

深空星载通信技术发展现状与展望

唐玉华^{1,2}, 梁启超¹, 雷振羽¹, 姜天天¹, 徐杨¹, 杨志华³,
胡茂海⁴, 陈中⁵, 郑为民⁵, 徐得珍⁶

(1. 深空探测实验室, 北京 100195; 2. 探月与航天工程中心, 北京 100190; 3. 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 深圳 518055; 4. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621999; 5. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 6. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 在深空探测任务中, 测控通信系统的星载部分是实现远距离信息传输的基础, 其技术发展直接推动地面接收数据速率的增长, 从而影响了探测任务的方案设计和工程实施。系统梳理了国内外深空探测任务中星载通信技术的发展历程与研究现状, 重点分析了高频段通信、高效率编解码和深空中继通信等关键技术, 相关结论可为中国未来深空探测任务的测控通信系统设计与任务规划提供技术参考。

关键词: 高频段通信; 高效率编解码; 深空中继通信

中图分类号: V448.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)05-0463-13

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250064

引用格式: 唐玉华, 梁启超, 雷振羽, 等. 深空星载通信技术发展现状与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(5): 463-475.

Reference format: TANG Y H, LIANG Q C, LEI Z Y, et al. Status and prospect of space-borne communication technology for deep space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(5): 463-475.

引言

深空通信技术作为支撑巨行星探测与行星际探索的核心技术, 在深空任务中面临三大技术挑战: ①极远距离导致小时级通信时延, 造成传统闭环控制模式失效; ②行星际链路损耗极高, 逼近香农极限的容量约束严重制约数据传输效率; ③极端环境(太阳风、星际尘埃等)所引发的通信信号衰减及畸变, 削弱接收信噪比。

中国目前正在论证“天问三号”火星采样返回任务、“天问四号”木星系探测任务、太阳系边际探测任务等深空探测任务, 深空星载通信技术是实施这些任务的前提和基础。国际上, 美欧等国已经实施了数次深空探测任务, 在这些任务中都采用了地面测控网和星载测控设备协同的方式, 实现星地通信。中国通过探月任务和火星探测任务, 也建立了世界上唯三的全局布局深空测控网(另外两个是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的深空网(Deep Space Network, DSN)^[1]和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的欧洲空间跟踪网络(European space track, Estrack)^[2]), 为实施深空探测任务奠定了良好的基础^[3]。

星载通信技术方面, 通过“嫦娥”系列探测器和“天

问一号”探测器, 国内相关研制单位已经积累了丰富的经验^[4]。面向深空通信提出的更高要求, 需要从多个方面进一步提升星载通信能力, 并通过与地面深空测控网协同, 保障深空探测任务的成功实施。

本文聚焦于深空星载通信技术, 通过梳理近50年来的技术演进历程, 分析表明该领域呈现以下发展趋势: ①高频段通信能力持续突破, 通过Ka波段调制解调(26~40 GHz)及激光通信技术实现传输带宽从MHz至GHz量级的跃升; ②高效率编解码架构深度革新, 借助低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)/Turbo码等近香农限编码与自适应传输策略, 在低信噪比条件下保障通信的可靠性; ③深空中继通信体系逐步完善, 依托中继卫星网络部署, 为超远距离通信链路的可靠性与信号完整性提供保障。相关成果可为巨行星探测、太阳系边际探测等任务奠定关键技术基础。

1 国外星载通信发展概况

美国是全球首个开展深空探测任务的国家。截至目前, NASA和ESA通过独立或合作的形式, 已成功完成数十次深空(火星、木星、土星、天王星等)探测任务, 主要任务列表如表1所示。

收稿日期: 2025-07-10 修回日期: 2025-09-20

基金项目: 国防科工局民用航天预研项目(D010202); 国家自然科学基金委重大项目(62394350); 国家自然科学基金委重大项目(62394351); 国家自然科学基金委重大项目(62394355)

表1 国外主要深空探测任务列表

Table 1 List of major international deep space exploration missions

任务名称	发射时间	通信频段/GHz	编码方式	器上天线尺寸
“先驱者10号”(Pioneer 10) ^[5]	1972年	2.1 GHz (上行) 2.3 GHz (下行)	卷积编码	2.74 m固定反射面
“先驱者11号”(Pioneer 11) ^[6]	1973年	2.1 GHz (上行) 2.3 GHz (下行)	卷积编码	2.74 m固定反射面
“旅行者1号”(Voyager 1) ^[7]	1977年	2.1 GHz (上行) 2.3 GHz / 8.4 GHz (下行) 首次在深空任务中采用X波段下行	Golay和卷积级联编码/ RS和卷积级联编码	3.66 m固定反射面
“旅行者2号”(Voyager 2) ^[8]	1977年	2.1 GHz (上行) 2.3 GHz / 8.4 GHz (下行)	Golay和卷积级联编码/ RS和卷积级联编码	3.66 m固定反射面
“伽利略号”(Galileo) ^[9]	1989年	2.1 GHz/7.2 GHz (上行) 2.3 GHz/8.4 GHz (下行) 由于X波段仅支持高增益天线, 而高增益天线展开失败, 因此后续实际使用的是S波段上下行	RS/卷积编码	4.8 m折叠反射面天线 (展开失败, 后续使用低增益天线)
“卡西尼-惠更斯号”(Cassini-Huygens) ^[10-12]	1997年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行)	RS/卷积编码	4 m固定反射面
“奥德赛号”(Odyssey) 轨道器 ^[13]	2001年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行) 400 MHz/437 MHz (器间通信)	RS/卷积编码	1.3 m固定反射面
“火星勘测轨道器”(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO) ^[14]	2005年	约8 GHz (上行) 约8 GHz/约32 GHz (下行) 约400 MHz (器间通信) 验证新一代UHF通信系统	RS/卷积编码/ Turbo编码	3 m固定反射面
“新视野号”(New Horizons) ^[15-18]	2006年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行)	Turbo编码	2.1 m固定反射面
“朱诺号”(Juno) ^[19-20]	2011年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行)	Turbo编码/RS/ 卷积编码	2.5 m固定反射面
“露西号”(Lucy) ^[21-22]	2021年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行)	RS/卷积编码	2 m固定反射面
“木星冰卫星探索”(Jupiter Icy Moons Exploration) ^[23]	2023年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行) 31.8-32.3 GHz (下行)	RS/卷积编码/ Turbo编码	2.5 m固定反射面
“灵神星号”(Psyche) ^[24-25]	2023年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行) 深空光通信实验	Turbo/LDPC编码	2 m固定反射面
“欧罗巴快船”(Europa Clipper) ^[26-27]	2024年	7.2 GHz (上行) 8.4 GHz (下行) 32 GHz (下行)	Turbo/LDPC编码	3 m固定反射面

“先驱者10号”是NASA于1972年3月2日发射的探测器,如图1所示,其核心任务目标包括首次穿越小行星带、近距离探测木星及其磁场环境,并为后续外太阳系探测任务验证关键技术。作为人类首个进入太阳系逃逸轨道并实现行星际航行的航天器,其通信系统设计运用了多项工程创新:

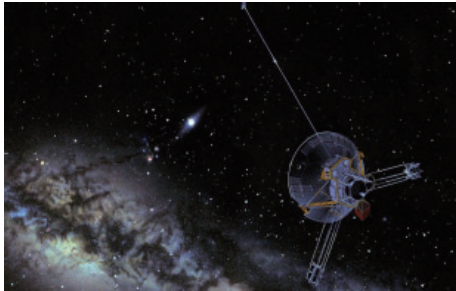
①探测器主体总长2.9 m,采用自旋稳定模式(转速4.8转/min),通过中轴线定向确保高增益天线持续指向地球,以解决深空探测中的姿态控制难题。②通信系统采用三级天线冗余架构,直径2.74 m的高增益抛物面天线作为主通信设备,固定于自旋轴顶端;馈源顶部集成中增益定向天线作为辅助通信通道;全向低增益天线安装于高增益天线基座下方,形成应急通

