中国深空测控网现状与展望

吴伟仁¹, 李海涛^{2*}, 李赞², 王广利³, 唐玉华¹

1. 探月与航天工程中心, 北京 100190

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

3. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 通信作者. E-mail: lihaitao@bittt.cn

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-12-03; 接受日期: 2019-12-14; 网络出版日期: 2020-01-13

国家中长期科技发展规划重大专项 (探月工程) 资助项目

摘要 深空测控网是支持深空探测任务实施的核心系统, 在深空探测任务中具有不可替代的重要地位和作用. 在中国探月工程带动下, 分阶段建成了功能完备、性能先进、全球布局的中国深空测控网. 未来在后续月球与行星探测工程的带动下, 通过应用天线组阵、光通信、相位参考干涉测量等新技术, 中国深空测控网将实现更强的深空测控通信能力, 并可同时用于深空科学探测活动.

关键词 深空测控网, 功能与性能, 深空通信, 深空导航, 科学探测

1 引言

对未知世界的探索, 是人类发展的永恒动力; 对茫茫宇宙的认知, 是人类的不懈追求. 进入 21 世纪以来, 随着航天技术与空间科学的飞速发展, 人类认识宇宙的手段越来越丰富, 范围也越来越广, 开展地月日大系统研究^[1], 进行太阳系边际探测^[2], 已成为人类航天活动的重要方向.

深空探测是指脱离地球引力场, 进入太阳系空间和宇宙空间的探测活动. 关于深空探测的定义, 一种是国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 在《无线电规则》第 1.77 款中关于深空的规定; 另一种定义为对月球及以远的天体或空间开展的探测活动^[3]. 1988 年 10 月, 世界无线电管理大会 (World Administrative Radio Conference, WARC) ORB-88 会议确定将深空的边界修订为距离地球大于或等于 2.0×10^6 km 的空间, 这一规定从 1990 年 3 月 16 日起生效^[3], 国际空间数据系统咨询委员会 (The Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 在其建议标准书中也将距离地球 2.0×10^6 km 以远的航天活动定义为 B 类任务 (即深空任务); 中国采用了第 2 种定义, 将月球探测作为了深空探测的起点.

引用格式: 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状与展望. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 87–108, doi: 10.1360/SSI-2019-0242
Wu W R, Li H T, Li Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 87–108, doi: 10.1360/SSI-2019-0242

图 1 深空测控系统组成示意^[8]

Figure 1 Configuration of deep space TT&C system

深空测控系统是用于深空探测任务航天器跟踪测量、监视控制和信息交换的专用系统^[4], 其在深空探测任务中具有不可替代的重要地位和作用^[5,6]. 中国深空测控系统是伴随着探月工程“绕、落、回”三步走的战略步伐逐步建设和发展起来的^[7], 历经了探月工程一期利用服务于地球轨道卫星任务的航天测控网完成 40 万公里以远目标测控任务, 实现了远距离测控技术的突破; 探月工程二期建设了国内两个深空站, 初步具备了独立实施深空探测任务测控支持的能力; 在探月工程三期中, 建设了位于南美洲的第 3 个深空站, 从而形成了全球布局功能体系完备的深空测控网. 北京航天飞行控制中心作为中国月球与深空探测任务的操作控制中心, 负责完成深空探测全任务过程的操作控制和管理工作的。

2 全球深空测控网概况

深空测控系统一般由深空航天器上的星载测控分系统、分布于地面的深空测控站、深空任务飞行控制中心以及将地面各组成部分连接在一起的通信网组成, 如图 1^[8]所示. 通常, 将地面的多个深空测控站组成的测控网称为深空网或深空测控网, 它特指专门用于深空航天器测控和数据传输的专用测控网. 其特点是配有大口径抛物面天线、大功率发射机、极高灵敏度接收系统、信号处理系统以及高精度高稳定度时间频率系统, 能完成对距离地球 200 万公里以远深空航天器的测控任务^[9].

为了克服地球自转影响, 实现对深空航天器的连续测控覆盖, 深空测控网的布局通常是在全球范围内经度上间隔约 120° 布站, 这样可以确保对距离地球表面在 3 万公里以上的航天器进行连续测控, 图 2 所示为美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 深空网布局对不同轨道高度航天器的测控覆盖示意. 综合考虑跟踪弧段和天线性能等因素, 深空站的站址纬度通常选择在南北纬 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间^[10].

目前, 美国、欧洲航天局 (European Space Agency, ESA)、中国等已经建立了深空测控网^[11]. 俄罗斯、日本、印度、意大利、德国等国家也研制建设了自己的深空测控设备, 但并未形成完整的深空测控网. 全球深空测控设施分布如图 3 所示.

2.1 NASA 深空测控网

美国 NASA 深空网由在全球按经度间隔接近 120° 分布的三处深空通信综合设施组成, 分别位于美国加州的戈尔德斯通 (Goldstone)、西班牙的马德里 (Madrid) 和澳大利亚的堪培拉 (Canberra). 深空

图 2 NASA 深空网布局对不同轨道高度航天器的覆盖示意 [10]

Figure 2 Coverage of spacecraft at different orbital altitudes by NASA's deep space network

图 3 全球主要深空测控设施布局

Figure 3 Layout of global major deep space TT&C facilities

网的操作控制中心位于美国加州帕萨迪纳 (Pasadena) 的喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL). NASA 深空网是目前世界上能力最强、规模最大的深空测控通信系统. 系统始建于 1958 年, 1961 年建成包括戈尔德斯通、澳大利亚伍默拉 (Woomera) 和南非约翰内斯堡 (Johannesburg) 3 个深空站

图 4 美国 NASA 深空网布局和组成

Figure 4 NASA deep space network layout and composition

的系统, 1963 年正式命名为深空网; 之后在 1965 年新建了西班牙马德里和澳大利亚堪培拉两个深空站. 直到 1974 年, 堪培拉和马德里站取代了伍默拉和约翰内斯堡 (NASA 关闭了这两处设施), 形成了目前的三站格局^[12], 如图 4 所示.

(1) 戈尔德斯通深空通信综合设施 (北纬 $35^{\circ}25'36''$, 西经 $116^{\circ}53'24''$), 位于美国加州的莫哈维沙漠. 目前在运行的有 1 个 70 m 天线、3 个 34 m 波束波导 (Beam Waveguide, BWG) 天线, 正在新建 1 个 34 m BWG 天线.

(2) 马德里深空通信综合设施 (北纬 $40^{\circ}25'53''$, 西经 $4^{\circ}14'53''$), 位于西班牙首都马德里以西 60 km. 目前在运行的有 1 个 70 m 天线, 1 个 34 m 高效率天线, 2 个 34 m 波束波导天线, 另有 2 个 34 m 波束波导天线在建.

