

火星探测中的深空测控通信关键技术

马文峰, 王聪, 田辉, 朱熠, 于琼, 史涵意

(陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 我国深空测控系统的实施始终围绕探月工程的三步走战略, 包括“绕”“落”“回”, 从关键技术突破、系统初步建成到系统完善, 逐步发展起来。如今火星探测工程的成功实施, 将进一步带动深空测控系统能力的建设与提升。从深空应答关键技术和地面站系统建设等方面, 回顾了我国深空测控系统从无到有的发展历程, 对火星深空测控系统的关键技术进行了总结。同时, 针对美国在行星探测上的优势, 对“毅力号”火星车的深空应答技术进行了分析概述, 为我国火星探测未来发展提供借鉴。进一步, 结合美国深空站建设现状, 针对我国当前快速增长的对未来深空探测任务的需求, 简要回顾了中国深空站系统结构、总体性能、关键系统设计和贡献。

关键词: 深空测控通信; 火星探测; 应答机; 深空站

中图分类号: V443

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00289

Key technologies of deep space TT&C and telecommunication for Mars exploration

MA Wenfeng, WANG Cong, TIAN Hui, ZHU Yi, YU Qiong, SHI Hanyi

College of Field Engineering, Army Engineering University, Nanjing 21007, China

Abstract: The implementation of China's deep space telemetry, track and command (TT&C) system has always revolved around the three-step strategy of the lunar exploration project, including “circling”, “falling” and “returning”, which helps us to make great achievements from the breakthrough of key technologies, the initial construction of the system to the optimization of the system. At present, the success of Mars exploration will further promote our ability of deep space TT&C system construction. In terms of the view of the key technologies of deep space response and the ground station system construction, the development process of China's deep space TT&C system from scratch was reviewed, and the key technologies of Mars deep space TT&C system were summarized. At the same time, in view of the advantages of the United States in planetary exploration, the deep space response technology of the “Perseverance” rover was analyzed and summarized, which can provide reference for the future development of Mars exploration in China. Furthermore, considering the construction of the US deep space station and the current rapidly growing demand for future deep space exploration missions, the system structure, overall performance, key system design issues and contributions of these Chinese deep space stations were briefly reviewed.

Key words: deep space TT&C and telecommunication, Mars exploration, transponder, deep space station

0 引言

天问一号任务的顺利完成是我国航天事业跨

越性发展和自主创新的标志性成果。天问一号任务在我国航天发展史上共实现了6个“首次”重要突破: 一是首次实现地火转移轨道探测器发射; 二是

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2023-01-26

通信作者: 田辉, jaytianhui@foxmail.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62001515, No.61771486, No.62103441); 江苏省博士后科研资助项目(No.2019K090)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62001515, No.61771486, No. 62103441), The Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (No.2019K090)

首次实现行星际飞行；三是首次实现地外行星软着陆；四是首次实现地外行星表面巡视探测；五是首次实现 4 亿千米距离的测控通信；六是首次获取第一手的火星科学数据。天问一号任务也是世界航天史中的一次重大进步，它不仅第一次将中国人的印记留在火星上，而且第一次通过一次任务就同时完成了 3 个目标，包括环绕、着陆以及巡视火星。天问一号任务的顺利完成凝聚了我国航天人的智慧，同时也标志着我国行星探测领域的重大进步，让我国跻身世界航天前列^[1]。

天问一号之前，美国和欧洲一些国家围绕火星进行了数量巨大的探测，从绕火星开始到落地火星探测，都有成功记录。但天问一号的特殊使命和意义，在于它一次性实现中国的绕火星探测和落地探测双突破，瞬间追平其他国家探索火星的进度^[2]。

深空探测是人类在新世纪主要的三大航天活动之一^[3]。深空测控能力是实施月球与深空探测的必然要求，中国深空测控系统的创建和发展是以探月工程三步走的战略步伐作为参考，探月工程第 1 期的任务，主要是实现距离地球 40 万千米的远距离测控，主要借助我国服务于地球卫星的航天测控网完成；第 2 期主要完成我国领域内两个深空站的创建，从基础上完成深空测控网的构建，能够单独进行深空探测；进入到第 3 期后，完成第 3 个深空站的规划建设，该深空站已于 2016 年年底在南美洲阿根廷完成建设。我国深空测控系统已形成较为完善的深空探测能力，基本上能够覆盖超过 90% 的月球以及深空航天器的测控^[4]，并已具备 X 频段和 Ka 频段深空测控通信能力^[5]。

本文主要对我国深空测控系统的建设成就进行回顾，分析了我国未来深空探测任务中测控系统面临的诸多困难与挑战，介绍了我国深空测控领域的最新研究进展与技术发展方向。2020 年以前，我国建设的全球深空测控网具有大口径多天线组阵和全球多基线干涉测量等特性，该系统规模和能力与美国航空航天局（NASA）深空网相当，可对我国自主火星探测和后续深空任务提供测控支持^[4]。

深空探测任务面临的一个主要困难是较远通信距离带来的巨大空间衰减^[6]。信号的衰减主要来自自由空间的传播损耗 L ^[7]。为了解决超长链路损失带来的超低信噪比信号接收难题，通常采用的技术方案包括：将天线口径进一步增大，将接收系统的噪声温度减小，将射频频段提高，开发和更先进的

信源压缩与信道编译码技术等。包含美国在内的国外发展情况如下，1997 年探测海王星的“旅行者二号”成功完成发射，在其通信系统中最先选择应用 X 频段，从此俄罗斯、美国以及日本等国家发射的深空探测器的通信系统全都选择使用 X 频段，通过这种方式减少通信链路产生的损耗。对于我国而言，嫦娥二期工程（主要为 S 频段测控）、嫦娥三期工程（主要为 X 频段测控，对于主动段选择 S 频段进行测控）在进行探测器测控任务时，都选择应用 X 频段测控系统实现^[8]。X 频段深空探测全向天线是嫦娥三号与四号探测器测控与通信系统的重要组成部分^[9]，其中，着陆器的测控上行和中继前向信号接收均通过全向天线完成^[10]。

