



深空网的天线组阵技术

(美) David H. Rogstad Alexander Mileant Timothy T. Pham 著

北京跟踪与通信技术研究所 组织翻译

李海涛 译 张纪生 校



深空网的天线组阵技术

(美) David H. Rogstad Alexander Mileant Timothy T. Pham 著

北京跟踪与通信技术研究so 组织翻译

李海涛 译 张纪生 校

清华大学出版社
北京

David H. Rogstad, Alexander Mileant, Timothy T. Pham

Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network

EISBN: 0-471-46799-5

Copyright © 2003 by John Wiley & Sons, Inc. All Rights reserved.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体字翻译版由美国约翰·威立父子公司授权清华大学出版社独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2005-2650

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

深空网的天线组阵技术/(美)罗格斯塔(Rogstad, D. H.), (美)米兰特(Mileant, A.), (美)彭(Pham, T. T.)著;李海涛译. —北京: 清华大学出版社, 2005. 5
(JPL 深空通信与导航丛书)

书名原文: Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network

ISBN 7-302-10906-0

I. 深… II. ①罗… ②米… ③彭… ④李… III. 天线阵—研究 IV. TN820.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 040572 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 石 磊

文稿编辑: 赵从棉

封面设计: 李海涛

印 刷 者: 北京四季青印刷厂

装 订 者: 三河市春元印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 153×235 印张: 9.25 字数: 151 千字

版 次: 2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-10906-0/TN·251

印 数: 1~3000

定 价: 39.00 元

JPL 深空通信与导航丛书

编译委员会

主任 于志坚

委员 匡乃雪 董光亮 孙 威

李海涛 李 平

丛书译序

进入 21 世纪以来,随着美国机遇号、勇气号火星探测器成功登陆火星,卡西尼号探测器飞抵土星并成功释放惠更斯号探测器着陆土卫六,深空探测越来越成为全球关注的焦点。美国宣布将在 2015 年前后将宇航员重新送上月球,在那里建立永久性基地;在 2030 年之后,美国宇航员将前往遥远的火星探险。随着人类探索外太空活动的深入,深空探测正逐步成为航天活动的新热点。

我国于 2000 年发布的《中国的航天》白皮书指出,深空探测是指对太阳系内除地球外的行星及其卫星、小行星、彗星等的探测,以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探测。它是继卫星应用、载人航天之后的又一航天技术发展领域。

月球探测和火星探测将是 21 世纪空间探测的重点领域。我国探月工程计划的启动是中国走向深空探索的第一步,标志着我国深空探测的开始,也是未来进行更远深空探测的必然要求。随着我国经济和科技实力的不断增强,进一步开展深空探测,展开对火星、小行星和其他太阳系内行星的探测将是我国未来深空探测的目标。

北京跟踪与通信技术研究所以作为我国测控领域的技术总体单位,广大科技人员长期跟踪国际深空测控领域的技术动态和发展方向,并对深空测控通信技术进行了预先研究。此次我所组织翻译的《JPL 深空通信与导航丛书》是美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)编著的一套关于深空探测器测控通信技术的专著,该套丛书总结了美国 NASA 近 50 年来深空测控通信工程技术的经验,是从总体上了解和掌握深空测控通信技术不可多得的教材。同时,书中提供的参考文献为读者进一步深入研究和學習提供了帮助。相信该丛书的翻译出版不仅对深空测控领域的科研、工程 and 教学人员具有较高的参考价值,而且对于我国未来深空测控通信系统的总体设计和建设以及相关技术的研究都具有一定的指导意义。

北京跟踪与通信技术研究所以

于志望

2005 年 3 月

丛书序

1998年,美国国家航空航天局(NASA)在加州理工学院的喷气推进实验室(JPL)成立了深空通信和导航系统精英中心(DESCANSO)。DESCANSO负责管理和促进能够满足未来深空探测对通信和导航技术需求的创新和改革。

DESCANSO的目标是实现在任何时间、任何地点的连续通信和精确导航。为了支持这一目标,DESCANSO努力探寻和提倡新概念、新系统和新技术;培养关键的技术人才;主办报告会、专题讨论会和论坛,来实现互动和思想交流。