信保障。③通信链路采用S频段,上行频率2 110 MHz,下行频率2 292 MHz,通过双冗余接收机系统提升可靠性,信号调制采用卷积编码技术,双8 W发射机,以保障远距离通信需求。④“先驱者10号”的数据传输速率在飞往木星途中可达2 048 bit/s,任务末期降至16 bit/s。所有数据通过NASA深空网络的64 m口径天线阵列接收解析^[28]。

“先驱者11号”作为姊妹探测器,继承并验证了该通信系统架构,于1973年执行扩展任务:除完成木星探测外,首次实现对土星的近距离观测,并为“旅行者号”任务验证土星环的安全穿越路径。两探测器的通信系统设计为后续深空任务奠定了基础,其冗余机制和功率管理策略至今仍具参考价值。



(a) 先驱者10号



(b) 先驱者11号

注: 来源于NASA。

图 1 “先驱者10号”和“先驱者11号”
Fig. 1 Pioneer 10 and Pioneer 11

“旅行者1/2号”探测器于1977年8月20日(“旅行者2号”)和9月5日(“旅行者1号”)相继发射, 如图2所示, 其核心任务包括: 探测外太阳系行星系统(“旅行者1号”重点考察木星、土星及土卫六的大气与地质特征, “旅行者2号”则成为迄今唯一造访天王星与海王星的探测器); 研究行星磁场与太阳风的相互作用机制; 持续监测星际空间的等离子体密度、宇宙射线等物理参数。



注: 来源于NASA。

图 2 “旅行者号”概念图
Fig. 2 Voyager concept art

相较于“先驱者”系列, “旅行者号”的测控系统实现了三大工程突破: ①在器上通信系统中, 首次采用X频段(8.4 GHz)作为主下行链路, 配合直径3.66 m的卡塞格伦抛物面天线(1970年代深空探测最大固面天线), 将天线增益提高到48 dBi, 较传统S频段, 显著提升对地数据传输能力; 同时构建双频段协同架构, S频段专用于低速率指令上行与基础遥测, X频段

则实现科学数据高速下行。②在信道编码架构中, 任务初期采用Golay码与卷积码级联方案。为应对星际介质中的强宇宙射线干扰, 任务中期通过深空指令注入完成在轨编码器动态重构, 将外码升级为RS码, 形成RS-卷积级联编码体系。实验数据表明, 信息输出误码率由 5×10^{-3} 减少到 10^{-6} 量级。③在地面深空网络系统中, 将64 m天线升级至70 m天线, 接收信号强度提高1.4 dB。此外, 采用基带合成技术的多天线阵列, 将70 m天线和一副34 m天线组阵, 可使70 m天线性能提高0.8 dB^[29]; 70 m天线和两副34 m天线组阵, 可使70 m天线性能提高1.2 dB, 有效补偿星际距离导致的路径损耗^[30-32]。

“旅行者1/2号”探测器作为人类历史上飞行最远、运行时间最长的深空探测器^[33], 在47 a的行星际旅程中先后完成了对所有外太阳系行星——木星、土星、天王星和海王星的首次近距离探测, 突破日球层顶成为首个进入行星际空间的人造物体, 并在能源即将耗尽时仍通过创新技术手段延续科学使命。

“伽利略号”木星探测器于1989年10月18日发射, 该探测器在1995—2003年任务周期内实现了人类首次对木星及其卫星系统的长期环绕观测, 如图3所示。其通信系统由3个核心模块构成: ①高增益抛物面天线(High-Gain Antenna, HGA), 采用直径4.8 m的伞状可展开结构, 设计工作频段为S频段(2.295 GHz)上行指令接收与X频段(8.425 GHz)下行数据传输, 理论最大下行速率134 kbit/s; ②低增益全向天线(Low-Gain Antenna, LGA), 工作于S频段, 全向辐射模式; ③S/X双频段冗余收发机系统。然而, 由于展开机构机械故障(支撑肋锁栓冷焊效应), HGA未能实现完全展开, 导致探测器仅能依赖LGA进行通信。在木星轨道运行阶段, LGA的实际下行速率降至10 bit/s, 严重制约科学数据回传效率^[34]。



注: 来源于NASA。

图 3 “伽利略号”概念图
Fig. 3 Galileo concept art

针对这一异常工况, NASA团队实施了5项关键技术升级: ①进行站内和站间天线组阵, 增大地面天线有效口径; ②对堪培拉70 m天线进行改进, 以实现用于接收系统的极低噪声温度; ③利用Block V接收机的抑制载波跟踪技术提高调制效率; ④使用先进的信道编码, 降低工作信噪比门限; ⑤采用数据压缩与图像编辑方案, 减少星载数据量。

通过上述综合技术升级, 下行链路数据传输速率从初始10 bit/s提升至100 bit/s, 信噪比容限改善达4.8 dB。尽管通信带宽受限, “伽利略号”轨道器仍成功获取木星大气环流模型、木卫二次表层海洋电磁感应特征等关键数据, 最终实现了原定科学目标的70%。此应急通信方案为后续深空任务(如“卡西尼-惠更斯号”)的故障冗余设计提供了重要技术参考。

从1960年至今, 人类已开展了43次火星探测发射活动, 其中完全成功或部分成功任务22次, 总体成功率约52%^[35]。这一数据印证了火星探测的高风险性, 主要归因于深空通信距离远(与地球相距最远时为4亿km)及行星环境复杂。进入21世纪后, 2001火星“奥德赛号”与“火星勘察轨道器”成为轨道器技术演进的标志性任务。

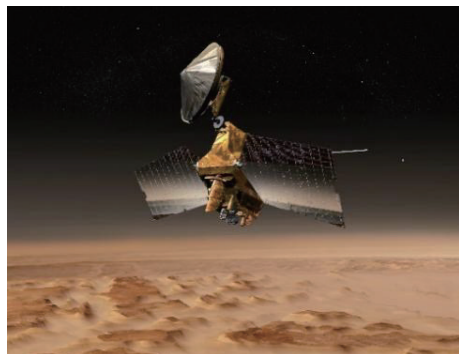
“奥德赛号”于2001年4月7日发射, 如图4所示。其突破性在于集成X波段深空链路与其高频(Ultra High Frequency, UHF)中继系统, 实现火星轨道探测与星表设备协同作业的双重目标。UHF系统成功保障“火星探测漫游者”(Mars Exploration Rover, MER) 128 kbit/s的数据传输, 奠定火星表面网络中继技术基础。



注: 来源于NASA。

图4 “奥德赛号”截至2024年所取得的成就图
Fig. 4 Images of Odyssey's achievements as of 2024

“火星勘察轨道器”于2005年8月12日发射, 如图5所示。其多频段通信系统实现技术性跨越: ①X频段(8.4 GHz)负责深空遥测与指令; ②Ka频段(32 GHz)进行试验性高速数传(较X波段提升3倍带宽); ③新一代UHF系统(400 MHz), 其中Electra通信载荷为火星本地任务科学及工程数据提供高速可靠中继服务, 可实现频率捷变并变换发射和接收带宽, 支撑“凤凰号”着陆器与“好奇号”火星车与地球的通信服务。



注: 来源于NASA。

图5 “火星勘察轨道器”效果图
Fig. 5 MRO renderings

“灵神星号”于美国东部时间2023年10月13日10时19分, 在肯尼迪航天中心(Kennedy Space Center, KSC)由猎鹰重型火箭(SpaceX Falcon Heavy)发射升空。其核心任务是对火星与木星之间主小行星带中一颗富含金属的同名小行星展开研究, 预计2029年7月下旬抵达目标小行星, 并开展为期两年的绕星飞行探测, 期间将执行影像采集与数据收集任务, “灵神星号”概念图如图6所示。