在进入火星轨道时，探测器需要实施近火制动。此时，探测器距离地球近 1.9 亿千米，发动机点火时间约 1 000 s，届时通信时延约 11 min^[11]，为了确保地面对制动过程进行实时监控，使用了 539 厂自主研发的 X 频段深空应答机。它是深空领域国内首台 X 频段高灵敏数字化应答机。研制人员攻克了 4 亿千米地火远距离通信面临的多项关键技术难题，达到了国际先进水平。在功能上与传统应答机相比，它能够适应不同遥控、遥测码速率的信息传输和高灵敏度的捕获、跟踪和数据解调。同时，研制人员对它还进行了功能升级，根据不同指令，实现测控和数传双功能工作模式的切换^[11]。

为了最大限度保证探测器被火星捕获成功，539 厂的研发人员还在计算机中提前设置了一套程序控制。即便在制动过程中，探测器发生突发状况，也能够发出精准的指令，自主地完成相应处理。在这一关键过程中，深空应答机全程监控，把过程中的遥测变化信息连续回传，便于地面远程观测和地面判断^[11]。

1 火星探测现状及技术要求

自 1960 年苏联发射第一颗火星探测器“火星一号”至今，人类先后向火星发射了数十颗探测器，其中，美国通过历次火星探测任务，先后实现了对其飞掠、环绕、着陆和巡视探测，获取了大量探测数据，让人类对火星这个神秘天体有了越来越深入的认识^[12]。

深空探测的测控通信受远距离、大时延、弱信号^[13]的影响，对火星探测器的测控通信与近地、月球探测器在工作频率、测控通信设备配置、使用模

式等方面都有很大不同^[12]。火星探测中对于天地测控通信设备需要进行详细的配置。

为了解决远距离带来的通信难题，地面必须采用深空测控设备完成探测器的上行指令发送、下行数据接收和轨道测量等工作，必要时还将使用天线组阵技术，以提高测控性能。深空测控设备通常具备以下主要特点^[12]。

- 地面站天线口径大：目前国际上用于深空测控的天线口径最大达到 70 m。
- 地面站接收灵敏度高：通常优于-200 dBW。
- 地面站系统内部噪声温度低：采用低温制冷等技术，低至几十 kbit/s。
- 地面站发射功率高：能够达到数十乃至数百千瓦。
- 能够支持 S/X/Ka 等多个频段的全功能测控。

探测器上也配置了高性能的深空应答机，通过与地面深空测控设备配合完成相应的任务，探测器上的应答机通常具有以下主要特点。

- 轨道器大口径天线：高增益天线口径达到数米，如美国火星勘察轨道器（MRO, Mars reconnaissance orbiter）上配置的高增益天线口径就达到了 3 m。
- 轨道器高性能应答机：接收灵敏度优于 -150 dBm。
- 轨道器高功率发射机：发射功率达到几十、上百乃至千瓦级。
- 多种类型应答机和天线：具备 S/X/Ka 和 UHF 频段等通信能力，适应各任务阶段需求。
- 中继通信：配置中继转发器，实现火星表面探测器数据的中继高速传输。

地面与火星探测器之间的测控通常有直接通信和中继通信两种方式，其中，直接通信是指地面深空测控设备与探测器测控设备直接建立通信链路，完成数据收发和轨道测量；中继通信是指地面深空测控设备通过在轨飞行的中继星（配置中继终端）接力，完成与其他探测器（环绕器或火星表面探测器）的数据收发和轨道测量^[12]。

2 火星探测应答机技术挑战

2.1 信号微弱问题

火星软着陆探测器如果与地面直接进行通信，就会出现很大程度的空间损耗，造成信号在传输过程中的衰减，传输到地面的信号非常微弱，因此就

对探测器传输下行信息的能力起到限制作用。而且因为火星探测任务进入、下降、着陆（EDL, entry, descent and landing）时对热环境以及气动环境的要求非常严格，同时还有可能出现探测器大角度姿态的改变，因此探测器只可以选择应用增益较低的宽波束天线，通过进一步降低天线增益的方式，提高波束宽度，从而保障更全面的对地覆盖，同时也增加了 EDL 过程中通信的难度，提出了更高更严苛的要求^[14]。

2.2 高多普勒动态问题

EDL 过程会造成探测器发射信号上出现较高的多普勒频移动态叠加，会导致较高的多普勒变化率，即多普勒变化范围以及多普勒加速度较大。因为在解调信号时要求解调器始终处于跟踪状态，EDL 通信过程中出现的高多普勒动态很容易造成环路失锁，进而丢失接收端的数据。特别是在信噪比较低的情况下，仅仅在单机层面不能够兼顾高灵敏度以及高动态，因此在设计通信方案时，就需要从系统级层面入手采取相应的措施进行解决，进而保障整个过程中的通信不受影响^[14]。

2.3 黑障现象

当以高超声速穿过火星大气层后，火星探测器就需要在极短的时间内减缓速度，大气阻力发挥的作用导致大部分飞行器的动能向热能转换，如果探测器附近的温度比火星大气电离的阈值温度更高或者温度相同的情况下，大气分子以及其中的烧蚀材料就会出现电离，从而在探测器周围产生等离子鞘套，这种物质很大程度上会对电磁波进行吸收以及散射，进而形成通信“黑障”现象。这种现象的出现和探测器飞行的攻角、飞行的速度、自身的形状以及大气密度等因素息息相关。由于火星 EDL 过程中通信容易受黑障现象的干扰，因此在设计通信方案时，就需要将这种干扰充分考虑在内，并进行量化分析，同时研究相关的防护技术，起到减轻黑障现象作用^[14]。

