

片反射阵进行了分析,详细研究阵列单元的反射相位特性,设计并加工了37个单元的阵列,测试结果证明实现了较好的极化变换功能。

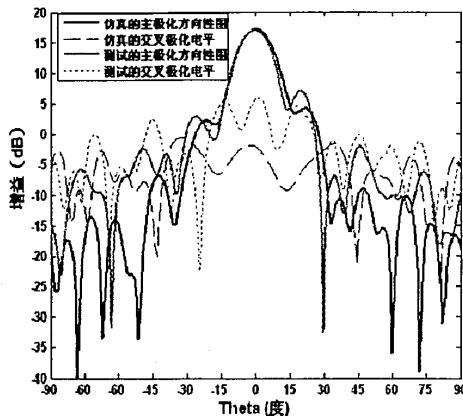


图8 仿真和测试的辐射方向性图(10 GHz)

参考文献

- [1] J Huang. Microstrip reflectarray[C]. IEEE AP-S Int Symp. Antennas Propagat, 1991, 2: 612~615.
- [2] D M Pozar and T A Metzler. Analysis of a reflectarray antenna using microstrip patches of variable size[J]. Electron. Lett., 1993, 29(8): 657~658.
- [3] W Menzel, D Pilz, and M A Tikriti. Millimeter-wave folded reflector antennas with integrated polarizers[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1995, 43(10): 835~840.
- [4] J A Encinar. Design of two-layer printed reflectarray using patches of variable size[J]. IEEE Trans. on AP, 2001, 49(10): 1403~1410.
- [5] W X Zhang, Z H Wu, L Zhang, P Lu, Z G Liu, and W Shen. On the printed reflectarray with polarized transformation[C]. Proc. Int. Workshop Antenna Technol, Singapore, 2005, 59~62.
- [6] Z H Wu, W X Zhang, Z G Liu, and W Shen. Reduction of feed blockage in reflectarray by orthogonally polarized transformation[C]. IEEE Antennas Propagat. Int. Symp., 2005, 4A: 325~328.
- [7] J A Encinar. Broadband design of three-layer printed reflectarrays[J]. IEEE Trans. on AP., 2003, 51(7): 1662~1664.
- [8] H H Chen, W X Zhang, Z H Wu and H L Sun. Study on three-layer reflectarray of microstrip patches with polarization transform[C]. Proc. EUCAP., 2006.
- [9] 吴知航. 宽频带极化变换微带反射阵天线的研究与应用[D]. 南京: 东南大学无线电工程系, 2005

深空测控网的大口径天线与天线组阵

李海涛

(北京跟踪与通信技术研究所 100094)

摘要: 本文介绍了国外深空测控网的大口径天线和天线组阵技术和特点,分析了未来深空测控网发展中大口径天线与中小口径天线组阵的关系。

关键词: 深空测控网、大口径天线、天线组阵

1 前言

深空测控通信系统是人类与深空探测器联系的通道和纽带,在深空探测任务中起着关键的作用。由于深空任务周期较长、通信时延大、信号微弱、数据更加关键可贵等一系列原因,使得深空测控通信与地球轨道航天器的测控通信有着明显差异,实现起来更为困难。从技术角度来讲,深空探测的测控通信无论对星上设备还是对地面设备都存在挑战,可以带动许多相关技术的发展,特别是深空站大口径高效率天线技术领域发展需求更为迫切。

2 深空测控中的大口径天线

目前美国、欧空局、俄罗斯和日本都已经建立了以大口径天线为基础的深空测控通信系统或测控通信网，用于对月球和深空探测器的测控通信。

美国 NASA 建立了全球分布的地基测控深空网（DSN），用于对执行月球、行星和行星际探测任务的航天器进行跟踪、导航与通信，可以提供双向通信链路，用于对航天器的指挥控制、跟踪测量、遥测、图像和科学数据接收等。深空网由在全球按间隔 120° 分布的三处深空通信测量综合设施组成，分别位于美国加州戈尔德斯顿、澳大利亚堪培拉和西班牙马德里。每处综合设施都建有多个深空设备，配备大口径抛物面天线（主要有 70m、34m，S、X 频段上、下行，Ka 频段下行）、高灵敏度接收系统、信号处理中心和通信网络系统。

