

第1章

系统

1.1 概述

深空探测工程极大拓展了人类对宇宙认知的深度和广度,但是星际飞船即便是在太阳系的各行星之间飞行也比在地面上的任何航行距离都要远得多。国际上,200 万 km 以远定义为深空,以太阳系中我们的近邻火星为例,其距太阳的平均距离为 1.524AU(1AU 相当于 149 457 000km,为地球到太阳的平均距离),距地球在 5000 万~5 亿 km 之间变化。

可以预见,星际航行中的测控、通信问题也就更加困难、复杂而且非常重要。

1.1.1 深空测控通信系统的任务

(1) 跟踪测量导航

在探测器飞行过程中,地面指挥控制人员要知道探测器任何时候所处的飞行位置,探测器也要随时知道自己所在的空间位置,以便进行姿态保持或控制。这就需要通过深空网对探测器进行双向或多向测距、多普勒测速和甚长基线干涉测量(VLBI)来实现对探测器的跟踪测量。通过融合连续或多弧段的各类测量数据,可以对探测器的飞行轨道进行计算定轨,同时将定轨结果注入探测器,以供制导、导航与控制分系统使用。

(2) 任务飞行控制

为了完成特定的深空探测任务,探测器需要从发射初始轨道经过一系列的变轨以达到目标轨道。例如,对于火星着陆探测,其主要的飞行控制包括地火转移轨道的中途修正控制、近火点制动捕获火星控制、环绕火星轨道控制和着陆火星控制等。任务飞行控制是建立在跟踪测量定轨基础上的,由任务中心根据任务设计的轨道要求计算出当前轨道到目标轨道的变轨控制量,并通过深空网注入探测器完成探测器的变轨任务。

(3) 探测任务操作

探测任务操作是任务控制中心根据探测器的当前状态和探测任务要求,编排一系列指令控制程序,并通过探测器相关执行机构实施的过程。探测操作可分为直接控制操作、程序控制操作和交互式操作三种基本模式。根据任务的复杂程度,一项操作任务的实施可由一种或多种不同操作模式组合完成。

(4) 数据传输通信

数据传输通信就是将探测器产生或获取的各类信息数据传输到地面,供各类用户使用。这些数据主要包括探测数据和视频图像信息,如果是载人活动,还包括语音信息。探测数据主要供科研人员开展科学研究,图像和语音信息主要

供任务中心进行任务指挥和控制使用。

1.1.2 深空测控通信的特点

(1) 信号空间衰减大

深空测控需要对几亿千米,甚至上百亿千米的遥远探测器进行测控,信号衰减程度非常大。无线电信号功率按传播距离的平方衰减,遥远的距离带来巨大的信号路径损耗,这意味着同样强度的发射信号,传播距离越远接收方得到的信号越微弱,可传输的有效信息将急剧下降,或者为保证一定的信息量传输将花费更大的代价。

为了弥补深空测控通信巨大的信号空间衰减,通常采用增大天线口径、增加射频(RF)发射功率、降低接收系统噪声温度(简称噪温)、接收机采用极窄带锁相环提高载波频率、利用高效信道编译码技术、降低传输码速率和通过数据压缩降低信息传输数据量等措施。

(2) 信号空间传输时延长

近地卫星测控中,电波的空间传播时延为毫秒(ms)级,在深空测控中,这个时间延长到数分钟甚至数小时(到火星 11min,1 亿 km; 海王星 8h,43.5 亿 km)。

常规测控模式已不再适应深空任务大时延的特点,比如要完成 1 亿 km 的距离测量,常规测距模式下距离捕获的时间将达到 1.5h,而对海王星探测器测距时,上行测距经探测器转发返回地面后,地面站可能由于地球自转而无法看到目标。

针对以上特点,地面深空站需研究适应深空任务特点的深空测距流程,包括三向测距。

(3) 高精度导航困难

与近地航天器导航相比,深空探测器距离地球遥远,无法使用像全球定位系统(GPS)这样的卫星导航系统;同时,由于地面接收到的深空探测器信号非常微弱,还将导致无线电测距、测速精度恶化;此外,由于深空探测器相对于单个地面站的测量几何关系变化非常微小,也不利于实现高精度的轨道测量。