《JPL深空通信与导航丛书》由在各自领域有多年经验的科学家和工程师撰写,通过交流关键技术领域的最新技术知识为创新奠定基础。该丛书归纳了JPL在几十年的深空探测研究过程中获得的基本原理和实践经验,同时还介绍了值得赞美的成果和应该吸取的教训。该丛书将作为新一代从事本领域研究的科学家和工程师的指南。

Joseph H. Yuen
(DESCANSO 负责人)

前 言

本书介绍深空网(DSN)中天线组阵技术的发展和应⽤,为那些希望了解这一已经研究成功并已实现的技术的人员提供入门指导。书中并没有对组阵这一主题进⾏全面的讨论,只包括 DSN 已经使⽤的那些相关部分。

虽然基带组阵、符号合成和载波组阵技术在 DSN 历史中相当早的时候就进⾏过研究和开发,但直到进⼊木星范围的伽利略探测器上的主天线发⽣故障,天线组阵才显示出其重要作用。为了应对这一危机,对全频谱组阵和复符号合成两种⽅法进⾏了分析。虽然这两种⽅法都得到了进⼀步开发,但最终采⽤了全频谱组阵来支持伽利略数据重放。这一努⼒非常成功,后续的全频谱组阵提供了比伽利略任务更高的数据率,可以同时利⽤戈尔德斯顿综合设施内多达 6 个天线进⾏组阵。除了给 70m 天线提供备份外,该全频谱处理阵(FSPA)可以使未来的深空任务在不同的时间使⽤数量不同的天线,从而使资源的利⽤最优化。这种能力在 DSN 其他的综合设施内也已经实现。

我们在本书中对这一技术的发展进⾏了描述,包括某些历史背景,对几种组阵⽅法的分析,这些⽅法及其组合的对比,用于获得合成加权值的几种相关处理技术的讨论,几项组阵试验的结果和对未来研究的一些建议。这些内容摘自许多在 JPL 参与组阵技术和能⼒开发工作的同事们的著作。我们对在 DSN 天线组阵中扮演重要角色的诸多的科学家、⼯程师、测试和操作人员深表感谢。最后我们感谢 NASA 及其深空网,特别是伽利略⼯程在开发这一令人兴奋的能⼒中所起的重要作用。

David H. Rogstad
Alexander Mileant
Timothy T. Pham

致 谢

我们要特别感激致力于这项工作的 George M. Resch (1941—2001) 在寻求利用甚长基线干涉 (VLBI) 技术和设备进行全频谱组阵过程中不屈不挠的支持, 并以此书献给他。他的鼓励和专业知识的使得组阵技术从最初的技术研究项目最终成为增强伽利略工程遥测能力的方法。

我们还要对那些为 DSN 组阵技术开发和后来对本书该主题很多部分做出贡献的众人表示感谢。在这里不能一一列举每个人的名字, 但要在这里特别提到那些在材料的准备中做出重要贡献的人: Roger A. Lee, Robert Kahn, Andre Jongeling, Sue Finley, Dave Fort, William Hurd, James Ulvestad, Biren Shah, Sampson Million, and Joseph Statman。需要单独提出感谢的是 Sami Hinedi, 他和另一个作者 (Alexander Mileant) 的工作为第 5 章到第 7 章接收机和阵分析的大部分内容提供了基础。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 组阵的优点	2
1.1.1 性能优点	2
1.1.2 可操作性优点	3
1.1.3 成本优点	3
1.1.4 灵活性优点	3
1.1.5 科学优点	4
参考文献	4
第 2 章 深空网组阵的背景	5
2.1 早期的发展	6
2.2 发展现状	7
2.3 现有能力的预期应用	8
参考文献	9
第 3 章 组阵的概念	10
3.1 作为干涉仪的阵列	10
3.2 可检测性	12
3.3 天线和阵的增益限制	13
3.4 系统温度	14
3.5 可靠性和可用度	16
参考文献	19
第 4 章 组阵技术概述	20
4.1 全频谱合成(FSC)	20
4.2 复符号合成(CSC)	21