(3) 堪培拉深空通信综合设施 (南纬 $35^{\circ}24'05''$, 东经 $148^{\circ}58'54''$), 位于澳大利亚首都堪培拉西南 40 km. 目前在运行的有 1 个 70 m 天线, 3 个 34 m 波束波导天线, 有 1 个 34 m 波束波导天线在建.

2.2 ESA 深空测控网

ESA 深空网的建设始于 1998 年, 目前已经建成了 3 个全球分布的具有 35 m 口径天线的深空站, 分别是澳大利亚新诺舍 (New Norcia) 站、西班牙塞夫雷罗斯 (Cebreros) 站和阿根廷马拉圭 (Malargüe) 站, 3 个深空站可以由位于德国达姆施塔特 (Darmstadt) 的欧洲空间操作中心 (European Space Operations Centre, ESOC) 进行远程操作控制, 其布局如图 5 所示. ESA 是世界上第 2 个建成全球布站深空测控网的航天机构.

(1) 新诺舍深空站 (南纬 $31^{\circ}2'53.61''$, 东经 $116^{\circ}11'29.40''$), 位于澳大利亚西部珀斯市以北 150 km 新诺舍镇以南 8 km, 2003 年建成.

(2) 塞夫雷罗斯深空站 (北纬 $40^{\circ}27'09.68''$, 西经 $04^{\circ}22'03.18''$), 位于西班牙马德里以西的埃维拉省塞夫雷罗斯城以南 12 km, 2005 年建成.

(3) 马拉圭深空站 (南纬 $35^{\circ}46'33.63''$, 西经 $69^{\circ}23'53.51''$), 位于南美洲阿根廷西部门多萨省马拉圭市以南 30 km, 距离布宜诺斯艾利斯市 (Buenos Aires) 1200 km, 2012 年底建成.

图 5 ESA 深空测控网布局示意

Figure 5 Layout of ESA deep space TT&C network

3 中国深空测控网现状

目前,中国深空测控网由分布在中国东北部地区和西北部地区的 2 个深空站和位于南美洲阿根廷西部地区的 1 个深空站组成.具备支持各类月球和深空探测任务的多频段遥测、遥控、数据接收和跟踪测量等功能,是目前世界上功能完备全球布局的三大深空测控网之一.

3.1 总体概况

全球布局的中国深空测控网包括中国西北部喀什地区 35 m 深空站、中国东北部佳木斯地区 66 m 深空站和位于南美洲阿根廷西部内乌肯省萨帕拉地区的 35 m 深空站.从整体布局而言,中国深空测控网并不是最优的地理布局,国内两个深空站的经度差只有 54° ,喀什深空站和阿根廷深空站的经度差为 146° ,测控覆盖搭接时间约 2 小时,而阿根廷站和佳木斯站的经度差则达到了 160° ,无法实现 10° 仰角的测控覆盖搭接.因此,中国深空测控网对深空航天器的测控覆盖率只能接近 90%,如图 6 所示.即便是在 5° 仰角状态,当星下点位于南纬 20° 以南时佳木斯深空站和阿根廷深空站之间也还存在一段测控无法覆盖的空档弧段,如图 7 所示.

中国深空测控网采用了国际标准的 S, X 和 Ka 三频段,频率范围覆盖 NASA 和 ESA 深空站的频率范围,符合国际电联和 CCSDS 的相关建议,如表 1 所示.目前 S 和 X 频段上下行链路均可用, Ka 频段主要用于下行接收.

中国深空测控网在规模上与 ESA 的深空测控网相当,都是在全球范围内建设了 3 个深空站,具备独立支持深空探测任务的能力.中国深空测控网的建设起步晚、起点高,作为支撑国家重大航天工程任务的重要基础设施,中国深空测控网从规划设计之初就立足现实、着眼长远,在总体设计上提出了: (1) 兼顾中国月球探测和未来深空探测任务; (2) 具备测控、数传和长基线干涉测量等多种功能于一体,最大限度发挥深空测控网效能; (3) 在技术体制上与国际主流的 NASA, ESA 深空任务测控体制相互兼容,利于国际合作与任务交互支持等基本原则^[13].

在深空站的站址选择上,重点从电磁环境方面考虑,以确保深空站极高灵敏度接收机尽可能不受

图 6 中国深空测控网 10° 仰角测控覆盖示意

Figure 6 Coverage of China deep space TT&C network at 10° elevation

图 7 中国深空测控网 5° 仰角测控覆盖示意

Figure 7 Coverage of China deep space TT&C network at 5° elevation

表 1 深空测控工作频段

Table 1 Frequency band for deep space TT&C

Frequency band	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
S-band	2025~2120	2200~2300
X-band	7145~7235	8400~8500
Ka-band	34200~34700	31800~32300

外界电磁干扰, 达到国际电联建议书 (ITU-RSA.1157-1) 给出的深空站干扰保护标准^[14]. 因此, 所选深空站的站址基本上都处于远离微波中继通信干线、移动通信基站、高压线、高等级公路和电气化铁路的山区, 从而避免外界电磁环境抬高接收的系统噪底所导致的接收灵敏度恶化; 同时还充分利用站址周围的地形遮蔽条件, 进一步降低外界电磁干扰对深空站的影响, 同时也避免了深空站大功率发射信号对外界环境的电磁辐射影响.

(1) 佳木斯深空站. 佳木斯深空站 (北纬 46°29′37″, 东经 130°46′12″), 位于中国黑龙江省佳木斯市东南约 45 km 桦南县境内. 站址所处的区域, 属于完达山支脉的低山丘陵地区, 地势东北高、西南低,

图 8 佳木斯深空站 66 m 测控设备与站址周边地形

Figure 8 Jiamusi deep space station 66 m TT&C equipment and site surrounding terrain

图 9 喀什深空站 35 m 测控设备与站址地形

Figure 9 Kashi deep space station 35 m TT&C equipment and site surrounding terrain

周边低山的海拔都在 300~400 m 左右, 与山谷的相对高程差在 100 m 左右, 66 m 口径的天线布设其中, 可以形成较好的遮蔽条件, 如图 8 所示. 气候属温带大陆性季风气候, 春季干旱风大少雨, 夏季温热多雨, 秋季降温急剧多早霜, 冬季寒冷漫长. 因此, 在该站建设了一套具备 S/X 双频段测控能力的 66 m 深空测控设备 (综合考虑气象等因素暂未考虑 Ka 频段), 于 2013 年建成并投入使用.