目前深空测控设备的测距、测速、测角的精度要求仍然很高,比如在信噪比(SNR)为 20dBHz 的条件下,S 频段测速随机误差 1mm/s、X 频段测速随机误差 0.1mm/s,测距随机误差 1m。针对这样的要求,需要采用大口径天线、制冷超导滤波器和低噪声场放来提高系统的接收品质因数(G/T),其次,需要在接收基带采用超窄带的载波锁相环和副载波锁相环以保证测量精度。

为了实现深空探测器的高精度导航,已经开发了双差分单向测距(Δ DOR)和再生伪码测距技术。 Δ DOR 是一种干涉技术,它通过一条长基线两端的 2 个地面

站接收航天器差分单向测距(DOR)信号的相干来提供精确的探测器角位置,可实现5nrad的导航精度。再生伪码测距是通过深空探测器解调上行链路(U/L)测距信号,然后再生转发到地面,消除了上行链路噪声的影响,从而提高测距精度。

为保证在这种长延迟条件下精确的双向或三向测速和测距,深空站必须配备长期稳定度($2 \times 10^{-15}/\text{h}$)和准确度很高的原子频标(如铯钟、氢脉泽(MASER))。图 1-1 给出了美国国家航空航天局(NASA)深空网原子频标发展路线图。

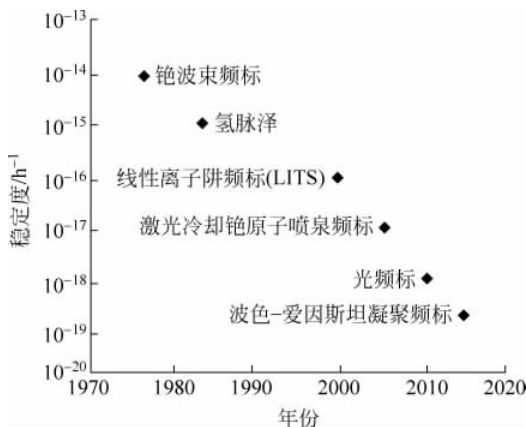


图 1-1 NASA 深空网原子频标发展路线图

(4) 信号传播环境复杂

深空测控通信无线信号要穿越变化复杂的太阳等离子区,经受随时出现的太阳风暴的冲击;同时,对具有大气层的地外天体的探测,信号还要穿过该星体的大气层;这些都会给测控通信性能带来影响。无线电信号的频率越高,电波波长越短,受电离层和太阳等离子区中带电粒子的影响就越小,从而可以提高无线电测量的精度。

1.1.3 关键技术

深空测控通信任务是由全球布站的地面深空网和深空探测器共同完成的,而地面深空站则是地面深空网的重要组成部分,其性能指标必须与深空任务特点相适应,满足在深空距离上的高可靠控制、高灵敏度微弱信号接收以及高精度测量的要求。

66m S/X 双频段深空测控通信设备(DSF1)是面向深空测控通信任务而设计的大型地面系统,其特点如下:

- 1) 配有大口径抛物面天线以及极低噪声的波束波导射频网络;
- 2) 发射机输出功率高,达到 10kW 或更高;

3) 接收机具有极高的接收灵敏度,能够对淹没在噪声以下的信号进行跟踪处理;

4) 需对低信噪比和高动态的信号进行接收和处理;

5) 配备高精度、高稳定度的时间与频率系统;

6) 系统标校复杂,须探索高精度深空大天线标校方法;

7) 系统电磁兼容性(EMC)设计复杂。

针对 DSF1 以上特点,提炼出电路设计、系统标校、微弱信号捕获跟踪以及测距体制等方面需要解决的关键技术问题。

1.1.3.1 天伺馈关键技术

(1) 深空天线波束波导设计技术

深空站高功放(HPA)、低温接收机布局在地面机房,按照常规天线设计方案,馈源安装在天线中心体内,馈源至低温接收机的收馈线、至高功放的发馈线很长,即使采用波导传输也会带来较大损耗,严重影响系统 G/T 值和等效全向辐射功率(EIRP)等技术指标的实现。