4.3 符号流合成(SSC)	22
4.4 基带合成(BC)	23
4.5 载波组阵(CA)	24
参考文献	25
第5章 单台接收机的性能	26
5.1 基本公式	26
5.2 恶化和损失	28
参考文献	32
第六章 组阵技术	33
6.1 全频谱合成(FSC)	33
6.1.1 遥测性能	38
6.2 复符号合成(CSC)	41
6.2.1 遥测性能	44
6.3 符号流合成(SSC)	45
6.4 基带合成(BC)	48
6.5 载波组阵(CA)	51
6.5.1 基带载波组阵方案	52
6.5.2 中频载波组阵方案	53
参考文献	55
第7章 组阵的组合与比较	56
7.1 组阵的组合	56
7.2 数值实例	59
7.2.1 先驱者10号	59
7.2.2 旅行者2号	61
7.2.3 麦哲伦号	63
7.2.4 伽利略号	64
7.3 结论	70
参考文献	71
第8章 相关算法	72
8.1 概述	72

8.2	Simple 算法	73
8.3	Sumple 算法	74
8.4	Eigen 算法	75
8.5	最小二乘法	75
8.6	仿真	75
	参考文献	76
第 9 章	目前的组阵能力	77
9.1	设备描述	77
9.2	信号处理	80
9.2.1	相关	80
9.2.2	延迟补偿	83
9.2.3	合成	83
9.3	结论	83
9.3.1	遥测阵增益	84
9.3.2	无线电外测的阵增益	86
	参考文献	86
第 10 章	未来的发展	88
10.1	平方公里阵	89
10.2	阿伦望远镜阵	90
10.3	DSN 的大型阵	92
10.3.1	相关	96
10.3.2	监视和控制	97
10.3.3	信号发送	97
10.3.4	维护	97
10.3.5	数据路由选择	98
10.4	上行链路阵	98
10.4.1	电子设备稳定性	99
10.4.2	对流层变化	99
10.5	软件合成器	99
10.6	结束语	100
	参考文献	100

附录 A 天线定位	102
附录 B 阵的可用度	104
参考文献	105
附录 C 解调过程	106
C.1 信号模型	106
C.2 载波解调	106
C.3 副载波解调	107
C.4 符号解调	107
附录 D DSN 天线的伽马因子	109
参考文献	109
附录 E 闭环性能	110
附录 F 副载波环和符号环的 SNR 性能	111
F.1 副载波 I 和 IQ 环	111
F.2 数字数据跳变跟踪 I 和 IQ 环	114
参考文献	118
附录 G 复符号合成的公式推导	120
G.1 式(6.2-5)的推导	120
G.2 式(6.2-1)的推导	120
总参考文献	122
缩略语	130

第 1 章 概述

随着来自逐渐远去的深空航天器到达地面的信号变得越来越弱,需要一种能补偿信噪比(SNR)降低的方法。最大天线口径和最低接收机噪声温度已到极限,提高有效 SNR 的惟一方法就是对来自几个天线的信号进行合成,称为组阵,它使美国国家航空航天局(NASA)深空网(DSN)的一些航天器的任务得以延长到超过其预期寿命。组阵所提供的相关优点是:能以比用单个天线所接收的更高数据率接收数据。在旅行者与海王星相遇期间,在超大阵(VLA)射电望远镜(位于新墨西哥州)和戈尔德斯顿(位于加州)的天线之间用符号流合成进行符号组阵处理就是一个例子^[1,2]。这一技术提高了数据传递速率,增加了从航天器返回的科学数据量。通常,组阵可使通信链路的实际数据传输速率比利用单个实际可用天线的更高。

天线组阵可用于任何信号调制格式,如二相相移键控(BPSK)、四相相移键控(QPSK)、连续相位调制(CPM)等。在本文中,将用 NASA 标准深空信号格式来说明不同的组阵技术,但其结果可推广到其他格式,包括抑制载波调制。