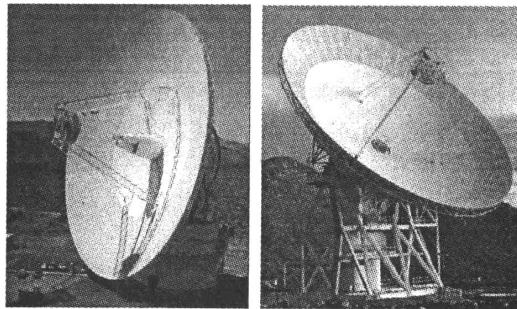


图 2-1 美国 NASA 深空网的 70m 天线（左）和 34m BWG 天线（右）

欧空局（ESA）为了支持其以火星和彗星探测为先导的深空探测任务，在澳大利亚西部的珀斯附近建有 35m 深空站，天线采用波束波导馈电形式，工作频段为 S、X（上、下行）和 Ka（下行）；2005 年在西班牙建成了第二个 35m 深空站，工作频段为 X（上、下行）和 Ka（下行），并计划在加拿大西部或南美州再建一个深空站，最终建成全球分布的深空测控通信网。

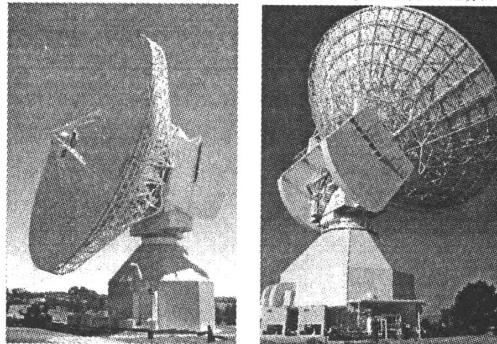


图 2-2 ESA 新诺舍（左）和塞布莱罗斯（右）的 35m 天线

深空测控通信网的主体是具有大口径天线的深空站，考虑到深空测控通信的国际合作性和现有技术水平以及费效比等因素，在深空站的频率选择上，应采用国际通用的 S、X 和 Ka 三频段，频率范围应覆盖 NASA 和 ESA 深空站的频率范围，以便于将来进行国际联网，具体工作频段的频率范围如表 2-1 所示：

表 2-1 深空站测控通信频率范围

频段	上行(MHz)	下行(MHz)
S 频段	2025~2120	2200~2300
X 频段	7145~7235	8400~8500
Ka 频段	34200~34700	31800~32300

天线口径的选取主要考虑以下因素：

- 满足月球探测二期和未来火星任务的测控通信需求；
- 尽量加大地面天线口径，由此可以减小对地面及探测器发射机、接收机的要求；
- 国内研制生产相关频率大口径天线的技术储备和能力；

- 研制成本和周期；
- 利于进行国际合作；
- 未来的技术发展方向。

由于天线的设计生产难度及研制经费与天线的口径大小成指数增加关系，而设备作用距离与天线口径成线性关系，因此单个天线口径增加到一定程度后天线建设的费效比将明显变差。此外未来深空探测的测控通信频率会更高，可能会达到 40~50GHz，更大口径天线将难以满足要求。

目前美国、欧洲的深空站普遍采用的是工作频段在 S、X 和 Ka 频段的 34m 或 35m 口径天线，Ka 频段的下行接收能力已经具备，部分站具备 Ka 频段上行发射能力。ESA 35m 深空站的成本约为 4000 万~5000 万欧元（1998 年），约合 4~5 亿元人民币。由于单个天线的费用随口径变化（通常取 D^2 ），如果建 70m 天线，在理论上天线增益比 35m 提高约 6dB（NASA 70m 天线增益实际比 34m 天线高约 5.5dB），而成本要增长到接近 20 亿人民币。美国在论证现有 70m 天线的替代方案过程中，就提出过建造新 70m BWG 天线的方案，初步估计建设经费需求在 2 亿美元（2000 年）左右，也约合人民币接近 20 亿元，这还不包含前期关键技术突破、试验验证等方面的投资。

深空站初期应主要针对我国的月球探测工程并着眼于未来的以火星为先导的行星和小行星深空探测任务，满足其基本的测控通信任务需求。

随着天线组阵技术的发展，国外深空站的建设不再倾向于建造更大口径的天线。4 个 35m 天线组阵的性能等价于 1 个 70m 天线，但成本相差甚远，4 个 35m 天线的深空站共需约 16~20 亿人民币，1 个 70m 天线则需要 20 亿以上，而且 70m 天线设计建造的技术难度和维护成本目前还难以确定。美国 NASA 在论证现有 70m 天线的替代方案过程中，提出了建造新 70m BWG 天线、4 个 34m 天线组阵、大量小型抛物面天线组阵、平面天线组阵、高效率反射单元（SPHERE）球形对天线概念等几种方案，从目前 NASA 公布的 2010 深空网规划可以看出，其将要在全球分布的 3 处深空通信综合设施各建设 4 个 12m 口径天线的天线阵，用以替代即将退役的 26m 站，支持其月球任务；并计划在 2020 年建成达多到 400 个 12m 天线的大规模天线阵，最终实现 240m 的等效天线口径，在 X 频段实现相当于目前 70m 天线 120 倍的通信能力。