(2) 喀什深空站. 喀什深空站 (北纬 $38^{\circ}26'34.7''$, 东经 $76^{\circ}43'40.3''$), 位于中国新疆维吾尔自治区喀什市以南约 130 km 莎车县境内. 站址所处的区域位于昆仑山北麓、帕米尔高原脚下, 塔克拉玛干沙漠西缘. 站址西南方向是连绵高耸的昆仑山脉, 周边的山峦与站址的高差也都在 100 m 以上, 遮蔽条件良好, 如图 9 所示. 该区域属温带大陆性干燥型气候, 四季分明、气候干燥、日照时间长、水份蒸发量大. 因此, 在该站建设了一套具备 S/X/Ka 三频段测控能力的 35 m 深空测控设备, 于 2013 年建成并投入使用.

(3) 阿根廷深空站. 阿根廷深空站 (南纬 $38^{\circ}11'28.90''$, 西经 $70^{\circ}8'58.20''$), 位于南美洲阿根廷西部内乌肯省萨帕拉市以北约 80 km, 站址所处的区域, 位于南美洲巴塔哥尼亚 (Patagonia) 高原的北缘, 地势由西向东逐步降低. 站址西面是高昂的安第斯山脉, 周边的群山环绕, 与站址的高差也都在 200 m 以上, 遮蔽条件良好, 如图 10 所示. 该区域的气候介于温带大陆性气候和高原山地气候之间, 有温季

图 10 阿根廷深空站 35 m 测控设备与站址地形

Figure 10 Argentina deep space station 35 m TT&C equipment and site surrounding terrain

和干季之分。夏季热, 大部分晴天, 冬季寒冷, 部分多云, 全年干燥和多风。因此, 在该站建设了一套具备 S/X/Ka 三频段测控能力的 35 m 深空测控设备, 于 2017 年建成并投入运行。

3.2 系统功能和性能

深空测控网利用深空测控设备上行或下行无线链路和深空航天器上的测控应答机, 可以实现 3 种基本功能。第 1 个功能, 也是最为重要的, 就是获取无线电跟踪测量数据的功能。深空航天器在轨运行期间, 任务中心利用许多无线电测量信息估计航天器的精确位置, 包括多普勒 (Doppler) 信号数据、测距信息数据、两个测站构成的差分干涉测量数据等。第 2 个功能是利用加入到上行链路 (从深空测控站发出) 和下行链路 (从深空航天器发出) 的调制信号, 通过上行链路发送遥控指令至深空航天器, 同时通过下行链路将航天器上的工程和科学数据发送回地球。第 3 个功能是利用深空测控网作为科学测量仪器用于无线电科学和雷达天文学研究。

中国深空测控网在系统功能上实现了测控、数传、干涉测量一体化。首先, 在无线电跟踪测量方面, 具备基本的测距、测速和干涉测量功能。目前, 可以支持双向相干多普勒测速、单向测速和三向测速, 数据类型包括多普勒频率和相位, S 频段测速精度可以达到 1 mm/s, X 频段测速精度可以达到 0.1 mm/s^[15]; 测距支持侧音测距、ESA 标准音码混合测距和 CCSDS 建议标准的伪码测距, 双向测距精度可以达到 1 m^[15]; 干涉测量具备支持 S, X 和 Ka 三频段的窄带测量能力, 可以实现差分单向测距 (differential one-way ranging, DOR) 和单向差分多普勒 (differential one-way Doppler, DOD) 观测, 并已经实现了与 ESA 深空站的联合测量和数据交互。其次, 在遥测遥控和数据接收功能方面具备符合 CCSDS 建议标准的调制方式、波形、数据码速率和信道编码方式, 同时还引入了 CCSDS 空间链路扩展协议 (space link extension, SLE) 以实现不同航天机构之间的交互支持, 并已经实现了与欧洲空间操作中心 (European space operation center, ESOC) 的互联互通和月球探测任务的支持。第三, 在科学应用方面, 深空测控站已经具备一定的宽带射电天文观测能力, 在可用接收频段内能够进行射电天文观测, 同时还具备了双频段多普勒同时测量能力, 可用于无线电科学研究。

中国 35 m 三频段深空测控设备和 66 m 双频段深空测控设备均是由天伺馈分系统、发射分系统、高频接收分系统、多功能数字基带分系统、监控分系统、数据传输分系统、时频分系统、CCSDS 空间链路扩展服务终端分系统、标校分系统和自动测试分系统等组成的^[15]。

- 大口径波束波导天伺馈。中国深空测控网 3 套设备的天伺馈系统均采用了 35 m/66 m 大口径赋

图 11 35 m 深空测控天线波束波导结构示意图 (左) 及双色镜 (右) ^[15]

Figure 11 Beam waveguide structure of 35 m deep space TT&C antenna (left) and dichroic mirror (right)

图 12 佳木斯 66 m 深空测控设备 S 频段 (左) 10 kW 发射机和 X 频段 (右) 10 kW 发射机 ^[15]

Figure 12 Jiamusi 66 m deep space TT&C equipment S-band (left) 10 kW transmitter and X-band (right) 10 kW transmitter

形卡塞格伦天线和波束波导馈电方式, 如图 11 所示, 能够满足多频段工作、较高的系统 G/T 值和高指向精度等要求. 采用波束波导技术, 还实现了将体积较大的馈源及其他电子设备移到地面, 便于安装和维修, 也利于接收机采用低温制冷技术, 从而降低系统噪声温度提高系统 G/T 值, 同时也减小了大功率发射馈线的损耗, 利于保证实现较高的 EIRP 值.

● **大功率发射机.** 深空测控设备所采用的大功率发射机发射功率都在数十 kW 量级, 主要由大功率速调管、高功率电源、冷却设备、输出微波网络、控保与监控等部分组成. 中国深空测控设备采用了自主研发的 S/X 频段 10 kW 速调管发射机, 由国产单注速调管作为末级放大器, 输出功率大于 10 kW, 带宽大于 95 MHz (−1 dB), 实现了整个工作频段免调谐和功放设备输出功率 0.1 dB 步进的精确控制, 如图 12 所示. 针对深空测控设备 10 kW S/X 频段速调管工作时发热量大, 对其采取了液冷和风冷相结合的冷却方式.

图 13 深空测控设备配置的 X 频段制冷接收机和低温放大器

Figure 13 X band refrigeration receiver and low temperature amplifier of deep space TT&C equipment

图 14 深空测控设备配置的主动型氢原子钟和频率净化器 [15]

Figure 14 Active hydrogen clock and frequency purifier of deep space TT&C equipment

- **低噪声高频接收机.** 高频接收分系统实现了对接收到的 S/X/Ka 射频信号进行低噪声放大和变转换, 其设备配置能够满足双目标、双点频左右旋同时接收的需求. 配置的 S/X/Ka 三频段低温接收机, 深度冷却低噪声放大器, 有效降低低噪声放大器的噪声温度, S 段低温接收机噪声温小于 18 K, X 频段低温接收机噪声温小于 20 K [15], 如图 13 所示.
- **高精度时频系统.** 时频系统主要由氢钟、频率净化器、时码信号产生器/分配器、GPS/北斗定时接收机、GPS 共视接收机、频率信号分配放大器、时频监控以及联试用铷原子频率标准等部分组成. 时频分系统配备两台主动型氢钟和频率净化器 (如图 14 所示) 为其他分系统提供所需的高精度频率基准信号和时标脉冲 (如表 2 所示); 还能接收外部输入的时间码信号或通过分系统内部的 GPS 或北斗定时接收机, 产生全系统所需的时间基准信号. 同时配置高精度 GPS 共视接收机来实现高精度站间时间同步, 多站联合观测站间时间同步精度优于 20 ns.