本书中分析并比较了各种组阵算法和技术,然后讨论它们的相对优点和缺点。讨论了用于接收来自深空探测器信号的 5 种组阵方案,包括全频谱合成(FSC)、复符号合成(CSC)、符号流合成(SSC)、基带合成(BC)和载波组阵(CA)。此外,边带辅助(SA)也包括在内并进行比较,尽管它只使用一个天线,并不是一种组阵方案。还讨论了这些方案的组合,如载波组阵加边带辅助和基带合成(CA/SA/BC)或载波组阵加符号流合成(CA/SSC),这里只提到了几种。我们讨论了复杂性与性能之间的权衡,以及从现有航天器接收信号的好处。这里应该说明的是只有 FSC 方法已经用于对非遥测信号组阵。因此,上面所提及的所有分析和对比都是用遥测信号进行的。

但没有理由认为针对非遥测信号的 FSC 性能不会得到相似的结果。

在 DSN 中最新的遥测组阵是戈尔德斯顿阵^[3],可用该综合设施内部多达 6 个天线进行全频谱合成。本书讨论了该阵所使用的具体技术,给出了几项实验结果。最后,讨论了下一步研究和发展的方向。

1.1 组阵的优点

组阵具有许多令人渴望的可能性:更好的性能、工作稳健性的增强、建造费用的节省、计划的灵活性更好和对科学界更广泛的支持。下面各节中将分别进行讨论。

1.1.1 性能优点

天线口径越大,波束宽度必然越窄。因而,天线指向误差要求就变得更为严格。为使目标处于主波束内同时引起的损失又最小,天线的指向必须更精确。然而大型结构实现起来是很困难的。

使用多个小天线的组阵,天线指向误差就不是问题。难点从机械域转移到电子域。每个小口径的阵元波束宽度很宽,使得阵的指向误差要求放得更宽。只要以最小信号恶化进行合成,就能获得最佳增益。

组阵还能使等效口径增加,超过现有 70m 的能力,在需要的时候可以为其某项任务提供支持。在过去的 20 世纪 80 年代后期,在旅行者号与天王星和海王星相遇期间,曾依靠组阵增加了其返回的数据量。伽利略任务是一个最新的例子,任务中使用组阵增加了 3 倍科学数据返回量(当与其他改进措施相结合时,如更好的编码方案、更有效的数据压缩和系统噪声的降低,实际实现的总提高量可达到 10 倍)。

未来的任务也能从组阵获益。这包括在某些运行阶段要求的性能超出单个天线所能提供范围的这类任务。例如,卡西尼任务在巡航阶段只需要一个 34m 天线,但当进入土星轨道时,为了能够返回每天 4Gb 的测绘数据,它需要由一个 70m 和一个 34m 天线组成的天线阵^[4]。那些需要在尽可能短的时间内将重要的科学数据传回地球的任务也是潜在的受益者。例如,在 2004 年与 Wild2 彗星相遇时,“星尘任务”通过提高数据率可以降低单事件风险。

1.1.2 可操作性优点

组阵可以增加系统的可操作性。第一,可以实现更高的资源利用率。使用单个孔径结构,34m 链路的性能不足时就需要立即使用 70m 天线,这就增加了 70m 天线超预定额服务的可能性。然而在采用阵列的情况下,一组天线可以参与许多子组,同时支持不同的任务,根据链路的要求确定每个组的规模。这样就提高了资源的利用率。

第二,组阵后的系统可用性和维护的灵活性更好。假设构建的天线阵列有 10% 的冗余单元,就可以轮流方式进行常规的预防性维护,而系统可全时全功能工作。

第三,备份部件的开支会更小。不必给系统 100% 的备份就能使之全时全功能地工作,因此阵列所需的备份比可以小于 1。

同等重要的是运行中抗故障的稳健性。使用单个天线,发生故障将会使系统瘫痪。使用阵列,一个阵单元失效只会使系统性能下降,但不会导致工作停止。

1.1.3 成本优点

使用**较小的天线**成本低,因为重量和规模小,所以容易建造,可以采用自动化的制作工艺来降低成本。众多的商业公司可以加入天线建造业,市场竞争将会使成本进一步降低。