综合考虑任务需求、技术难度、技术性能、研制建设成本和周期等因素，并着眼于未来技术的发展，特别是天线组阵技术的飞速发展，建议初期深空站天线选择 35m~50m 口径的 S、X、Ka 三频段天线，具体的口径可以根据投入的资金和研制进度要求最终确定。

3 深空测控中的天线组阵技术

天线组阵技术是利用分布在不同地方多个的天线组成天线阵列，接收来自同一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，是探测器高增益天线故障或进入安全模式时下行接收的有效解决方案，也是未来深空测控通信技术的一个重要发展方向。NASA 已将中小口径天线组阵技术与深空光通信技术和行星际通信网络技术并列为实现未来深空探测测控通信的三个主要技术途径。

天线组阵具有下列特点：

第一，天线组阵可以增加口径效率，能够超过现有的最大口径天线，在需要的时候可以为某个任务提供支持，实现更高的资源使用。

第二，提供了更高的系统可用性、维护的灵活性和工作的可靠性。常规的预防性维护可以在轮换使用不同天线的基础上实现，使系统能全时全功能工作。使用单个天线，故障可能会使系统失效。使用一个天线阵列，一个阵元素天线的失效只会使系统性能下降，而不会导致整个系统瘫痪。

第三，可以减少用于备件的费用。以取代保证单个天线全时全功能的工作所必需的 100% 的备份件要求，天线阵列只需要一个在一个分数量级的备份件配置方案。

第四，可以通过使用更小口径的天线来实现降低成本。因为从重量和尺寸考虑，小口径天线更容易建造。制造过程可以实现批量化、自动化，从而降低成本。

第五，天线组阵还可以提高系统的可操作性和计划的灵活性。新增加的天线单元对正在执行任务的设备不会有影响；可以根据不同任务的需求设计不同的组阵方案和工作计划安排。

此外，具有长基线的天线阵可以用来支持有关的科学应用，如甚长基线干涉（VLBI）和射电天文等。

天线组阵的基本原理如图 3-1 所示。地球表面的两个天线，观测一个遥远的射电源并构成一个

简单的干涉仪。用矢量表示，自无限远处的射电源的无线电波的到达时间差 τ_g ，可以简单地表示为

$$\tau_1 - \tau_2 = \tau_g = \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{i}}{c} = \frac{\mathbf{B} \sin(\theta)}{c} \quad (3-1)$$

其中 \mathbf{B} 是从 1 号天线轴交点延伸到 2 号天线轴交点的基线矢量， \mathbf{i} 是指向射电源的单位矢量， c 是光速。可以写出以基线和信源方向表示到达时间差的表达式。

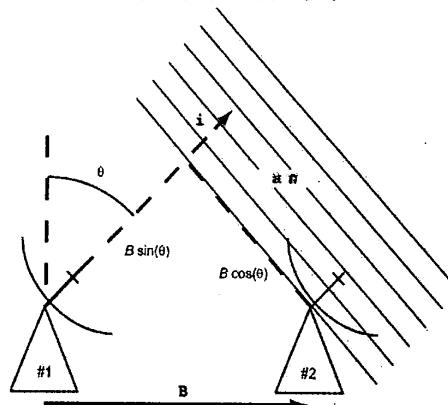


图 3-1 简单干涉仪

假设每个天线正在无线电频率 f 上观测一个遥远的强信源，每个天线的输出通过等长度电缆连接到一个乘法器上。该乘法器（或称为相关器）在时间 t 的输出，取下面的形式：

$$V_{out} \propto 2 \sin(2\pi f t) \sin(2\pi f(t - \tau_g)) \quad (3-2)$$

如果展开该式，并令它通过一个低通滤波器，我们得到的结果是

$$V_{out} \propto \cos(2\pi f \tau_g) \quad (3-3)$$

这只是来自干涉仪各单元电压简单的关系相乘。如果已知 τ_g 或者可以测量出它，就可以在两个天线的一条或两条电缆中加一个补偿延迟，使总的电缆延迟和几何延迟完全抵消。这样乘法器的 V_{out} 最大，且电压是同相的。如果我们加入一个加法电路与乘法器并联，我们就可以获得两个天线电压的相关和。这种处理通过相关使两信号的相位对齐然后将其相加，就构成了一个可以进行天线组阵的系统。

