

# 美俄载人航天测控系统发展综述

## 一、美国载人航天测控系统

### (一)概述

美国航天测控资源分属不同部门管理。美国国家航空航天局(NASA)负责民用航天计划,其中哥达德航天飞行中心(GSFC)管理 NASA 天基网(包括空间部分和地面部分)和地基网,喷气推进实验室(JPL)管理 NASA 深空网。国防部的军方航天测控资源主要为美国空军司令部负责管理的空军卫星控制网(AFSCN),以及全球定位卫星系统(GPS)及其运行控制中心。美国国家海洋和大气局(NOAA)管理所属卫星的测控中心和两个测控站,负责卫星的数据接收和指令控制。此外有一些商业机构在很小的市场范围内提供航天测控服务,更多的商业测控行为则依赖于与 NASA 之间的商业合同,包括一些大学。此外美国也与国外航天组织开展合作。



图 1 美国主要航天测控资源(不含深空网)

### (二) NASA 航天测控网

NASA 的天基网和地基网组成了 NASA 航天跟踪和数据网

(STDN)。地基网与天基网的任务分工见表 1。深空网则主要负责深空探测任务的测控,在地球轨道卫星的测控上与地基网有部分功能重叠。

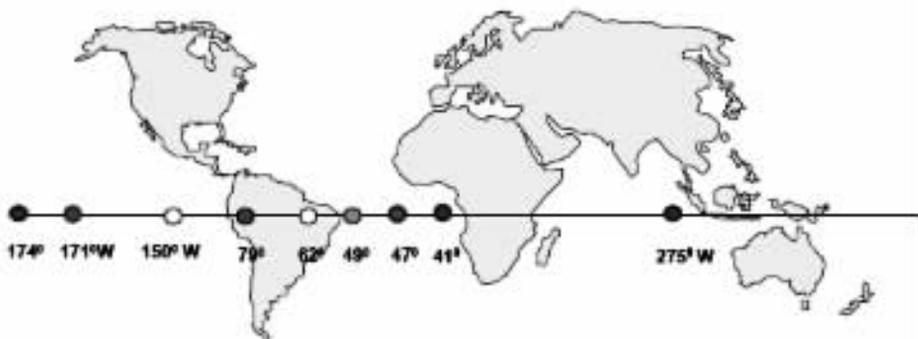
表 1 NASA 天基网与地基网的分工

	天基网	地基网
用户类型	近地轨道轨道器、亚轨道器、发射、航天飞机、国际空间站 陆基和海基任务	近地轨道 地球同步轨道 轨道器、亚轨道器、航天飞机
服务特征	提供低用户连续轨道覆盖 S 波段、Ku 波段和 Ka 波段通信服务	布站主要考虑为极轨支持和发射支持 X 波段高速数传服务 X、S、L 波段和 VHF 通信服务
系统特征	地球同步轨道中继卫星 9 颗在轨卫星 5 颗工作卫星 新墨西哥和关岛的地面站	NASA 的全球网和合同地面站 需要在适当位置附加的合同商业站

## 1. NASA 天基网

### (1) 天基网现状

美国 NASA 天基网建于 20 世纪 80 年代早期,由同步卫星星座和相应地面系统组成,在用户航天器平台和地面设备之间提供一个弯管的中继系统,以替代 NASA 全球分布的地基测控站。天基网由哥达德航天飞行中心的任务服务计划部(MSP)管理,包括空间部分和地面部分。空间部分即跟踪与数据中继卫星(TDRS)星座,分成最初的基本 TDRS 计划(TDRS F1 至 F6)、TDRS 替换计划(TDRS F7)和后续计划(TDRS H,I,J,即 TDRS F8-F10)。地面部分包括白沙综合站(WSC),双边测距转发系统(BRTS)、梅里特岛发射区(MILA)的 TDRSS 中继站和数据服务管理中心(DSMC)。其中白沙综合站、双边测距转发系统和梅里特岛发射区中继站均为天基网专用,但数据服务管理中心与 NASA 地基网共享。白沙综合站和 TDRS 星座组成数据中继卫星系统(TDRSS)。



时间段	TDRS星座可选方案配置				
	41	47	171	174	275
2002-2005	F4	F6	F8	F7	F5
2006-2010	F8	F9	F8	F7	F5

图 2 2002~2010 年 TDRS 星座的可选方案配置

天基网的地面部分包括：

**白沙站：**提供每颗 TDRS 中继的发射、接收数据和跟踪信息的通信设施。白沙综合站包括 3 个地面终端，白沙站地面终端(WSGT)，第 2 套 TDRSS 地面终端(SGLT)和关岛远端地面终端(GRGT)。前两个终端各自独立运行，白沙站地面终端有 2 个自动的天地链路终端(SGLT)。关岛远端地面终端有 1 个天地链路终端，由白沙站地面终端远程操作。每个天地链路终端包括提供对指定 TDRS 提供用户通信、跟踪和测控(TTC)功能服务的软硬件设备。天地链路终端的运行由 TDRSS 的运行控制中心(TOCC)负责控制和监视。白沙综合站的其他功能还包括数据处理和对航天飞机的支持。除了作为 TDRS 控制中心外，这 3 套地面终端设备保证天基网能够为用户提供完整的全球覆盖。这些设施一周 7 天，每天 24 小时有人值守，为天基网用户提供服务。

**梅里特岛发射区 TDRSS 中继站：**梅里特岛发射区的中继站提供发射前 TDRS 和用户有效载荷或平台之间的射频信号路由，需要时还提供待发有效载荷和 NASA 集成服务网络之间的中继。

**双边测距转发系统：**由无人和全自动的转发站组成，与 TDRSS

和飞行动力学部一起提供每颗在轨 TDRS 星历的精密轨道确定所需的测轨数据。目前双边测距转发系统位于白沙综合站、澳大利亚、阿森松岛和美属萨摩亚群岛。

**数据服务管理中心:**是天基网的运行控制设施,制定天基网所有设备的时间表,提供天基网的计划、捕获、控制和状态接口。用户通过它获得天基网的支持,它将用户需求转换成特定事件。

其他不属于天基网但是支持天基网运行的一些 NASA 机构还包括:

——集成服务网络(NISN):组成 NASA 全球通信网。

——哥达德航天飞行中心的飞行动力学部(FDF):提供轨道确定、生成捕获数据、姿态确定、轨道机动和姿态机动,还控制管理和监视双边测距转发系统。

——射频模拟运行中心(RF SOC)和模拟运行中心(SOC):提供用户飞行项目模拟的设备。

——兼容性测试车(CTV)和兼容性测试实验室(CTL):测试远端的用户平台与天基网的射频兼容性。

——地基网:与天基网共同组成航天跟踪与数据网。

——深空网:支持标准任务,提供应急测控或降级的航天跟踪与数据网支持,还提供 TDRS 发射和后续转移段的通信和跟踪支持。

——麦克默多的 TDRSS 中继系统:包括两个 TDRS 中继地面系统,可用于 TDRS 和白沙综合站之间 300Mbps 的中继。目前用于特殊目的下的数据中继。

——南极 TDRSS 中继站(SPTR)和白沙综合站另一套资源终端(WART):南极 TDRSS 中继站位于南极阿蒙森海-斯科特考察站,专用于南极科学实验提供交互式、通过 TDRSS 中继的高速数据通信链路。

表 2 NASA 天基网测控能力

服务			TDRS 1-7	TDRS 8-10	注释
单 址	S 频段	前向	1~300kbps	1~300kbps	无变化
		反向	1kbps~6 Mbps	1kbps~6Mbps	
	Ku 频段	前向	1kbps~25Mbps	1kbps~25Mbps**	
		反向	1kbps~300Mbps	1kbps~300Mbps	
	Ka 频段	前向	无	1kbps~25Mbps**	23/25~27GHz 频段
		反向	无	1kbps~超 1.2Gbps*	
每个航天器的 链路数			2SSA2 KuSA	2SSA 2KuSA 2KaSA	TDRS 8-10 同时 使用 S 和 Ku, 或 S 和 Ka 服务操作时, 需要单一 SA 天线
多 址	每个航 天器的 链路数	前向	1 个, 每个 100bps-10kbps	每个 100bps-10kbps (超过 TDRSS 8dB)	
		反向	5 个, 每个 150kbps (仅受地面设备限制)	6 个, 每个 3Mbps(星 载波束组成)	
查询地址系统			6 个, 可扩展至 50 个 TDRS 反向服务, 每 个通道 150kbps	不可用	基本操作能力
随机地址系统			除系统为用户自有和操作外, 与查询地址系统能力相同		
用户星跟踪测轨			150 米(3 $\sigma$ )	150 米(3 $\sigma$ )	无变化

注:\* 超过 300Mbps 需改造地面站;\*\* 受到白沙站 DIS 限制在前向服务上有一个 7MB 的限制。

## (2) 天基网 2010~2030 年发展规划

到 2010 年, 由于设备老化, 仍在继续服役的星座会存在潜在的故障(图 3)。到 2015 年, 为星座补充两颗新的 TDRS 卫星, F-K 和 F-L, 以维持同样的系统容量并保持用户满意业务水平为 99%。