2.4 太阳闪烁的影响

当无线电波穿过分布不均匀的介质时，介质分布的不均匀性导致电波的相位以及振幅都会以较快的速度随机地发生起伏，这种现象被称为闪烁。太阳风中的带电粒子分布不均匀，同时太阳磁层内部显著性的波动会导致闪烁现象发生。通过有关的研究发现，太阳风等离子体密度和径向距离的平方两者呈反比例关系，即随着径向距离的逐渐增大，等离子体密度就会逐渐降低。如果

探测器与太阳表面之间的距离大于 4 个太阳半径, 太阳风等离子体密度的分布呈现平滑状态, 而且对无线电信号传输产生的干扰主要以色散、吸收、群时延等为主。如果与太阳表面之间的距离比 4 个太阳半径更小, 太阳风带电离子密度就会出现不规则的改变, 如果信号穿越该范围, 太阳风都会对信号的相位、幅值以及频率产生显著性的影响, 同时在该范围内不但会存在由太阳风平滑分布产生的干扰, 同时还会出现频谱扩展、幅度闪烁以及相位闪烁等情况^[15]。

如果无线电信号与太阳风之间的距离较小, 会使得无线信号被菲涅耳区的湍流介质散射。如果无线电信号需要穿过该范围, 波前相位和电波射线路径发生变化, 会造成信号幅度以较快的速度发生改变, 这种改变会以其平均值作为中心。通常将无线电信号在幅度上发生的改变称为幅度闪烁。幅度闪烁主要反映太阳风中小尺度带电离子密度出现的起伏, 这种带电离子的半径通常比菲涅耳半径更小^[15]。

当无线电信号穿过太阳风范围时, 该无线信号的相位会发生改变, 这种情况被称为相位闪烁。相位闪烁会造成信号频率发生改变, 因为地面和飞行器两者之间的相对运动会形成多普勒频移, 因此也可以将相位闪烁视为多普勒噪声, 所以也将其称为多普勒闪烁。通常对相位闪烁进行测量的方式就是对多普勒噪声进行测量^[15]。

频谱扩展代表的就是无线电信号穿过太阳风中不均匀分布的等离子体, 造成该信号的半功率带宽增大。当电磁波在任意介质中传播时, 相位起伏会导致信号频率发生改变, 主要以频谱扩展为主要表现。频谱扩展也是对太阳风中等离子体密度起伏及其速度的反映。若传输信号出现较大程度的频谱扩展时, 为了保证能够捕获全部频率信号, 要求跟踪环路带宽更宽, 然而如果选择较宽的跟踪环路带宽, 会引入大量的热噪声, 进而造成接收机锁相环失锁^[15]。

3 深空应答机关键技术概述

3.1 抗闪烁技术

通过研究发现, 无线电信号受太阳风产生的干扰主要和信号的频率紧密相关, 随着信号频率的逐渐提高, 太阳风对其产生的影响也会逐渐减弱。为了提高对太阳闪烁的抵抗能力, 可以使用

频段较高的无线电信号。如果其他条件一致的情况下, 在闪烁指数方面, Ka 波段信号只有 X 波段的 15%, 而在频谱扩展方面, Ka 波段也只有 X 波段的 20%。根据文献[16]仿真结果, 如果信道条件一致的情况下 ($R=4R_0$, R 为太阳半径; R_0 为信道与太阳中心的距离), 在闪烁指数上, Ka 波段为 0.064, X 波段为 0.37, 如果要满足 10^{-5} 的误码率, X 波段的信号信噪比的衰减率为 7.8 dB, 而 Ka 波段信号几乎不出现衰减, 即相比于 X 频段, Ka 频段的增益为 7.8 dB^[15]。

然而随着信号频率的提高, 在穿越地球大气层的过程中, 信号会发生更大程度的衰减。火星全球勘测者探测器第一次进行 Ka 波段通信性能实验时, 因为受放大器噪声以及大气的干扰, 相比于 X 波段, Ka 波段实际性能下降 6~8 dB。为了解决大气衰减问题, 借助近地轨道中继转发卫星, 将接收到深空探测器的 Ka 频段信号变频到 X 频段后, 再将数据传输到地球, 通过这种方式能够更大程度减少大气层产生的影响。所以将来深空通信的发展方向, 就是应用 Ka 波段远地轨道传输和近地轨道 X 频段中继转发完成通信^[17]。通过这种方式, 不但有助于保障通信性能, 而且还能够减少探测器的自重, 节省功率, 有助于提高数据传输速率^[15]。

3.2 极低信噪比信号捕获技术

深空任务中, 地面接收机接收信号的信噪比非常微弱 (低于 20 dB), 此处信噪比为 C/N_0 , 单位为 dB。在特定轨道上, 下行信号的频率多普勒效应变化范围很大, 例如, X 频段下行信号多普勒变化范围为[-2.4 MHz, 2.4 MHz], 多普勒变化率为 800 Hz/s。常规快速傅里叶变换 (FFT, fast Fourier transform) 频率捕获方案已无法在上述条件下快速、可靠地工作。

高精度的频率捕获是载波跟踪的基础和前提, 研究在极低信噪比、大动态条件下对多种体制信号接收的高精度频率捕获算法是深空测控系统接收终端设计的首要任务。

3.3 极窄带锁相环跟踪技术

由于接收信号极其微弱, 载波和副载波锁相环若要正常工作, 载波环路带宽就要压窄到赫兹 (Hz) 级甚至 0.001 Hz 以提高接收机的灵敏度^[18], 并恢复随机抖动更小的本地相干参考信号以提高测速、测距精度, 而深空目标的速度已达第二宇宙速度, 多

普勒频率变化率高达 800 Hz/s。采用二阶锁相环，10 Hz 的环路带宽能够跟踪的信号动态也仅为 7 Hz/s，无法顺利完成深空探测任务。

采用三阶锁相环进行相位跟踪，并用高精度频率捕获算法辅助环路工作，是实现极窄带锁相环跟踪技术的有效途径。

3.4 低损耗解调译码技术

为了提高数据通信能力，在深空测控系统中广泛采用了低码率、高增益信道编译码技术。卷积码和里德-所罗门 (RS) 编码组成的级联码方案，被空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 推荐为遥测信道的标准编码结构。另外，在相同码率条件下，Turbo 码可以获得比级联码更高的编码增益，其在深空测控系统中的应用潜力更大。

