

# 深空通信天线组阵关键技术及其发展趋势

姚 飞<sup>1</sup>, 匡麟玲<sup>2</sup>, 詹亚锋<sup>2</sup>, 陆建华<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 清华大学宇航技术研究中心, 北京 100084)

**摘 要:** 天线组阵是未来深空通信中的重要发展方向之一。本文介绍了天线组阵的发展历程, 重点讨论了组阵中的关键技术, 包括阵址选择、阵元口径和数量设计、阵构型设计以及信号处理的方法, 分析了上述技术对组阵性能的影响。最后, 探讨了天线组阵的发展趋势。

**关键词:** 深空通信; 天线组阵; 相干合成; 误差消除

**中图分类号:** TN911.7; V556.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2010)10-2231-08

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.10.001

## Key Techniques and Development Trend of Antenna Arraying for Deep Space Communication

YAO Fei<sup>1</sup>, KUANG Lin-ling<sup>2</sup>, ZHAN Ya-feng<sup>2</sup>, LU Jian-hua<sup>1,2</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tsinghua Space Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Antenna arraying is one of the most important development directions in deep space communication. In this paper, the evolution of antenna arraying is introduced, while key techniques are investigated in detail, including selection of array site, element diameter and quantity, array geometric configuration and signal processing algorithm. Moreover, effects of these techniques on the arraying performance are analyzed. Finally, the development trend of antenna arraying is discussed.

**Key words:** Deep space communications; Antenna arraying; Coherent combination; Error elimination

### 0 引 言

随着深空探测技术的发展,任务要求传输的探测数据量越来越大,美国宇航局(NASA)预测2012年深空通信下行峰值速率可达10 Mbps<sup>[1]</sup>;同时深空探测的距离越来越远,导致传输路径损失极大。由于探测器等效全向发射功率(EIRP)非常有限,这就要求地面站采用大口径抛物面天线,尽量增加接收面积以提高信噪比(SNR)。以火星探测任务为例,传输1 Mbps的数据,需要直径80 m的天线(根据NASA任务的参数计算得到)。然而天线口径越大波束越窄,探测器下行信号的捕获越难;同时大天线结构和重量庞大,驱动伺服非常困难<sup>[2]</sup>。NASA

深空网(DSN)的70 m大天线(重7260吨,高76米)已达目前的工程极限,必须要采用天线组阵技术。

天线组阵是指在一定地域范围内多个天线组成阵列,将各天线接收到的同一信源的信号合成,提高接收信噪比<sup>[2]</sup>。其基本原理是获得并消除各天线信号间的时间和相位差,进而相干相加。在各天线噪声不相关的条件下,理论上N个天线组阵接收信号的SNR是单个天线的N倍。若用体积小、重量轻、波束宽的中小口径天线组阵,则对信号捕获跟踪更为有利。另外,在能力扩展、可靠性、灵活性、多目标通信和成本等方面,天线组阵比单个大天线的优势更加明显<sup>[3]</sup>。

本文重点论述天线组阵中的关键技术和发展趋

势。第一节回顾组阵的发展历程,第二节给出组阵的整体描述并分析关键技术,第三节分析影响组阵性能的因素,第四节展望未来发展和研究的方向。最后一节对全文进行总结。

## 1 组阵发展历程

组阵的思想最早由喷气推进实验室(JPL)于1965年提出<sup>[4-6]</sup>。最初没有专用的天线阵,而是利用已有的深空通信大天线和大型射电天文望远镜构成阵,阵的形式取决于已有设施状态。表1<sup>[7-15]</sup>列出了在实际深空任务已实现的天线组阵情况。

组阵的发展历程基本可以分为三个阶段。最早的组阵是在一个深空通信综合设施(DSCC)内进行几个大天线的基带(BB,符号调制的副载波)信号合成。在1970年的先驱者8号任务(表1,序号2)中,