天基网提供的业务包括通信、跟踪与时钟校准、测试和分析。预计 2015 年的任务需求是用 7 到 9 个 SA 覆盖最高负载, 用 6 个 SA 确保“稳态”需求。在交会操作和“一致”支持的每个节点处至少需要两个 SA。发射、LEOP 支持和交会操作(包括 CEV)都会出现最高负载。

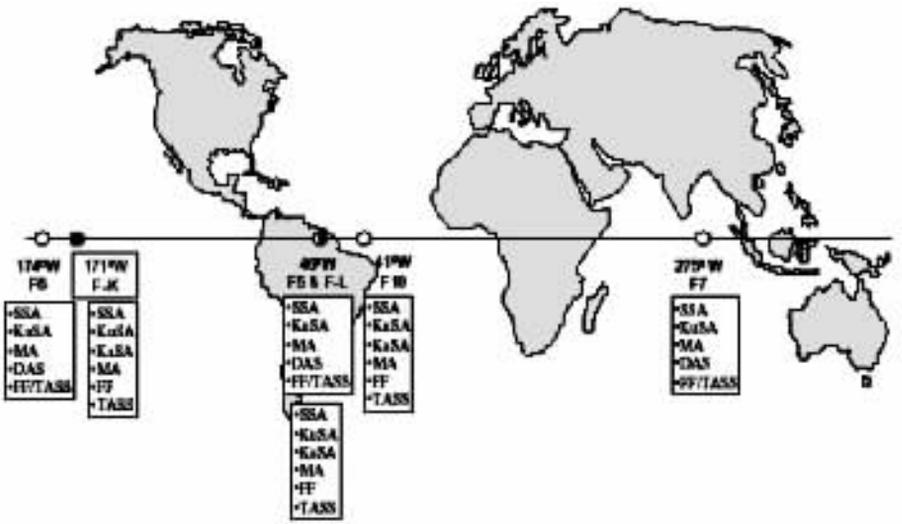


图 3 2010 年(空心节点)和 2015 年(实心的补充 TDRS)的天基网结构

表 3 2010 年天基网的能力

业务			TDRS 1-7	TDRS 8-10	备注
单通道	S 频段	前向	7Mbps	7Mbps	无变化
		后向	6Mbps	6Mbps	
	Ku 频段	前向	25Mbps	25Mbps	
		后向	300Mbps	300Mbps	
	Ka 频段	前向	N/A	25Mbps	>300Mbps-通过中频服务获取了
		后向	N/A	300Mbps~1.2Gbps	
	每个航天器的链路个数	SSA:2/TDRS;10WSC; 2/GRGT KuSA: 2/TDRS; 10KuSA/WSC; 2/GRGT	SSA:2/TDRS; 10WSC; 2/GRGT KuSA: 2/TDRS;10KuS A/WSC; 2/GRGT KaSA: 2/TDRS; 8/WSC	TDRS H,I,J 需要通过单个 SA 天线对 S&Ku 和 S&Ka 业务同时操作	
多通道	每个航天器的链路个数	前向	1/TDRS @ up to 300kbps; 4/WSC;1/GRGT	1/TDRS@ up to 300kbps;4/WSC (8Db over TDRSS)	参与 SSA 用户< 3Mbps 卸载到 TDRS H,I,J MA
		后向	5/TDRS @ up to 300kbps; 20/WSC;2/GRGT	5/TDRS @ up to 300kbps; 20/WSC	
	用户跟踪		150 米/3 $\sigma$	150 米/3 $\sigma$	无变化

到 2010 年可以完成的其他业务有：

·天基网扩展(SNE)使用 TDRS H, I, J 可以提供专用容量来迅速满足特殊用户的需求。关岛的地面终端(SNE-West)只能从白沙综合站进行远程操作。天基网扩展可以通过 TDRS SA 天线提供“地基网模式业务”(USB)。天基网扩展还可以为 Ku 和 S 频段提供非一致调制和数据率,提供前向多普勒补偿以及仅容一台用户设备的基带和中频(IF)界面。

·天基网通信系统(SNAS)是用户与天基网间的主要接口。天基网通信系统为天基网进程安排和实时控制与监视提供一个基于网络(服务器-客户关系)的用户界面。通过“网络控制中心数据系统”(NCCDS)和 DAS 来支持当前正在使用天基网业务的用户。天基网通信系统可以从互联网和集成服务网络开关输入输出网接入,提供与天基网用户无关的简单系统组装和 workstation 作为天基网通信系统用户软件并能在任何类型的个人电脑和 workstation 上运行。

## 2. NASA 地基网

### (1) 地基网现状

随着美国天基测控系统的建立,NASA 全球分布、规模庞大的地基测控网规模减小,很多测控站陆续关闭,但目前该网仍保留 50 个地面天线,30 个天线系统,并将长期维持下去。图 5 所示为 NASA 地基航天测控网,在地理上共有 7 个分布区域。这些测站一些由 NASA 所有,并负责维持,另外一些则为通过签订合同支持 NASA 任务的商业地面站。目前 NASA 所属测站可以每天跟踪 275 圈次以上,商业合同站可以提供每天 40 圈次的跟踪。NASA 将继续依赖地面网,而商业服务是双刃剑,一方面降低了成本,另一方面增加了测控风险。

NASA 所属和负责维持的测控站包括：挪威的斯瓦尔巴站(SGS)、美国弗吉尼亚州的沃洛普斯岛站(WGS)、南极洲的麦克默多站(MGS)、美国阿拉斯加州站、美国佛罗里达州站和美国新墨西

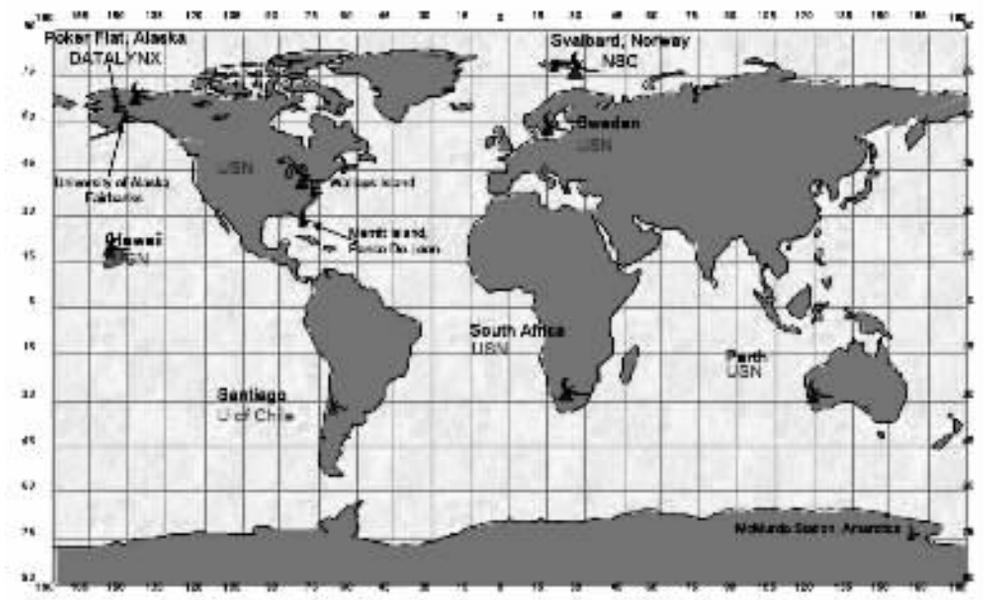


图 5 美国 NASA 地基航天测控网

哥州白沙站。此外,NASA 地基测控网还包括位于哥达德飞行中心的网络集成中心 (NIC) 和位于新墨西哥州白沙的地基网计划与 VHF 系统。

NASA 地基网是由用户需求驱动的, 提供轨道器和亚轨道器任务的遥测、遥控和跟踪服务。地基网可以提供各种轨道任务中所有阶段的多个不同频段的测控: 部分测控站位于高轨地区, 以提供极轨卫星的测控, 例如挪威、阿拉斯加和南极洲几乎可以每圈都提供极轨航天器的测控; 非极轨的测控站主要支持小倾角轨道任务和同步卫星的应急测控; 位于发射首区的测控站则主要提供高效的上升段航区跟踪, 如梅里特岛站提供从肯尼迪中心发射的航天飞机发射段测控支持, 而位于弗吉尼亚的沃洛普斯岛站主要提供小倾角用户的轨道支持, 在沃洛普斯上升段的测控跟踪和从肯尼迪航天中心发射的一些测控覆盖。这些非高轨测控站全球分布以提供非极轨任务的覆盖。