高增益信道编译码往往在低符号信噪比情况下的很小范围内存在明显的“瀑布”效应。如果采用 1/6 Turbo 编码，在误码率为 10^{-5} 量级时，符号信噪比低至 -7 dB 以下，且编译码输入信噪比每变化 0.1 dB，其误码率将有一个量级的变化，因此低损耗解调译码技术尤其需要关注低信噪比下的解调性能和译码过程中的量化等损失。

3.5 “黑障”效应防护与减轻技术

由于无线电波与等离子鞘套内自由电子相互作用是产生“黑障”现象的主要原因，因此解决信号中断问题的关键是如何改变自由电子分布和降低自由电子密度，其相应的技术措施从机理上可归为 3 类：一是改进探测器自身设计，如改变气动外形、改善耐热材料、合理布置天线窗口、提高发射功率、改变通信频率等；二是降低天线附近自由电子密度，如采用化学减轻技术等；三是外加强磁场，限制自由电子运动，改变信号传播模式^[14]。但这些技术并不能单独、完全地解决问题。在实际应用中，需要综合考虑目标性能，合理选择方式方法，多种技术措施结合使用，才能最大限度地提高通信质量^[14]。

4 美国深空应答机技术分析

4.1 美国火星探测 X 频段应答机

火星科学实验室 (MSL, Mars Science Laboratory) “好奇号”于 2011 年 11 月 26 日，在美国佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地利用阿特拉斯-5 型运载火箭发射升空，先后经历发射段、巡航段、EDL 段，并于 2012 年 8 月 6 日成功着陆于火星盖尔撞击坑^[12]。下面对“好奇号”的通信设备配

置和器地通信过程进行详述。

相较于一般的火星探测巡视器 (MER, Mars exploration rover)，“好奇号”火星探测巡视器主要由巡航级、后壳、下降级、漫游器和防热大底 5 部分组成，主要利用 X 和 UHF 频段完成控制、监视、测量和导航等工作。“好奇号”在巡航级、降落伞锥、下降级和漫游器上均配置了测控通信设备。其中，在巡航段、EDL 段和火星表面工作期间通过 X 频段与地面深空测控设备通信，在 EDL 段和火星表面工作期间探测器与环绕火星轨道器之间的中继通信通过 UHF 频段完成。“好奇号”下降级和漫游器均配备了 1 台 X 频段小型深空应答机。

“好奇号”在火星表面巡视探测期间主要利用环绕火星飞行的轨道器完成对地中继通信，轨道器与地面之间采用 X 或 Ka 频段通信，“好奇号”中继通信过程示意如图 1 所示^[12]。

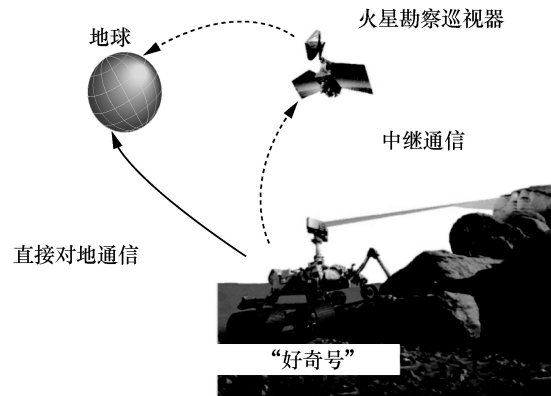


图 1 “好奇号”中继通信过程示意 (以火星勘察巡视器为例)^[12]

巡航段使用下降级上的 X 频段设备，包括小型深空应答机 (SDST, small deep space transponder) 和行波管放大器 (TWTA, travelling wave tube amplifier)，巡视器上的 X 频段设备包括 SDST 和固态功率放大器 (SSPA, solid-state power amplifier) 作为备份；巡航段和 EDL 段最初阶段使用巡航级上的 X 频段中增益天线 (MGA, medium-gain antenna) 和降落伞低增益天线 (PLGA, parachute low-gain antenna)。MGA 增益较大、波束宽度较窄；PLGA 的波束宽度较大，增益较小。在任意给定时段，选择使用 MGA 和 PLGA 中的一副天线^[12]。

EDL 段开始时，首先弹射出连同 MGA 一起的巡航级，按序选择 PLGA、环形低增益天线 (TLGA) 和下降级低增益天线 (DLGA)，此时仅进行下行通信；在轨道器以倾斜角度运动时，使用 TLGA，以最大限度地保持对地通信链路；背板分离时，降落

伞锥体已脱离，TLGA 也随之舍弃。剩余的动力下降过程利用 DLGA 保持下行链路，当背板分离时 DLGA 开始发送信号^[12]。

漫游器着陆时，绳索被切断，下降级飞离。由于 SDST、TWTA 和 DLGA 均位于下降级上，因此无法有效控制这些设备，同时此刻地面深空测控设备和漫游器之间通信已中断，巡视器的 X 频段测控设备在 EDL 段结束后首次开始运行工作^[12]。

4.2 MER、MSL 对地通信方案

火星探测巡视器任务中有“机遇号”以及“勇气号”，两种火星探测巡视器的通信系统的构成是一致的，其组成主要包括 X 频段和 UHF 频段子系统。其中，X 频段子系统主要用于和深空网之间的通信，而当进入后壳分离阶段之后，UHF 频段子系统主要用于和火星轨道器之间的通信。EDL 全过程中不存在上行链路或者是前向链路。