地面深空站天线设计采用波束波导(BWG)方案,天线焦点处的能量被传输到地面,安装在常规天线中心体内的馈源转移到了地面机房,从而有效解决了系统设计中一系列空间和结构难题。

(2) 高精度位置编码技术

深空天线口径大、频段高的特点决定了其波束宽度很窄,66m 深空站 X 频段半功率波束宽度只有 0.045° ,因此,较高的指向精度就成为完成任务的必要条件。高精度位置编码是实现高精度指向的前提,而选用高精度的测角元件则是实现高精度位置编码的重要保障。

结合本系统方位测角元件超大空心内径及高精度的要求,使用增量式光电角度编码器是方位测角元件的唯一选择,也是本系统研制中的关键技术之一。

(3) 大口径天线副反射面调整技术

重力因素引起的天线结构变形使得天线反射面精度降低,增益下降,引起天线波束指向误差。这些误差可以通过自适应调整副反射面来抵消,使天线在有效转动范围内保持增益不变,以保证天线高指向精度的要求。

如何实现高精度副反射面调整是地面深空系统研制的关键技术之一。

(4) 大口径天线标校测试技术

DSF1 天线射频指标测试和标校内容主要包括:

1) 天线方向图测试(S/X 频段);

2) 天线 G/T 值测试及校准;

3) 角度标校,并为角度模型提供数据;

4) 天线副反射面实时修正数据的标定。

实现大口径、多频段地面深空天线系统的高精度测量与标校是保证设备研制并投入使用的关键,也是系统设计关键技术之一。

(5) 天线反射面精度测量及调整技术

大口径高精度地面站天线反射面精度测量及调整是地面站建设的最后一个环节,直接关系到天线反射面最终精度的形成,是本系统研制的关键技术。

(6) 波束波导天线三轴中心位置的确定及测量

波束波导三轴中心是系统距离、角度测量的参考点,其位置的精密测定直接影响各测量元素的精度。由于波束波导天线的三轴中心被 M1 反射镜占据,无法直接在此处设置测量标志,因此需要采用间接测量方案来对三轴中心位置进行标定。

波束波导天线三轴中心测量方法研究是本系统研究的关键技术之一。

1.1.3.2 高功放关键技术

(1) 宽带大功率速调管技术

DSF1 要求 S/X 频段的高功放输出功率要达到 10kW。高功放设计采用大功率速调管,研制过程要解决功放宽带应用、大功率输出等多项技术难点。

(2) 大功率散热技术

深空站高功放工作时发热量大,必须合理设计散热方案才能保障设备稳定可靠地工作。这对功放整机的设计提出了不同于常规测控站的更高的散热要求,是深空地面站建设的关键技术之一。

(3) 功率精确控制技术

系统对功放输出功率提出了 0.1dB 的控制精度要求,因为速调管增益受外界条件的影响比较大,高精度功率控制就成为功放研制必须突破的一项关键技术。

1.1.3.3 高频接收关键技术

(1) 超低相位噪声频综设计技术

为了确保深空探测任务中高精度测量的实现,要求高频接收机本地振荡器(LO,简称本振)具有极低相位噪声。总体提出的 1Hz 处相噪指标已经接近理论极限,要求设计指标与理论指标相比的恶化控制在 1dB 以内,这对高频接收频综设计提出了很大挑战,需要探索兼顾小步进(100Hz)和低相噪的最优方案。

(2) 低温接收机设计技术

在深空系统设计中,采用低温接收机设计技术能有效降低低噪声放大器

(LNA)噪声温度,S频段低温接收机噪声温度小于18K(常温60K),X频段低温接收机噪声温度小于20K(常温90K)。

DSF1低温接收机设计要兼顾极低噪声接收和耐发射大功率的双重要求,需要攻克超导耐大功率设计、低温隔离器设计以及低温低噪放设计等多项技术难题。

(3) 超导滤波器设计技术

微波频率范围内,在相同条件下超导薄膜的微波表面电阻 R_s 是铜的 $1/10 \sim 1/1000$ 。采用超导技术设计的滤波器具有低插入损耗、高 Q 值以及体积小、重量轻等突出优点。