大致来说,天线的建造费用与天线的体积成正比。然而接收能力与天线表面面积成正比。例如,天线口径减小一半,单个天线的建造费用降低 8 倍;然而只需要 4 个天线就能实现这一等效口径,节省了接近 50% 的费用。然而,应该说明的是,天线建造费用只占全系统建设和运行的全寿命周期费用的一部分。为计算实际节省的开支,需要考虑多个阵单元中所需的额外电子设备以及系统复杂性增加有关费用。参考文献[5]中记载了 DSN 估计这项费用最新的研究成果。

1.1.4 灵活性优点

组阵提供了计划的灵活性,因为可以在任务需要的时候逐步增加额外

的单元以增大总孔径。这种办法可以分散所需的资金,使一次性投入所有投资的需求降到最小。增加新的单元对正在工作的现有设备几乎不会产生什么影响。

1.1.5 科学优点

可以利用具有长基线的阵来支持那些依赖干涉测量的科学应用,如甚长基线干涉(VLBI)和射电天文。随着第10章介绍的大规模阵的未来发展,DSN的实施方案将与国际“平方公里阵(SKA)”项目综合在一起。如果能及时实现,这样一个系统就可作为验证这种能力的试验平台,只是规模较小。

参考文献

- [1] J. W. Layland, P. J. Napier, and A. R. Thompson, “A VLA Experiment—Planning for Voyager at Neptune,” The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42—82, April-June 1985, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, pp. 136—142, August 15, 1985. http://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/
- [2] J. S. Ulvestad, “Phasing the Antennas of the Very Large Array for Reception of Telemetry from Voyager 2 at Neptune Encounter,” The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42—94, April-June 1988, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, pp. 257—273, August 15, 1988. http://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/
- [3] T. T. Pham, A. P. Jongeling, and D. H. , “Enhancing Telemetry and Navigation Performance with Full Spectrum Arraying,” IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, March 2000.
- [4] Deep Space Network, Near Earth and Deep Space Mission Support Requirements, JPL D-0787 (internal document), Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, October 1996.
- [5] G. M. Resch, T. A. Cwik, V. Jamnejad, R. T. Logan, R. B. Miller, and D. H. Rogstad, Synthesis of a Large Communications Aperture Using Small Antenna, JPL Publication 94—15, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1994.

第 2 章

深空网组阵的背景

喷气推进实验室(JPL)为美国国家航空航天局(NASA)运营深空网(DSN),与那些探索太阳系的航天器进行通信。这种通信距离按地面的标准来看是非常大的,而航天器可用的发射功率非常低(典型的是 20W 或更小)。因而,通信链路总是工作在余量很低的情况,所以投入大量资金用于提高地面系统各个方面的性能(如天线、低噪声放大器、接收机、编码等)。

Potter^[1]等人对深空通信的地面和飞行器上的各方面作了早期系统分析,得出这样的结论:最佳的地面配置应以大型(即当时的 64m 级直径)的天线为中心,而不是用较小天线组阵来得到等效收集面积。这一分析是基于这样一种方案:单个地面天线与航天器之间有专用链路,航天器从升起落到落下连续地被监视以及在航天器与一个遥远行星相遇时技术上所允许的最高可能数据率。

在 Potter 等人研究后的 30 多年的时间中,许多假设条件发生了变化。首先,认识到航天器会发生紧急情况,无论一个机构在地面的收集面积有多大,在紧急情况时它总是想要更大的收集面积。一种选择就是从其他机构“借”孔径,这就意味着组阵能力。第二,在与遥远的行星相遇时,科学家总是希望尽可能多的数据返回。由于建造新的 64m 天线,从政治或经济上并不总是可行的,于是借用其他孔径来增加数据返回量的压力再次增大。在 20 世纪 80 年代中期旅行者 2 号与海王星相遇时,就借用射电天文协会的超大规模阵的 27 个天线,与戈尔德斯顿深空通信综合设施的 70m 和 2 个 34m 天线组成天线阵,提供了在航天器任务发射时认为不可能的数据返回量,这达到了机构间组阵方案的顶峰。第三,认识到实际上在行星际任务的长时间巡航阶段,通信需求并不高,用一个比 64m 或 70m 直径小得多的天线就能很容易地满足。这样,DSN 提出了 34m 天线集合的概念,可以分别用于