

# 深空测控通信技术发展趋势分析\*

林 墨

(中国空间技术研究院卫星应用系统部·北京·100080)

**摘 要** 为满足 21 世纪我国深空探测任务的需要,参考国外深空测控通信系统的先进技术,归纳和总结了未来相关技术发展的 7 个趋势,为我国深空测控通信技术的发展提供一些参考。

**关键词** 深空探测;测控通信系统;发展趋势

中图分类号:V556.1;V556.5

文献标识码:A

## Trend of Development of Deep Space Tracking and Communication Systems

L N Mo

(Chinese Academy of Space Technology Satellite Application System Department, Beijing 100080)

**Abstract** To meet requirements for China's deep space exploration missions in the 21st century, this paper summarizes the state-of-the-art technologies of foreign deep space tracking and communication systems and points out seven trends of development of related technologies, aiming to provide reference for China's development of deep space tracking and communication technologies

**Key words** Deep Space Exploration; Communication and Tracking System; Development Trend

### 0 引 言

月球和深空探测是载人航天工程之后中国航天战略的新举措,将成为 21 世纪中国航天事业发展的重点领域。由于深空任务时间周期较长,通信距离长、时延大,链路带宽窄,接收信号微弱等一系列原因,使得深空测控通信与地球轨道航天器的测控通信相比差别很大,挑战更多,实现也更为困难。

为了解决深空任务的通信时延、测角以及连续观测等问题,目前国际上采取的措施有:通过加大深空站的口径,提高射频频段,降低接收系统噪声温度,采用先进的光通信技术、信道编译码技术和信源压缩技术等措施来克服巨大的距离损失;运用差分甚长基线干涉仪(VLBI)技术来提供精确测角数据进行导航;立足于全球布设陆基深空网,克服地球自旋影响,提供全天时连续观测。

### 1 深空探测的发展趋势

深空测控通信技术发展迅猛,本节介绍深空测控通信技术今后的发展趋势。

#### 1.1 工作频段以 X 频段为主,并向 Ka 频段发展

自 20 世纪 70 年代以来,X 频段技术已得到广泛使用,目前深空探测器的测控频率基本上采用 X 频段。Ka 频段与 X 频段相比,同等条件下信噪比更高,可以提供的数据率更高。美国 NASA 将在 2010 年之前完成对深空网(DSN)70m 和 34m 设备的 Ka 频段升级。Ka 频段已经在“卡西尼号”(Cassini)深空探测器上得到了应用<sup>[1]</sup>。

欧空局在澳大利亚西部的珀斯附近新建的 35m 深空站已经具备 Ka 频段下行接收能力,并且可以扩展上行 Ka 频段能力;正在西班牙马德里建造的第二个 35m 深空站同时具备 Ka 频段上、下行能力。

\* 收稿日期:2005-03-17

作者简介:林墨(1981-),男,研究生,主要从事深空测控通信领域的技术研究。

## 1.2 天线组阵技术

所谓天线组阵就是利用分布的多个天线组成天线阵列,接收来自同一信号源(深空探测器)发送的信号,并将来自各个天线的接收信号进行合成,从而获得所需的高信噪比接收信号<sup>[2]</sup>。

天线组阵相比单个天线具有下述优点。

**实际使用中的优点** 对于大口径天线来说波束宽度相对较窄,因此天线指向误差就是个大问题。指向精度要求的提高也使得大口径天线的制造越来越困难。天线阵使用口径较小的天线产生相对宽的波束,因此更能容许指向误差。而且天线组阵可以增加口径效率,能够等效实现更大的天线口径。

**操作上的优点** 天线阵列提供了更好的系统操作易用性、维护的灵活性和工作的可靠性。常规的预防性维护可以轮换使用不同天线,使系统全时满负荷工作。使用天线阵列,一个天线单元失效仅仅使得系统性能下降,并不会导致系统瘫痪。同时减少备份件所需要的费用,与全时全功能工作的单个天线所必须的百分之百的备份件要求相比,天线阵列需要的备件数量要少很多。

**成本和花费上的优点** 因为从重量和尺寸考虑,小口径天线更容易建造。大批量、自动化的制造过程可以降低成本。喷气推进实验室(JPL)对于使用小口径天线阵来替代大口径单个天线进行过成本估计,即便计算了附加的多套组阵电子设备也依然可以降低建造成本。

