5835 MHz 段等. 此外, 部分卫星网络资料的申报频段不符合 SFCG 建议书的频段规划, 例如月船系列任务在 2400~2480 MHz 的月表无线网频段申报有源遥感业务, 鹊桥中继卫星在 7190~7235 MHz 和 8450~8500 MHz 段用于星间中继, 太阳系互联网星座在 22.55~23.15 GHz 段申报卫星间业务等, 后续可通过议题研究达成国际共识.

3 地月空间典型任务间频率干扰分析

地月之间距离远大于地球、月球的球体直径. 假定从月球中心沿月地连线方向, 有一锥形波束照射到地球, 当波束宽度不同时, 则波束照射到地球的剖面

表 5 月球波束照射地球的面积特征参数

Table 5 Characteristic parameters of the lunar beam's illuminated area on Earth

波束宽度/(°)	剖面直径/km	所截球面弧长/km	所截球冠面积/km ²	所截球冠占地球表面积百分比/(%)
0.05	329.5	329.5	8.53×10^4	0.017
0.1	1318.3	1320.6	1.37×10^6	0.27
0.5	3297.3	3335.2	8.69×10^6	1.70
1	6607	6945.1	3.70×10^7	7.23
1.5	9949.2	11412	9.56×10^7	18.71
1.9034	12753	19754	2.50×10^8	48.89

直径、所截球面弧长、所截球面面积以及所截球面占地球面积的百分比如表 5 所示。

取地月中心距离 3.84×10^5 km, 地球半径 6378 km. 如图 3 所示, 当波束宽度 $\geq 1.9034^\circ$ 时, 若位于距离地球中心 3.84×10^5 km 处, 向地球发射无线电电波, 则该波束可覆盖近一半地球表面. 从本文涉及的卫星网络资料来看, 仅有极少部分空间电台的波束宽度 $< 2^\circ$, 若多数卫星任务按照申报参数向地球发射无线电电波, 实际使用中很难通过空间隔离实现干扰规避, 相互干扰的风险会显著增加。

为了进一步显示地月空间任务间的频率兼容问题, 以月球中继任务 Gateway 卫星 (卫星网络资料 GATEWAY HALO) 和商业月球中继卫星 Khon (卫星网络资料 USA-KHON-1) 各自对位于月球南极的月球车的下行通信链路为例 (场景建模如图 4 所示) 进行量化计算. 仿真数据采用双方向 ITU 申报的卫星网络资料中的频率、空口参数与公开的空间位置信息. 干扰评估标准基于国际电信联盟 ITU-R SA.609-2 建议书《有人和无人操纵的近地科学卫星的无线电通信链路保护准则》, 该建议书是地球外延 2×10^6 km 范围内科学卫星的保护准则. 该准则建议空间台站接收机输入端接收的干扰电波功率应比等效工作噪声功率低 6 dB, 故此处借鉴选用 $I/N \leq -6$ dB. 场景参数设置如下。

(1) 链路空间位置. 干扰链路 (Gateway 卫星-月球车 1) 是周期 6.56 天的地月 L2 南族 NHRO 轨道的 Gateway 卫星对 Nobile 坑附近 (53.5°E , 85.2°S) 月球车的下行链路. 受扰链路 (Khon 卫星-月球车 2) 是周期为 24 h 的月球椭圆冻结轨道^[15] 的 Khon 卫星对奥德赛着陆器附近 (1.44°E , 80.13°S) 月球车的下行链路。

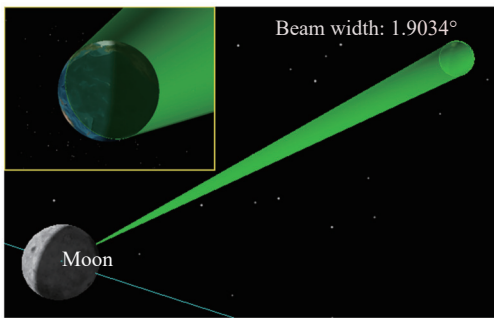


图 3 位于月球的无线电波束照射范围仿真
Fig. 3 Simulation of the coverage range of radio beam on the Moon