NASA 还通过签订合同的商业地面站支持 NASA 任务。这些测站包括阿拉斯加的阿拉斯加卫星设备 (ASF)、阿拉斯加的尼维尔公

司的 DataLynx™ 站、挪威斯瓦尔巴的 Kongsberg 卫星服务(KSAT)、阿拉斯加、夏威夷和澳大利亚的全球航天测控网(USN)和智利圣地亚哥的智利大学(UdC)。

地基网支持广泛的航天器任务，网络使用计划尽可能满足用户需求，并考虑航天器应急测控和天线维护需要，考虑用户优先级，然后建立天线跟踪圈次的时间表。负责制定跟踪计划的系统称为沃洛普斯轨道跟踪信息系统(WOTIS)，位于新墨西哥的白沙，由一个界面处理系统、核心计划系统和数据库系统组成。航天任务可以申请一般测控需求和特殊需求。一般需求包括：

- 每天最少的支持圈次；
- 每圈最少的支持时间(遥测和遥控独立指定)；
- 支持圈次之间的最大或最小时间；
- 支持的测控站；
- 指定时间段内支持站的最少数目；
- 最低地面站跟踪仰角。

任务控制中心每周提交一般测控申请，包括跟踪测站和每圈跟踪的起止时间。如果申请特殊需求，则需提前 3 周，每周提交申请时间表。沃洛普斯轨道跟踪信息系统生成 3 种时间计划，提前 3 周的计划称为“稻草人计划”，主要完成测控需求的收集；提前两周的计划称为“预报计划”，主要考虑航天任务的优先级；一周的计划称为“实施计划”，仅在预报计划基础上修改绝对优先级(如应急测控，发射支持等)。

## (2) NASA 地基测控网 2010 年规划

经过几十年的建设演化，NASA 地基测控网主要面临四大挑战。首先为性能挑战，表现在测控设备老龄化带来服务性能的风险，任务需求驱动导致接口和硬件的非标准化限制了网络之间的互操作，有限的经费投入，使得升级或建设新系统受到限制；其次为成本挑战，突出体现在老龄化系统、非单一系统、手动扩展的系统，针对任

务建设的专用设备和那些相对使用率低的系统；第三为未来用户需求的矛盾，包括短期内少数用户会使得 S 频段任务大量增加，对地观测任务的 X 频段需求，其他中期高速数据任务计划使用其他网和未来空间操作发展趋势对地面网的影响；第四为高覆盖的急剧增加，主要为希望尽快实现空间资源与用户的端到端通信（共同的接口），编队飞行的多目标同时测控，航天任务的高度自主和更多的组织和用户参加到航天领域中，很多用户建设自己的测控站大量时间处于空闲状态，等等。

未来 NASA 地基测控网的口号是“更灵活，更可靠，更完整”。NASA 的地面网将提供多任务共享能力，集中在满足任务需求上，商业合同站则提供单一任务的补充。NASA 地基测控网将实现与美国其他地面网互操作，包括与诺阿、国防部的航天测控资源和其他一些商业资源的合作。同时提供应急测控、发射测控和早期轨道段测控及其备份是地基测控网的长期测控任务。

### 3. NASA 深空网

目前，深空网(DSN)由位于美国加州戈尔德斯顿、澳大利亚堪培拉、西班牙马德里的 3 个深空通信设施(DSCC)，位于加利福尼亚州帕萨迪那的控制中心，以及位于加州帕萨迪那附近和佛罗里达肯尼迪角的测试设施组成。深空通信设施与帕萨迪那控制中心每周 7 天、每天 24 小时连续工作。可对深空航天器提供近连续的覆盖。3 处设施中的每一处都有 1 个 70 米天线、数个 34 米天线、1 个 26 米天线、1 个 11 米天线。34 米、70 米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 米和 70 米天线，产生并发送航天器指令，接收并处理航天器遥测数据。

与其他地基网相比，深空网有如下主要特点：

——分布式运行控制，例如航天器运行控制，科学运行控制，数据获取等等；

——每一个任务都是特殊的，需要特殊适应；

- 国际任务和跟踪资源之间的互操作；
- 信噪比约束下的测控,很长的双向光行时；
- 特殊的跟踪和导航技术,不能应用 GPS；
- 多任务工具和服务的集成。

面临未来深空任务的挑战,下一代深空网建设将分成两大部分:一是建设深空主干网,包括现有深空网全面升级至 Ka 频段,布设数百个天线组阵的天线阵,开展光通信技术研究,开发高效率深空通信设备和建设月球、火星卫星通信网络等;二是建设与这个主干网相配套的工具和技术,包括提供多任务运行控制的操作系统、软件和标准,创新的任务操作概念和更高级的深空任务设计、导航技术和用户工具等。通过二者的结合,最终建设一个行星际的测控网络。具体的时间表是,第一步在 2010 年实现大于 40Mbps 的高速数据传输,开展光通信演示验证;第二步是通过天线阵,支持美国重返月球计划;更长远的规划是应用光通信技术,实现 2020 年行星自动探测器 1000Mbps 的高速数据传输,并在增强光通信性能后支持 2030 年载人火星探测计划。

### (1) 深空网现状

深空网由位于美国加州戈尔德斯敦、澳大利亚堪培拉、西班牙马德里的 3 个地面终端设施组成,相互之间经度相隔约  $120^{\circ}$ ,这样可以为深空探测器跟踪测量提供连续观测和适当的重叠弧段。每个地面终端设施最少包含 4 个深空站,每个深空站都配有高灵敏度的接收系统和大口径的抛物面天线,具体包括:

- 1 个直径为 34 米的高效率天线
- 1 个直径为 34 米的波束波导天线(戈尔德斯敦有 3 个)
- 1 个由 4 个 12 米天线组成的天线阵
- 1 个直径为 70 米的天线