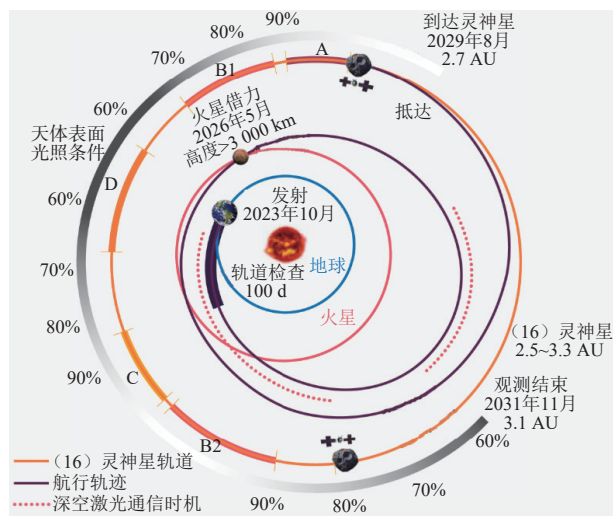


注: 来源于NASA。

图6 “灵神星号”概念图
Fig. 6 Psyche mission concept art

该航天器配置4根天线用于与地面站通信, 包括一根直径2 m的固定高增益天线, 以及3根低增益天线。此外, “灵神星号”搭载激光通信终端, 在飞往目标小行星途中开展深空光通信(Deep Space Optical Communication, DSOC)技术演示实验^[36]。需说明的是, 实际科学数据传输仍依赖微波天线, 激光终端仅用于技术验证, 其飞行路径与主要任务规划如图7所示。DSOC系统由三大核心模块构成^[37]: ①星载飞行激光收发器(Flight Laser Transceiver, FLT): 配备近红外激光发射器与光子计数相机, 用于实现地星双向激光通信。其光学孔径22 cm、发射波长1 550 nm、平均激光功率4 W, 基于串行级联脉冲位置调制(Serially Concatenated Pulse-Position Modulation, SCPPM)技术, 可实现最高267 Mbit/s的数据传输速率; 能够接收波长

1 064 nm、功率大于100 fW的弱激光信号, 设备重量28 kg、功耗76 W, 采用光子计数相机接收1064 nm上行信标光^[38]。②地面激光发射端 (Ground Laser Transmitter, GLT): 鉴于尚无专用深空光通信基础设施, 研究团队对原有1 m口径光学通信望远镜进行升级改造。改造后的GLT可发射1 064 nm激光信标光, 采用LDPC编码, 最大平均功率达5 kW, 为深空激光通信终端提供参考指向。③地面接收终端 (Ground Laser Receiver, GLR): 通过对5 m口径海尔望远镜的升级, 实现0.06~2.7 AU下行链路数据接收, 并利用改进的单光子探测器阵列完成数据同步、解调和编码处理^[39]。



注: 来源于NASA。

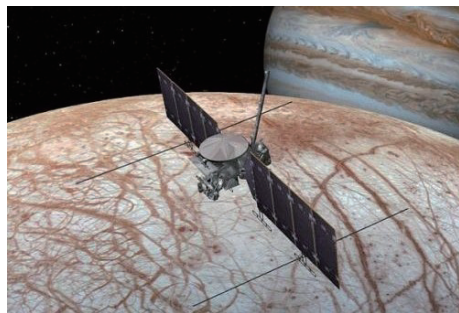
图7 “灵神星号”前往小行星灵神星的飞行路径及主要任务里程碑
Fig. 7 Psyche spacecraft's trajectory to the asteroid 16 Psyche and key mission milestones

为解决星地激光通信中的关键技术问题, NASA联合康垂尔动力公司 (Controlled Dynamics Inc) 研发专用隔振平台, 实现DSOC系统所需的主动稳定与精确指向^[40]。同时, 针对大气信道干扰、时频同步、多普勒频移、弱信号解调及光束跟踪等难题, NASA研发了大气信道补偿、高精度时频同步、多普勒频移动态校正、高灵敏度解调及高精度光束跟踪与指向等系列技术。在实验过程中, “灵神星号”航天器在距地球3 100万km处实现267 Mbps的最大下行传输速率, 在3.9亿km处仍保持8.3 Mbps的传输速率。

“灵神星号”航天器的DSOC技术演示实验成功刷新了深空超远距离高清视频及数据传输记录, 其成功验证将为未来深空探测任务的数据传输效率提升与通信技术革新奠定坚实基础。

“欧罗巴快船”于2024年10月14日由SpaceX猎鹰重

型火箭发射升空, 如图8所示, 预计2030年4月抵达木星系统^[41], 对木卫二 (欧罗巴) 进行49次近距离飞掠探测, 最低飞行高度仅25 km。其核心科学目标是评估木卫二冰壳下全球性液态海洋的宜居性, 探索生命存在的潜在条件。其通信系统需应对木星强辐射环境及超远距离通信挑战, 以下是其核心设计与技术亮点: ①X频段高增益天线: 主通信链路采用直径3 m的HGA, 支持远距离数据传输, 理论速率可达数十kbps; ②Ka频段科学数据链路: 专用于高分辨率科学数据回传; ③冗余低增益天线: 配置3个LGA和3个扇形波束天线, 用于近地通信及应急指令传输。“欧罗巴快船”的通信系统为人类首次系统性探测木卫二提供了可靠技术保障, 其设计经验或为未来冰卫星探测任务 (如木卫三、土卫二) 提供重要参考。



注: 来源于NASA。

图8 “欧罗巴快船”概念图
Fig. 8 Europa Clipper concept art

深空通信技术的演进是驱动探测能力提升的驱动力。早期“先驱者”系列确立了S/X频段与天线冗余架构的基础模式。“旅行者号”实现了首次重大飞跃, 通过升级至X频段、采用RS-卷积级联编码及地面天线组阵技术, 显著提升了链路可靠性与数据容量。“伽利略号”任务则验证了在严重故障下的应急通信能力。进入21世纪, 火星轨道器推动了Ka频段的应用。当前, “灵神星号”任务演示的深空光通信技术, 实现了远超传统射频的传输速率, 标志着深空通信技术正迈向新纪元。这一持续的技术革新历程, 为拓展人类深空探测边界提供了根本保障。

2 国内星载通信发展概况

中国深空探测工程虽起步较晚 (首个月球探测器“嫦娥一号”发射于2007年), 但通过“三步走”战略 (“绕、落、回”) 与系统性技术攻关, 实现了从地月系到行星际的跨越式发展 (图9)。截至2023年, 已完成: ①月球探测, “嫦娥”系列任务6次发射, 成功率100%, 其中“嫦娥四号” (2018) 实现人类首次月球

背面软着陆; ②火星探测,“天问一号”(2020)首次任务即完成“绕、着、巡”三大任务,最远通信距离4亿km。

尽管“嫦娥”系列(最远40万km)与“天问一号”(最远4亿km)的任务距离尚未触及太阳系边际(>100 AU),但其通信系统演进为深空任务奠定核心技术基础,表2列举了国内历次深空探测任务。