对于一个理想天线阵（无合成损失）的 G/T 值是

$$\left[\frac{G}{T} \right]_{array} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{G}{T} \right)_i \quad (3-4)$$

如果阵中每个天线的 G/T 值是完全一致的，则有：

$$\left[\frac{G}{T} \right]_{array} = \left(\frac{G}{T} \right)_0 \sum_{i=1}^N 1 = N \left(\frac{G}{T} \right)_0 \quad (3-5)$$

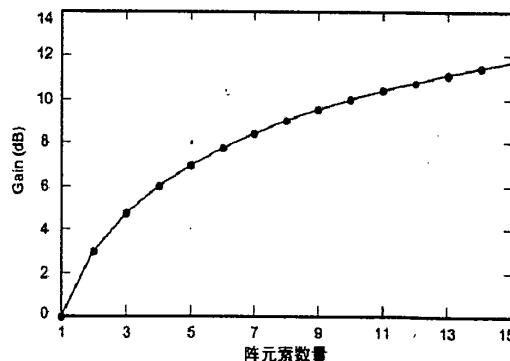


图 3-2 阵元素数量与阵增益的关系

随着深空测控通信频段的不断提高，大口径天线巨大的重力变形所引起的效率下降等一系列问题，而解决这些问题的成本更是难以估计。而中小口径天线在这方面具有先天的优势，如果能够形成规模生产，成本将会进一步降低。可以说天线组阵是在射频范围内解决深空测控通信问题的最终技术途径。

作为支持深空探测的一种灵活的技术手段，其在航天大国已经获得了很好地发展和应用。这一极具发展潜力的新技术，对我国未来的深空探测具有很强的应用价值，特别是在支持未来更深远的深空探测中将发挥决定性作用。

4 未来深空测控网大口径天线与天线组阵的关系

未来深空测控网的建设应该首先以大口径多频段天线的深空站建设为先导，初步解决月球探测和火星探测任务的测控通信问题，在全球范围内建 2~3 个 35m~50m 口径的大天线，具备支持火星范围内测控通信能力。同时积极开展天线组阵技术的关键技术研究和演示试验，结合计算机技术和高速数字信号处理技术的发展，力争在 5~10 年内取得全面突破。

在未来的深空站长远规划中，应充分考虑天线组阵技术的应用要求，在已建成的大口径天线附近建设多组中小口径的天线阵，这样每个站点的多组天线阵和一个大口径天线即可以同时支持多个任务，又可以在必要时进行更大规模的天线组阵，支持有特殊要求的任务，如高速数据的接收等。同时，由于大口径天线的接收信号的信噪比比单个小口径天线要高很多，可以对中小口径的天线阵进行频率引导。

随着任务需求的增长和国家投入经费的累积，以大口径深空站为核心的天线阵规模将不断扩大，可以支持更高数据率和更远距离的测控通信能力。在射频范围内，甚至可以实现支持到覆盖太阳系边缘探测活动的测控通信能力。

参考文献：

- 1 Wolff S, Deep Space Network, NASA, URL: <http://jpl.nasa.gov/dsn/index.html>.
- 2 Catherine L. Thornton , James S. Border Radiometric Tracking Techniques for Deep- Space Navigation (JPL Publication 00-11) October 2000 Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- 3 David H .Rogstad , Alexander Mileant, Timothy T. Pham Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network (JPL Publication 03-001) January 2003 Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology.
- 4 William A. Imbriale Large Antennas of the Deep Space Network (JPL Publication 02-6) February 2002 Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology'.
- 5 ESA's 35-Meter Deep Space Antennas at New Norcia/Western Australia and Cebreros/Spain. ESOC/ESA Publication.

四维天线阵的频域全波分析

杨仕文 朱小文 聂在平

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都, 610054)

摘要 将四维天线阵的时域激励进行频域等效，并采用传统的频域全波分析方法分析了四维天线阵的辐射特性。计算了具有时间调制特性孔径尺寸可变以及具有双向运动相位中心特性的两种印刷偶极子四维天线阵的辐射特性，结果与已有文献报道的实验结果吻合良好。为四维天线阵的精确分析与设计提供了重要的参考依据。

关键词 四维天线阵, 时间调制, 全波分析

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>