从 2005 年以来,深空网最主要的变化在于 26 米天线子网的退役和每个深空站 12 米天线阵安装的开始。从 2005 年到 2030 年,根

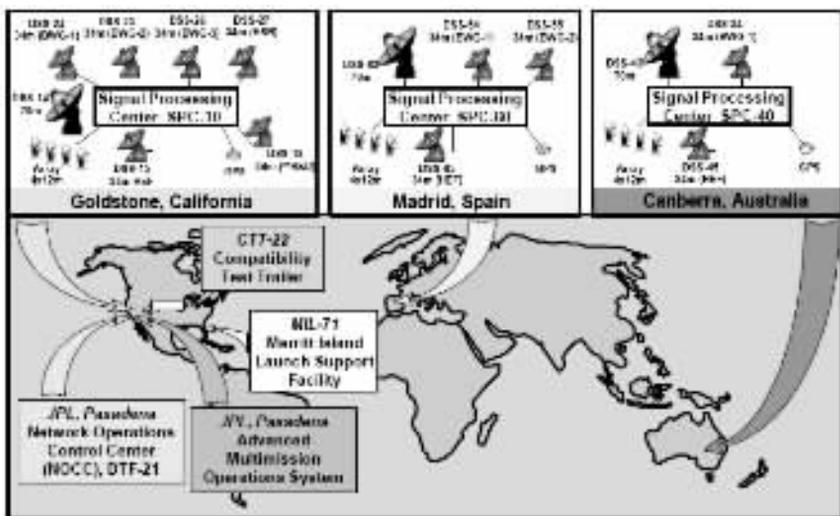


图 6 2010 年深空网体系结构

据深空任务中下行数据传输要求，传输速率和链路预计增长  $10^6$  量级(图 7)。为了满足这种快速增长的需求，必须采用一系列新的技术手段(图 8)。

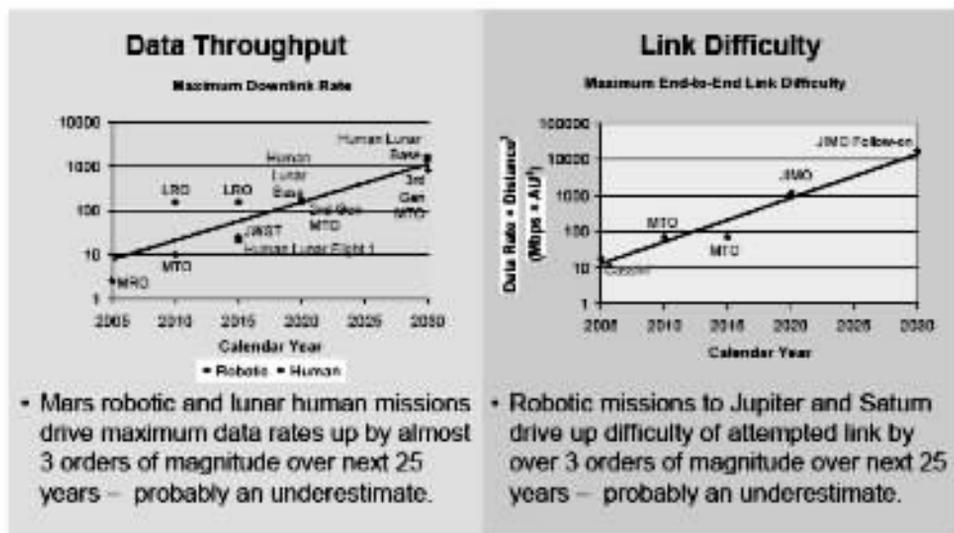


图 7 深空网下行数据要求预计增长

深空网现在的体系结构，使用大口径天线已不能有效满足 NASA 未来任务设置（灵敏度和导航），而且维护和运行费用过于昂

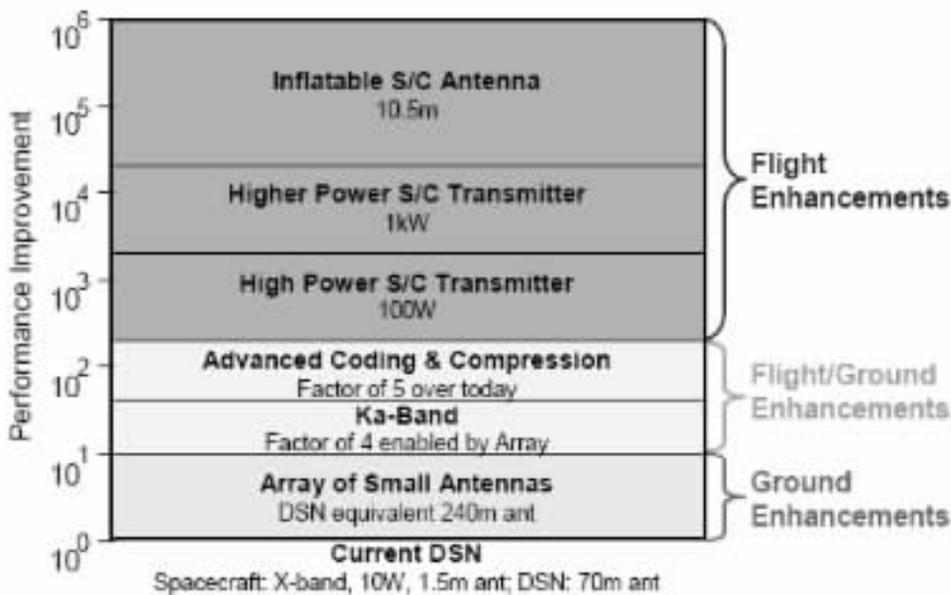


图 8 深空网下行数据增长要求的解决办法

贵。一种新的方法,就是使用可靠的、性价比较高、规模可变的小口径天线组成的天线阵来满足增长的需要。通过商业研究得出结论:在合理消费前提下,12米天线是商业化可用的;万一天线或接收机未接收到信号,操作时可以提供满意的衰减;还可以满足 SMD 未来任务设计的科学数据传输速率要求。天线组阵概念可以满足数量上显著增长的探测器需要,因为天线阵可以同时服务于几个任务,都可以提供满足每一个任务要求的口径。进一步来说,这些小天线相对于大天线来说拥有显著的商业化支持和较长的生命周期。12米天线阵的设计至少包含 400 个天线,相当于提供等效口径为 240 米的大天线或者在 X-频段比现在的 70 米天线能力提高 120 倍。子天线阵可以为几个探测器中每一个提供理想的口径。在空间不同地方的多个航天器或者空间相距较近的 16 个飞船能够利用天线阵的高灵敏度。

在每个深空网地面站由 4 个 12 米天线组成的最初天线阵用来支持 2008 年早些时候开始的 RLEP(机器人月球探测计划)任务。在“谁使用谁投资”的思想指导下,天线阵经过一段时间会不断增长以

满足需要,2020年将会完全达到计划的400个天线。

## (2) 2010~2030年深空网发展规划

目前,NASA深空任务的特点正在发生变化,深空网必须进行调整去适应这些变化。据估计,未来的任务将要求下行链路传输速率和数量增加1~2个数量级,上行链路数据率也可能增加10~100倍。为了满足NASA及其他航天局任务迅速增加的需要,喷气推进实验室制定了一系列发展计划,重点放在优化结构,以及在预算不断削减的情况下降低操作维护费用、提高服务能力。目前,喷气推进实验室正在实施的计划主要有:

### ① 改造现有深空网

尽管未来深空网的发展将主要依赖新的技术方法,但仍要立足于现有深空网并充分利用其能力,其改造主要是:首先是延长70米天线的寿命,70米天线是从64米天线扩展的,设计利用率为25%,但大多数时间实际达到80%。其次,高数传速率的需求驱使深空网实施Ka频段改造计划。改造34米和70米天线,使其具备Ka频段遥测下行链路能力,可以在不建造新天线的情况下使下行链路能力在原有基础上增加4倍。

需改进的另一关键问题是上行链路传输能力。由于航天器上搭载的指令接收机从S、X频段减少到只有X频段,加上70米天线的X频段发射机只有20千瓦(而S频段发射机为400千瓦),深空网可以通过提高发射功率或研制上行链路天线阵的方法解决此问题。

此外,深空网正在实施多目标支持(MSPA)计划,即一个天线可以同时出现在其波束范围内的多个目标。目前,一个天线可以同时支持两个目标,但操作复杂,劳动量大。将来,通过对深空网的自动化改造,每个天线可以同时支持4个目标。

### ② 甚大规模天线阵计划

为满足未来数传速率不断增加的需要,一个方案是建造34米或70米天线,一种更经济的方案是利用大量小口径(10米级)天线

组阵。NASA 计划在南半球和北半球 2 或 3 个不同经度的位置布置甚大规模天线阵。该计划具体目标是,到 2008 年使天线阵的口径等效于 2.8 个 70 米口径天线;到 2020 年将深空网的信号接收能力提高 100~500 倍。

为了同时支持大量任务,每个天线阵可以划分为数个子阵。每个子阵由指向同一方向的所有天线组成,作用在一起相当于一个大天线。组成子阵的天线可以位于不同的地点,而且是动态的,可以在航天器过境期间随意改变,但不影响跟踪通信。

### ③ 深空光学通信网

能将传输速率提高几个数量级的另一种方法是采用光学通信。光学天-地链路的地球端有两种实现方案——地基和天基,但目前更倾向于前者。在地基方案中,将采用几个 10 米望远镜接收深空信号。望远镜的部署有两种方法:第 1 种方法称作“线性分散光学子网”(LDOS),即沿地球一周等间距地布置 6~7 个光学望远镜,NASA 需要建立新的测站和基础设施。第 2 种方法称作“集群配置光学子网”(CDOS),在每个站上布置 3 个 10 米光学望远镜,全球共 9 个。

空基方案是在中、高地球轨道上部署光学望远镜。由于空间减少了 3dB 的大气信号衰减,光学望远镜的大小减至 7 米左右。但空基站的成本是地基站的 8 倍,而且同时只能支持一个目标。

目前,光学通信方案还处在概念研究阶段。JPL 建立了光学通信技术实验室,开发出 1 米的光学望远镜样机进行实验。从长远来看,JPL 将在大多数深空任务中采用光学通信,以支持无法用射频通信满足的高速率任务。

### ④ 建立火星网——星际 Internet

NASA 的火星观测计划(MSP)正在开发火星轨道上的通信及导航卫星星座,称作火星网,用来支持未来火星探测中通信和导航之需要。该网络由低成本小卫星以及火星中继卫星组成,也是“星际 Internet”最先实现的组成部分。作为深空网的扩展,该网络必须能够

支持各种不同的用户,包括已规划的任务和尚未出现的任务。火星网对用户的支持必须是高效的、大量自主的,以满足用户数量不断增加的需要。该网本身的操作也是以一种高效、自主的方式进行。

#### 4. 美国空军卫星测控网

美国空军卫星测控网(AFSCN)提供美国所有运行中军用卫星的地-空链接,还提供美国所有主要发射任务的发射段和早期轨道段的测控。如图9所示,美国空军卫星测控网包括10个全球分布的22个天线和两个控制中心,提供包括国防部、军用、军民联合和民用卫星等超过100颗卫星的工作状态和测控。其他功能还包括任务数据复原、通信、避免频率干扰和冲突等。

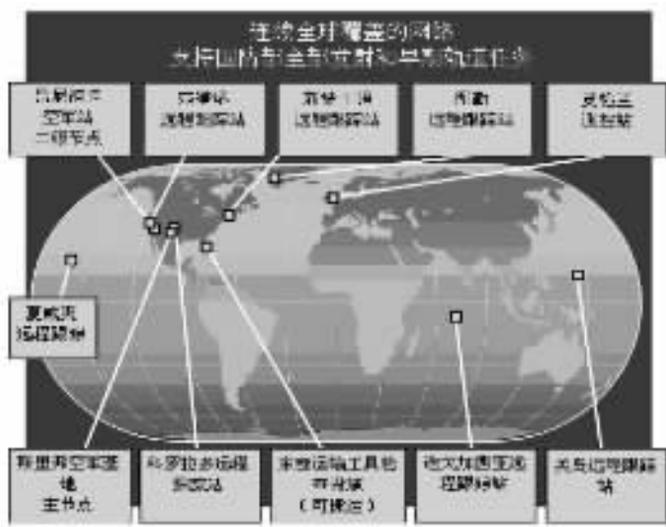


图9 连续全球覆盖的美国空军卫星测控网布局

目前的美国空军卫星测控网分为3部分:测距部分、通信部分、指令和控制部分。测距部分主要为远端的自动跟踪站;通信部分由多个测控站完成,指令和控制部分由分别位于加利福尼亚州和科罗拉多州的运行控制节点组成。