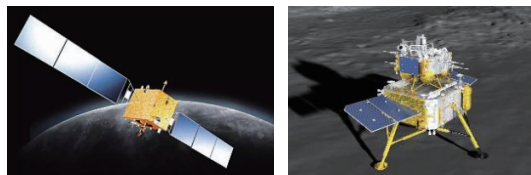
表2 国内深空探测工程应用

Table 2 Chinese deep space exploration engineering applications

任务名称	发射时间	通信频段/GHz	编码方式	先进性
嫦娥一号	2007年10月24日	S频段	卷积/RS编码	采用异频半空间组阵测控技术
嫦娥二号	2010年10月1日	S频段/X频段	卷积/RS编码	国内首次开展X频段测控通信技术试验
嫦娥三号	2013年12月2日	X频段/UHF频段	RS+卷积编码	国内首次实现月面UHF频段器间通信
鹊桥一号	2018年5月21日	S频段/X频段	RS+卷积编码	采用口径4.2 m的高增益伞状抛物面天线,是发射时深空探测器史上的最大口径通信天线 ^[41]
嫦娥四号	2018年12月8日	X频段/UHF频段	RS+卷积编码	实现月球背面与地球的可连续可靠中继通信
天问一号	2020年7月23日	X频段/UHF频段	RS+卷积/LDPC编码	采用UHF/X双频段中继技术 ^[43] ;采用2.5 m固定反射面天线
嫦娥五号	2020年11月24日	X频段/UHF频段	RS+卷积编码	突破了多器组合一体化测控技术,设计了上升器和轨道器组合测控方式
鹊桥二号	2024年3月20日	S频段/X频段/Ka频段/UHF频段	RS+卷积/LDPC编码	S频段通信速率最高6 Mbit/s; Ka频段对地通信速率最高100 Mbit/s;支持在轨程序上注更新 ^[44]
嫦娥六号	2024年5月3日	S频段/X频段/UHF频段	RS+卷积编码	通过“鹊桥二号”卫星,实现高速中继通信,数传速率最高可达5 Mbit/s

“嫦娥”系列任务的通信技术历经六次任务迭代,实现了从直达链路到中继传输、从单器传输到多器协同等技术突破。“嫦娥一号”(2007年)首创异频半空间组阵测控技术,并通过18 m天线站的支持,解决了40万km外月球轨道精密定轨难题^[41];“嫦娥二号”(2010年)首次开展X频段测控通信技术试验^[45],突破X频段统一载波测控体制,研制高灵敏度X频段深空应答机,为后续高频段通信奠定基础^[46];“嫦娥三号”(2013年)首次实现月面UHF频段器间通信,完成巡视器对着陆器的单向数据传输;“嫦娥四号”(2019年)依托“鹊桥一号”中继卫星攻克月背通信盲区,通过地月L2点Halo轨道控制与4.2 m伞状可展开天线^[47],实现月背至地面连续通信;“嫦娥五号”(2020年)构建多器组合一体化测控技术和高速返回与回收测控技术^[48],支撑实现了中国首次月球采样返回任务;“鹊桥二号”中继星采用双频段多目标通信系统设计,其4.2 m口径高增益天线分时与“嫦娥六号”探测器的上升器、着陆器及轨道器建立双向链路,为月面采样、封装及地外天体起飞等关键任务阶段提供中继支持;同时,配置的0.6 m口径定向天线通过自适应跟踪机构动态校准指向地球,利用S/Ka双频段与地面站进行信息传输^[49]。

通过遵循“频段升级-中继扩展-自主协同”的技术路径,“嫦娥”系列形成覆盖绕月、着陆、巡视、采样返回的全链条测控体系。



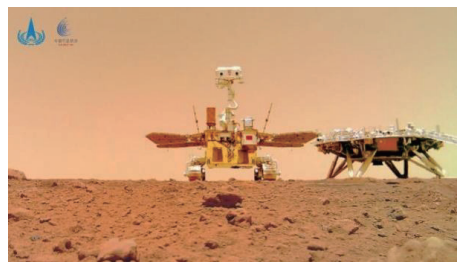
(a) 嫦娥一号 (b) 嫦娥六号

注:来源于中国国家航天局。

图9 “嫦娥一号”和“嫦娥六号”

Fig. 9 Chang'e-1 and Chang'e-6

中国首次火星探测任务“天问一号”通过一次任务实现了火星环绕、着陆和巡视探测三大目标,如图10所示,其核心通信系统采用X频段统一载波测控体制,支持4亿km超远距离的深空通信,并创新性地构建了多节点、多体制中继通信网络^[43]。在行星际巡航阶段,X频段深空应答机实现了-153 dBm的极弱信号捕获能力,结合地面建设的大天线组阵系统,使中国深空测控距离从月球扩展到火星^[50]。在着陆与巡视阶段,系统采用双频段协同机制:环绕器与着陆巡视器间通过UHF/X频段通信(应用CCSDS邻近空间链路协议)实现数据传输^[51-52],采用曼彻斯特编码辅助残留载波BPSK调制技术及自适应码速率切换机制保障可靠性;这套技术体系成功支撑了着陆器自主导航与数据回传,标志着中国深空通信技术实现了从地月系到行星际的跨越式发展。



注:来源于中国国家航天局。

图10 天问一号

Fig. 10 Tianwen-1

中国深空探测虽起步较晚, 但依托“三步走”战略与持续技术攻关, 实现了从地月系到行星际的跨越式发展。“嫦娥”和“鹊桥”系列任务逐步突破S/X/Ka等多频段通信、UHF链路、中继传输等关键技术, 构建了覆盖“绕、落、回”全链路的测控体系。“天问一号”首次火星探测即实现“绕、着、巡”, 其X/UHF双频段中继通信与极弱信号捕获能力, 标志着中国深空通信已具备行星际任务支撑能力。整体技术路径遵循“频段升级-中继扩展-自主协同”的演进逻辑, 为后续深空探测奠定了坚实基础。

3 深空星载通信关键技术

纵观国内外相关探测任务的发展历史和现状, 可以发现深空通信技术的发展是支持美欧等发达国家不断拓展人类到达边界的基础, 同时也是中国深空探测活动由月球走向火星的支撑所在。

为了实现“一步一个脚印, 迈向星际探测新征程”的远大理想, 深空已经成为了中国下一阶段空间探测的重要目标, 发展星载通信技术是实现这一目标的基本前提。然而深空星载通信的技术实现难度极高, 比较中国目前实现的最远探测目标-火星和典型的深空目标, 由距离带来的自由空间损耗和单向光行时对比如表3所示(所选频率为8.45 GHz, X频段)。

表3 典型器地距离上的自由空间损耗和单向光行时对比
Table 3 Typical free-space loss and one-way light travel time comparison at spacecraft-Earth distances

探测目标与最远距离/亿km	单向光行时/h	自由空间损耗/dB
火星, 4.01	0.37	283.04
木星, 9.33	0.86	290.37
土星, 15.82	1.46	294.96
天王星, 30.42	2.82	300.64
海王星, 46.42	4.30	304.31
冥王星, 73.76	6.83	308.33
太阳系边际, 150	13.89	314.50

由表3可知, 深空典型目标的光行时普遍增加到数小时, 自由空间损耗也大幅增加, 最远的太阳系边际达到314.5 dB。为克服超远距离空间损耗带来的信号衰减问题, 必须开展系统建设和技术攻关, 增强地面和星上能力, 才能保证星地测控链路的可靠性。

在深空探测任务中, 星载天线能力的提升受到多重物理限制, 其中运载火箭整流罩尺寸是核心制约因素。以中国“天问一号”为例, 其环绕器搭载的2.5 m固面反射天线已接近“长征五号”火箭整流罩5.2 m^[53]的直径极限, 未来天线尺寸的扩展空间极为有限。因此, 必须从其它方面开展技术攻关, 提升星上能力, 为

深空通信所遇到的极弱信号、极高时延问题提供解决方案。

3.1 高频段通信技术

传统S/X频段通信受限于窄带宽与较低的等效全向辐射功率, 难以满足未来深空探测高速率科学数据回传需求。针对这一挑战, 欧美国家开展了一系列技术探索: “欧罗巴快船”任务部署Ka频段科学数据链路, 实现深空高速数据传输; NASA的“灵神星号”航天器则搭载激光通信终端, 计划在小行星灵神星开展深空激光通信试验^[54-55]。实践与研究表明, 高频段通信技术, 包括激光通信和激光微波一体化通信, 凭借其宽频带、高速率传输特性, 是深空通信的关键技术之一。