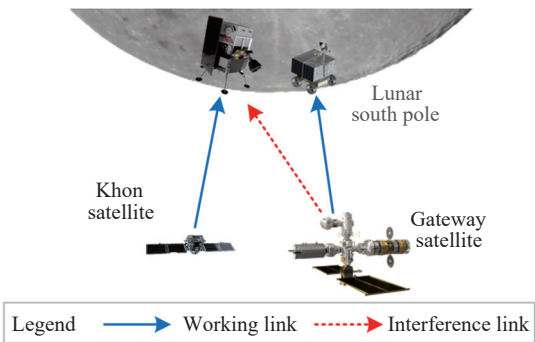


图 4 月球南极频率兼容分析场景模型
Fig. 4 Frequency compatibility analysis scenario model of the lunar south pole

(2) 空口参数. Gateway 卫星取 GATEWAY HALO 的 HSTH 波束的空口参数, Khon 卫星取 USA-KHON-1 的 TFWDHGA 波束的空口参数, 天线模型选取 ITU-R S.1528 建议书的 天线模型。

(3) 月球车空口参数. Khon 卫星通信的月球车取 USA-LUNAR-2 卫星网络资料 THMU2 波束的空口参数和天线模型, 此卫星网络资料的 THMU2 波束

是 USA-KHON-1 卫星网络资料 TFWDHGA 波束申报的关联空间电台的通信波束; GATEWAY HALO 的 HSTH 波束未申报关联空间电台的相关信息. 因此, Gateway 卫星通信的月球车的空口参数和天线模型, 与 Khon 卫星通信的月球车一致, 取 USA-LUNAR-2 卫星网络资料 THMU2 波束的空口参数和天线模型.

仿真时间为 2024 年 4 月 1 日 00:00:00 UTC 至 2024 年 7 月 1 日 00:00:00 UTC, 仿真步长设置为 1 min, 仿真结果 I/N 如图 5 所示. 在链路 (Khon 卫星-月球车 2) 的全部工作时间内, 干扰链路 (Gateway 卫星-月球车 1) 对其产生干扰功率 I/N 超过 -6 dB 门限的时间占比为 96.85%.

上述频率兼容性分析的仿真结果表明, 在未来月球开发利用的热点区域——月球南极, 月轨-月表的链路之间极易产生同频干扰. 一方面, 因为 S 频段卫星波束相对较宽, 通信距离较远, 且月球车较为集中地分布在月球南极区域内, 月球轨道器天线主瓣发射的能量可覆盖月球南极大部分区域; 另一方面, 目前月球车天线近似全向天线, 无法通过旁瓣来减少干扰电波的接收, 导致干扰电波功率较大. 由此可见, 难以通过空间隔离的方式, 规避月球南极月轨-月表链路中的同频干扰.

在月球开发利用成为未来国际热点的前提下, 多任务、高频次、长时间的月球空间通信将不可避免, 通过弧段相位错开等时空隔离方式规避干扰的难度也日益增加. 后续工程任务中, 需要重点关注如何规

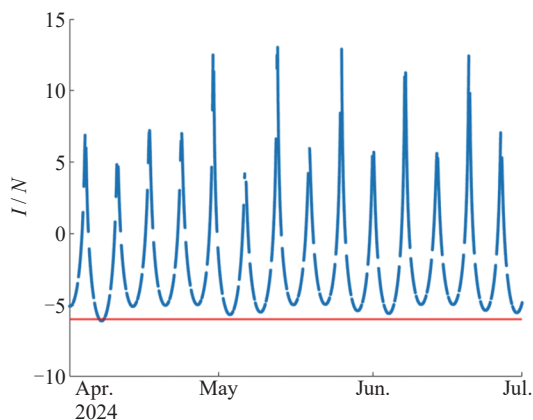


图 5 月轨-月表间典型任务的 I/N 仿真结果

Fig. 5 Simulations of I/N for typical missions between lunar orbit and lunar surface

避同频乃至邻频干扰的问题, 以保障空间重大基础设施的安全可靠与投资效益.

4 地月空间任务用频态势及建议

4.1 地月空间任务用频态势

探月任务规划层面, Artemis 计划以月球为中转站瞄准未来火星登陆, 数据传输需求剧增, 预计 2035 年数传速率需求达 $900 \times 10^6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 、日均数传量为 11.5 TB^[16]. 《LunaNet 互操作规范》提到, LunaNet 可提供实时/存储转发通信、定位导航授时、短信、告警/紧急及科学数据等服务, 多业务类型对月球区域频段业务划分提出新的需求. 国际月球科研站 ILRS 作为建立在月球表面或月球轨道上的综合性科学实验基地, 将开展多学科、多目标的科学研究并长期自主运营. 可以预见, 随着未来月球任务向高数传速率、大数据容量、多业务需求、长时间操控等方向发展, 地月空间探索与开发利用领域中, 越来越多的飞行器、载荷对频率资源的需求必将出现爆发式增长.