**灵活性上的优点** 天线组阵技术可以提高系统计划的灵活性。新增加的天线单元可以在任务需要的时间内加大整个口径。而且在这个过程中对正在执行任务的设备造成的影响很小,可以根据不同任务的需求设计不同的组阵方案。

**科学应用上的优点** 很多科学应用,比如 VLB I 射电天文观测,都要依靠很长基线的天线阵干涉。今后还可以把该技术应用于“平方公里天线阵列”(SKA)中。

NASA 深空网从 20 世纪 60 年代起就开始研究天线阵技术。依靠深空网的地面天线组阵技术可以提高接收信号的信噪比,也就提高了从探测器接收到的数据量。对于美国深空探测网来说,一直以来他们都努力研究各种天线阵列用来替代 70m 口径的大天线,从而提高对远距离微弱信号的接收能力。通过适当的措施,这种阵列系统被设计成可以扩充,并且其  $G/T$  值也可以达到 70m 口径天线的水平。

目前,射电天文学和 NASA 深空网计划研制“平方公里天线阵列”。SKA 作为一个国际合作计划,将由美国、加拿大、欧洲、澳大利亚、中国和印度共同开展。具体实施计划由 SKA 科学工作小组制定。

另外一种正在研究的技术是上行链路组阵技术。这种技术可以增加航天器前端链路的带宽,好处有:在航天器发生故障处于危险状态时,建立上行链路;在时间紧迫的情况下,可以向航天器上传特殊任务;对未来的深空载人任务提供支持。

基于软件合成的阵列系统也是一种潜在发展需求。该系统利于从记录信号中抽取更多有用信息。

虽然今后可以建造更多的 34m 口径天线或者 70m 口径天线,但是一座全新的 34m 天线站——包括天线单元构造、上下行电子设备、整机测试——至少需要 3000 万美元才能完成。同时因为单站天线口径毕竟有限,所以最大限度地利用每一座天线组成天线阵列就成了今后一段时间重点研究的课题,并且可以相当程度上节省天线运营费用。

另外,出于性价比考虑,除了增加天线单元的费用之外,天线阵所需全部结构和电子设备的花费要比制造单个的大口径天线小。因此,今后深空测控天线组阵技术的主要发展方向将是替代大口径天线的超大规模天线阵列。

## 1.3 深空探测无线电测量新技术

作为目前世界范围深空探测领域的主导力量,NASA 的喷气推进实验室在新书 *Radiometric Tracking Techniques for Deep Space Navigation* 中将单向测速、再生测距技术、新型甚长基线干涉技术(FSR/VSR)、连接元干涉技术(Connected Element Interferometry, CEI)、同波束干涉技术(Same Beam Interferometry, SBI)作为今后的发展方向<sup>[3]</sup>。其中后两项技术将成为今后一段时间内研究和试验的重点。

连接元干涉技术(CEI)是 NASA 今后一段时间重点研究和使用的实时测角技术。两个观测站间隔仅 21km,之间用宽带光纤连接,采用统一的原子钟,用光纤分配频率和时间标准,观测站将收到的信号用光

纤实时传到数字处理中心处理。其优点之一是测角精度可达到 80nrad,甚至更好,和 VLB 测角精度近似;优点之二是可用于实时导航。从 20 世纪 90 年代起 CEI 技术进行了多次试验:1990 年 11 月 11 号到 18 号及 20 号到 27 号这两周时间内,使用戈尔德斯顿深空站 DSS13-DSS15 之间的连接元干涉仪对“伽利略号”探测器进行跟踪。1991 年 6 月 18 号,使用 CEI 在 DSS13-DSS15 基线上观测“麦哲伦号”航天器,并且和 DSS15 观测站进行的日常遥测一起进行。观测到的干涉条纹与“麦哲伦号”的在 2.3GHz 和 8.4GHz 上的载波相对应。特别是在 1992 年 2 月在木星重力探测任务中对“尤利西斯号”的精确测角将改善木星星历表。这将有利于 1995 年“伽利略号”靠近木星的导航任务。在这之后,CEI 观测将集中精力在“尤利西斯号”飞越木星的过程中。这些数据的处理一直在进行。初步试验表明,CEI 系统可以达到 50nrad 的精度。这种技术为实时测距、测角定位开创了一个新途径,可望在 21 世纪得到广泛应用。