美国空军卫星测控网目前在科罗拉多州斯普林斯、加利福尼亚州阳光峡谷、加利福尼亚州范登堡、新罕布什尔州新波士顿、格林兰岛图勒、英格兰、关岛、印度洋迭戈加西亚岛和夏威夷的瓦湖岛建有设备。

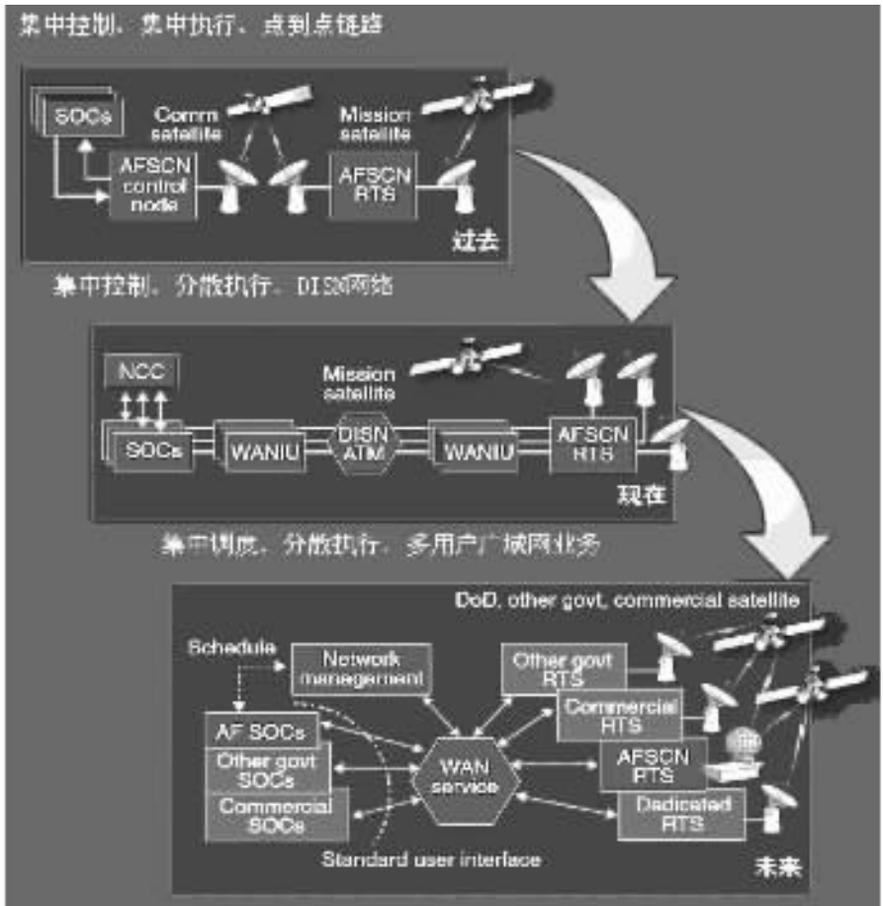


图 10 美国空军卫星测控网体系的发展

在过去的 50 年里，美国空军卫星测控网满足了国家安全航天系统卫星指令和控制需求。它正在朝着以标准为基础能够和其他国防部及民用卫星控制系统互操作的方向发展，并将成为美国政府互操作卫星控制网的一个重要组成部分。

### 5. 美国航天测控资源的综合利用

无论是负责民用航天计划的 NASA，还是负责军用航天计划的美国国防部，都面临着来自测控性能和测控成本两方面的挑战，在地基测控资源上表现尤为突出。NASA 的地基网和美国空军卫星测控网都面临未来卫星测控需求的持续增长，设备和系统老化更增大了航天测控服务的风险，然而财政投入的限制约束了新系统

的大规模建设和原有系统的全面升级。保留的一些早期任务专用设备,利用率低,仍需不断进行维护。实现不同测控网之间的互操作的呼声越来越强烈。图 11 是美国未来地面测控网体系结构的概念示意图。

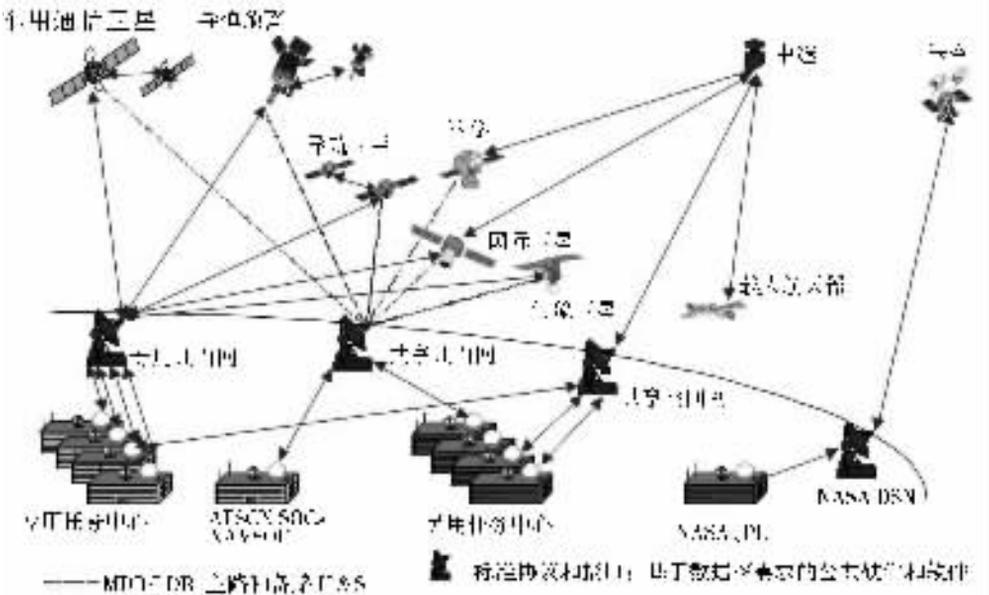


图 11 美国未来地基网结构的概念示意图

航天测控资源的综合利用可以有效覆盖,减少测控间隔;提高测控资源利用率,减少闲置时间;增强多任务测控能力;使测控系统更加灵活;有效降低航天测控成本等。但是由于以往任务需求驱动的模式,使得不同测控资源之间采用不同的标准和接口,系统间的互操作技术上仍需进行验证测试。已经在 NASA 的天基网、地基网和美国空军卫星测控网之间利用 CCSDS SLE 开展了一些互操作的实验。但同时面临不同部分所属资源的管理实施困难,由于测控网之间的差异导致空间操作更加复杂,并带来测控安全性问题,资源使用优先级的高效安排和经费使用等一系列问题。这些问题导致美国航天测控资源综合利用并未取得明显进展。

## 二、俄罗斯载人航天测控系统

苏联/俄罗斯经过 40 多年的建设、扩充和改造,已拥有一个庞大的、功能齐全的载人航天测控网。这个测控网可对载人航天器的上升段、在轨运行段(包括轨道机动,交会对接)和再入返回段提供良好的测控服务。

俄罗斯载人航天测控网的主要特点是高可靠性和高测控覆盖率,为达此目的,在测控网的建设上采用陆(海)基和天基测控网并用;在测控台站(含测量船)建设上采用备份和多站(双站和 3 站)重叠测控;在测控设备配置上既有集测轨、遥测、指令、电视、通话(报)于一体的多功能站,又有独立的遥测、指令、电视、通话(报)设备。这个测控网可对载人航天器的上升段、在轨运行段(包括轨道机动,交会对接)和再入返回段提供良好的测控服务。其主要任务如下。

- 对航天器进行跟踪测量,确定其轨道参数;
- 对航天器的空间导航系统和自主导航系统提供必要的地面支持;
- 接收和处理航天器的遥测信息;
- 对航天器进行工作状态控制和动力学控制;
- 接收航天器的电视信息,完成与航天员的通话;
- 保障航天员的应急救援;
- 与应用部门、研制部门、航天员培训中心、政府部门和新闻单位进行信息交换或通信。

苏联的国土辽阔,地处高纬度,这对航天测控网的建设带来极大好处,可以合理布置大量地面站。为补充地基站的不足,大量使用测量船,苏联曾保持了多达 11 艘的庞大测量船队,还配有少量测量飞机。1985 年后随着“波束”号中继卫星系统的建成,地基测控站网规模相应缩小,测量船使用数量也大为减少,例如“暴风雪”号航天飞机试飞时只使用了两艘测量船(入轨和返回)。