在深空高频段激光通信研究领域, 众多学者从不同角度展开探索。文献[56]基于地球、月球及探月卫星的三体运动模型, 系统分析月地高速激光通信系统的链路特性与遮挡问题, 重点研究不同链路模式对激光链路建立与中断的影响。仿真结果表明, 采用3颗月球极轨卫星(Moon Polar Orbit, MPO)与地球同步卫星构建通信链路, 可显著降低链路中断频次。文献[57]围绕月地长距离双向激光通信技术展开研究, 通过理论推导, 得出脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)非相干通信体制下, 大气湍流对激光传输上行、下行链路PPM通信误码率的影响表达式。进一步分析PPM阶数、发射端输出光功率、光束发散角及接收端光学天线孔径等参数对误码率的作用, 提出基于16-PPM调制与极弱光处理的月地高速激光通信下行链路设计方案, 以及基于4-PPM调制与极弱光处理的上行链路设计方案。文献[58]则针对深空激光通信链路建模, 深入剖析大气衰减、太阳辐射、指向控制精度衰减、暗电流噪声等因素对通信速率与误码率的影响, 并借助数值仿真, 探究发射端激光束散角、指向控制精度与最远通信距离间的约束关系, 提出深空高速率激光通信的参数设计思路, 为深空激光通信奠定理论基础。

随着卫星平台对体积、重量和功耗的严格限制, 小型化激光通信终端成为发展趋势。文献[59-61]系统阐述空间光通信终端系统的组成架构、波长体制与终端构型, 深入分析星载小型化激光通信终端技术的发展现状, 为相关技术研发提供参考。针对激光链路存在建链时间长、间歇性中断、稳定性差等问题, 文献[62]从网络拓扑转换和路由策略两方面, 研究激光链路的中断容忍机制, 保障空间通信网络业务连续性, 为解决深空激光通信网络中断问题提供可行方

案。文献[63]介绍了光通信凭借其高容量、低SWaP(尺寸、重量与功耗优势)及抗电磁干扰特性,正逐步成为深空通信的主流技术。尽管在指向控制、大气影响和协议设计等方面存在挑战^[64],但通过新兴技术和混合系统的整合,未来有望实现更远距离、更高安全性和可靠性的深空通信网络^[65]。随着立方体卫星和行星际中继网络的部署,深空光通信将支撑人类探索太阳系的宏伟目标。

但是,激光通信易受大气湍流、雾、烟等干扰,导致信号衰减或中断;而微波激光一体化技术通过动态切换机制(如硬切换或软切换),在恶劣条件下自动启用射频链路作为备份。此外,星载通信载荷受限于航天器平台空间约束,正朝模块化与高度集成化方向演进。在此背景下,微波激光一体化通信技术^[66](RF-Optical Hybrid Communication)应运而生。该技术通过频段动态切换与互备份机制,显著提升深空通信链路的鲁棒性与频谱兼容性。文献[67]介绍了NASA主导开发的集成无线电与光学通信有效载荷(integrated Radio and Optical Communications payload, iROC)即为典型实现:其采用轻量化碳纤维复合材料与金属网状共口径反射器,在满足光学表面精度与射频透波性的前提下,将3 m射频天线与0.25 m光学天线集成模块总重降至8.2 kg。文献[68]通过两种跨频段调制方式为微波激光一体化通信系统提供高可靠通信解决方案。文献[69]提出了一种基于共享发射机的混合射频/光传输系统创新架构,其核心突破在于通过单一发射链路同步传输射频与光信号,以降低系统复杂性与硬件开销。

高频段通信技术是突破S/X频段传输容量瓶颈、支撑未来深空探测高速数据回传的关键方向。当前,以Ka频段和激光通信为代表的高频技术已成为国际研发热点,其中激光通信凭借其宽频带、高速率和低SWaP优势展现出巨大潜力。研究聚焦于链路建模、调制解调、终端小型化与中断容忍等核心问题,推动技术不断成熟。同时,为克服激光通信易受大气干扰等局限,微波激光一体化技术通过动态切换与共口径集成设计,实现射频与光学链路的优势互补。高频段通信正朝着融合化、高可靠与高效能方向演进,为构建下一代深空通信体系奠定基础。

3.2 高效率编解码技术

近年来,Turbo码、LDPC码等近香农极限编码技术的突破,以及极化码在理论上的容量可达性,为深空通信提供了新的技术路径。例如,CCSDS标准已将Turbo码与LDPC码纳入深空信道编解码体系,支持自

适应速率与跨层优化。传统深空通信普遍使用的是卷积码与RS码的级联编码方式,伴随着编码技术的不断发展,深空通信广泛采用具备更高抗误码性能的Turbo码和LDPC码作为信道编码。其中LDPC码已经被NASA应用于高速通信卫星中,中国在“天问一号”也采用LDPC码信道编码技术。

文献[70]分析了2013年和2015年“火星快车号”和2001年和2002年“卡西尼号”在太阳相合期间获得的数据,使用端到端无线链路模拟器工具,验证使用LDPC,无论是在上行链路——即LDPC(128, 64)码和LDPC(512, 256)码,还是在下行链路——即LDPC(32 768, 16 384)码等方案,可以减轻等离子体闪烁的影响和提高无线链路的性能;文献^[71]提出了一种新的深空通信系统Turbo编码器的VLSI架构(基于CCSDS推荐的当代标准规范),已在FPGA上实现。文献[72~74]以LDPC级联码为内码,LT级联码为外码进行仿真。内码采用不规则LDPC码,外码采用最大长度 N 为1016,包数 K 为520的LT码,进行了6次迭代,得出在深空通信中LT码和LDPC码的级联提高了编解码的效率,并降低了复杂度。文献[75]提出一种改进的LT码联合编译码算法,将LT码的无速率特性与LDPC码的抗干扰、检错能力相结合形成LT-LDPC码,进一步降低编码冗余,提高了深空通信的通信成功率。

高效率编码技术是提升深空通信链路性能与频谱效率的核心。随着Turbo码、LDPC码等近香农极限编码的成熟,传统卷积码与RS码的级联方案正逐步被替代。LDPC码凭借其优异的抗误码性能,已被纳入CCSDS标准并应用于“天问一号”等实际任务中。当前研究进一步探索LT码与LDPC码等级联架构,在保证纠错能力的同时,有效降低编译码复杂度与冗余。编码技术正朝着高增益、自适应与低复杂度的方向持续演进,为深空高速可靠传输提供关键支撑。

3.3 深空中继通信

在深空长距离尺度下,中继通信技术通过部署中继节点扩展信号覆盖、避开遮挡,采用适当调制解调实现可靠传输,并以多跳路由或协作协议优化数据传输路径,从而显著提升星载通信服务质量并扩展探索范围。国内外近期相关研究聚焦中继卫星设计与技术优化。文献[76]系统阐述了ESA在地球、月球和火星任务中的中继系统发展计划(如继ARTEMIS卫星退役后),测试新型卫星通信技术及数据中继能力。文献[77]针对深空通信中频谱资源紧张与数据传输效率低的问题,提出一种基于物理层网络编码(Physical-layer

Network Coding, PNC)与部分响应连续相位调制(Partial Response Continuous Phase Modulation, PR-CPM)的非相干多符号检测算法,旨在提升中继卫星系统性能。文献[78]详细阐述了拉格朗日点或环绕地球的中继轨道飞行器的性能,为探测器围绕金星和火星等行星探测奠定了基础。文献[79]构建了一个围绕整个太阳系的中继轨道器网络模型。文献[80]针对“旅行者号”等深空探测器超远距离通信的瓶颈问题,创新性地提出在火星、木星卫星和土星卫星三个候选位置建立星际中继站的解决方案,通过构建包含再生中继器的双跳通信模型,对比分析了X波段上行链路和S波段下行链路的性能参数。

深空中继通信的未来发展将以多目标接入有限中继卫星为主要趋势,因而大量研究集中在中继调度优化:文献[81]研究火星车与轨道器双向匹配问题,引入偏好适合度和单边评估均衡目标,基于访问偏好提出了匹配优化方法,并采用并行架构封装一对多双向匹配算法以获得稳定匹配结果。文献[82]针对数据积压和TTL过期风险,提出改进的接触图路由-智能积压与过期避免方案(Contact Graph Routing - Smart Backlog and Perishability Invalidation, CGR-SPI),提升吞吐量以高效利用深空网络带宽。

