# 文章编号: 1672-2892(2011)06-0669-06

# 深空测控通信网技术的发展与展望

饶启龙 1,2

(1.上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240; 2.上海卫星工程研究所,上海 200240)

摘 要:介绍了美国喷气推进实验室(JPT)的概况及其在人类深空探测活动中所处的重要地位, 进而介绍了深空测控通信网的地理分布、组成部分及使用设备,研究了美国深空网在信号覆盖、 遥控能力、遥测能力及轨道测量方面的技术特点,最后对深空测控通信网技术的发展方向进行了 归纳、分析和展望,提出了建立激光统一测控体制的构想。

关键词: 深空; 测控; 通信; 美国深空网

中图分类号: TN927

文献标识码:A

# Development and outlook of deep space TT&C and communication network

# RAO Qi-long<sup>1,2</sup>

(1.School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This article introduces the general conditions about Jet Propulsion Laboratory(JPL), and its important status in deep-space exploration activities. The geographical distribution, components and equipments of American Deep Space Network(DSN) are presented; the technical characteristics in signal coverage, telecommand ability, telemetry ability and track measurement of American Deep Space Network are analyzed. The development trends of deep space networks are summarized and prospected. A vision about constructing laser unified Telemetry, Tracking And Command(TT&C) system is conceived, which would be a feasible development direction.

Key words: deep space; TT&C; communication; Deep Space Network

自 20 世纪 70 年代以来,人类通过发射飞行器对太空进行着孜孜不倦的探索。随着深空探测的逐渐深入,传统的测控手段已无法解决深空测控通信中距离遥远导致的信号损耗大、通信延迟长、连续测轨困难等问题,世界 各国因此大力开展了深空通信测控网的研究与建设。目前世界上只有美国、欧空局和俄罗斯完成了深空网的组网, 论其技术性能和覆盖范围,只有美国深空测控通信网堪称一流。本文对深空网中的佼佼者——美国深空测控通信 网,进行了较全面的技术研究。

#### 1 美国深空网概述

#### 1.1 喷气推进实验室

JPL,即喷气推进实验室,始建于 1936年,NASA 的一个下属机构,负责为美国国家航空航天局开发和管理 无人空间探测任务。JPL 已向太阳系中的每个行星都发射了无人探测器,研究并完成了一系列深空探测计划,如 伽利略木星探测任务和火星漫步任务(包括 1997年的火星探路者任务和 2003年的火星表面探测任务)等<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 DSN 概述

美国深空测控通信网简称深空网,即 DSN。DSN 在 JPL 管理下,执行对月球、行星和行星际探测航天器的 跟踪、导航与通信任务,支持双向通信链路,支持探测器图像和科学数据的接收等。DSN 还支持射电天文学、 雷达天文学及其相关的观测活动;此外,也支持一部分地球轨道的测控任务。

作为世界上最大、最灵敏的科学通信系统,其控制中心就设在 JPL 的总部所在地——美国加州的帕萨迪纳;

其主要组成部分是 3 个深空联合体——美国加州的金石(Goldstone)、西班牙的马德里和澳大利亚的堪培拉,它们 以 120°的经度间隔均匀地布置在地球上,具体如表 1 所示<sup>[2]</sup>。

DSN 战略性的地理布局,赋予了其得天独厚的优势:可以不间断地跟踪、遥测并且控制太阳系任一轨道运行的飞行器。由表 1 也可看出,DSN的每个联合体都至少包含 4 种深空站(Deep Space Station, DSS),并且每个深空站都配有高灵敏度的接收系统,以及高增益、大口径、远程可控的抛物面反射天线:

1) 1 个由 4 个 12 m 天线组成的天线阵;

2) 1个直径为34 m的高效率(High Efficiency, HEF)天线;

3) 1 个直径为 34 m 的波束波导(Beam Wave-Guide, BWG)天线(Goldstone 有 3 个);

4)1个直径为70m的天线。

其中,34 m,70 m 天线用于支持深空任务,小一些的天线则用于地球轨道任务。控制中心远程控制 34 m 和 70 m 天线,产生并发送遥控指令,接收并处理航天器遥测。此外,34 m 天线子网除了跟踪测量探测器,还能用 于甚长基线干涉测量(VLBI 和射电源观测)。