天线距离很近,数据速率很低,延迟差远小于比特周期,各天线的信号可以不用时间对齐而直接相加<sup>[8]</sup>。当数据速率增大后,基带合成(BC)就需要将各信号时间对齐之后再相加。时间对齐是用基带信号正交相关的结果控制延迟控制环来实现的<sup>[9]</sup>。在1974年的水手10号任务(表1,序号2)期间,三个站间遥测信号的对齐精度为85ns(1%比特周期)<sup>[8]</sup>。在旅行者1号、2号与木星和土星交会时以及先驱者11号与土星交会时(表1,序号3~6),时间对齐精度要求更高,为此NASA开发了实时合成器(RTC)<sup>[16]</sup>。RTC后来成为基带组件(BBA,DSN标准设备)的一部分。这一阶段的组阵仅利用了同一DSCC内的天线,SNR改善程度较小,但任务数据速率仍得到提高。

表1 天线组阵在实际任务中的应用情况

Table1 Applications of antenna arraying in deep space missions

序号	任务名称	时间	天线位置	天线类型	合成器类型	SNR改善程度/dB	合成损失/dB
1	先驱者8号	1970	西班牙	26m+26m	BB	—	—
2	水手10号(水星)	74.9	美国	64m+26m×2	BB	0.7(vs 64m)	0.1
3	旅行者1号、2号(木星)	79.3 79.7	美国	64m+34m	RTC	0.8~1.0 (vs 64m)	0.2~0.4
4	先驱者11号(土星)	79.9	美国	64m+34m	RTC	0.3~0.4 (vs 64m)	0.1~0.2
5	旅行者1号(土星)	80.8	所有DSCC	64m+34m	RTC	—	0.2~0.4
6	旅行者2号(土星)	81.8	所有DSCC	64m+34m	RTC	—	0.15
7	国际彗星探测器(Giacobini-Zinner)	85.9	所有DSCC 西班牙-美国 澳大利亚-日本	64m+34m 64m+64m 64m+64m	BB SSRC SSRC	— 3.7(vs 美国64m) 3.7(vs 澳大利亚64m)	≤0.1
8	旅行者2号(天王星)	86.1	西班牙 美国 澳大利亚	64m+34m 64m+34m×2 64m+34m×2+Parkes 64m 70m+34m×2	RTC/BBA RTC/BBA RTC/BBA+LBC+SSRC RTC/BBA	— — 2.2(vs 澳大利亚DSCC)	≤1.0 ≤1.0 ≤0.5
9	旅行者2号(海王星)	89.8	西班牙 美国 澳大利亚	70m+34m×2+VLA 25m×27 70m+34m×2+Parkes 64m	RTC/BBA+VLBC+SSRC RTC/BBA+LBC+SSRC	— —	≤1.2 ≤1.3 ≤0.35
10	伽利略号(木卫四)	96.11	澳大利亚/美国	70m+34m/Parkes 64m+70m	FSC/DGT	—	≤0.1

组阵发展历程的第二个阶段是机构间组阵<sup>[17]</sup>。由于旅行者号与天王星和海王星交会时,DSCC内部组阵不能满足要求,1982年NASA开始研究Parkes射电望远镜(PRT)、甚大阵(VLA)等大型射电接收设备以及跨大洲的DSCC之间能否组阵。机

构间组阵的主要方案为基带信号实时合成。由于机构间距离较远,要借助微波或卫星链路传送各大天线的的数据,需要能补偿更大的信号延迟和延迟变化速率的长基线(300km)基带合成器(LBC)<sup>[18]</sup>以及甚长基线(1900km)合成器(VLBC)。

机构间组阵的备份方案采用符号流合成(SSC)<sup>[19]</sup>,该方案先同步各机构天线的记录时间,再将信号记录到磁带上并送到中心站进行后期合成(SSRC)。SSC在解调后量化的软符号上对齐合成,因此地面通信带宽远小于BC,成本更低,也更有利于跨大洲的组阵。1985年国际彗星探测器任务中(表1,序号7)首次利用SSRC方法将不同大洲的深空站进行组阵<sup>[12]</sup>,两个64m天线(西班牙/日本64m天线的性能要好于美国/澳大利亚64m天线)组阵,SNR改善更明显,可支持2 ksp/s的数据速率。此后的1986年和1989年,在旅行者2号与天王星和海王星交会期间(表1,序号8,9)再次使用SSRC,引入Parkes的64m天线以及VLA阵,相比单独使用DSCC组阵,SNR改善较多,数据速率高达43.2 ksp/s<sup>[13]</sup>。