目前,俄罗斯有拜克努尔、普列谢茨克、斯沃博德内 3 大航天发射场,其中拜科努尔发射场是载人航天发射场。苏联/俄罗斯航天器(军民用卫星、飞船和空间站)的发射总数量一直保持世界最高纪录,其航天任务大都带有军事目的,主要由军方负责,所以其发射和运行测控由统一的测控网负责。载人航天任务、卫星任务和深空任务的指挥控制由加里宁格勒的航天指控中心负责,而军用卫星则由加里茨恩中心负责。拜克努尔载人航天测控系统由飞行控制中心、测控站和中继卫星等组成。这个测控系统除少数部门归俄罗斯联邦航天局管理外,大部分隶属于航天部队。

## 1. 飞行控制中心

俄罗斯最重要的载人航天飞行控制中心有位于莫斯科东北约 15 千米的加里宁格勒飞行控制中心和位于莫斯科西南约 40 千米的加里茨恩飞行控制中心。加里宁格勒飞行控制中心是载人航天飞行控制中心,隶属航天局。加里茨恩飞行控制中心是一个对各种航天器(包括载人航天器和各类卫星)提供支援的中心,属航天部队,也称航天部队试验总中心。

### (1) 概况

在航天飞行任务中,飞行控制中心是实施信息交换、数据处理、监控显示和指挥决策的中枢。加里宁格勒飞控中心的前身是一个协调计算中心,1973 年建成飞行控制中心,已有 30 多年的历史。该中心在保障航天器在轨运行、交会对接和再入返回等方面具有很高的技术水平和丰富的经验。

飞行控制中心有两个指挥大厅:“和平”号空间站指挥大厅和“暴风雪”号航天飞机指挥大厅。每个指挥大厅的两侧各有一个小厅,“和平”号空间站指挥大厅两侧的小厅分别为“联盟”号载人飞船指挥厅和“进步”号运货飞船指挥厅。“暴风雪”号航天飞机指挥大厅两侧的小厅用于深空探测器的指挥控制。两个大厅的布局和设备配置基本一致。“和平”号指挥大厅于 1976 年建成。大厅分两层,一层

的主要设备是监控显示台和大屏幕。在一层定位的主要是操作人员、分析人员和指挥调度人员；二层有三排坐席，用于安排领导人、外协人员和参观者。二层后部为国家委员会会议室，设有 21 个坐席和 6 个监视器。

## (2) 主要任务

飞行控制中心的主要任务是：完成航天器(包括空间站、载人飞船、运货飞船、航天飞机等)的飞行控制；完成深空探测器的飞行控制；作为一个科研实体开展研究工作。在载人航天器飞行控制任务中，飞行控制中心的具体任务如下：

- 作为载人航天飞行控制任务的枢纽。飞行控制中心是测控网的枢纽，也是“天-地”回路的枢纽，同时与应用部门、研制部门和航天员培训部门均有密切的信息关系。

- 生成测控计划和航天员作业计划，生成控制指令和注入数据。

- 完成航天器飞行过程的控制。在上升段，中心接收来自发射场的弹道测量信息与遥测信息，实时计算火箭各子级和有关部件(如整流罩、逃逸塔)的落点。在运行段中心利用测控站、测量船和“波束”号中继卫星三种手段接收航天器轨道信息、遥测信息，发送遥控指令；与航天员通信(话音、电视、电传)；对载人飞船与空间站的对接过程实施监控。在返回着陆段，对载人飞船与空间站分离、制动火箭点火、返回舱与轨道舱及推进舱分离等过程进行监控，并指挥搜索与救援系统完成回收救援等任务。

- 与研制部门的仿真航天器和综合仿真台配合进行仿真试验。

- 开展科研工作，以探索解决航天问题的方法和途径，如解决导航、控制问题的先进方法等。

- 开展国际航天合作，该中心是俄罗斯在航天领域开展国际合作的重要窗口。

## (3) 计算机系统

计算机系统是飞行控制中心的核心。其主要任务是：弹(轨)道

计算、仿真计算、显示信息处理。此外,还完成数据库的建立及其他科学计算任务。

### ① 计算机的分类

按照承担任务的不同,以计算机为核心组成的系统可分为如下几类:

·弹(轨)道计算系统:完成弹(轨)道参数确定、轨道摄动分析、轨道预报和轨道机动策略生成等。

·指令程序信息系统:完成计划生成与指令信息生成。计划分为长期计划和详细计划。指令程序信息包括指令信息块等控制指令,并由测控站的遥控设备发送到航天器。

·遥测数据处理系统:完成时间修正、格式变换、滤波、压缩(压缩 100 倍)等预处理后把数据送入遥测数据处理计算机。由于遥测数据处理系统运行速度足够高,在“通信期”(测量弧段)内,所有遥测数据流均可进行实时处理。

·仿真系统:可以进行数学仿真(建立载人航天器动力学模型、运行状态模型、外部环境模型、测控网模型等),也可与仿真中心(属航天器研制部门)进行信息交换,以便实施工程仿真。

·显示系统:其任务是将其他计算机的计算结果格式化,加工为显示信息送至个人显示设备(监视器)和公用显示设备(大屏幕)。其中 CM-1210 计算机的终端有 500 个监视器,而 CM-4,CM-1300 计算机则主要向各种大屏幕输送显示信息。显示系统可生成反映航天员状态的 200 种表格和 60 种参数。

### ② 计算机的特点

·运行速度快:载人航天任务测量数据种类多,速率高,因此要求飞控中心计算机有很高的运算速度。以完成“联盟”TM 飞船计算控制为例,对飞行控制中心计算机运算速度的基本要求为:弹(轨)道计算 1500 万条指令信息/秒,指令程序信息计算 500 万条/秒。飞控中心实时高速运算的主要方法是采用多处理器并行运算。

·实时性强:载人航天器的测量、控制、监视均对实时性有很高的要求。飞控中心的计算机硬件、软件的配置和设计满足了实时性强的要求。如遥测数据从处理到结果显示的总时延小于3秒。

·可靠性高:为确保载人航天器和航天员的安全,飞控中心计算机必须满足可靠性高的要求。为此,计算机系统采取了如下措施:定期维护、设备备份,上述各类计算机根据需要可相互替代。

·计算机联网:飞控中心的主要计算机以及各部门的一些微型计算机实施联网,网络数据传输速率为10兆位/秒。

·CM、IIC计算机采用中规模集成电路,存储部分采用大规模集成电路,冷却方式为水冷。中心所有计算机体积大、机柜多。

·计算机软件采用汇编程序,“ЭЛ-76”语言(类似ALGOL语言,1976年研制)、C语言等。

#### (4) 监控显示系统

该系统包括公用显示设备和个人显示(包括监控)设备,主要集中在指挥大厅。此外,各业务部门也配有大量个人显示设备。

##### ·主要功能

监控显示系统的主要功能是:利用飞控中心计算机弹(轨)道计算、遥测数据处理和指令程序信息计算所产生的结果,自动、实时显示飞行信息;以文字、数字、图形显示动态和统计飞行信息;显示电视信息;显示测控网状态;显示测控计划和时间信息;部分专业人员的监视显示台具有控制功能;对视频信息进行记录、重放、存储;制作有关电视资料。

##### ·大屏幕系统

大屏幕及其上方的电子信号盘为主要公用显示设备,大屏幕共6块。居中的一块尺寸为8×6平方米,主要显示以世界地图为背景的航天器飞行轨迹及测控网覆盖图。两侧的4块尺寸各为4×3平方米,根据航天器运行情况和工作状态,随时显示不同的文字、数据、曲线、图形和电视图象。页面的切换与飞行作业同步。此图如实地反

映了飞行任务的实施情况。电子信号盘以字符与数字形式显示时统时间、航天器运行圈号、跟踪开始与结束时间等。

大屏幕系统的投影设备分为电视投影设备与光学投影设备两种。电视投影设备采用 GE 公司生产的电视投影机,仅支持 4 块 4×3 平方米的屏幕,居中的大屏幕不显示电视图象。光学投影设备支持所有大屏幕,是主要的投影设备,具有亮度高、寿命长、费用低等特点。由以下 3 种投影机组成:

**MIKO 背景投影机:**以幻灯片的形式将特殊符号(如测控站、回收用飞机等)投影于遮光屏幕上;

**MIIC 静态图像投影机:**以幻灯片的形式将特殊符号(如测控站、回收用飞机等)投影于遮光屏幕上;

**MIIT 绘图投影机:**将代表运行轨迹的曲线与代表航天器的亮点投影于透光屏幕上。亮点的移动由计算机控制,从而实时显示航天器的运动轨迹。以上 3 种投影机产生的画面可在透光屏幕上迭加生成完整的画面。

### 监控显示布局

“和平”号指挥大厅监控显示台分 5 排,共 25 节,每节为 25 个单元(个人显示器、键盘)。这些监控台因使用对象不同而显示内容各异。人员定位情况如下(每排的叙述顺序序号均为自左至右)。