地月系统虽未达深空距离,但中国“嫦娥”任务中的“鹊桥一号”和“鹊桥二号”中继卫星为其奠定了基础。“鹊桥一号”通过地月L2点Halo轨道控制,相关研究围绕此展开:文献[83]针对月球背面探测实时通信需求,针对单一Halo轨道中继卫星(如“鹊桥一号”)的长覆盖间隙和能量限制,提出一种混合圆形-Halo轨道多中继星座系统,通过优化信息年龄(Age of Information, AoI)指标提升通信效能。

深空中继通信是实现深空可靠通信的关键技术,其核心价值体现如下:①覆盖扩展与遮挡规避。通过部署中继卫星节点扩展信号覆盖范围,弥补深空远距离下的通信盲区。利用中继技术避开空间物理障碍的遮挡(如行星阴影),确保信号连续性和可靠性。②服务质量提升与资源利用率优化。显著改进星载通信的实时性和稳定性,支撑高效深空任务操作。应对频谱资源紧张挑战(如通过非相干多符号检测算法),提升带宽利用效率;例如改进路由方案解决数据积压和过期风险。③调度匹配效率与多源数据管理。优化中继卫星调度(如一对多双向匹配算法),实现资源分配(如火星车与轨道器协作)。优化处理多目标和多数据源挑战,提升系统整体效能,如AoI指标减小覆盖间隙。

深空中继通信技术通过部署中继节点有效扩展信号覆盖、规避星体遮挡,是实现远距离可靠数据传输的关键支撑。当前研究聚焦于中继卫星系统设计、链路优化与资源调度等方面,旨在提升通信服务的连续性、实时性与资源利用效率。在任务实践中,中国“鹊桥”系列中继星已成功验证地月系统中继能力;国际上持续开展火星及以远的中继网络架构研究。随着探测任务向多目标、多节点发展,中继系统的调度优化与多跳路由成为技术热点。在深空特殊环境下,未来亟待研究:一方面,依据不利信道条件设计通信定制中继卫星,包括空间位置部署和调制解调等相关通信技术的选用;另一方面,针对多源数据趋势,深入研究中继卫星接入优化,以应对多目标和多数据源场景挑战。

4 结束语

深空星载通信技术作为支撑行星际探测的基础能力,面临极远距离、极大时延、极弱信号和极端环境等多重挑战。参考国际上已经实施的深空探测任务,必须通过地面和星载两方面的能力提升才能克服这些挑战。为此,中国已经建成的全球布局深空测控网能够提供良好基础,同时星载能力的发展也不容忽视。

星载通信技术的持续革新是驱动人类深空探测能力跨越式提升的核心引擎。纵观其发展历程,技术演进呈现出清晰的路径:通信频段从S/X向Ka及至激光通信不断演进,编码技术从卷积/RS级联向近香农极限的LDPC、Turbo码迭代,系统架构从单一直达链路向多中继、网络化协同通信演进。

当前,星载通信技术体系已步入多技术路线并行融合的发展新阶段。其一,高频段通信成为突破传输容量瓶颈的关键,Ka频段已进入工程应用,而深空激光通信技术更以其革命性的高速率优势完成在轨验证,与之互补的微波激光一体化技术则为构建高可靠、高韧性的下一代通信系统提供了解决方案。其二,高效率编码技术是保障链路可靠性与频谱效率的基础,LDPC等先进编码已取代传统方案成为新标准,并向着自适应、低复杂度的级联架构持续优化。其三,深空中继通信系统是拓展探测范围的根本保障,从地月空间的“鹊桥”系列到规划中的行星际网络,中继技术通过智能调度与多跳路由,有效解决了远距离遮挡和覆盖盲区问题。中国依托现有深空测控网与星载通信技术的积累,在高频段通信、高效率编码和深空中继通信等领域持续攻关,可为巨行星探测、太阳系边际任务提供技术保障。

参考文献

- [1] MACKOWSKI M P. Uplink-downlink: a history of the deep space network 1957-1997[J]. *ISIS*, 2003, 94(4): 781-782.
- [2] DOAT Y, LANUCARA M, BESSO P M, et al. ESA tracking network—a European asset[C]//Proceedings of 2018 SpaceOps Conference. Marseille, France: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [3] 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. Current situation and prospects of Chinese deep space network[J]. *Scientia Sinica Informations*, 2020, 50(1): 87-108.
- [4] 李炯卉, 韩宇, 吴学英, 等. 我国深空探测器测控通信技术发展[J]. *航天器工程*, 2024, 33(6): 116-122.
LI J H, HAN Y, WU X Y, et al. Development of TT&C and communication technologies for china's deep space probes[J]. *Spacecraft Engineering*, 2024, 33(6): 116-122.
- [5] HALL C F. Pioneer 10[J]. *Science*, 1974, 183(4122): 301-302.
- [6] NUNAMAKER R. Pioneer 10/11 mission results[C]//Proceedings of Pioneer Missions to Jupiter. Moffett Field, CA, USA: NASA Ames Research Center, 1975.
- [7] HEACOCK R L. The Voyager spacecraft[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1980, 194(1): 211-224.
- [8] JONES C, RISA T. The Voyager spacecraft system design[C]//Proceedings of 16th Annual Meeting and Technical Display. Long Beach, CA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1981.
- [9] JONES C, LANDANO M. The Galileo spacecraft system design[C]//Proceedings of 21st Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1983.
- [10] VANDERMEY N, PACZKOWSKI B. The Cassini-Huygens mission overview[C]//Proceedings of SpaceOps 2006 Conference. Rome, Italy: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [11] KLIORÉ A J, ANDERSON J D, ARMSTRONG J W, et al. Cassini radio science[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004: 1-70.
- [12] MATSON D L. Cassini/Huygens mission to the Saturnian system[C]//Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering. Denver, CO, USA: SPIE, 1996: 22-29.
- [13] MAKOVSKY A, BARBIERI A, TUNG R. Odyssey telecommunications: JPL DESCANSO[R]. Pasadena: Deep Space Communications and Navigation Center of Excellence, 2002.
- [14] TAYLOR J, LEE D K, SHAMBAYATI S. Deep space communications[M]. Hoboken: Wiley, 2016: 193-250.
- [15] FOUNTAIN G H, KUSNIERKIEWICZ D Y, HERSMAN C B, et al. The New Horizons spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 140(1-4): 23-47.
- [16] GUO Y, FARQUHAR R W. New Horizons mission design[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 140(1): 49-74.
- [17] DEBOY C C, HASKINS C, DUVEN D, et al. The New Horizons mission to Pluto: advances in telecommunications system design[J]. *Acta Astronautica*, 2005, 57(2-8): 540-553.
- [18] DEBOY C C, HASKINS C B, BROWN T A, et al. The RF telecommunications system for the New Horizons mission to Pluto[C]//Proceedings of Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2004: 1-10.
- [19] BOLTON S J, JUNO SCIENCE TEAM. The Juno mission[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2010, 6(S269): 92-100.
- [20] VACCHIONE J D, KRUID R C, PRATA A, et al. Telecommunications antennas for the Juno Mission to Jupiter[C]//Proceedings of 2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2012: 1-16.
- [21] LEVISON H F, MARCHI S, NOLL K, et al. NASA's Lucy mission to the Trojan asteroids[C]//Proceedings of 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2021: 1-10.
- [22] LEVISON H F, OLKIN C B, NOLL K S, et al. Lucy mission to the Trojan asteroids: science goals[J/OL]. *The Planetary Science Journal*, 2021, 2(5): 171. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/abf840/meta>.
- [23] LETTY R L, ESCOLAR D, ERD C, et al. The successful recovery of the JUICE RIME antenna deployment[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 216: 345-354.
- [24] BISWAS A, SRINIVASAN M, ANDREWS K, et al. Overview of the deep space optical communications (DSOC) technology demonstration[C]//Proceedings of Free-Space Laser Communications XXXVII. San Diego, CA, USA: SPIE, 2025: 125-136.
- [25] MOORE R R, SIROHI R. Evolution and analysis of Psyche's end-to-end information system architecture[C]//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2022: 1-16.
- [26] SRINIVASAN D, SHELDON C, BRAY M. Telecommunications Systems for the NASA Europa missions[C]//Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Seattle, WA, USA: IEEE, 2017: 1-4.
- [27] SRINIVASAN J M, BARLTROP C, BERMAN S, et al. Europa clipper flight system overview[J/OL]. *Space Science Reviews*, 2025, 221(1): 14. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-025-01139-9>.
- [28] HALL C F. Pioneer 10 and Pioneer 11[J]. *Science*, 1975, 188(4187): 445-446.
- [29] BRYAN A I, KEMP R, MADSEN B D. Status of the deep space network-Voyager flight project telecommunications compatibility [EB/OL]. (1997)[2025-07-10]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770024246>.
- [30] POSNER E C, RAUCH L L, MADSEN B D. Voyager mission telecommunication firsts[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1990, 28(9): 22-27.
- [31] LUDWIG R, TAYLOR J. Deep space communications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2016: 37-77.
- [32] BREJCHA A G. Microwave communications from the outer planets: the Voyager project[C]//Proceedings of 9th European Microwave Conference. London, U. K.: IET, 1979: 34-44.
- [33] KOHLHASE C E, PENZO P A. Voyager mission description[J]. *Space Science Reviews*, 1977, 21(2): 77-101.
- [34] TAYLOR J, CHEUNG K M. Deep space communications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2016: 79-134.
- [35] 于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(2): 108-113.
YU D Y, SUN Z Z, MENG L Z, et al. The development process and prospects for Mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 108-113.
- [36] DEUTSCH L J, LICHTEN S M, RUSSO A J, et al. Toward a NASA deep space optical communications system[C]//Proceedings of 2018