DSN 的 34 m 直径 BWG 天线<sup>[3]</sup>建造于 90 年代中期,采用一系列微波反射面,从反射器表面将能量引导到主 结构下受控的一个焦点上。天线采用新结构和材料使 G/T 值更加优化,但在原理上没有新发展,只是使用成型 的主反射器和副反射器增加了孔径效率。

DSN 的 70 m 子网<sup>[4]</sup>包括 DSS14,DSS43 和 DSS63,均由 64 m 直径天线改造而来,开始工作于 1966 年,最早 是作为火星站用于支持水星 4 号的探测活动。在 1982~1988 年期间将天线的直径扩展为 70 m 后,大大增加了探 测能力,从而可以支持旅行者 2 号与海王星相遇活动中的跟踪与控制任务。

70 m 子网的深空站同时支持 X 波段以及 S 波段作为上行和下行传输的载波。

#### 2 DSN 转发比

在进行双向或三向多普勒频移测量时,航天器转发的下行 信号必须与上行信号相位相干,这就涉及到上下行信号的转发 比问题<sup>[5]</sup>,DSN采用的各频段转发比如表 2 所示。

关于 DSN 转发比有以下几点需要说明:

1) 转发比通常以整数比的形式给出;

2) K 波段(25 500 MHz~27 000 MHz) 未被列入是因为 DSN 暂不支持在此波段的测量;

3) 整数转发比需要通过 JPL 频率主管协调后确定,且必须 通过规定范围的评估。

#### 3 DSN 信号覆盖范围

以 34 m BWG 子网天线为例,图 1 是其接收覆盖情况<sup>[6]</sup>,颜色越深的区域代表航天器轨道越低。由图可知, 对于 500 km 轨道的覆盖非常有限,并没有优势;但当轨道高度达到地球同步轨道(36 000 km 左右)时,DSN 全球 覆盖的效果有较强的体现;当航天器距离达到行星际时,DSN 的覆盖优势将完全体现。此时,通过美国金石、 西班牙马德里和澳大利亚堪培拉 3 个深空联合体的交互配合,可以将无覆盖区域压制到南大西洋等个别区域。由 于太阳系行星的跟踪覆盖区域其实仅在大约南北回归线之间,因此对于太阳系探测来说,DSN 已能达到全覆盖。

#### 4 DSN 遥控

假设一个参考探测器<sup>[7]</sup>,使用残留载波上行,则遥控的最远距离,在较低码速率时取决于载波跟踪性能;在

表 2 DSN 各频段转发比									
	Table2 Spacecraft transponder turnaround ratios								
	uplink	downlink	ratio (downlink/uplink)						
	S	S	240/221						
	S	Х	880/221						
	S	Ka	15.071 - 15.235						
	Х	S	240/749						
	Х	Х	880/749						
	Х	Ka	4.450 6 - 4.492 3						
	Ka	S	0.066 959 - 0.066 282						
	Ka	Х	0.245 61 - 0.243 52						
	v	V	0 0 20 82 0 0 20 84						

Table1 Distribution of DSN stations									
aı	latitude		longitude		altituda/m				
station	aperture	deg	min	deg	min	attitude/iii			
DSS 14	70 m	35	25	243	6	1 001.390			
DSS 15	34 m HEF	35	25	243	6	973.211			
DSS 24	34 m BWG	35	20	243	7	951.499			
DSS 25	34 m BWG	35	20	243	7	959.634			
DSS 26	34 m BWG	35	20	243	7	968.686			
DSS 34	34 m BWG	-35	23	148	58	692.020			
DSS 43	70 m	-35	24	148	58	688.867			
DSS 45	34 m HEF	-35	23	148	58	674.347			
DSS 54	34 m BWG	40	25	355	44	837.051			
DSS 55	34 m BWG	40	25	355	44	819.061			
DSS 63	70 m	40	25	355	45	864.816			
DSS 65	24 m HEE	40	25	255	44	822 820			

表1DSN 测控站地理分布

较高码速率时取决于有效  $E_b/N_0$ 。探测器姿态失稳时遥控捕获需要使用全向天线,并且上行遥控副载波调制度需低至 0.5 rad,以使载波能分配到更多的能量;而正常情况下,探测器使用高增益天线进行遥控通信,上行副载 波调制度将高达 1.2 rad。



Fig.1 Receiving coverage of DSN 34-m BWG antennas, near-earth spacecraft 图 1 DSN 34 m BWG 天线近地接收覆盖范围