同波束干涉 (SBI) 技术是指当两个航天器在角度非常接近的情况下,它们可以在地面天线的同一波束内观测,使用两个深空站天线对两个航天器同时观测,可以产生差分干涉测量,并可以提供在天平面上两个航天器非常精确的相对角位置测量。1991 年 8 月,当时“麦哲伦号”和“先驱者号”正处于金星轨道,NASA 对它们实现了 SB 测量并验证了其在轨道确定中有良好的作用。如今 SBI 已经在 NASA 的火星探测任务中用于对火星着陆器和火星车的相对位置测量,并且火星着陆器和火星探测器的相对位置的精度在几米的量级。未来,当更多的航天器进入火星轨道时,SBI 技术可以用于改善轨道的确定而且减少航天器对于地基(地球)测控资源的要求。所有火星固定轨道内的航天器都可以用一个 34m X 频段的 1mrad 的波束观测到<sup>[4]</sup>。SBI 技术可以作为今后火星测控导航战略的一部分,或者为今后火星测控网络提供备份能力。

#### 1.4 各探测器之间组网测控通信和航天器对航天器的跟踪技术

由于未来的深空探测将采取星座和组网的工作方式,通信中继技术将必不可少。它将为星座或网络中的探测器与探测器之间、着陆器与轨道器之间、巡视车与基地站之间、机器人与其他装置之间提供通信保障<sup>[3]</sup>。

航天器对航天器的跟踪技术 (Spacecraft-to-Spacecraft Tracking) 将为今后火星等其他星球的探测提供更多定位和导航支持。在历史上,航天器对航天器跟踪测量在行星探测任务中用得不多。但是最近随着一些新型任务概念的提出,包括航天器编队飞行和在火星或其他地方所需的就地跟踪(精度达到或接近地球轨道任务的跟踪精度)的需要,新型航天器之间微波跟踪和通信设备的设计得到大力发展。在 2001 年 NASA 的“重力探测和天气实验”(GRACE) 计划中,设计改变原来的 GPS 接收设备,包括了卫星交联测距能力 (cross-link ranging capability) 和星跟踪处理技术。航天器对航天器跟踪技术概念的核心是设计一种相关设备——“自主编队飞行器”(AFF)。第一个 AFF 称为“星座通信和导航发射机”(CCNT),2003 年会搭载在“空间技术-5”(ST-5) 探测器上。ST-5 的任务是验证“纳星星座技术”。另一种 AFF 类型的发射接收设备是用来交联通信和精确测距,测距能力将在未来火星通信和跟踪网络下进行研究。这个预想中的“火星网络”(Marsnet) 包括 6 颗低轨卫星 (800km) 和其他停泊轨道卫星。这个网络可以用于科学轨道器与邻近的航天器、火星表面着陆器和漫游器之间的通信。从未来的航天器对航天器测控导航应用远景来看,这种星座潜在优势惊人。在航天器接近火星时,我们将可以使用 1 个或多个轨道器对航天器捕获和降落阶段进行实时位置确定。

总之,未来深空探测任务要求新型的组网测控通信系统和飞行导航系统。空间干涉仪的高精度编队控制和火星及其他目标的导航的迫切需求都将进一步促进功能更强大的飞行无线电收发设备的发展。因此,航天器组网测控通信技术和航天器对航天器跟踪和通信 (C&T) 技术可能将在 21 世纪的前 10 年受到空前的重视。

#### 1.5 光通信技术<sup>[6]</sup>

由于光通信有大容量、非相干性、轻便小型等许多优点,它将会作为未来深空探测的重要信息传输手段而大力发展。预计光通信在 2010 年前后将获得广泛应用。目前正在进行高速宽带光通信终端的试验,光通信终端的研制成功将可以充分发挥深空探测器上的高分辨率、宽视场成像仪的作用而不受数据传输

能力的限制。同时可以大幅降低天线口径(从微波频段数米到激光频段的数十厘米),这不但可以减轻航天器发射过程中大型天线展开的困难,减轻航天器的重量、体积,也减少了不必要的天线驱动功率<sup>[7]</sup>。