1991年,为挽救伽利略任务(表1,序号10),JPL设计了能实现全频谱合成(FSC)的伽利略遥测子系统(GDT)<sup>[14]</sup>,组阵的发展进入第三阶段。与BC和SSC不同,FSC在中频进行信号合成,能处理更弱的信号,但需处理的数据量更大,所以被限制在一个DSCC之内。该技术后来发展为全频谱处理阵(FSPA),能支持6Msp/s的数据速率。2003年FSPA成为DSN的标准设备。受到工程实现的限制,目前还不能在跨DSCC的距离上实现FSC。

表1还给出了实际任务中天线的合成损失(单位:dB),其定义为理想合成SNR与实际合成SNR之差。组阵的发展目标是在最大程度上改善SNR,同时尽量降低合成的损失。

## 2 关键技术

随着未来深空探测任务的需求越来越高,单纯利用现有设施组阵已不能满足要求,需要设计建造专用的深空通信阵,用更多的阵元实现更大的接收面积。这时需要研究阵的构型、布局和新的信号处理方法以提高阵的能力。

### 2.1 组阵结构与布局

#### 2.1.1 阵址选择及阵布局

阵址选择及阵的布局是组阵系统结构中的关键要素。综合考虑不间断连续跟踪通信的需求以及天线增益和系统噪声温度的影响,NASA建议在地球南北纬30°~40°之间,间隔120°经线上各建一个阵。由于地面接收到的信号极其微弱,对阵周围的电磁环境要求极高。阵址选择时必须避免人口稠密

地区,以减少环境对阵的干扰。为对本地天气形成分集(这对Ka波段通信尤为重要),以及为导航提供直接的天平面测量,最好将阵划分成相隔较远(最远几百km)的几个天线簇,见图1<sup>[20]</sup>。各簇均有多个天线阵元,电子组件,信号合成器,以及控制室、气象站、通信系统等基础设施。各簇控制室与阵控制中心相连接。在这种布局中,信号先在各簇内合成,再在阵级别上合成。

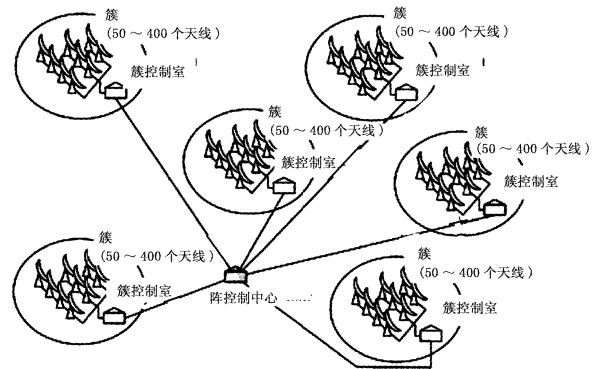


图1 深空天线阵分簇布局示意图

Fig. 1 Architecture of a deep space antenna array consisting of many clusters of antennas

#### 2.1.2 阵元直径和数量选择

阵元直径取决于天线阵的成本。选择大天线时,阵元数目少,成本主要取决于天线。天线直径较小时,所需阵元数目更多,此时天线成本显著下降,但合成众多阵元信号需要大规模信号处理,阵成本主要取决于电子设备。NASA专门开发的成本模型给出了阵成本与阵元直径的关系,结果表明最优阵元直径是12m<sup>[20]</sup>。

阵元数量取决于任务数据速率和阵元直径。对于NASA未来十年的任务需求<sup>[20]</sup>,在每隔120°的经线处各建一个100×12m阵就够了。但未来阵还应能同时处理多个目标,规模还需扩展,所以NASA预计最终的阵规模是400×12m。