第一排:运载火箭、温控、试验系统、医学保障设计师。

第二排:调姿与飞行动力、分析组主任、飞船系统专家、日常工作系统专家、空气成分保障人员;

第三排:无线电系统(遥测、遥控、电视)、测控系统、值班飞行指挥长、副飞行指挥长(计划)、航天器文件专家与航天员通话接线员;

第四排:测控系统负责人、总设计师、飞行指挥长、飞行控制中心主任;

第五排:总调度。

## (5) 通信系统

## ① 通信设备

**宽带通信:**用来收发电视、全遥测信息流、统一数字化信息流(包括遥测、遥控信息)。**窄带通信:**电报、电话,可传输话音、遥测、指令、弹道信息。

**专用通道:**专用人员之间的电话、电报通信、无关人士接收不到。

## ② 通信系统

### ·外部通信

飞控中心为完成任务必须接收航天器的跟踪测量数据、遥测数据、话音和电视信息,为此,采用卫星通信和中继卫星系统。飞控中心利用莫斯科附近的肖尔格沃站(通信枢纽)内的卫通站,通过“闪电”和“地平线”通信卫星,实现与测控站(船)的通信。同时利用肖尔格沃站内的终端设备与“波束”号中继卫星通信。中心具有 720 条窄带电路,20 条宽带电路。宽带电路用以传输电视等宽带信息。

### ·内部通信

中心内部的通信包括电话、扬声系统、录音系统,在全中心通报情况的通信设备,以及一些专门通信设备。内部电话 1000 门,扬声通道 80 个,10 个电视通道。

## (6) 飞控中心的各项勤务

### ① 遥测保障

飞控中心有一套遥测保障系统,包括接收、记录设备,信息处理设备,遥测信息分析、显示报告文件编制系统。

航天器上有 3 种遥测系统:

·脉码调制遥测系统,速率为 256~32kbps。

·遥测系统,速率为 256~32kbps。

除纯地址系统外,还可采用脉码调制或综合调制方式。

·专门无线电遥测系统,用于深空探测器,速率为 256~128kbps。

3 种遥测系统磁带总存储量为  $60 \times 10^6$  字。此外,航天器上还有一些速度参数,速率为  $10^9$  bps。可采用脉码、脉幅、调频及综合调制

方式。所有遥测信息可以通过地面站、测量船及中继卫星传到飞控中心。遥测信息处理指挥室完成管理工作。首先检查进来的信息质量,处理过程中信息质量也由它检查,还要检查测控站的工作情况,由它根据航天计划来决定哪些设备对哪个目标进行遥测接收发送预处理,二次处理,哪些站接收发送等等。

## ② 指令程序保障

基本任务是在通信期内注入信息,要生成 5 种指令程序信息,详细飞行计划(昼夜计划),长期计划(1 年)。年度飞行计划中要安排每昼夜的飞行计划,通过 3ЛБσPУС-1 来存储。然后计划每一昼夜的典型作业,这样详细的计划要有 120 昼夜,还要为 16 次通信期制定详细飞行计划,所有详细计划要在仿真中心仿真,然后,存储在 3ЛБσPУС-1 上,在规定的周期通过计算机注入到航天器。在每个通信期内要注入程序指令信息和数字化指令信息块。生成向航天员发送的通知,可以用话音、电报的方式通知航天员。

## ③ 外测保障

太空环境、引力场、航天器运动、姿态测量、进入阴影区等都要仿真。建立数学模型,进行仿真非常重要,特别对于交会对接、返回降落等作业。

## ④ 地面测控系统及通信保障

除飞行指挥控制外,各地要建立测控站。完成载人航天任务需要用到主测控站上的多功能测控系统。

# 2. 测控站

## (1) 上升段测控站

为保证发射和上升段的测控,拜克努尔发射场区内设有 5 个测控站:即位于“联盟”号运载火箭发射场附近的第一测量站,位于“天顶”号运载火箭发射场附近的第二测量站,位于“质子”号运载火箭发射场附近的第 3 测量站,位于列宁斯克(发射生活区,为一城镇)附近的第 4 测量站(也称“织女”号测量站)和第 5 测量站(也称“土

星”号测量站)。第 1、第 5 测量站为大型测量站,配有多功能测控设备。在上升段测控中,除利用场区的第 1、第 5 测量站外,还利用航区的测控站。航区的测控站分别位于:杰兹卡兹甘,卡位于达,巴尔喀什,巴尔瑞尔和科尔帕什沃等站。巴尔瑞尔站距入轨点较近,为入轨点主要测量站。

## 2. 运行段测控站

### ① 运行段测控站布局

为了提高对航天器的测控覆盖率,测控站在俄罗斯(苏联)国土的东西方向上“均匀配置”,从堪察加半岛到克里米亚半岛,布有 15 个主要测控站,经度覆盖范围近  $180^{\circ}$ 。其中 7 个测控站用于载人航天测控:位于堪察加半岛的彼得巴浦洛夫斯克站,位于符拉迪沃斯托克(海参威)附近的乌苏里斯克站,位于贝加尔湖以南的乌兰乌德站,位于新西伯利亚以北的科尔帕什沃站,位于拜克努尔发射场以东的朱萨雷站,位于高加索的第比利斯站,位于克里米亚半岛的耶夫帕托里亚站。

### ② 肖尔格沃测控站

肖尔格沃测控站位于莫斯科以东约 35 千米处的肖尔格沃市附近,团级单位,该站于 1956 年建成,曾参加苏联第一颗人造卫星测量任务。该站是航天测控网中规模较大的综合测控站,有多种用途的测控通信设备及相应的各类天线。现用的测控设备多数已使用 10 多年,随着科学技术的发展,测控设备在技术性能和自动化程度方面有较大改进与提高,从而圆满完成了各种航天员的测控任务。该站任务一般由加里茨恩测控中心和加里宁格勒飞行控制中心下达。无论载人航天飞行还是其它航天器的运行,肖尔格沃站均承担繁重的测控通信任务。

### ③ 主要测控通信设备

运行段测控站的典型测控设备是多功能测控设备,此外还有单一功能的测控通信设备。

俄罗斯(苏联)载人航天测控网共有 9 套多功能测控设备,兼有测轨、遥测、遥控、通信和电视传输等多种功能。

多功能测控设备天线为抛物面,分为 8 米口径和 25 米口径两种。

多功能测控设备工作频段上行为 760~770MHz,下行为 920~930MHz,为支援不同的航天器,采用多种载波与副载波。测量通道采用调相体制,通信电视通道采用调频体制。接收机灵敏度为-150dbw。伺服系统具有引导、手动和自动跟踪 3 种方式,测距采用伪随机码测距方式,码长  $L=1023$ ,码钟频率  $F_t=1\text{MHz}$ ,测距误差为 10 米,测速误差为 0.01 米/秒,遥测码速率为 256kbps,遥控指令码速率为 250bps,指令条数为 256 条。电视(天地双向、模拟体制)通道带宽为 7MHz。多功能测控设备反射功率为 1 千瓦。航天器上合作目标重 45 千克,发射功率 6 瓦。

#### ·遥测设备

所有测控站均有遥测设备,天线由 4 个 6 米口径的抛物面组成,形成比相式“单脉冲”跟踪结构。边沿的小螺旋天线为引导天线。工作频段为 200~250MHz 和 980~1100MHz,有数十个工作频率。采用调相体制。码速率为两路 256bps。飞船上传感器数量为 2000 余个。飞船上遥测系统重 100 千克,发射功率 15 瓦。

#### ·通信/电视设备

肖尔格沃等站配有通信/电视设备,其任务是完成对航天器通信及电视信息的接收与发送。天线是由 40 个振子组成的长方形阵面,波束宽度约  $16^\circ$ ,波束可进行控制。工作于分米波段,双机热备份。伺服系统具有手动和计算机自动控制两种状态。航天器上通信设备重 23 千克,发射功率 4 瓦。航天器上电视系统重 12 千克,发射功率 10 瓦。

#### ·卫星通信地面站

各测控站均配有卫星通信地面站,其任务是利用“闪电”号等通信卫星传输话音、电视信息和遥测数据流。通信系统工作于厘米波

段,包括发射机、接收机、伺服机构和终端设备,以及口径为 12 米的夫塞格伦天线,采用双信道并行工作。话路通道带宽为 5MHz,电视通道带宽为 7MHz。

### ·中继卫星终端站

位于肖尔格沃站内的中继卫星终端站是两颗“波束”号中继卫星的转接站。通过与中继卫星的双向通信,传输测轨数据、遥测数据、遥控指令、话音与电视信息。终端站工作于 Ku 波段,上行频率为 14.6GHz,下行频率为 10.9GHz。使用 3 个载频和 2 个副载频,抛物面天线口径为 16 米,波束宽度约 0.1°。设备由发射机、接收机、伺服系统、计算机等组成,双机热备份。发射机采用行波管,风冷。发射机功率 150 瓦。伺服机构以计算机控制为主,手控为辅。