假设参考探测器 S 波段和 X 波段高增益天线指向损耗分别为 30 dB 和 39.7 dB, 系统噪声温度 500 K, 载波 环路带宽 100 Hz, 载波余量 12 dB, 最低 *E*<sub>b</sub>/*N*<sub>0</sub> 为 9.6 dB,则可对 DSN34 m 和 70 m 天线的遥控能力进行以下分 析比较。图 2 所示是使用全向天线且调制度为 0.5 rad 时的最大遥控距离,其横坐标是码速率 bit/s,其纵坐标单 位是 AU(天文学上的长度单位,相当于 149 597 871 km,大约是地球-太阳的平均距离)。由图可以看到,在低于 10 bps 的低码速率通信中,使用 34 m 天线时,最远的遥控距离只能到达水星轨道的远地点。而使用 70 m 天线, 发射功率为 20 kW 时,则可达到火星的远地点;当发射功率提高到 400 kW 时,遥控距离可超越土星的远地点。

图 3 所示是使用高增益天线且调制度为 1.2 rad 时的遥控能力范围。由图 3 可以看到,由于采用了高增益的 天线,遥控距离得到了极大提升,通信码速率也提高了 10 倍。在低于 100 bps 的码速率的通信中,即使使用 S 波段 34 m 天线、发射功率为 20 kW 时,遥控距离也已能达到海王星的近地点。若使用 70 m 天线,发射功率提 高到 400 kW 时,遥控距离更是大大超过了冥王星的远地点,直至超越太阳系的边界。

DSN 的日常遥控工作模式是用户驱动模式。DSN 地面站的任务仅仅是将接收到的格式遥控数据调制到射频 并通过天线发射出去。DSN 仅对收到的遥控信息进行格式适应性检查,但不会对遥控信息的内容进行译码等任 何改变,并且也不保证上行遥控的正确性;航天器的项目方需要自己对其提供的遥控信息进行检错和纠错。



另外, DSN 还会为每个航天项目储存少量应急遥控信息,一旦出现与航天器失去联系等危急情况,可以迅速使其恢复到安全的状态。但这是属于常规遥控操作之外的情况。

#### 5 DSN 遥测

典型的 DSN 地面遥测接收系统模块<sup>[8]</sup>主要包括射频接收、符号同步、帧同步、解扰、信道解码以及 CRC 校验等。DSN 遥测系统的载波调制通常有残留载波和抑制载波 2 种,二者的性能差别主要取决于码速率<sup>[9]</sup>,如图 4 所示,此时假设是采用(1 784,1/3)的 Turbo 编码,误帧率 FER 为 0.000 1。

图 4 纵坐标表示地面解调时所需的最低功率噪声比 P<sub>1</sub>/N<sub>0</sub>,横坐标为比特速率。

由图可以看出低码率或超低码率时,残留载波有较大优势——其需要的解调门限明显比抑制载波时低得多, 尤其在载波环路带宽较大时。而在中、高码率时,抑制载波具有优势,但随着码速率的进一步提高,相应解调门 限进一步放宽,则其优势将仅为 0.1 dB。

为讨论 DSN 遥测的能力范围,同样先假设一个参考的探测器<sup>[10]</sup>,其主要性能指标为:发射功率 35 W,X 波 段天线增益为 39 dB,编码方式为(1 784,1/3)Turbo 码,DSN 天线增益 63 dB(70 m),余量 3 dB。

图 5 反映了 X 波段的遥测能力。由图可知,遥测最远距离与传输码速率呈线性关系,码速率越高,最远距 离越短。当码速率低至 10 bps 时,若航天器载遥测天线为全向天线,则即使地面使用 70 m 天线,也仅能到达木 星平均轨道;若航天器载遥测天线等效辐射 EIRP 高达 82.4 dBm 时,遥测距离则能远远超出冥王星的范围,直 至超出太阳系范围。



## 6 DSN 轨道测量

## 6.1 VLBI 测量

轨道测量是个复杂的过程,尤其在 SEP(Sun-Earth-Probe)角<sup>[11]</sup>过小,即当飞行器飞到太阳背面时,要想得到 精确的测量值,除了要调整测量信号频率外,还必须借助甚长基线干涉测量法(Very-Long Baseline Interferometry, VLBI)技术。20世纪 70年代初,美国 NASA 首先将 VLBI 技术应用于航天器的精密定位和测轨,用 VLBI 技术 测量 Apollo 登月月球车的运动路线就是一个著名实例<sup>[12]</sup>。