- SpaceOps Conference. Marseille, France: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018: 1-8.
- [37] BREIDENTHAL J, ABRAHAM D. Design reference missions for deep-space optical communication[EB/OL]. (2016)[2025-07-10]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-Reference-Missions-for-Deep-Space-Optical-Breidenthal-Abraham/5d0479c96525a61eaf2aa497683bd388b7663f57>.
- [38] DRISCOLL D, ZELLERS B, SCHOMACKER J, et al. Deep Space Optical Communications (DSOC) beam expander design and engineering[C]//Proceedings of Free-Space Laser Communications XXXII. San Diego, CA, USA: SPIE, 2020.
- [39] SRINIVASAN M, VELASCO A E, WRIGHT M W, et al. The deep space optical communications project ground laser transmitter[C]//Proceedings of Free-Space Laser Communications XXXV. San Diego, CA, USA: SPIE, 2023: 183-194.
- [40] DEUTSCH L J. Towards deep space optical communications[J]. *Nature Astronomy*, 2020, 4(9): 907-907.
- [41] CANGAHUALA L A, CAMPAGNOLA S, BRADLEY B K, et al. Europa Clipper mission design, mission plan, and navigation[J/OL]. *Space Science Reviews*, 2025, 221(1): 22. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-025-01140-2>.
- [42] 于国斌, 刘继忠, 张立华. 搭建地月通信纽带的“嫦娥”四号中继星“鹊桥”[J]. *中国航天*, 2019(1): 5-8.
YU G B, LIU J Z, ZHANG L H. “Queqiao” relay satellite of Chang’e-4: building the communication link between Earth and the Moon [J]. *Aerospace China*, 2019, 20(1): 5-8.
- [43] 孙泽洲, 饶伟, 贾阳, 等. “天问一号”火星探测器关键任务系统设计[J]. *空间控制技术与应用*, 2021, 47(5): 9-16.
SUN Z Z, RAO W, JIA Y, et al. Key mission system design of Tianwen-1 Mars probe[J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(5): 9-16.
- [44] 徐进, 王秋平, 李耀, 等. 鹊桥二号中继通信载荷任务分析与设计[J]. *中国空间科学技术(中英文)*, 2025, 45(3): 1-12.
XU J, WANG Q P, LI Y, et al. Mission analysis and design of relay communication payload for Queqiao-2[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2025, 45(3): 1-12.
- [45] 吴伟仁, 黄磊, 节德刚, 等. 嫦娥二号工程 X 频段测控通信系统设计与试验[J]. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41(10): 1171-1183.
WU W R, HUANG L, JIE D G, et al. Design and test of X-band TT&C communication system for Chang’e-2 project [J]. *Science China: Information Sciences*, 2011, 41(10): 1171-1183.
- [46] 吉欣, 王凤宇, 黄晓峰, 等. 嫦娥二号卫星 X 频段星载测控系统设计与验证[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2013, 43(5): 499-505.
JI X, WANG F Y, HUANG X F, et al. Design and verification of X-band on-board TT&C system for Chang’e-2 satellite [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2013, 43(5): 499-505.
- [47] 陈国辉, 王波, 华岳, 等. 嫦娥四号中继星伞状可展开天线关键技术研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(2): 166-174.
CHEN G H, WANG B, HUA Y, et al. Key technologies of umbrella-like deployable antenna for Chang’e-4 relay satellite [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, 49(2): 166-174.
- [48] 李海涛, 程承, 黄磊, 等. “嫦娥五号”发射及入轨段 X 频段测控任务设计[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(2): 183-190.
LI H T, CHENG C, HUANG L, et al. Design of X-band TT&C mission for Chang’e-5 launch and orbit insertion phase[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(2): 183-190.
- [49] 胡蓝月. 鹊桥二号: 为“探、登、驻”架起信息之桥[J]. *太空探索*, 2024(7): 16-19.
HU L Y. Queqiao 2: building an information bridge for “exploration, landing, and habitation”[J]. *Space Exploration*, 2024(7): 16-19.
- [50] 王民建, 朱新波, 何春黎, 等. “天问一号”环绕器测控数传通信系统设计与验证[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2023, 10(1): 28-36.
WANG M J, ZHU X B, HE C L, et al. Design and verification of TT&C and data transmission integrated system for Tianwen-1 orbiter[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(1): 28-36.
- [51] 张婷, 韩宇, 孙泽洲, 等. “天问一号”着陆中继通信系统设计与验证[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(1): 53-61.
ZHANG T, HAN Y, SUN Z Z, et al. Design and verification of relay communication system during entry, descent and landing for Tianwen-1 Mars probe[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(1): 53-61.
- [52] 孙泽洲, 强晖萍, 韩宇, 等. “天问一号”火星探测器 UHF 频段中继通信系统设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(5): 817-826.
SUN Z Z, QIANG H P, HAN Y, et al. Design of UHF band relay communication system for Tianwen-1 Mars probe[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 54(5): 817-826.
- [53] 李东, 王珏, 李平岐. “长征”五号: 中国新一代运载火箭的旗舰[J]. *中国航天*, 2021(6): 11-17.
LI D, WANG J, LI P Q. Long March 5: the flagship of China’s new-generation launch vehicles[J]. *Aerospace China*, 2021(6): 11-17.
- [54] WRIGHT M W. Downlink and uplink laser transmitters operational performance for the deep space optical communications project on the Psyche mission[C]//Proceedings of Free-Space Laser Communications XXXVIII. San Diego, CA, USA: SPIE, 2025: 147-157.
- [55] HART W, BROWN G M, COLLINS S M, et al. Overview of the spacecraft design for the Psyche mission concept[C]//Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2018: 1-20.
- [56] 王淇, 马晶, 谭立英, 等. 月地高速激光通信系统链路特性分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2019, 6(6): 537-544.
WANG Q, MA J, TAN L Y, et al. Link characteristics analysis of high-speed lunar-earth laser communication system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(6): 537-544.
- [57] 高锋铨. 月—地长距离双向高速激光通信技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2025.
GAO D R. Research on long-distance bidirectional high-speed laser communication technology between the Moon and the Earth[D]. Xi’an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi’an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2025.
- [58] 陈功轩, 张伟, 叶晖, 等. 深空激光通信终端主要参数的分析与研究[J]. *遥测遥控*, 2024, 45(4): 66-74.
CHEN G X, ZHANG W, YE H, et al. Analysis and research on main parameters of deep space laser communication terminal[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2024, 45(4): 66-74.
- [59] MATHASON B, ALBERT M, ENGIN D, et al. Advances in CubeSat laser communications transceiver[C]//Proceedings of Small Satellite Conference. Logan, UT, USA: Utah State University, 2019: 1-12.
- [60] 夏方园, 陈祥, 陈安和, 等. 星载小型化激光通信终端技术研究现状及发展方向综述[J]. *空间电子技术*, 2020, 17(3): 8-15.