X 频段子系统主要作为小规模深空应答机核心单元，MER 任务 X 频段通信子系统框图^[14]如图 2 所示。在 1998 年第 1 次搭载 SDST 成功完成深空-1 (Deep Space-1) 的发射，而且在 NASA 无人深空探测任务中 SDST 成为主要的应答机设备。在 EDL 过程中，SDST 选择应用的工作模式为多进制频移键控 (MFSK, multiple frequency shift keying)。在此工作模式下，应答机能够将没有经过调制数据的副载波以及载波发送，而且不同频率副载波的总量以及副载波频率发生改变的速度直接决定了信息的速率。MER 任务中选择使用的副载波信号频率不同，数量为 256 个，在相同的时间点，只把其中的副载波信号进行调制。在超音速进入阶段，每 10 s 就会切换副载波频率。在开启伞后，切换副载波频率就会变为每 20 s 一次，由于频率切换时间变长，使得在信噪比变化较快时能够容易地进行信号检测^[14]。

火星科学实验室 (MSL) 通信系统的构成主要包括两个系统，分别是 X 频段子系统以及 UHF 频段子系统，与 MER、“凤凰号” EDL 过程相同，MSL 在和地面基站之间通信时都是借助于 X 频段子系统完成的，当与火星轨道器之间进行通信时，则是借助于 UHF 频段子系统完成的。“好奇号” X 频段测控通信子系统配置^[12]如图 3 所示。

在进行 EDL 通信时，X 频段子系统在对 MFSK 调制信号进行发送时主要借助降落级上的 SDST 以及输出功率 100 W 的 TWTA 完成，从而完成和地

面站之间的通信，MSL 选择应用的副载波频率不一致，数量为 256 个，切换副载波的时间为 10 s。X 频段子系统前后选择应用的天线包括降落伞低增益、斜装低增益以及降落级低增益天线。其中，前两种天线在设计上都是一致的，而且都是在降落伞舱上进行安装，指示安装的方向存在区别，从而达到 EDL 过程中不同时期天线增益方向图对地面站的覆盖度的要求。脱离降落伞舱后，MSL 能够借助降落级低增益天线完成和地面直接的通信^[14]。

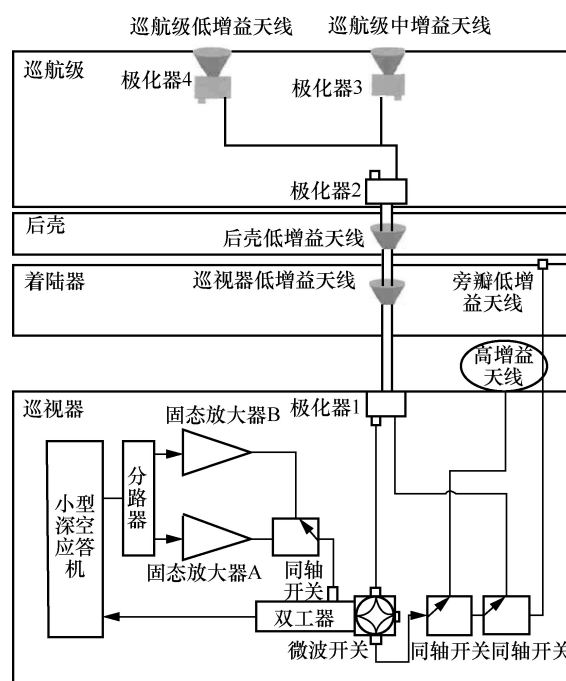


图 2 MER 任务 X 频段通信子系统框图^[14]

“毅力号”从美国佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地的发射台出发，经历长达 7 个多月的旅程，到达火星上的杰泽罗陨石坑 (Jezero Crater, Mars) 着陆，执行美国的第 9 次火星着陆任务^[19]。

这次任务与之前不同，目的是为了精确探索火星生命，NASA 瞄准了火星上的微生物样本，正在进行一次火星生命“地毯式搜索”^[19]。

为了提升载荷能力，美国将火星车越做越大，1976 年到达火星的“海盗 1 号”与“海盗 2 号”的质量仅有 91 kg，2012 年到达火星的“好奇号”大小已经接近一辆 MINI Cooper 的大小，而六轮的 NASA 火星漫游车“毅力号”足足有一辆 SUV 大小^[19]。

NASA 给“毅力号”配备了仪器七件套，除了火星旅行标配相机、雷达、激光等设备，该火星车还携带了先进的钻井系统、一个微型直升机和一个制氧系统，宛如一个“火星工程师”^[19]。

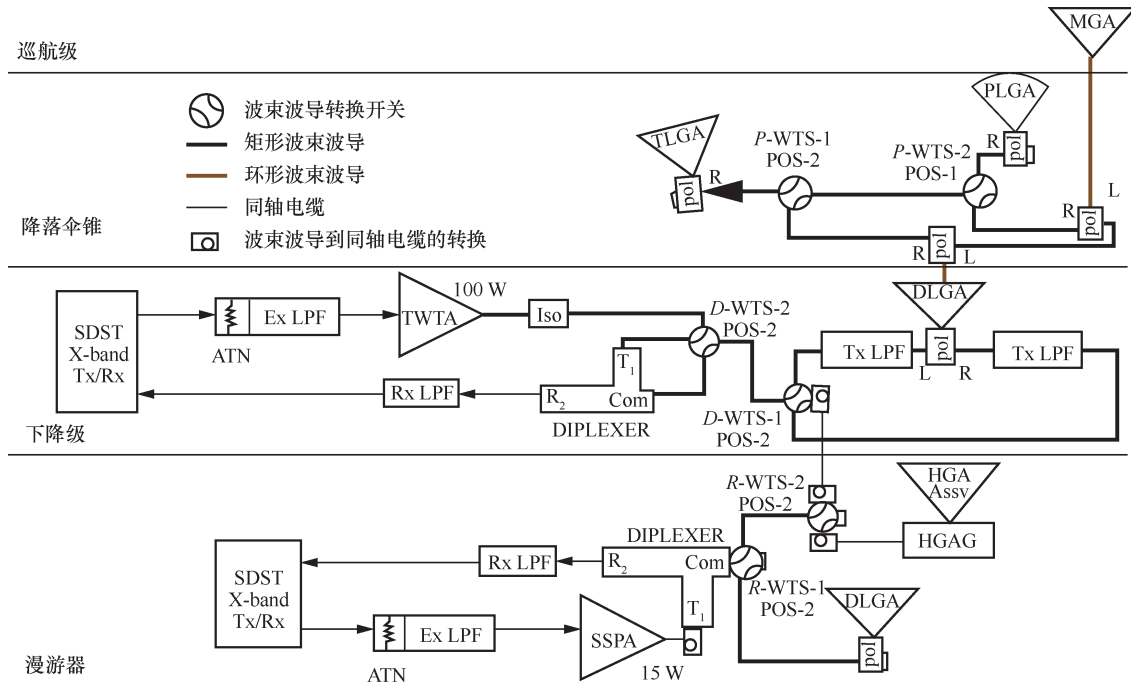


图 3 “好奇号” X 频段测控通信子系统配置^[12]