频率资源划分层面, 《LunaNet 互操作规范》正通过 SFCG 组织推动, 逐步成为国际通用的建议书之一. 该规范第 5 版在月球中继用频方案中, 引用了 SFCG 的 REC 42-1 建议书, 而此建议书也同步引用了《LunaNet 互操作规范》第 4 版, 形成了双向技术衔接. 此外, 《LunaNet 互操作规范》已作为 NASA 和 ESA 月球中继卫星系统的官方操作规范, 同时也是其他商业月球探测卫星接入其月球中继星座的统一技术准则. 目前, 其他国家及航天机构也正在积极开展相关领域的研究工作, 后续将有更多配套操作规范出台, 进一步指导月球空间频率资源的科学划分与高效利用.

未来地月空间频率资源将呈现以下态势.

(1) 月面月轨频率资源划分需求迫切. 国际上以 Artemis 计划和 ILRS 为代表的大量基础设施登陆月球实现有人或无人值守, 需要对月面月轨用频进行科学合理划分, 确保各基础设施之间频率兼容共用. 目前 ITU 也已将月面月轨频率划分列入研究议题, 组织全球研讨, 以推动形成国际新规则.

(2) 月球-地球间同频、邻频通信链路干扰概率增大. 地月距离相对遥远, 从月球传输至地球间的通信链路主瓣发射的能量对地球的覆盖范围较大 (2° 波束

可覆盖约半个地球),随着月球探测任务越来越多,未来同频、邻频干扰概率会继续增加。

(3) 频率资源业务由空间研究拓展到通信、导航、移动等多类型业务。月球任务从月球研究探索发展至月球开发利用,业务需求将在空间研究业务基础上扩充通信、导航、测控、移动等业务,业务需求也逐渐增加。

(4) 通信带宽需求将逐步提升。现有 S 和 X 频段的频率资源难以满足未来月球基础设施建设与利用的需求,国际上月球门户 Gateway、太阳系互联网星座 CelestNet 已在 ITU 申报 Ka 频段宽带资源,月球中继星座及关键太空资产已开始向 Ka 频段布局。

4.2 地月空间任务用频建议

为了避免出现频率资源无序使用的局面,给出如下建议供后续地月空间任务规划论证及工程实施参考。

(1) 围绕任务实施,牵引推动国际规则制修订。基于中国探月任务实施情况,结合未来任务规划,以在轨运行的工程参数作为数据支撑,深入开展针对月球中继与月面频率划分的研究工作,参与 ITU 相关建议书及规则制定流程,推动达成国际共识,形成针对现有月球关键基础设施的规则保护。

(2) 加强模型与工具研究,开展频率兼容共用量化评估工作。针对未来探月任务干扰概率提升的趋势,在工程频率论证及方案设计阶段,选用规则范围内相对空闲频段或采用扩频等抗干扰通信体制,同步开展干扰评估模型研究及自主工具的研制,实现不同任务间、同一任务不同飞行器之间的频率干扰量化评估,支撑干扰规避措施制定及在轨有害干扰排查。

(3) 控制实际使用带宽,提高频率资源的利用效率。由于各类业务的应用场景不同,不同频段对可靠性和带内带外的使用规范不尽相同,工程上需严格控制边带。在调制方式与信道编码方式之间权衡,尽量兼顾合规及高效,减少带外发射及杂散的影响,提高频率资源的利用效率。

(4) 工程任务用频向 Ku/Ka 频段拓展。目前已申报使用 S/X 频段的探测任务数量较多,且有大量任务在轨运行。国际上划分给空间研究业务 Ku/Ka 频段的带宽远大于 S/X 频段,且当前申报 Ku/Ka 频段的用于月球探索任务的卫星网络资料数量较少,申报高频段频率资源可满足未来高速数传的需求,缓解