- XIA F Y, CHEN X, CHEN A H, et al. Research status and development trend of on-board miniaturized laser communication terminal technology[J]. *Space Electronic Technology*, 2020, 17(3): 73-80.
- [61] ROUBAL C, DOLEJSKY T, RÖDIGER B, et al. Laser terminals on CubeSats: developments for telecommunications and quantum links[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2025, 43(3): 133-146.
- [62] 杨孩. 空间信息网络激光星间链路中断容忍机制研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2025.
YANG H. Research on interruption tolerance mechanisms for laser inter-satellite links in space information networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2025.
- [63] KARMOUS S, ADEM N, ATIQUZZAMAN M, et al. How can optical communications shape the future of deep space communications? a survey[EB/OL]. (2024-06-15)[2025-07-10]. <https://arxiv.org/abs/2406.09872>.
- [64] GAO D R, SUN M Y, HE M G, et al. 深空激光通信发展现状与趋势分析(封面文章·特邀)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(7): 20240247.
- [65] WANG T, LIN P, DONG F, et al. Progress and prospect of space laser communication technology[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2020, 22(3): 92-101.
- [66] 赵焯, 熊建林, 刘向南, 等. 深空微波激光通信一体化技术现状及关键技术 [J]. *光通信技术*, 2021, 45 (1): 16-21.
ZHAO Y, XIONG J L, LIU X N, et al. Status and key technologies of deep space microwave-laser communication integration technology[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(1): 16-21.
- [67] FIELHAUER K B, BOONE B G, RAIBLE D E. Concurrent system engineering and risk reduction for dual-band (RF/optical) spacecraft communications[C]//Proceedings of 2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [68] OIKONOMOU T K, TEGOS S A, DIAMANTOULAKIS P D, et al. Cross-band modulation design for hybrid RF-optical systems[EB/OL]. [2025-01-20]. <https://arxiv.org/abs/2501.03267>.
- [69] ZHANG Q, YU J, LONG J, et al. A hybrid RF/FSO transmission system based on a shared transmitter[J/OL]. *Sensors*, 2025, 25(7): 2021. <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/2021>.
- [70] FINOCCHIARO S, ARDITO A, BARBAGLIO F, et al. Improving deep space telecommunications during solar superior conjunctions[C]//Proceedings of 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2017: 1-13.
- [71] PATHAK M, SHRESTHA R. Hardware architecture and FPGA implementation of low latency turbo encoder for deep-space communication systems[C]//Proceedings of 2023 36th International Conference on VLSI Design and 2023 22nd International Conference on Embedded Systems (VLSID). Bangalore, India: IEEE, 2023: 1-6.
- [72] SOFIA J J, JAYAKUMARI J. Application of LT code technology in deep space communication[C]//Proceedings of 2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT). Thuckalay, India: IEEE, 2015: 458-463.
- [73] FOMINYKH A A, OVCHINNIKOV A A. Comparative analysis of polar and LDPC codes in space and satellite communication systems[C]//Proceedings of 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, Russia: IEEE, 2023: 1-4.
- [74] WANG Q, FU P, ZHANG S. A comparison of concatenated polar codes with different interleaving and decoding schemes[C]//Proceedings of 2020 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Shanghai, China: IEEE, 2020: 570-574.
- [75] TIAN H, ZHAO D F, YANG Y F, et al. Research of LT code based on key information feedback in deep space communication[J] *IEEE Access*, 2020, 8: 103956-103972.
- [76] WITTIG M. Data relay for Earth, Moon and Mars missions[C]//Proceedings of 2009 International Workshop on Satellite and Space Communications. Rome, Italy: IEEE, 2009: 300-304.
- [77] WANG M, HAO C, DANG X, et al. Non-coherent multi-symbol detection of PR-CPM for deep space relay satellites with physical-layer network coding[J]. *China Communications*, 2020, 17(7): 101-112.
- [78] MODENINI D, LOCARINI A, VALENTINI L, et al. Two-leg deep-space relay architectures: performance, challenges, and perspectives[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(5): 3840-3858.
- [79] RAHMAN M, ISLAM M, HUQ R. Deep space communication and exploration of solar system through inter-Lagrangian data relay satellite constellation[C]//Proceedings of 8th Interplanetary CubeSat Workshop (iCubeSat). Pasadena, CA, USA: Caltech, 2019: 1-19.
- [80] LIU Z. Modeling of a planetary relay station in improving deep-space probe telecommunication performance[J/OL]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2218: 012029. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2386/1/012029/meta>.
- [81] WAN P, ZHAN Y. Study on the two-sides matching between multiple rovers and multiple orbiters in Mars relay communications[J]. *China Communications*, 2020, 17(7): 80-93.
- [82] DHARA S, GOEL C, DATTA R, et al. CGR-SPI: a new enhanced contact graph routing for multi-source data communication in deep space network[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT). Pasadena, CA: IEEE, 2019: 33-40.
- [83] YUAN A, HU Z, ZHANG Q, et al. Toward the age in cislunar communication: an AoI-optimal multi-relay constellation with heterogeneous orbits[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(5): 1420-1435.

作者简介:

唐玉华(1973-), 研究员, 探月工程“嫦娥七号”任务副总设计师, 主要研究方向: 航天工程总体技术。

通信地址: 北京市海淀区东冉北街9号(100195)

E-mail: tangyuhua2010@126.com

梁启超(1995-), 男, 工程师, 主要研究方向: 深空探测器通信系统设计。**本文通信作者。**

通信地址: 安徽省合肥市蜀山区望江西路900号(231283)

E-mail: liang145@mail.ustc.edu.cn

Status and Prospect of Space-Borne Communication Technology for Deep Space

TANG Yuhua^{1,2}, LIANG Qichao¹, LEI Zhenyu¹, JIANG Tiantian¹, XU Yang¹, YANG Zhihua³,
HU Maohai⁴, CHEN Zhong⁵, ZHENG Weimin⁵, XU Dezhen⁶

(1. Deep Space Exploration Lab, Beijing 100195, China;

2. National Space Administration Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, Beijing 100190, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, China;

4. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

5. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

6. Beijing Institute of Tracking & Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In deep space exploration missions, the space-borne portion of the deep space communication system serves as the foundation for long-distance information transmission. Its technological development directly promotes the growth of ground-based received data rates, which affects the design and engineering implementation of exploration missions. In this paper, the development and current state of space-borne communication technologies in deep space exploration missions worldwide were systematically reviewed, with a focus on key technologies such as high-frequency band communication, high-efficiency coding/decoding and deep space relay technologies. The findings offer valuable technical reference for the design of deep space communication systems and mission planning in China's future deep space exploration.

Keywords: high-frequency band communication; high-efficiency coding/decoding; deep-space relay communication

Highlights:

- Compare space-borne communication technologies used in various typical deep space missions.
- Quantitatively analyze spatial loss and one-way optical travel time in long-distance communications.
- Focus on three key technical areas: high-frequency band communication, high-efficiency coding/decoding and deep-space relay communication.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]