### 1.6 天基测控通信网和激光通信技术的结合

国内著名深空探测测控专家姜昌先生提出了一种基于天基深空通信测控网络的构想<sup>[8]</sup>。该构想区别于目前主要航天国家所采用的陆基通信测控网络的构成,提出了另外一条技术道路。

理论上,地心夹角大于  $34.634^\circ$  的 2 颗 GEO 轨道测控卫星  $S_1$ 、 $S_2$ ,通过在国家陆地领土内建立一个有 2 副 X 频段天线的管理站控制管理,即可进行深空探测的全天候、全方位观测,避开复杂的国际合作。从陆地管理站到测控卫星选择 S/X 频段的上/下行链路。在巡航段及行星段,从  $S_1$ 、 $S_2$  两颗测控卫星至深空探测器之间的测控通信,建议采用激光频段。两颗测控卫星的转发技术采用数据再生技术,处理收发信号,在调制到 S/X 频段发送回地球。

该构想要求激光波束捕获技术,并且对于激光功率要求较高,同时航天器姿态抖动限制也比较严格。以我国现有综合国力暂时没有可能实现,但作为一种具有创见性的设想,可以为今后人类的深空测控系统的构建提供一种宝贵的参考。

### 1.7 超低噪声温度放大器(LNA)<sup>[5]</sup>

深空探测任务中返回信号十分微弱,必须在信号解调和数据处理之前进行信号放大。信号的接收质量除信号功率外还取决于信噪比,在深空探测任务中,虽然采用面积很大的天线接收,但收集到的信号依然非常微弱,为了获得高的信噪比,努力降低地面接收系统的噪声水平,获得尽可能高的  $G/T$  值,也是一个重要方面。目前美国等在深空探测领域技术领先的国家普遍采用低温制冷超低噪声温度放大器。HEMT(高电子迁移率晶体管)是目前最先进的低噪声放大器(LNA)。HEMT LNA 目前由 JPL、应用物理实验室(APL)、NRAO(美国国家射电天文观测站)和通用电气公司(GE)联合进行研究。HEMT 制冷条件相对比较宽松,冷却到物理温度 15K 即能工作,设备较为简单,耗资少。目前为止,HEMT 在 X 频段工作时,噪声温度为 4K;在 Ka 频段工作时,噪声温度为 11K。制冷温度提高后,也提高额系统的可靠性,降低了价格。由于它的灵敏度比原来使用的行波脉泽(TWM)放大器的灵敏度好,今后在进一步实验完成后,将装备美国深空网的所有台站。

## 2 结束语

展望 21 世纪的月球和深空探测,人类以新姿态重返月球,大规模的行星际探测也将成为新世纪重要的航天活动之一。国外的航天大国在月球和深空探测方面已经有近 40 年的科学研究和工程实践,有相当多的技术和工程经验可以借鉴学习。21 世纪我国若想在月球以及深空探测方面有所建树,深空测控系统的研究和建设具有举足轻重的作用和意义。

### 参考文献

- [1] Jones C P. Cassini Program Update[C]. AIAA Space Programs and Technologies Conference and Exhibit, September 21-23, 1993, Huntsville, AL.
- [2] Rogstad D H, Mileant A, Phan T T. Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network[M]. Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [3] Thomson C L, Border J S. Radiometric Tracking Techniques for Deep Space Navigation[M]. Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- [4] Folkner W M, Border J S, Nandi S, et al. Precise Tracking of the Magellan and Pioneer Venus Orbiters by Same-Beam Interferometry-Part I: Orbit Determination Analysis[R]. TDA Progress Report 42-113, Vol 1 January-March, 1993, [2000-10-16]. [http://tma.jpl.gov/progress\\_report/issues.html](http://tma.jpl.gov/progress_report/issues.html)
- [5] 姜昌, 范晓玲. 航天通信跟踪技术导论[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2003.
- [6] Wilson K, Enoch M. Optical Communications for Deep Space Missions[J]. IEEE Communication Magazine, August 2000: 134-139.
- [7] Yuen J. Deep Space Telecommunications Systems Engineering[M]. New York: Plenum Press, 1983.
- [8] 姜昌, 黄宇民. 研究与开发天基测控通信跟踪网的倡议[J]. 飞行器测控学报, 1999, 18(4): 28-37.