为了满足DSF1复杂电磁兼容设计问题,对配置在收支路上的发阻滤波器提出了很高的指标要求。传统的腔体滤波器由于其体积庞大而无法实现制冷应用,较大的插入损耗严重恶化了 G/T 指标。在此背景下,采用超导滤波器就成为最佳的替代方案。

(4) 极低噪声测试及不确定度评估技术

DSF1的噪声温度是影响系统 G/T 指标的决定因素,而对噪声温度的精确测量则成为深空低温接收系统研制的关键环节。常规采用噪声系数测试仪等测量仪器的测试误差通常在10K左右,不能满足低温接收机噪声温度测量的精度要求,因此需探讨极低噪声测试方案及如何对测试不确定性做出准确评估。

1.1.3.4 高精度时频设计

除独立完成各项测控任务外,DSF1还作为深空网的一个节点来完成任务赋予的使命,比如与其他深空站联合进行三向测距、甚长基线干涉测量观测等。

深空任务要求站间时间同步精度优于20ns,频标的稳定度优于 $2 \times 10^{-15}/h$ 。

DSF1通过采用高精度站间时间同步技术和配置主动型氢钟来满足上述要求。

1.1.3.5 多功能基带关键技术

(1) 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20dBHz),在特定轨道上,下行信号的频率动态很高,X频段下行信号多普勒变化范围为 $[-2.4\text{MHz}, 2.4\text{MHz}]$,多普勒变化率为800Hz/s。常规快速傅里叶变换(FFT)频率捕获方案已无法在上述条件下快速、可靠工作。

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、大动态条件下对各种体制信号接收的高精度频率捕获算法是深空系统接收终端设计的首

要任务。

(2) 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)级甚至到 0.001Hz 以提高接收机的灵敏度,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 800Hz/s 。采用二阶锁相环, 10Hz 的环路带宽能够跟踪的信号动态也仅为 7Hz/s ,无法顺利完成深空任务。

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

(3) 低损耗解调译码技术

为了提高数据通信能力,在深空系统中广泛采用了信道编译码技术。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,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。如采用 $1/6$ Turbo 编码时,在误码率为 10^{-5} 量级时,符号信噪比低至 -7dB 以下,且编译码输入信噪比每变化 0.1dB ,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。

1.1.3.6 系统校零校相

深空天线由于天线口径大、工作频段高,满足天线远场工作条件的标校塔建设难度大,因此需探索无塔条件下校零和校相方案。

(1) 距离零值标校

在无塔情况下,对深空系统主要采用偏馈校零的方案完成地面系统距离零值的标定。在偏馈校零方式下,校零天线被安装在天线主面特定位置,接收天线发射的上行射频,并通过校零变频器转换到下行接收频段,回馈给接收大天线接收机,形成测距闭环。

深空系统偏馈距离零值标校的目的在于,通过对偏馈环路下电波在深空天线系统中的几何传输路径的研究,获取高精度的测距零值。

(2) 相位零值标校

深空地面站跟踪接收机和差通道相位校准有两个方案:射电星校相和快速校相。

射电星校相受两个条件限制：一是要求射电源流量能够满足数字信号处理的信噪比要求；二是射电源尽量为点源，角径要小于天线波束宽度。

快速校相的基本原理是首先在数引方式下控制天线对准目标并进行跟踪，此时波束指向与目标空间位置保持相对固定，等效于静态条件下的天线对塔过程。在此基础上进行天线顶偏设置，完成校相，其基本流程与常规对塔校相一致，算法上要增加波束波导坐标变换，这是波束波导系统的固有要求。