S/X 频段资源紧张的局面。

5 结语

围绕地月空间频率资源的使用现状与规划需求,在分析国际上已申报的卫星网络资料数量及频段的基础上,推演关联任务并刻画典型任务的空间分布态势,基于自主开发的地月空间频率资源兼容性仿真分析工具,以月球南极区域的两个任务为例,进行了月轨-月面通信链路的定量化计算,给出了两个探测任务 S 频段的用频兼容分析。基于月球区域国际频率资源划分的现状,提出了后续研究工作以及工程实施的建议。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

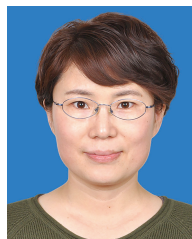
- [1] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al.* Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(24): 2577-2586 (裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站 [J]. *科学通报*, 2020, **65**(24): 2577-2586)
- [2] BAO Weimin, WANG Xiaowei. Some thoughts about cislunar exploration and exploitation[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, **43**(6): 705-712 (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)
- [3] JONES A. Europe launches ambitious “Moonlight” program to support lunar exploration[EB/OL]. (2024-10-17)[2024-11-15]. <https://www.space.com/europe-moonlight-program-lunar-navigation-communications>
- [4] WU Ji. Lunar based Earth observation and its potential applications[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 965-969 (吴季. 月基对地观测的特点与应用潜力分析 [J]. *空间科学学报*, 2024, **44**(6): 965-969)
- [5] WANG Chi, LIN Yangting, PEI Zhaoyu, *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 (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)
- [6] YANG Mengfei, PENG Jing, LI Jionghui, *et al.* Architecture and development envision of cislunar space infrastructure[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2024, **44**(3): 1-14 (杨孟非, 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*, 2024, **44**(3): 1-14)
- [7] CONG Dianwei, WU Fumei, LI Chonghui, *et al.* Autonomous navigation technology and research advances of cislunar space spacecraft[J]. *Radio Engineering*, 2025, **55**(2):

- 317-322 (丛佃伟, 吴富梅, 李崇辉, 等. 地月空间航天器自主导航技术及研究进展 [J]. *无线电工程*, 2025, **55**(2): 317-322)
- [8] QIAO Liang, LI Chenghao, WANG Shanpeng, *et al.* Cislunar cloud network: the cross-domain integrated cislunar-spatial network[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2024, **44**(3): 43-50 (乔梁, 李承昊, 王善澎, 等. 地月云网: 跨域融合一体的地月空间网络 [J]. *中国空间科学技术*, 2024, **44**(3): 43-50)
- [9] PAN Ji, SHI Huipeng, ZHANG Xiao Yan, *et al.* Satellite Frequency and Orbital Resources International Declaration and Coordination [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2024 (潘冀, 石会鹏, 张晓燕, 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)
- [10] NASA. WhatisBioSentinel[EB/OL]. (2024-11-20)[2025-01-02]. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/ames/what-is-biosentinel/>
- [11] NASA. Cube quest challenge spotlight: team miles [EB/OL]. (2017-05-18)[2025-01-02]. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/cube-quest-challenge-spotlight-team-miles/>
- [12] JONES A. Senegal among new members of China's ILRS moon base project[EB/OL]. (2024-09-05)[2025-01-10]. <https://spacenews.com/senegal-among-new-members-of-china-ilrs-moon-base-project/>
- [13] NASA. The Artemis accords[EB/OL]. (2025-02-11)[2025-02-12]. <https://www.nasa.gov/specials/artemis-accords/>
- [14] NASA. LumaNet interoperability specification[EB/OL]. (2022-09-12)[2025-01-10]. <https://www.nasa.gov/director-ates/somd/space-communications-navigation-program/lun-anet-interoperability-specification/>
- [15] ZHOU Wenyan, GAO Shan, LIU Decheng, *et al.* Orbit design for lunar polar region exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(3): 248-254 (周文艳, 高珊, 刘德成, 等. 月球极区探测轨道设计 [J]. *深空探测学报 (中英文)*, 2020, **7**(3): 248-254)
- [16] NASA. LumaNet overview[EB/OL]. (2022-06-08)[2024-12-29]. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/humanet-empowering-artemis-with-communications-and-navigation-interoperability/>

作者简介



李震 男, 1995年9月出生, 现为中国科学院国家空间科学中心工程师, 主要研究方向为地月空间频轨资源应用技术。
E-mail: lizhen@nssc.ac.cn



姚秀娟 (通信作者) 1977年8月出生, 博士研究生导师, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 从事空间通信与频谱感知方面的研究工作。
E-mail: yaoxj@nssc.ac.cn