表 2 深空测控设备时频分系统输出信号^[15]

Table 2 The output signal of time-frequency subsystem of deep space TT&C equipment

Number	Signal types	Number of signal
1	10 MHz sine wave	16
2	100 MHz sine wave	16
3	1 pps	12
4	10 pps	5
5	100 pps	5
6	1 kpps	5
7	IRIG-B (TTL) output	16
8	Monitoring of time and frequency	1

表 3 国际典型大口径深空测控设备性能比较 (64 m/66 m)

Table 3 Performance comparison of international typical large-diameter TT&C equipment (64 m/66 m)

	Russia 64 m	Japan 64 m	Italy 64 m	China 66 m
S-band EIRP (dBW)	–	104	–	97.3
S-band G/T (dB/K)	–	44 (15° EL)	41 (15° EL)	41.8 (10° EL)
X-band EIRP (dBW)	107.8	113	108	108.3
X-band G/T (dB/K)	51.7 (5° EL)	55.1 (15° EL)	54.5 (10° EL)	53.3 (10° EL)

表 4 国际典型大口径深空测控设备性能比较 (34 m/35 m)

Table 4 Performance comparison of international typical large-diameter TT&C equipment (34 m/35 m)

	ESA 35 m	NASA 35 m	China 35 m
S-band EIRP (dBW)	97	98.1	93
S-band G/T (dB/K)	37.5 (10° EL)	39.4 (10° EL)	37 (10° EL)
X-band EIRP (dBW)	107	109.4	104
X-band G/T (dB/K)	50.1 (10° EL)	50.0 (10° EL)	50.0 (10° EL)
Ka-band EIRP (dBW)	101 (design value)	108.5 (DSS-25)	(Scalable)
Ka-band G/T (dB/K)	55.8 (10° EL)	60.8 (45° EL)	56 (10° EL)

中国深空测控系统在功能和性能上与美国、ESA 等所属的深空站处于同一水平. 表 3 和 4 分别给出了国际典型大口径深空测控设备的性能参数.

3.3 任务支持情况

(1) 嫦娥二号任务 S 频段测控支持. 2011 年, 喀什 35 m 和佳木斯 66 m 深空测控设备基本建成, 初步具备全功能测控和数传能力. 此时, 嫦娥二号卫星已完成各项既定的工程和科学探测目标, 2011 年 8 月 25 日嫦娥二号到达了日地拉格朗日 (Lagrange) L2 点 (简称日地 L2 点)^[16, 17], 进行了为期 10 个月的科学探测; 喀什 35 m 和佳木斯 66 m 从 2011 年 10 月开始为嫦娥二号卫星提供测控支持, 期间先后检验了两套深空测控设备对深空探测器的 S 频段遥控、遥测、数传和干涉测量数据采集等功能, 验证了其双向测距、测速数据和天线指向控制等精度, 对相关技术指标进行了系统测试. 并顺利支持了嫦娥二号在 2012 年 12 月 13 日国际上首次近距离飞越探测编号 4179 的“图塔蒂斯” (Toutatis)

小行星的再拓展任务. 之后喀什 35 m 和佳木斯 66 m 深空测控设备一直负责嫦娥二号卫星的测控支持, 最远跟踪嫦娥二号卫星至约 1 亿 km, 最终因卫星下行信号消失, 与地面失去联系. 同时在嫦娥二号任务中, 开展了 X 频段测控技术试验, 对后续任务正式使用的 X 频段测控进行先期验证^[18,19].

(2) 嫦娥三号任务 X 频段测控支持^[20]. 嫦娥三号探测器于 2013 年 12 月 2 日发射, 14 日安全着陆在月球虹湾着陆区, 实现了中国首次在地外天体上进行原位和巡视探测. 从 2013 年 12 月开始, 喀什 35 m 和佳木斯 66 m 两套深空测控设备正式作为参试设备参加嫦娥三号任务. 其间, 两套深空测控设备首次利用 X 频段完成了探测器地月转移、环月、动力下降、月面工作段的各项测控任务, 期间获取的双向和三向测距测速、差分单向测距、同波束干涉测量等数据为高精度测定轨、动力下降轨迹监视和探测器月面绝对和相对位置确定等提供了高精度的测量数据. 深空测控设备实现了 X 频段测控, 测量数据精度相比 S 频段提高 3~5 倍. 截至目前, 两套深空测控设备仍在持续为嫦娥三号着陆器提供各项测控支持.

(3) 嫦娥四号任务全网 S/X 双频段测控支持^[21~23]. 2017 年底, 阿根廷 35 m 深空测控设备建成并在 2018 年 5 月 21 日发射的嫦娥四号“鹊桥”中继星任务正式投入使用, 和国内喀什 35 m 和佳木斯 66 m 深空测控设备共同为鹊桥提供了 S 频段测控支持, 这也是中国深空测控网首次全网执行测控任务. 2018 年 12 月 8 日, 嫦娥四号探测器成功发射, 深空测控网的全部 3 个深空站为探测器任务提供了全程 X 频段测控通信支持. 2019 年 1 月 3 日, 嫦娥四号探测器成功着陆于月球背面的预选着陆区——冯·卡门撞击坑 (Von Karman Crater), 成为世界第 1 个在月球背面实现软着陆和巡视探测的航天器, 并实现了世界上首次月球背面航天器与地球之间的中继通信, 如图 15¹⁾所示. 嫦娥四号任务首次全面检验了深空测控网全网协同工作和稳定可靠运行、多频段与多目标联合测控等能力, 为深空测控网后续对更远深空探测器提供测控支持奠定了坚实的技术基础.