4.3 NASA 深空测控支持设备

就火星探索而言，NASA 绝对是这个时代的领先者，这不仅是因为 NASA 是全球第一个实现航天器火星软着陆的机构，也是迄今为止，能够同时有两辆火星车在火星表面工作的航天机构。目前，NASA 的“好奇号”和“毅力号”均在火星表面正常工作，其中，和中国“天问一号”同时发射升空的“毅力号”，已经在火星表面度过了将近 2 年时间，向地球传送了大量高清火星表面照片^[20]。

比较而言，我国的“祝融号”自 2021 年 5 月 15 日 7 时 18 分成功登陆火星以来，迄今公开的由“祝融号”拍摄的照片总数屈指可数。当然，能够拍几张照片并不能真正说明什么，但是能够从遥远的火星传回这些数量不少的照片，却的确是一个技术含量满满的工作。“毅力号”之所以能够每天传回数量众多的照片，主要得益于 NASA 功能强大的深空网络（DSN, deep space network）。该网络由 3 个经度相差 120°的深空综合体组成^[21]，分别设置在西班牙马德里、澳大利亚堪培拉、美国加利福尼亚州戈德斯通^[22]，而控制中心位于加利福尼亚州的帕萨迪纳^[23]，这个分部设置使得任何来自宇宙空间的探测器都能够实时获得与地球的通信联系^[20]。

NASA 的深空网络目前支撑着大量的来自全球主要航天机构的深空探测器，这些合作机构包括日本宇宙航空研究开发机构（JAXA, Japan Aerospace

Exploration Agency）、欧洲航天局（ESA, European Space Agency）以及加拿大航天机构等，仍在支持的任务包括功勋卓越的“旅行者一号”和“旅行者二号”航天器、“新视野号”航天器等大家耳熟能详的著名探测任务，如果我们也能够利用该深空网络的话，那么，“祝融号”也能够向我们传送大量的来自火星表面的高清照片^[20]。

NASA 执行“好奇号”测控任务的地面测控设备主要包括其位于戈德斯通、勘培拉和马德里的 70 m 和 34 m 天线组成的深空网。虽然 NASA 的许多深空任务都可以使用多个 34 m 天线组阵提高下行接收能力，但火星距离地面的距离并不算特别遥远，利用现有设备能够满足上下行数据传输需求，因此在任务中没有使用天线组阵技术。NASA 深空网主用设备^[12]如图 4 所示。

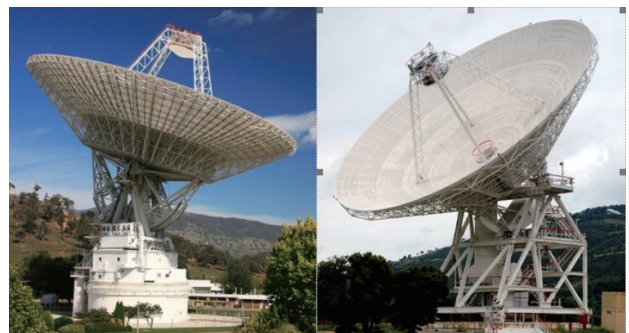


图 4 NASA 深空网主用设备^[12]

5 深空测控网技术分析

2016年6月, NASA在“国际空间站”完成对容迟网络(DTN, delay tolerant network)的测试, 这种网络能够提供转发数据以及数据自动存储的功能, 因此在探索深空以及火星时的通信方面提供了可能, 这也表示NASA在创建稳定性更高的星际互联网方面有了更大的进步, 同时经过扩展之后, DTN计划覆盖范围变为整个太阳系^[24]。

完成一个具备伸缩性能的集成基础设施的建立和保持, 同时能够提供更具经济性、整体性以及量级数据速率的空间通信服务, 满足NASA科学探测任务提出的要求就是空间通信与导航(SCaN, space communication and navigation)网络架构的愿景^[24]。

SCaN具有一套与国际标准过程以及切口相互兼容的体系结构, 而且在运行时属于单一的综合化网络。如果运行域存在区别, 或者其中一部分用户对其中的能力提出特殊要求的情况下, 集成网络将最大程度上应用横向标准达到要求。集成网络管理功能能够成为全部SCaN用户的接口。排除当前已经存在的信息技术、物理技术和通信方式, 在对访问控制进行管理时, 将选择使用全新的标准安全方式, 从而保证整个系统的整体性、机密性以及可使用性^[24]。

SCaN架构的特性包括: 能够覆盖整个太阳系; 以服务作为基础的集成网络和集成架构管理; 任意时间、任意地点, 地球、月球及火星的连通性; 进一步对月球中继能力进行开发, 同时将进一步增强火星中继能力; 能够对当前已经存在的技术落后、设备老化的基础设施进行替换; 作为对射频通信基线的补充, 更加系统性地引入光通信作为高速通信手段^[25]。在完成国际和商业互操作时选择应用标准接口; 向更高频率射频链路迁移; 将新型技术引入SCaN, 包括软件定义无线电(SDR, software defined radio)、阵列等。在将来SCaN架构中存在一个微波链路基线, 能够实现从低数据速率到高数据速率, 同时借助于高数据速率光电路完成补充, 向用户提供直接与地球以及中继资源之间的通信。