深空任务目标角速度非常小的特点有利于快速校相方案的实施。

1.1.3.7 系统电磁兼容性设计

DSF1 系统具有 S 频段和 X 频段两个工作频段，上行链路两个频段最大发射功率 10kW。下行链路最小可接收信号低至热噪声电平以下，具有极高的接收灵敏度。

深空站采用波束波导射频传输方案来完成上行功率发射和下行高灵敏度信号接收。

在整个波束波导网络中，收发端口之间存在的多条互耦通道将上行大功率信号在各个频段上的频谱分量耦合到接收链路，处理不当会造成严重的 EMC 问题。

系统电磁兼容设计的基本要点有两个：一是当高功放输出功率为 10kW 时，其上行基波频谱泄漏到接收链路前级场放入口的能量不能对 S/X 接收链路形成阻塞，从而确保接收链路工作在线性状态；二是高功率放大器(HPA)输出频谱中，在 S/X 接收频段的噪声功率耦合到接收链路场放入口后引起的系统噪声温度升高不超过 1K，同时功放输出基波及其谐波与接收链路本振组合产生的中频带内交调分量要小于接收系统的最小接收信号灵敏度。

1.2 系统功能与技术指标

1.2.1 主要功能

- 1) 具备对深空探测器平台及载荷的测距、测速及跟踪能力；
- 2) 具备对深空探测器下行遥测(TM)、数传的接收能力；
- 3) 具备对一个目标上行遥控(TC)和数据注入的能力；
- 4) 具备对同一波束内两个目标下行信号同时接收的能力；
- 5) 具备与国际同体制深空设备进行联网工作的能力；
- 6) 具备 VLBI 干涉测量信号采集记录能力。

1.2.2 技术指标

(1) 工作频段

- S 频段：发射 2.025~2.120GHz；接收 2.2~2.3GHz。
- X 频段：发射 7.145~7.235GHz；接收 8.4~8.5GHz。

(2) 系统品质因数

- S 频段： $\geq 41.8 + 20\lg(F/F_0)$ (dB/K) ($F_0 = 2200\text{MHz}$, $E \geq 10^\circ$)。
- X 频段： $\geq 53.3 + 20\lg(F/F_0)$ (dB/K) ($F_0 = 8400\text{MHz}$, $E \geq 10^\circ$)。

(3) 等效全向辐射功率

- S 频段： $\geq 97.3 + 20\lg(F/F_0)$ (dBW) ($F_0 = 2025\text{MHz}$)。
- X 频段： $\geq 108.3 + 20\lg(F/F_0)$ (dBW) ($F_0 = 7145\text{MHz}$)。

(4) 接收灵敏度和接收信号动态范围

- 接收灵敏度： -190dBW (双边环路带宽 10Hz, 无多普勒预报)；
 -210dBW (双边环路带宽 0.1Hz, 有多普勒预报)。
- 接收信号动态范围：120dB。

(5) 测量精度

1) 测距精度(双向)

- 侧音测距随机误差：

$$\sigma_R \leq 1\text{m} (S/\Phi_{\text{载波}} = 20\text{dBHz}, 2B_L = 10\text{Hz}, S/\Phi_{\text{主音}} = 10\text{dBHz}, 2B_R = 0.001\text{Hz}, R \leq 2 \times 10^6 \text{km}, \text{主音频率 } 500\text{kHz})。$$

- 音码混合测距随机误差：

$$\sigma_R \leq 1\text{m} (S/\Phi_{\text{载波}} = 20\text{dBHz}, 2B_L = 10\text{Hz}, S/\Phi_{\text{测距音}} = 10\text{dBHz}, 2B_R = 0.01\text{Hz}, R \leq 2 \times 10^6 \text{km}, \text{主音频率 } 1.5\text{MHz})。$$

- 测距系统误差： $\leq 4\text{m}$ 。

2) 测距精度(三向)

- 测距随机误差： $\leq 2\text{m}$ 。
- 测距系统误差： $\leq 8\text{m}$ (含校零残差、站间时间同步误差等)。

3) 测速精度

- S 频段： $\sigma \leq 1\text{mm/s}$ ($C/N_0 = 20\text{dBHz}$, $2B_L = 10\text{Hz}$, 积分时间 10s)。
- X 频段： $\sigma \leq 0.1\text{mm/s}$ ($C/N_0 = 20\text{dBHz}$, $2B_L = 10\text{Hz}$, 积分时间 60s)。

4) 测角精度

- 跟踪精度： 0.015° (S 频段)、 0.007° (X 频段)。
- 指向精度： 0.02° (S 频段)、 0.01° (X 频段)。