4 中国深空测控网未来展望

以嫦娥四号任务圆满成功为标志, 中国探月工程四期和深空探测工程全面拉开序幕. 在嫦娥五号任务之后将实施嫦娥六号、嫦娥七号和嫦娥八号 3 次月球探测任务. 嫦娥六号计划在月球南极进行采样返回; 嫦娥七号是在月球南极, 包括对月球的地形地貌、物质成分、空间环境等进行一次综合探测; 嫦娥八号除了继续进行科学探测试验以外, 还要进行一些关键技术的月面试验. 中国未来深空探测工程将实施 4 次重大任务: 2020 年发射首个火星探测器, 一次实现火星环绕和着陆巡视探测; 2024 年前后进行一次小行星探测; 2028 年前后实施第 2 次火星探测任务, 进行火星表面采样返回, 开展火星构造、物质成分、火星环境等科学分析与研究; 2036 年前后开展木星系及行星际穿越探测.

未来中国深空测控网将面临更复杂的测控通信任务、更遥远的测控通信距离、更高的深空导航精度等诸多新的挑战^[24], 伴随着后续月球和深空探测工程的实施, 中国深空测控网在规模和性能上都会有大幅度的提升.

4.1 更强的深空测控通信能力

4.1.1 构建天线组阵系统

遥远距离的深空测控通信始终是深空探测活动面临的重大挑战. 随着科学探测能力的不断提高, 对数据传输速率需求也越来越高; 而随着探测距离的持续增大, 地面所接收到的信号强度却越来越微弱, 单纯依靠地面大口径天线解决这一问题变得越来越困难^[25]. 天线组阵接收技术是利用地面多个

1) <http://www.cnsa.gov.cn/>.

图 15 在月球背面嫦娥四号着陆器、玉兔二号月球车以及鹊桥中继星工作示意图

Figure 15 The Chang'E-4 lander on the far side of the moon, the Yutu-2 lunar rover and the Queqiao relay satellite

天线组成天线阵列, 将各个天线所接收到的信号进行合成, 从而达到增大天线口径的效果, 实现遥远距离信号的有效接收.

即将在 2020 年实施的首次火星探测任务中, 中国深空测控网的测控通信支持距离将进一步延伸到 4 亿公里远. 为了提高深空测控网的数据接收能力, 中国正在喀什深空站建设 3 个 35 m 口径新天线, 与原有的 1 个 35 m 天线组成天线阵系统, 通过天线组阵接收技术, 使得喀什深空站在 X 频段深空任务测控通信数据接收能力达到与佳木斯深空站 66 m 深空测控设备相当的水平 (见图 16). 未来还计划在阿根廷深空站构建类似的天线阵系统, 从而实现更强更远的测控通信能力.

此外, 组成天线阵系统的各个 35 m 天线均可以升级成为独立的 35 m 深空测控设备, 从而实现每个深空站点更多任务目标的测控通信支持能力.

未来通过广域天线组阵还可以将中国国内可用的大口径天线都利用起来, 能够形成等效天线口径超过 150 m 的接收能力, 如图 17 所示, 大大提升深空探测任务的数据接收能力. 表 5 给出了天线组阵后的系统接收能力与单个大口径天线的对比.

4.1.2 应用 Ka 频段测控通信

为提高深空测控通信传输效率, 还可以提高测控通信频率. 目前, 国际上深空测控通信主用的是 X 频段, 更高的 Ka 频段还处在试验或应用初期阶段. 采用频率比 X 频段更高的 Ka 频段还可以大幅度降低地球电离层、行星际空间等离子区以及太阳风的影响, 提高深空任务测距测速精度, 实现更高的深空导航精度.

中国深空测控网已经建成的喀什和阿根廷的 2 套 35 m 深空测控设备已经具备了 Ka 频段下行接

图 16 中国喀什深空站 4×35 m 天线组阵示意图
Figure 16 Schematic diagram of 4×35 m antenna array of China kashi deep space station

图 17 中国国内广域天线组阵示意图
Figure 17 Schematic diagram of China’s domestic wide area antenna array

表 5 天线组阵与单个大口径天线性能对比
Table 5 Antenna array and a single large antenna performance comparison

	NASA 70 m	China 66 m	ESA 35 m	China 35 m	China wide area antenna array
X-band G/T (dB/K)	57	53.3	51	50	≥ 61
Ka-band G/T (dB/K)	—	—	55.8	56	≥ 67.5

收能力. 正在建设中的喀什深空站天线阵系统的 3 个 35 m 口径天线的表面精度也是按照支持 Ka 频段考虑的 (优于 0.3 mm), 后续可升级成具备 Ka 频段全功能测控通信能力的系统.

表 6 深空测控发射机功率对比
Table 6 Power comparison of deep space TT&C transmitter

Nation or organization	Frequency band	Maximum transmitted power
US	S	20/400 kW
	X	20/80 kW
	Ka	800 W
ESA	S	20 kW
	X	20 kW
China	S	10 kW
	X	10/50 kW

此外,在探月工程四期还规划了在佳木斯深空站新建 1 个 35 m 口径 Ka 频段全功能测控设备,以支持 Ka 频段测控通信技术验证试验.也就是说,未来中国深空测控网将具备全面支持 Ka 频段测控通信的能力,数据接收能力和导航测量精度都将会得到大幅度的提升.

4.1.3 研制 100 kW 级大功率发射机

为了实现后续深空探测任务高速数据的可靠注入,进一步提升深空测控网的上行发射能力,在 2012 年自行研制 S 频段和 X 频段 10 kW 速调管发射机的基础上,2017 年又实验成功了 X 频段 50 kW 连续波速调管高功放,各项技术指标又达到一个新的高度,接近世界先进水平,如表 6 所示.后续还计划开发发射功率在 100 kW 量级的 X 频段连续波速调管高功放,以支持未来实施的火星采样返回任务和木星探测任务.同时,还将继续开展上行组阵技术攻关,充分利用发射信号空间和成的 N^2 效应,以实现更大的上行发射能力,支持未来更深远的行星际探测任务.

4.1.4 发展深空光通信技术

深空光通信技术是指以激光或空间自由光为载体,通过望远镜进行深空通信的技术.激光的频率比射频信号高 4~5 个数量级,极高的频率使得激光具有更好的方向性和更为丰富的宽带资源^[13],并且在相同数据传输速率条件下,体积更小、质量更轻、投资费用更少.目前,国际上对于光通信技术研究还处于研究和在轨验证阶段.美国在 2013 年 9 月发射的“月球大气与粉尘环境探测器”(LADDEE),对月地激光通信技术进行了演示验证,实现了月地间下行 622 Mb/s 和上行 20 Mb/s 的通信速率.中国计划在探月工程四期开展地月激光通信技术验证试验^[26,27].