全球布局的中国深空测控网包括喀什深空站、佳木斯深空站和阿根廷深空站。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2h, 而阿根廷深空站和佳木斯深空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%, 中国深空测控网 10° 仰角测控覆盖示意^[26]如图5所示, 即便是在 5° 仰角状态, 也会存在一段测控无法覆盖的空档弧段。

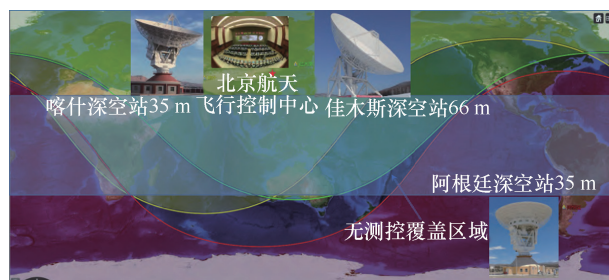


图5 中国深空测控网 10° 仰角测控覆盖示意^[26]

在整体规模方面, 我国深空测控网和ESA的基本相同, 只是对于我国深空测控网而言, 其创建开始相对较晚, 具有更高的起点, 而且从建立深空测控网的初期开始, 我国就将其作为构成国家重大航天工程的至关重要的基础设施, 因此整个建立的过程都以长远发展为着眼点, 以实际为基础, 对于深空测控网整体设计提出了相关要求, 其中包括:

- 1) 我国深空测控网不但要完成探测月球的任务, 同时还需要兼顾将来探测深空的任务;
- 2) 能够同时实现不同类型的功能, 包括数据传输、测控以及长基线干涉测量等, 更大程度上充分发挥其效能;
- 3) 我国深空测控网在技术体制方面和世界范围内主要的深空任务测控能够进行兼容, 如ESA、NASA, 有助于与其他国家相互合作以及任务交互支持等^[26]。

在深空测控通信科学研究方面, 我国已经达到国际先进水平。文献[27]针对未来载人深空测控网络, 提出了一种基于信息中心网络(ICN, information centric networking)的发布-订阅网络架构, 实现了控制平面与数据平面的逻辑解耦, 对路由进行了改进, 以适应深空的长传播时延和频繁的链路中断。文献[28]研究了基于DTN的复杂深空网络的网络评估和协议部署, 并将结果应用于美国国家空间科学中心提出的基于通用星际通信网络的新型复杂深空网络进行仿真和验证。文献[29]提出了一种基于双跳混合射频/自由空间

光(FSO, free space optical)系统的深空通信模式,该系统由地球与地球同步轨道中继卫星之间的射频链路和卫星与深空探测器之间的 FSO 链路组成。文献[30]对火星表面地形进行建模,并将粗糙度参数与雷达后向散射函数结合,给出了考虑整个面面距离变化的回波相位的解析表达式,并对火星着陆点位于乌托邦平原进行了表面杂波仿真,利用 Chirp Scaling 算法生成仿真雷达图。文献[31]基于“天文一号”的高分辨率成像相机(HiRIC)的特点,设计了在轨立体成像策略,研究了 HiRIC 立体图像摄影测量处理的技术解决方案,并制作了“天文一号”着陆区的地形数据集。

6 结束语

伴随着“天问一号”火星探测器的成功发射,中国航天实现从地月系到行星际探测的跨越。当前,国务院新闻办公室发布的《2021 中国的航天》白皮书中指出,未来五年,中国继续实施行星探测工程,发射小行星探测器、完成近地小行星采样和主带彗星探测,完成火星采样返回、木星系探测等关键技术攻关。在此基础上,本文对我国及世界上深空探测关键技术及测控站建设状况进行了分析总结,对于后续深空空间的小行星探测乃至宇宙探测任务应答机研发的关键技术起到了借鉴作用。

参考文献:

- [1] 天问一号任务实现我国航天发展史上 6 个首次[N]. 人民日报, 2021-06-13(1).
The Tianwen 1 mission achieved six firsts in China's space history[N]. People's Daily, 2021-06-13(1).
- [2] 天问一号传回高清火星影像, 全面整理火星探索的问与答[EB]. 2021-03-04.
Tianwen 1 has sent back high-definition images of Mars, a comprehensive collection of questions and answers on Mars exploration[EB]. 2021-03-04.
- [3] 韩来辉, 李新胜. 地基深空网发射机现状及未来发展[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(2): 79-85.
HAN L H, LI X S. Development and status in ground transmitters for deep space networks[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2017, 36(2): 79-85.
- [4] 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[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 99-114.
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT & C system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 99-114.
- [5] 王冬冬, 刘德喜, 王莉莉, 等. 航天器测控频段应用现状与展望[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 45-53.
WANG D D, LIU D X, WANG L L, et al. The Current application status and development of TT & C frequency band for spacecraft[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(6): 45-53.
- [6] 陈腾博, 孙大媛, 李俊珊, 等. 一种 X/Ka 双频共用同轴馈源设计[J]. 航天器工程, 2016, 25(2): 58-63.
CHEN T B, SUN D Y, LI J S, et al. Design of X/ka dual band coaxial feed[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(2): 58-63.
- [7] 王玮, 梁克, 郑伟. 一种载人航天器深空通信系统架构的设想[J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 18-23.
WANG W, LIANG K, ZHENG W. A thought of deep space communication system structure for manned spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(6): 18-23.
- [8] 李长生, 谢静波, 陆凝, 等. 基于 X 频段深空应答机的石英晶体性能需求[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(5): 387-391.
LI C S, XIE J B, LU N, et al. Performance requirements of quartz crystal for X-band deep space transponders[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2014, 33(5): 387-391.
- [9] 周卫来, 朱培芸, 成克伟, 等. X 频段深空探测全向天线设计与实现[EB]. 2019.
ZHOU W L, ZHU P Y, CHENG K W, et al. Design and implementation of X band omnidirectional antenna for deep space exploration [EB]. 2019.
- [10] 刘适, 黄晓峰, 毛志毅, 等. 嫦娥四号着陆器测控通信系统设计与验证[J]. 航天器工程, 2019, 28(4): 85-93.
LIU S, HUANG X F, MAO Z Y, et al. Design and verification of telecommunication system for chang'e-4 lander[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(4): 85-93.
- [11] 航天九院多项科技保驾“天问一号”进入火星轨道[N]. 北京日报. 2021-02-10.
A number of technologies from the ninth Academy of Aerospace Sciences helped Tianwen 1 enter Mars orbit[N]. Beijing Daily. 2021-02-10.
- [12] 知乎网. 你知道地面与火星探测器之间是如何实现通信的吗?[EB]. 2021.
Zhihu.com. Do you know how to communicate between the ground and the Mars rover?[EB]. 2021.
- [13] 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 experiment of X-band TT & C system for the project of CE-2[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2011, 41(10): 1171-1183.
- [14] 刘适, 黄晓峰, 乔旭君. 火星探测进入、下降、着陆过程通信方案[J]. 航天器工程, 2015, 24(4): 94-101.
LIU S, HUANG X F, QIAO X J. Telecommunication system scheme for Mars probe during EDL[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(4): 94-101.
- [15] 薛喜平, 李春来, 孔德庆, 等. 太阳风对火星探测通信信道的影响及抗闪烁策略研究[J]. 天文研究与技术, 2017, 14(1): 110-116.
XUE X P, LI C L, KONG D Q, et al. Analysis of the influence of solar wind and anti solar wind flicker strategy on the transmission channel of Mars probes[J]. Astronomical Research & Technology, 2017, 14(1): 110-116.
- [16] MACKAY D J C, NEAL R M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes[J]. Electronics Letters, 1996, 32(18): 1645.
- [17] 张周不染, 朱煜良, 杨盛庆, 等. 深空星间链路信道建模及硬件模拟器研制[J]. 飞控与探测, 2020, 3(5): 97-104.
ZHANG Z B R, ZHU Y L, YANG S Q, et al. Channel modeling and hardware emulation for deep space inter-satellite links[J]. Flight Control & Detection, 2020, 3(5): 97-104.

