

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加严格。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送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与系统复杂性增加有关的费用。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

可预见的越来越多的任务数量,但也可以组阵用于“特殊”事件。

Reschet 等人^[2]最近研究了单个 70m 口径与一个抛物面阵(以抛物面直径为参变量)的费用与性能之比。他们得出结论,使用阵列结构并未明显地节省开支,但它确实具备单个孔径所不能提供的调度灵活性。

2.1 早期的发展

在 20 世纪 60 年代后期和 70 年代期间,对组阵的兴趣在 DSN 内部缓慢增长,对这一问题研究了两种截然不同的方法。第一种方法利用这样一个事实:多数深空任务在航天器上用一个副载波调制载波信号,用数据调制副载波。由于一般约 20% 的航天器发射功率用在载波上,这样载波就可用作信标。如果在地球上两个或两个以上的天线能锁定在这个信标上,那么每个天线的射频(RF)谱可混频至很低的中频范围,补偿信号到达时间差(即延迟),则来自每个天线的中频频谱就可以同相叠加。

第二种组阵方法与一项计划综合发展,该计划以大地测量、地球旋转和射电天文的科学研究为目的。该项计划要观测频谱为纯噪声的自然射电源,天线阵就是用作复合干涉仪的天线集合。科学研究的目的是使用天线间隔距离接近地球半径的无线电干涉仪,作为测量诸如基线长度、射电源位置、地球旋转速率小变化等参数的装置。测量量是信号到达不同天线的到达时间差。然而,我们看到随着设备和技术的完善,如果测量可以以足够的精度完成,则可以实时或事后(如果数据被记录下来)补偿延迟,来自组合干涉仪的各组成单元的最终输出可同相相加(而不是干涉测量中的相乘)而得到一个增强的信号。

在 1977 年,JPL 发射了两个名义上是以探索木星为目的的旅行者航天器,但也可以继续飞向更远的太阳系,飞越外行星。事实上,在这些航天器发射的时候,并不清楚在比木星更远的距离上能返回多大的数据量,这一问题推动了对组阵更认真的研究。

旅行者 2 号在获得木星引力辅助后,继续飞越土星、天王星、海王星。土星到太阳的距离几乎是木星到太阳距离的 2 倍。天王星是 4 倍,海王星则是 6 倍。如果不对链路采取改进措施,那么我们接收来自土星的数据量就只有来自木星的 1/4。在天王星将只有 1/16,而到海王星则仅有 1/36。

DSN 64m 天线加大其直径到 70m,并降低其系统噪声温度,使来自土星的数据率得到提高。到达天王星时,位于澳大利亚的 70m 天线与隶属于

联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的与 DSN 70m 天线相距约 180km 远的一个 64m 天线组阵。到达海王星时,利用戈尔德斯顿 70m 和 2 个 34m 的天线与新墨西哥州中部的甚大规模阵(每个直径 25m)的 27 个天线进行天线组阵。所有的这些努力都成功地提高了旅行者任务的返回数据率。一个重要的结论是所获得的性能提高与工程师们基于所用技术理论研究所预测的结果非常接近。

2.2 发展现状

在这一节里,我们介绍正在 DSN 中使用的系统,涵盖了从 1996 年到 2003 年历时 8 年部署的 3 个系统,这 3 个系统都采用了全频谱组阵技术。

1996 年建成第一个全频谱组阵系统,用来支持伽利略任务^[3]。信号处理准实时进行,只滞后几分钟。专门设计的前端处理部件从参与组阵的每个天线采集包括遥测信息的相应信号谱。这些数据再转换成数据记录并存储在商用计算工作站上。接下来的相关和合成功能以及合成信号的解调和解码都由软件来完成。由于相关和合成是软件完成的,采用标准的互联网型的连接,这种阵可以用于跨越非常长基线的各种结构,例如伽利略任务中就有数千公里。然而,这种连接的一个缺点就是受带宽的限制。为了将滞后减小到合理值(约数分钟),这一系统对低数据率任务更有用。伽利略任务使用低增益天线,等效全向辐射功率(EIRP)较低,就是这种情况。伽利略系统的设计受最高数据率为 1×10^3 符号/s 所限制。这一上限是 3 种因素的结果:

(1) 与具体实施方案相关的技术和经费条件的制约。目标是在所给经费和来自伽利略任务事件的时间限制内,交付一个实用系统。

(2) 一个专为伽利略任务设计的方案,但可以扩展为多个任务服务。例如,只对几种最可能被伽利略使用的输出数据率进行构建、测试并交付使用。目前的能力在最高达到 1×10^3 符号/s 数据率的技术指标规格内;然而,进行小的软件修改,就能扩展到约 1×10^4 符号/s。这一上限是由系统中电子设备的总线带宽限制造成的。

(3) 在合成后处理中,解调和译码功能由软件实现。软件译码器可配置成编码增益更高的新级联(14,1/4)卷积和可变冗余 Reed-solomon 编码方案。软件接收机可对数据间断进行再处理,从而增加有用数据的返回量。然而软件处理的缺点是信息吞吐量受限,使系统不能适应一大批高数据率