## 3. 中继卫星

俄罗斯现用的中继卫星“波束”号共两颗,分别定点于东经 95°和西经 16°,对航天器的测控覆盖率可达 85%。中继卫星的两个抛物面天线分别与地面终端站及“和平”号空间站通信,两抛物面天线之间的相控阵天线与飞船通信。终端站发往飞船、空间站的信息(来自飞控中心)有指令信息、话音等,终端站发往飞控中心的信息(来自飞船、空间站)有遥测信息、话音、电视等。中继卫星与地面终端站(肖尔格沃站)通信的抛物面天线口径为 1.6 米,波束宽 1°~1.2°,中继卫星与终端站的通信频率为 14.6GHz/10.9GHz。与“和平”号空间站通信的抛物面天线口径为 4.5 米,波束宽度约 1°。中继卫星与空间站的通信频率为 13GHz/15GHz。中继卫星与飞船通信的相控阵天线阵面为 4 米,由 16 个单元组成,波束宽度为 5°×5°。中继卫星与飞船的通信频率为 0.7GHz/0.9GHz。数据传输速率为 64kbps。中继卫星系统建成后,充分展示了其覆盖率高、使用方便等特点,俄罗斯在 1992 年执行的重要航天飞行任务(包括分别载有德、法航天员的“联盟”TM-14 飞船,“联盟”TM-15 飞船先后与“和平”号空间站交会对接)中,均采用陆上测控站加中继卫星的测控

方案,而未动用测量船。

在SDRN地球同步轨道中、西部位置上加入“波束”号卫星后,载人航天测控网得到加强。从远程陆地站上,“闪电”号(Molniya)卫星可向莫斯科的飞控中心提供链路。

#### 4. 深空测控网

俄罗斯深空网由3个地面站、2个指控中心(MCC)和2个弹道中心(BC)组成。3个地面站分别设在乌苏里斯克、叶夫帕托里亚、熊湖。乌苏里斯克配置的是25米(发)、32米(收)和70米(收/发)站,叶夫帕托里亚拥有32米(发)、70米(收/发)站,熊湖则是32米(收)、64米(收)站。东、西两站经度相隔 $100^{\circ}$ 左右,提供了从前苏联本土最长的接力观测时间,并构成尽可能长的基线。

深空任务的主控中心位于加里宁格勒,备用和本地指控中心与叶夫帕托里亚站在一起。2个弹道中心分别设在莫斯科附近的飞行控制中心(FCC)和俄罗斯科学院的应用数学所。

##### (1) 任务指控中心(MCC)

探测器的飞行和工作控制由任务指控中心的操作控制组(COOG)完成。该组的人员来自探测器研制和空间飞行控制过程制订部门,分为任务执行小组、分析小组、飞行规划小组、测控规划和分析小组、弹道组、通信组。MCC中的信息处理设施包括三大计算机程控系统:自动处理和分析遥测信息的系统、程控遥控系统和信息显示系统。

##### (2) 弹道中心

该中心的主要功能是确定探测器的真实飞行弹(轨)道,并预报两次弹道测量过程之间的飞行路径。在进行弹道修正的准备过程中,弹道中心要计算出探测器从某一弹道转移到另一弹道所需机动飞行参数。探测器机动数据以数字形式送到相应测控站,再通过无线电通信链路送到探测器,插入探测器控制系统的定时器,以便在预定时间修正探测器的飞行路径。

2个弹道中心独立计算探测器的弹道和机动参数，计算结果进行比对，如相同则可使用。弹道中心计算出的数据送往测控站，以便计算目标引导数据以及规划未来探测器操作。

### (3) 测控设备

目前叶夫帕托里亚站的测控设备是80年代研制的“量子-D”。该站主要利用直径70米的收发天线，站中还有一个32米发射天线及相应设备。

70米设备除完成对深空探测器的测控任务外，还可以其巨型天线和大功率厘米波发射机构成行星雷达，有规律地实施对火星、金星、水星的测距测速(测距精度为0.3~2千米)，从回波信号中获得有关行星表面物理结构及行星旋转参数，绘制多种用途的行星表面的雷达图(亮度图、地貌图、地形高程图等)。

乌苏里斯克站的设备组成与叶夫帕托里亚站基本相似，只是没有行星雷达设备，32米天线设备只用于接收，而用25米天线设备作为备份发射设备。熊湖站的32米、64米天线设备只用于信息的接收。

### (4) 信号检测和遥测信息处理系统

射频信号的检测和解调由一台程控数字式接收机完成。该系统实时识别帧和字同步信息、探测器上时标，分离各通道的信息，利用模-数变换器和磁带机记录这些信息，将相应信息送往用户，以串行或并行码进入通信信道，时间同步精度为 $\pm 1$ 毫秒。

### (5) 弹道测量系统

利用载波多普勒测量法测量探测器的径向速度，应答方式和非应答方式都可测量。通过压缩通带，提高探测器和地面接收机的信噪比，即在产生地面发射机载频和接收机外差信号时，程控频综器将频率偏移一个相当于多普勒频移的预期值。

采用相位法进行测距，基于测距信号的传播时延，测距信号在地面发射机中调制在载波上，由探测器应答机转发。

由于深空飞行的探测器位置事先是知道的,所以不需要测整个距离,仅需要对事先确定的值进行验证和某种修正即可(分米波段测距无模糊距离为 5 000 千米,厘米波段为 500 千米)。

采用差分甚长基线干涉仪测量( $\Delta$ VLBI),可大大缩短测轨时间并提高定轨精度。俄罗斯 3 个深空站可构成差分甚长基线干涉仪,叶夫帕托里亚到熊湖的基线长达 1200 千米,到乌苏里斯克的基线达 6900 千米,利用这些基线,测角精度可望达到 0.05~0.1”。

## (6) 程控指令信息系统

任务指控中心制订与探测器通信的计划,形式是操作指令和数字指令的一个顺序表,定时精度为 0.1 秒,通过高可靠性通信信道传送,并自动储存在程控指令系统存储器内,其容量为 6000 个 9 位字。在与探测器通信期间,把计划送到发射机调制器。指令送到调制器上时,任务指控中心对这些指令自动进行检验。

## 5. 新的深空测控系统

经过几个阶段的现代化改造,“量子-D”虽可以满足目前的需要,但已过时,且寿命已满。而且,俄罗斯未来的深空任务将使用 X 频段,“量子-D”的工作频段也不能满足需要。

上述原因促使开发下一代深空测控系统——“木星”。“木星”的设计满足下述要求:(1)上、下行链路采用 X 频段;(2)使用效率更高的编码技术提高链路的性能;(3)提高轨道测量信息容量和精度;提高遥测和遥控数据速率。(4)“木星”系统于 2004~2005 年间投入使用,用来支持 2005~2015 年之间的深空探测任务。该系统将安装在叶夫帕托里亚、乌苏里斯克与熊湖站。熊湖站使用 64 米和 32 米天线。

“木星”测控系统现有的高效 70 米和 32 米天线经适当的现代化改造后仍将使用。新系统的电子设备采用先进的部件制造,包括专用大规模集成电路,应用专用处理器和个人计算机等数字方法进行信号和数据处理,许多功能和操作模式用软件而不是硬件的方法来实现。系统的控制和操作监视是自动进行的。所有这些方法都将

减少设备体积、操作人员数量,最终降低测控站的操作费用。

考虑到“木星”站的使用寿命要达到 20 年,设备的研制将尽可能地为该站今后进一步现代化提供方便,以便在运行过程中改造个别系统而不影响该站其余系统的操作。

在高电子迁移场效应晶体管的基础上开发出了工作波长为 3.5 厘米的低噪声接收设备,闭环低温制冷器将放大器保持在液氮的温度,噪声温度预期小于 10 K。

采用特殊的高效专用计算处理器,信号跟踪、信号解调、轨道测量等任务打算采用硬件和软件相结合的方式实现。接收遥测数据的信道打算采用 CCSDS 建议的级联码,在信噪比较低的情况下将采用 Turbo 码。支持高远地点地球卫星时,遥测数据速率将增加到 1 Mbps。

“木星”测控系统将为 70 米天线配备新的工作波长 4.2 厘米的 20~40 千瓦的发射机,为 32 米天线配备 5~10 千瓦的发射机。为提高可靠性,测控站上的所有设备都有备份。

调制技术、信号结构等方面的 CCSDS 建议将最大程度地用于“木星”站。该站贯彻 CCSDS 建议将有助于俄罗斯深空测控通信网参与国际合作。新系统还将具有收发异地的三向多普勒测量能力,从而测得发射站-探测器-接收站距离和的变化率。

叶夫帕托里亚站现保留有工作波长为 6 厘米的 200 千瓦发射机以及相应的信号处理设备,用于行星无线电定位。70 米天线中现有的波段为 0.33、1.7、2.3、5 GHz 的接收信道打算用于射电天文实验。