- [18] 卢满宏, 周三文, 谌明, 等. 深空测控通信技术专题研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28(S1): 11-16.
LU M H, ZHOU S W, CHEN M, et al. Research on deep space TT & C and communication[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(S1): 11-16.
- [19] 智东西公众号. 毅力号火星车发射! 美国 56 年来首探火星生命, 2020 火星三杰齐了[EB]. 2020.
Zhidx.com. Perseverance rover launches! America's first search for life on Mars in 56 years is set for 2020[EB]. 2020.
- [20] ALENG 自媒体. 毅力号已经传回 88000 张照片, 为何祝融号只传回了不足 10 张? [EB]. 2021.
ALENG Self-Media. Perseverance has sent back 88,000 images. Why did Zhurong send back less than 10?[EB]. 2021.
- [21] 韩来辉. 美国地基深空探测网现状及对我国发展的启示[J]. 现代雷达, 2020, 42(5): 1-8.
HAN L H. Status of ground-based deep space exploration network of USA and its revelation for China[J]. Modern Radar, 2020, 42(5): 1-8.
- [22] 蒋罗婷. 国外小卫星测控通信网发展现状和趋势[J]. 电讯技术, 2017, 57(11): 1341-1348.
JIANG L T. Development and trends of foreign TT & C and communication networks for small satellites[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(11): 1341-1348.
- [23] 吴海涛. 面向深空通信网络的高效文件传输策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WU H T. Research on the efficient file delivery strategies for deep space communications network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [24] 颜洁, 彭玉婷. NASA 空间通信与导航网络现状及未来发展[J]. 国际太空, 2018(7): 25-31.
YAN J, PENG Y T. Current status and future development of NASA space communications and navigation (SCaN) network[J]. Space International, 2018(7): 25-31.
- [25] 白帆, 李炯卉, 徐宝碧, 等. 深空探测光通信技术途经分析与展望[J]. 航天器工程, 2022, 31(2): 139-145.
BAI F, LI J H, XU B B, et al. Technical approach analysis and prospect of optical communication technology for deep space explorations[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(2): 139-145.
- [26] 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状及展望[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.
- [27] GU L T, YU L, LI W F, et al. A publish-subscribe networking architecture for future manned deep space exploration[J]. China Communications, 2020, 17(7): 38-51.
- [28] YU G, DONG Z X, ZHU Y. Network evaluation and protocol deployment for complex deep-space networks based on DTN[J]. China Communications, 2020, 17(9): 237-258.
- [29] XU G J, ZHANG Q Y. Mixed RF/FSO deep space communication system under solar scintillation effect[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(5): 3237-3251.
- [30] HONG T S, SU Y, DAI S, et al. An improved method of surface clutter simulation based on orbiting radar in Tianwen-1 Mars exploration[J]. Radio Science, 2022, 57(9): 1-18.
- [31] YAN W, REN X, LIU J J, et al. Topographic reconstruction of the "Tianwen-1" landing area on the Mars using high resolution imaging camera images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022(60): 1-14.

[作者简介]



马文峰 (1974-), 男, 博士, 陆军工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为深空通信、群体智能通信网络与集群控制、无线自组网网络技术等。



王聪 (1971-), 男, 博士, 陆军工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网通信、无人集群控制、飞行自组网网络技术等。



田辉 (1987-), 男, 博士, 陆军工程大学讲师, 主要研究方向为物联网无线资源优化、智能无人通信网络、飞行自组网网络技术等。



朱熠 (1986-), 男, 博士, 陆军工程大学助理研究员, 主要研究方向为集群通信与控制技术、智能系统等。



于琼 (1991-), 女, 博士, 陆军工程大学讲师, 主要研究方向为信号处理、飞行自组网网络技术等。



史涵意 (1994-), 陆军工程大学讲师, 主要研究方向为无人机总体设计与控制、智能无人自组网网络技术。