2001年,使用 VLBI 技术参与美国的奥德赛(Odyssey)火星探测器的测轨,入轨的高度误差小于 1 km。它避免了进入环火星轨道时,由于火星与地球的几何关系,单用测速测距方法,难以保证探测器入轨精度的问题。此外,VLBI 测轨还大大提高了美国火星车进入火星大气层的入射角的精度,从而缩小了着陆区的误差椭圆。

DSN 在 VLBI 的应用中,主要采用多频点基于宽带的差分干涉单向距离测量(Delta Differential One-way Ranging, ΔDOR)技术和单一频点基于窄带的 ΔDOR 技术<sup>[13]</sup>。ΔDOR 技术通常在转移轨道阶段、行星探测器入轨 阶段和特殊观测任务中使用。目前只有 DSN 真正实现了基于多频点的宽带 ΔDOR 技术,并成功地用于诸多的探测任务之中。

#### 6.2 SBI 测量

同波束干涉技术(Same Beam Interferometry, SBI)主要用于对双探测器或多探测器的同步相对精密测轨。例 如早期 NASA 在对阿波罗月球车相对着陆器的精确月面轨迹测量时就用到了 SBI。

其测量原理主要是使用 2 个深空天线对 2 个角度意义上非常接近的探测器同时观测, 2 个探测器的载波相位 可被同时跟踪,进而可以进行差分干涉测量。这种方法使用了载波相位而不是群时延,相比 ΔDOR 可以进一步 提高测量精度。近年 NASA 使用 SBI 技术确定火星着陆舱和漫游器间的相对位置精度已达到几米的量级。

#### 7 深空网技术的展望

作为当今世界深空探测领域最杰出的代表, NASA 在深空测控通信技术的最新研究规划无疑在很大程度上预示着深空测控通信领域未来的发展方向。为满足这些新的探测需求, 作为最重要的技术支撑——深空测控通信网的技术发展势必要与时俱进, 以下从不同的方面对其进行一些展望。

#### 7.1 改造现有地面测控网

首先,在世界经济不景气的大背景下,目前各国都难以再做出类似当年美国阿波罗计划时那样规模巨大的地面测控网建造,为满足距离越来越遥远的行星际探测的要求,只能立足于改造现有地面测控网,特别是在原有天线的基础上通过结构优化进一步增大天线口径,延长其使用寿命,以满足近期对大口径地面站的需求。

然而,虽然进一步增大天线口径可以在一定程度上缓解行星际测控通信的需要,但也给超大口径天线本身的 建造和使用带来了巨大的挑战。大规模或甚大规模天线阵技术在这方面突破了超大口径天线的限制。利用小口径 天线的阵列组合,可以等效地得到超大或是甚大口径的天线面积,除了可以进一步提高地面天线增益外,还更有 助于实现 VLBI等长基线测量。NASA 在这方面规划就是在南半球和北半球 2 到 3 个不同经度的位置上布置甚大 规模天线阵,每个天线阵由数千个小口径天线组成,便于提供很长的、相互垂直的基线以产生差分单向距离(ΔDOR) 数据。该甚大规模天线阵计划的一个具体目标是 2020 年,在有限的投入下,将 DSN 的信号接收能力提高 100~500 倍<sup>[14]</sup>。

此外,在多目标跟踪方面,目前普遍的做法还是单个天线同一时间只跟踪1到2个目标,这不利于未来深空 探测器星座化或多星同时探测的实现,未来的趋势必然是要求充分发挥现有地面站的能力,改造地面接收系统以 支持同时出现在其波束范围内的至少4个目标。

#### 7.2 实践深空测控通信网

天基测控网相比于地基测控网有着如拥有超高覆盖能力、不受地球大气和地球自转等因素影响等与生俱来的 优势,各国均已在该领域进行了中继卫星等方面的实践。下一步的实践方向应该是在中继卫星的技术基础上,开 展深空测控通信网的研究与实践活动。

基于天体力学关于太阳系拉格朗日平衡点方面的研究成果,如果在地月系统和地球太阳系统中的拉格朗日平 衡点附近的弱稳定区走廊放置中继测控通信卫星,则非常有利于卫星的长期稳定运行,对组成深空测控通信网或 中继网有非常大的好处。一旦其成功实践,深空探测器的测控通信将不再依赖于日渐达到极限的地基地面站,对 于未来的行星际高精度测轨、实时测控通信,探测器的交汇、对接,乃至太空基地的建立和人类的深空旅行都具 有深远意义。