未来发展中国深空测控网光通信系统可能的技术途径包括: (1) 建设全球布局的地基 10 m 左右口径光学系统,考虑气象备份全球需要布设 6 套(间隔 120° 分布 3 处站址,并各有 1 个气象备份站址)地面光学系统,潜在可选站址分布如图 18 所示,其优点是地面易于实现最大接收能力,缺点是受气象条件影响难以实现系统的高可用度,代价也较大; (2) 依托现有的 35 m 深空测控天线构建等效光学口径 6~8 m 的射频/光学混合系统,其优点是可以综合利用已有 35 m 深空测控设备、代价小,缺点是受限于已有站址环境其利用效率会比较低,如图 19 所示; (3) 构建基于星间链路的射频/光学混合认知通信网络,可以通过地球轨道中继的星间激光链路动态调整,避开因气象条件而不可用的地面站或者调整到射频进行数据传输,其优点是系统可用度高、运用灵活,缺点是系统复杂、建设代价巨大.

图 18 潜在深空光通信可选地面站址的分布示意

Figure 18 Distribution of potential deep space optical communications optional ground sites

图 19 35 m 深空射频/光学混合系统示意图

Figure 19 Schematic diagram of 35 m deep space RF/optical hybrid system

4.2 更高的深空导航精度

4.2.1 构建相位参考干涉测量系统

相位参考干涉测量技术源自射电天文中的干涉成图方法, 它依靠多天线间的基线长短指向组合, 并利用了地球自转效应, 通过时域和空域相结合的方法解出相位模糊度^[15, 28]. 与传统无线电干涉测量方法相比, 相位参考干涉测量充分挖掘了不同测站间基线随地球自转产生的指向和长短变化效应, 以及不同测站间相对位置关系对相位模糊度的约束能力, 相当于从时域和空域上扩展提高无线电干涉测量的方法^[29].

相位参考干涉测量技术具有几个优点: (1) 测量精度高, 航天器与射电源角距测量精度优于

图 20 中国深空测控网国际联网条件下的干涉测量基线组合^[31]

Figure 20 Interferometry baseline combination under the condition of International cooperation of China deep space TT&C network

0.5 nrad, 比现有的 Δ DOR 测量精度更高; (2) 不需要航天器具备特殊的信标, 利用航天器下行载波信号就可以实现精确测量; (3) 灵敏度高, 可以观测很弱的航天器信号, 或者利用更弱的更靠近航天器的参考射电源, 进一步减小系统误差; (4) 需要多个天线观测, 但允许单个 (或少数几个) 天线在故障或气象条件差的情况下不对整体测量性能造成太大影响, 系统冗余性和鲁棒性强; (5) 天线分布范围广, 可以有效增加观测时间, 方便制定观测计划^[30].

中国 VLBI (甚长基线干涉测量技术) 天文观测网, 包括上海天文台天马站 65 m、佘山站 25 m、国家天文台密云站 50 m、云南天文台昆明站 40 m 和乌鲁木齐天文台南山站 25 m 5 个天线^[29]. 2013 年中国喀什 35 m 和佳木斯 66 m 两个深空站也已建成投入运行, 一共有 6 个大口径天线. 其中最长基线为喀什深空站至佳木斯深空站, 约 4300 km. 2013 年利用“嫦娥三号”开展了中国首次相位参考干涉测量试验, 以嫦娥三号巡视器作为目标源, 着陆器为参考源, 利用 VLBI 天文观测网 4 个测站的数据, 得到了可靠的巡视器相位参考图. 通过与实际任务视觉定位结果对比, 巡视器相对定位精度优于 1 m, 等效于巡视器和着陆器相对角位置测量精度优于 0.5 mas, 差分相时延测量精度达到 10 ps 量级^[31].

观测网规模越大, 相位参考干涉测量的效果就越好. 随着具备干涉测量能力的阿根廷 35 m 深空站和纳米比亚 18 m S/X 双频段测控设备投入使用, 加上与 ESA 的 2 个深空站开展联网观测, 就可以形成更优的基线组合和 UV 覆盖^[32], 如图 20 和 21 所示. 未来还可以综合利用国内已有的大地测量和其他天文观测设备, 进一步增加测站数量, 丰富基线组合, 从而更有效地提高相位参考干涉测量的精度和实时性, 为后续深空探测任务提供更高精度导航支持.

4.2.2 发展地月空间长基线干涉测量技术

提高深空导航干涉测量精度的另外一个途径就是通过延长基线获得更高的时延测量精度, 将受限于地球直径的地基基线延伸到空间, 乃至 38 万公里远的地月空间, 形成从地球到月球的超长基线. 中

图 21 赤纬 30° 时中国与 ESA 联网的干涉测量网 UV 平面覆盖图^[31]

Figure 21 Spatial frequency UV plane coverage for the Chinese VLBI Network with ESA for declination 30°

图 22 中国地月空间 VLBI 概念图

Figure 22 China cislunar space VLBI concept

国的空间 VLBI 计划提出在后续月球深空探测任务中在环月轨道上部署月球 VLBI 天线, 通过与地基射电望远镜组网开展地月 VLBI 观测实验, 如图 22 所示. 我国空间 VLBI 将充分利用最近几年射电天文技术发展, 通过配置高稳氢原子钟时频系统, 宽频信号接收采集记录系统, 与地面大口径高性能射电望远镜组网观测, 借助星地高速数据传输技术开展地月 VLBI 观测, 预期在深空探测导航技术应用、天体测量学与天体物理学领域前沿课题观测研究 3 个方面展示技术能力, 产出有国际影响力的成果.

深空测轨技术方面, 月球 VLBI 把我国 VLBI 网的基线长度提高约 100 倍. 利用探测器信号在地月基线上开展 VLBI 精密测定轨实验, 验证深空 VLBI 观测网测轨技术能力. 基于 6 m 口径月球 VLBI

表 7 月球 VLBI 与地面测站组网的测量能力

Table 7 The measurement capability of the lunar VLBI with ground stations network

Ground station	Sensitivity (mJy)	SNR ^{a)}	Accuracy of delay (ps)
Tianma 65 m	2.5	20	53
FAST	0.8	63	17

a) SNR: signal to noise ratio.

天线指标, 对 50 mJy 射电源在 512 MHz 带宽观测, 300 s 积分的 VLBI 能力分析见表 7.

4.3 更多的科学探测应用

4.3.1 高精度时空基准测量

深空测控网的大口径天线系统作为接收设备使用时, 其高接收灵敏度与射电天文观测设备性能相近, 适当调整接收频率范围就可以实现对射电源的观测.

深空测控高精度时空基准是更远距离的深空探测任务 (如火星、小行星、行星际探测等) 实现高精度导航、工程目标、科学研究等的基本前提. 定期、持续地参与国际联测, 是建立国际天球、地球参考框架下深空测控高精度时空基准最为直接、有效的措施. 自 2014 年起, 中国佳木斯深空站、喀什深空站联合 VLBI 观测网定期开展了天文观测 (简称天测)/大地测量 (简称测地), 获得了高精度的空间基准, 验证了联合观测网的 EOP 观测能力. 未来中国深空测控网将在现有基础上, 进一步扩展设备的接收频率范围, 将其作为高精度时空基准的测量设施, 可以参与国际联测 (全球网观测、区域网观测、UT1 加强观测等).