的任务。

在 2001 年,第二套全谱组阵系统在戈尔德斯顿投入运行。它是伽利略任务的后续系统,称为全谱处理阵(FSPA)系统。相关和合成功能使用现场可编程门阵列(FPGA)技术硬件实时进行。此外,处理后的解调和译码功能由支持多任务的标准硬件完成,而不是像伽利略系统那样用专门制造的设备。这样做,戈尔德斯顿的实时阵系统可以支持的数据率高达兆符号/s,并可以利用一个 DSN 综合设施内多达 6 个天线进行组阵。注意,由于硬件处理特性及其更宽的带宽,这个系统仅限于在一个 DSN 站址内组阵,不能在两个 DSN 综合设施之间进行组阵。这种阵能工作在 X 频段频率(8.4GHz),这是深空通信中最常用的频率;然而,因为组阵实际是在第一次 RF/IF 下变频之后的中频完成的,对于 S 频段(2.3GHz)和 Ka 频段(32GHz)信号,相应的中频频率也在采集带宽范围内。因此,如果需要的话,现在工作在 S 频段的任务和将来使用 Ka 频段的任务也可以组阵。

在 2003 年,功能与上述 FSPA 系统相当的第三个阵系统,已准备部署在 2 个海外 DSN 设施:马德里和堪培拉。由于这些站的天线较少,所部署的系统规模已缩小成只支持 4 个天线组阵。在该系统方案设计中采用了更先进的 FPGA 技术。以前由专用印刷电路板实现的功能,如数字下变频、延迟、相位旋转、相关和合成,现在都集中在一块通用设计电路板上。功能上的差异由 FPGA 编程处理。使用来自最新技术进步的更强有力的处理器,可以将更多的功能集成在该电路板上。结果,系统变得更加紧凑。旧的设计方案需要 4 个全部填满的机柜,而新的系统可以装在 2 个机柜内。

2.3 现有能力的预期应用

预期近期要使用 DSN 组阵接收卡西尼任务的高价值科学数据。该任务要求在其轨道阶段每天返回 4Gb 数据。一个 70m 天线不能提供足够的余量来支持这一所需的数据率,而由一个 70m 和一个 34m 天线组阵就足够了。这种结构相对于 70m 天线增加了 25%的数据返回量。计划中的戈尔德斯顿和马德里综合设施之间组阵,从 2004 年后期开始,一直将持续到 2008 年。

在执行深度撞击任务的小行星相遇期间也可能要使用组阵。在 2005 年 7 月,深度撞击航天器将释放一个撞击器到 Tempel 1 彗星的慧核。根据撞击过程所收集的数据,科学家将能够更好地了解彗星的化学和物理特性。

因为这是一个对任务至关重要的一次性观测,发生在潜在危险的环境中,希望尽可能快地返回数据。由 70m 和几个 34m 天线组阵将有助于提高数据率。

除了提高任务数据返回量,在紧急时期或长时间的维护阶段,天线阵还可为 70m 天线提供备份支持。然而备份支持是有限的,并不能完全替代 70m 天线的功能。备份能力应用于下行遥测接收和无线电测轨功能,但不能用在上行遥控指令发送。另外,海外的综合设施没有足够的 34 m 天线进行组阵来提供与 70m 天线相等效的口径。在马德里,一个新的 34m BWG 天线计划将在 2003 建成,这里将有 3 个 34m 天线可供使用,它们能构成 75% 的 70m 天线接收能力。在堪培拉,34m 子网只有 2 个天线,因而,通过组阵可以达到 70m 天线 50% 的能力。另一方面,戈尔德斯顿有 4 个 34m 天线,因而,可以非常接近于 70m 天线的能力。

参 考 文 献

- [1] P. D. Potter, W. D. Merrick, and A. C. Ludwig, Large Antenna Apertures and Arrays for Deep Space Communications, JPL Technical Report 32—848, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, November 1, 1965.
- [2] 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 Antennas, JPL Publication 94—15, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, July 1, 1994.
- [3] T. T. Pham, S. Shambayati, D. E. Hardi, and S. G. Finley, “Tracking the Galileo Spacecraft with the DSCC Galileo Telemetry Prototype,” The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42—119, July–September 1994, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, pp. 221—235, November 15, 1994. http://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/

第 3 章

组阵的概念

一个天线的增益除以它的系统温度,即 G/T ,是确定在一定信噪比 (SNR)下有多少数据可以通过通信链路传送的参数之一。在理解组阵的任何研究中,我们的第一个目标是把问题当作累加每个天线 G/T 来概括组阵的一些实际问题。接下来,我们必须认清用现有技术可实现的性能界限并尝试以某种与天线直径相关的方式将性能和费用参数化。然后我们必须明白阵列的总体可靠性和可用度与费用的联系,以及如何将阵列与单个口径进行比较。

3.1 作为干涉仪的阵列

图 3-1 所示是坐落在地球表面某处的两个天线,观测一个遥远的射电

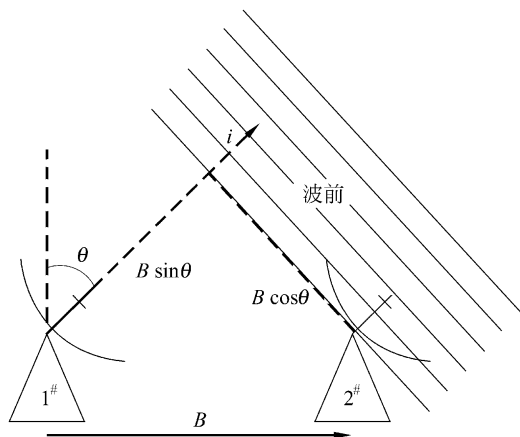


图 3-1 简单干涉仪