#### 7.3 开展深空激光统一测控技术研究

从美国阿波罗计划开始的统一载波测控体制已伴随我们走过了 40 多个春秋,到现在依然是当今航天测控中

普遍应用的测控体制;在其基础上发展出了扩频统一测控体制,解决了前者难以多目标、多站同时测控以及抗干扰能力差等方面的问题<sup>[15]</sup>。但随着航天器探测能力的不断提升,客观上给目前非常有限的深空通信带宽及速率带来了极大的挑战,现有的测控体制在此方面已很难有大幅度的改善。

激光通信技术近年来的商用化发展突飞猛进,很容易地联想到将其应用于空间通信中。利用激光通信指向性 极强、传输带宽极宽的优点,一方面可以很方便地突破现有传输瓶颈,实现高速率、大容量的空间科学探测数据 传输;另一方面可以结合前述深空测控通信网的空间网络节点相对稳定不变的特点,将其应用于组网连接中,能 大大提高空间网的传输能力。

进一步地,当激光通信在空间得到成熟应用后,将上行遥控、下行遥测、跟踪测轨及空间科学数据传输等所 有测控通信链路整合到统一的激光通信信道上,形成激光统一测控通信体制将是可以预见的事实。

#### 参考文献:

- [1] NASA. JPL Fact Sheet[EB/OL]. [2011-01-26]. http://www.jpl.nasa.gov/about/index.cfm.
- [2] 于志坚. 深空测控通信系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2009. (YU Zhijian. Deep Space TT&C System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [3] Slobin S D. 104, Rev.F, 34-m BWG Antennas Telecommunications Interfaces [R/OL]// DSN Telecommunications Link Design Handbook. California: CIT, 2010. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [4] Slobin S D. 101.Rev.C,70-m Subnet Telecommunications Interfaces[R/OL]// DSN Telecommunications Link Design Handbook. California:CIT, 2009. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [5] Kwok A. 201, Rev.B, Frequency and Channel Assignments [R/OL]// DSN Telecommunications Link Design Handbook. California: CIT, 2009. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [6] Kwok A. 301, Rev. F, Coverage and Geometry [R/OL]// DSN Telecommunications Link Design Handbook. California:CIT, 2010. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [7] Kwok A. 205, Rev.C, 34-m and 70-m Command [R/OL]// DSN Telecommunications Link Design Handbook. California: CIT, 2010. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [8] Robert W Sniffin. 208, Rev. A, Telemetry Data Decoding [R/OL]// DSN Telecommunications Link Design Handbook. California: CIT, 2009. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [9] Kinman P W. 207, Rev. A, 34-m and 70-m Telemetry Reception [R/OL]// DSMS Telecommunications Link Design Handbook, 2003. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [10] Kwok A. 206, Rev. B, Telemetry General Information [R/OL]// DSN Telecommunications Link Design Handbook, California: CIT, 2009. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [11] Ho C,Morabito D.106,Rev.A,Solar Corona and Solar Wind Effects[R/OL]// DSMS Telecommunications Link Design Handbook,2005. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [12] Kinman P W. 211, Wideband Very Long Baseline Interferometry [R/OL]// DSMS Telecommunications Link Design Handbook, 2006. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [13] Kinman P W. 210, Delta Differential One-way Ranging[R/OL]// DSMS Telecommunications Link Design Handbook, 2004. [2011-01-26]. http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/.
- [14] 李平,张纪生. NASA 深空网(DSN)的现状及发展趋势[J]. 飞行器测控学报, 2003,22(12):10-17. (LI Ping,ZHANG Jisheng. The Current Status and the Future of NASA Deep Space Network[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2003,22(12):10-17.)
- [15] 张健. 电子对抗环境下飞行器测控通信技术的发展[J]. 信息与电子工程, 2006,4(2):81-88. (ZHANG Jian. Developments of Vehicle Tracking Telemetry Command and Communication Techniques Under Environments of Electronic Countermeasure[J]. Information and Electronic Engineering, 2006,4(2):81-88.)

#### 作者简介:



**饶启龙**(1986-),男,福建省明溪县人,硕士,工程师,主要从事卫星测控分系统设计及研究工作.email:mrrao2561@126.com.