4.3.2 天体引力场测量

目前, 中国深空测控网具备 S, X 和 Ka 频段的单程、双程以及三程多普勒跟踪测量能力, 并可以实现双频段同时能力. 三程模式是地面跟踪站向探测器发射上行信号, 由星上转发器接收, 产生一个相干的下行信号, 然后由另一地面站接收; 双程模式与三程多普勒模式类似, 不同之处在于双程模式发射站与接收站相同. 双程模式是一种闭环跟踪模式, 而三程模式是开环跟踪模式, 其通信链路两端开放. 多普勒数据是目前行星/月球重力场反演的重要观测量之一, 目前深空测控系统多普勒测量精度可以优于 0.1 mm/s, 相应的重力场模型精度也有很大的提高.

天体引力场探测可以揭示天体内部结构和物质组成的重要信息, 是深空探测任务中的重要科学目标之一. 天体引力场是行星科学的一个重要部分, 是研究天体物理性质及内部结构、天体起源和演化等科学问题的主要手段. 目前月球、火星等天体的引力场测量与反演主要是利用地基/天基无线电跟踪测量手段实现的, 利用天地大回路或星间的无线电链路的多普勒测量数据. 与此同时, 多普勒测量数据还可用于基本物理学研究, 例如通过测量 NASA 卡西尼号土星探测器与地球通信过程中的无线电频率的变化, Bertotti 等^[33]得到了太阳系中对于广义相对论验证的一个强有力限制. 此外, 多普勒跟踪测量很可能是测量低频引力波 ($10^{-5} \sim 1$ Hz) 的唯一方式^[34].

4.3.3 射电天文观测

大口径、高接收灵敏度的特点使得深空测控网在弱射电源观测方面具有极大优势. 阿根廷深空站改善了南半球 VLBI 测站偏少、全球分布不均匀的局面, 有利于南半球射电源的加密观测; 深空测控网的 Ka 频段接收设备可用于 Ka 频段天球参考架观测, 其多频段观测能力可有效支持不同频段天球

参考架的连接. 深空测控网与国际 VLBI 联网, 根据特定的观测纲要开展联测, 可有效实现天球参考架的加密和精化, 实现不同频段参考架之间的连接.

深空测控网在脉冲星观测方面同样可发挥重要作用. 作为亚洲国家最大的全可动天线, 佳木斯深空站 66 m 天线在脉冲星观测方面取得了丰硕成果; 即将建成的喀什深空站 4×35 m 天线阵亦可用于脉冲星观测, 观测效果甚至会优于佳木斯深空站. 深空测控网通过长期开展脉冲星观测, 构建脉冲星高精度星历表, 搜索和发现新脉冲星, 可为脉冲星导航提供不可替代的技术支撑, 为人类认识宇宙作出贡献.

5 结束语

未来中国深空测控网将伴随着后续月球探测工程和行星探测工程实施的步伐, 不断发展和壮大, 系统规模和深空测控通信能力将会得到大幅度提升, 能够实现覆盖太阳系内所有探测任务的能力, 达到国际一流水平. 同时, 深空测控网还将参与到科学探测应用领域工作, 为科学探测和时空基准测量提供有力支撑, 充分发挥其作为国家航天重要基础设施的积极作用和效益.

致谢 中国科学院上海天文台黄勇研究员、北京跟踪与通信技术研究所徐得珍助理研究员, 对本文撰写提供了有益的帮助.

参考文献

- 1 Luan E J. Penetration point of China's space exploration—the point of large system of earth-lunar-sun. *Spacecraft Eng*, 2007, 16: 1–8 [栾恩杰. 中国空间探索的切入点——“地月日大系统研究”的观念. *航天器工程*, 2007, 16: 1–8]
- 2 Wu W R, Yu D Y, Huang J C, et al. Exploring the solar system boundary. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 1–16 [吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1–16]
- 3 Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS). Radio Frequency and Modulation Systems—Part 1 Earth Stations and Spacecraft. Recommendations for Space Data System Standards CCSDS 401.0-B. Blue Book, 2008. <https://public.ccsds.org/Pubs/401x0b29.pdf>
- 4 Wu W R. Deep space exploration and deep space TT&C communication technology. In: Proceedings of the 9th Annual Conference of Deep Space Exploration Technology Committee of Chinese Astronautical Society, Hangzhou, 2012 [吴伟仁. 深空探测与深空测控通信技术. 见: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会, 杭州, 2012]
- 5 Wu W R, Yu D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies. *J Deep Space Exp*, 2014, 1: 5–17 [吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术. *深空探测学报*, 2014, 1: 5–17]
- 6 Wu W R, Liu W W, Tang Y H, et al. Development trends of deep space exploration and several key technologies. In: Proceedings of the 10th Annual Conference of Deep Space Exploration Technology Committee, 2013 [吴伟仁, 刘旺旺, 唐玉华, 等. 深空探测及几项关键技术发展趋势. 见: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十届学术年会论文集, 2013]
- 7 Ye P J, Huang J C, Sun Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe. *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 543–558 [叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44: 543–558]
- 8 Chief Editorial Committee of Encyclopedia of China. Encyclopedia of China—Aerospace Volume. Beijing: Encyclopedia of China Press, 1985 [中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书——航空航天卷. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985]
- 9 Wu W R, Dong G L, Li H T, et al. Engineering and Technology of Deep Space TT&C System. Beijing: Science Press, 2013 [吴伟仁, 董光亮, 李海涛, 等. 深空测控通信系统工程与技术. 北京: 科学出版社, 2013]
- 10 Li H T, Wang H, Dong G L. Selection of latitude for a deep space station. *J Spacecraft TT&C Tech*, 2009, 28: 1–6 [李海涛, 王宏, 董光亮. 深空站站址纬度选择问题的分析. *飞行器测控学报*, 2009, 28: 1–6]

- 11 Wu W R, Liu X C. A survey of deep space exploration activities abroad. *Aerospace China*, 2004, 1: 26–30 [吴伟仁, 刘晓川. 国外深空探测的发展研究. *中国航天*, 2004, 1: 26–30]
- 12 Mudgway D J. Uplink-downlink: a history of the deep space network 1957–1997. National Aeronautics and Space Administration Office of External Relations, Washington, 2001. <https://history.nasa.gov/SP-4227/Uplink-Downlink.pdf>
- 13 Cheung K-M, Abraham D, Arroyo B, et al. Next-generation ground network architecture for communications and tracking of interplanetary smallsats. In: *Proceedings of the CubeSat Developer Workshop*, San Luis Obispo, 2015
- 14 International Telecommunication Union (ITU). Protection criteria for deep-space research. ITU-R SA.1157-1. <https://www.itu.int/rec/R-REC-SA.1157/en>
- 15 Dong G L, Li G M, Wang X Y. China Deep Space Network: System Design and Key Technologies (II) S/X/Ka-Band Deep Space TT&C System. Beijing: Tsinghua University, 2016 [董光亮, 李国民, 王新永. 中国深空网: 系统设计与关键技术 (中) S/X/Ka 三频段深空测控通信系统. 北京: 清华大学出版社, 2016]
- 16 Wu W R, Luo H, Chen M, et al. Design and experiment of deep space telemetry and data transmission system in Libration points 2 exploring. *Syst Eng Electron*, 2012, 34: 2559–2563 [吴伟仁, 罗辉, 湛明, 等. 面向嫦娥二号日地拉格朗日 L2 点探测的深空遥测数传系统设计与试验. *系统工程与电子技术*, 2012, 34: 2559–2563]
- 17 Wu W R, Cui P Y, Qiao D, et al. Design and performance of exploring trajectory to Sun-Earth L2 point for Chang'E-2 mission. *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2012, 57: 1987–1991 [吴伟仁, 崔平远, 乔栋, 等. 嫦娥二号日地拉格朗日 L2 点探测轨道设计与实施. *科学通报*, 2012, 57: 1987–1991]
- 18 Wu W R, Li H T, Dong G L, et al. X-band TT&C technology of Chang'E-2 project. *Sci Sin Tech*, 2013, 43: 20–27 [吴伟仁, 李海涛, 董光亮, 等. 嫦娥二号工程 X 频段测控技术. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 20–27]
- 19 Wu W R, Huang L, Jie D G, et al. Design and test of X-band TT&C system for Chang'E-2 project. *Sci Sin Inf Sci*, 2011, 41: 1171–1183 [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. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41: 1171–1183]
- 20 Wu W R, Yu D Y. Key technologies in the Chang'E-3 Soft-Landing Project. *J Deep Space Explor*, 2014, 1: 105–109 [吴伟仁, 于登云. “嫦娥 3 号”月球软着陆工程中的关键技术. *深空探测学报*, 2014, 1: 105–109]
- 21 Wu W R, Tang Y H, Zhang L H, et al. Design of communication relay mission for supporting lunar-farside soft landing. *Sci China Inf Sci*, 2018, 61: 040305
- 22 Wu E R, Wang Q, Tang Y H, et al. Design of Chang'E-4 Lunar farside soft-landing mission. *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 111–117 [吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. “嫦娥 4 号”月球背面软着陆任务设计. *深空探测学报*, 2017, 4: 111–117]
- 23 Wu W R, Wang G L, Jie D G, et al. High-accuracy VLBI technique using Δ DOR signals. *Sci Sin Inform*, 2013, 43: 185–196 [吴伟仁, 王广利, 节德刚, 等. 基于 Δ DOR 信号的高精度 VLBI 技术. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43: 185–196]
- 24 Wu W R. Key technologies for lunar and deep space exploration. In: *Proceedings of China Deep Space Exploration 6th Annual Conference*, Changsha, 2008 [吴伟仁. 月球与深空探测的关键技术. 见: 中国深空探测第六届学术年会, 长沙, 2008]
- 25 Li H T. Design Principles and Methods of Deep Space TT&C System. Beijing: Tsinghua University Press, 2014 [李海涛. 深空测控通信系统设计与方法. 北京: 清华大学出版社, 2014]
- 26 Zhang L, Guo L H, Liu X N, et al. Latest progress and trends of development of space laser communication. *J Spacecraft TT&C Tech*, 2013, 32: 286–293 [张靓, 郭丽红, 刘向南, 等. 空间激光通信技术最新进展与趋势. *飞行器测控学报*, 2013, 32: 286–293]
- 27 Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration. In: *Proceedings of SPIE*, San Francisco, 2014
- 28 Dong G L, Li H T, Hao W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system. *J Deep Space Explor*, 2018, 5: 99–114 [董光亮, 李海涛, 郝万宏, 等. 中国深空测控系统建设与技术发展. *深空探测学报*, 2018, 5: 99–114]
- 29 Thompson A R, Moran J M, Swenson G W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2008
- 30 Li H T, Zhou H, Zhang X L. Research on phase referencing VLBI technique in deep space navigation. *J Astronaut*, 2018, 39: 147–157 [李海涛, 周欢, 张晓林. 深空导航相位参考干涉测量技术研究. *宇航学报*, 2018, 39: 147–157]
- 31 Martin-Mur T J, Highsmith D E. Mars approach navigation using the VLBA. In: *Proceedings of the 21st International Symposium on Space Flight Dynamics*, Toulouse, 2009

- 32 Napier P J, Bagri D S, Clark B G, et al. The very long baseline array. *Proc IEEE*, 1994, 82: 658–672
- 33 Bertotti B, Iess L, Tortora P. A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft. *Nature*, 2003, 425: 374–376
- 34 Armstrong J W. Low-frequency gravitational wave searches using spacecraft Doppler tracking. *Living Rev Relativ*, 2006, 9: 1–60

Status and prospect of China's deep space TT&C network

Weiren WU¹, Haitao LI^{2*}, Zan LI², Guangli WANG³ & Yuhua TANG¹

1. *Lunar Exploration and Space Engineer Center, Beijing 100190, China;*
2. *Beijing Institute of Tracking & Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;*
3. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 200030, China*

* Corresponding author. E-mail: lihaitao@bittt.cn

Abstract As a core support system, China's deep space TT&C (tracking telemetry and command) network plays an irreplaceable role in deep space exploration. Driven by China's Lunar Exploration Project, the deep space TT&C network, with complete functions, advanced performance, and global layout, has been built in stages. Additionally, driven by the future lunar and planetary exploration projects, China's deep space TT&C network will realize stronger deep space tracking and telecommunications capabilities through the application of new technologies such as antenna arraying, optical communication, and phase reference interferometry. It will also be useful for deep space scientific exploration activities.

Keywords deep space TT&C network, function and performance, deep space communication, deep space navigation, scientific exploration

Weiren WU is a member of the Chinese Academy of Engineering and the International Academy of Astronautics, and is the chief designer of the China Lunar Exploration Project. His research interests include TT&C system and deep space exploration engineering system design.

Haitao LI earned his B.S. degree from the National University of Defense Technology in 1996 and his M.S. degree from the National University of Defense Technology in 2002, both in communication engineering. He is currently the chief designer of the TT&C system for the China Lunar Exploration Project and China First Mars Exploration Program, and is one of the main designers of China's deep space TT&C network. His research interests include technical research and system design of deep space TT&C.