#### 2.1.3 阵的构形设计

阵构形的基本要素是大小、形状和阵元间隔。阵信号合成主要考虑信号相位,而影响信号相位的最显著因素是地球对流层中的水蒸气波动。如果阵元均位于大气相位波动保持相关的空间尺度之内,该影响就可通过相关来消除。这种空间尺度与阵址、天气、时间有关,典型值为几百米,它决定了阵中最长的基线长度,进而决定了阵的大小。阵元间隔的选取要综合考虑大气相位变化和阵元间遮挡(以

免造成合成损失,特别是低仰角时)的影响,一般取为二倍阵元直径到几百米。阵的形状要在最长基线约束下容纳更多阵元,同时使阵合成波束的旁瓣较低。这样可以减少太阳以及飞行器附近行星热辐射对系统噪声的影响,在跟踪多个飞行器时还能减少信号间的干扰。图2<sup>[21]</sup>给出NASA考虑了实际阵址(位于戈尔德斯顿附近)的DSN 400 × 12 m阵构形的仿真优化结果。图中的每一点代表一个阵元,阵元间最小间隔为45 m,最大间隔为1751 m,基本是一个圆阵形式。阵主波束区域内旁瓣电平小于主瓣电平的0.3%。

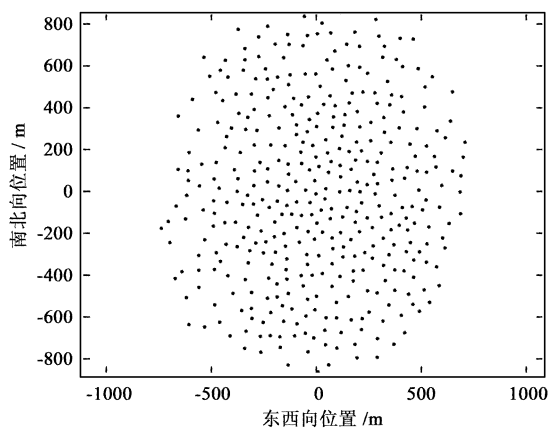


图2 DSN的阵构形

Fig. 2 Configuration of the DSN array

## 2.2 组阵信号处理方法

阵的基本工作原理是用天线、微波和射频子系统接收目标能量,形成中频信号,中频信号(或基带信号)通过信号处理子系统进行滤波、数字化、采样等工作,再将各路信号的时间延迟和相位延迟对齐后再合成,形成最终的阵输出信号。因此,阵元信号的处理方法是组阵的核心问题。

在组阵的发展过程中,针对传统深空通信残留载波调制信号,逐步形成了五种信号处理方案<sup>[22]</sup>。除前述FSC、BC、SSC外,还有载波组阵(CA)和复符号合成(CSC)。SSC、CSC、CA与BC性质类似,均属于阵元载波锁定后合成,此时阵元可独立锁定载波并在基带处理,故仅需考虑信号时延差,相关的难度不大<sup>[16]</sup>。

FSC方案对阵元的中频信号进行处理,因此需要同时考虑信号间的延迟差和相位差<sup>[22]</sup>。一般认为用轨道预报和几何计算可以确定延迟差,故FSC主要考虑通过相关获得相位差<sup>[23]</sup>。阵元信号的相关本质上是一种最大似然估计,可以给出估计的克

拉美劳下界<sup>[24]</sup>。相位差估计误差的方差与相关SNR成反比,相关SNR取决于阵元SNR、相关带宽和相关(积分)时间,后者受大气相干时间的约束。满足一定精度(使阵合成SNR的损失较小)的估计所需的阵元SNR可以远低于阵元锁定跟踪载波所需的阵元SNR。这就是FSC的意义:当单个阵元无法独立检测出信号时,可通过多个阵元信号的相干合成使合成后的信号高于检测门限,随后完成解调和译码,最终恢复出原始数据信息。这相当于组阵能在很大程度上降低检测门限,增强极微弱信号的接收能力。如果参与组阵的阵元数量更多,进一步提高合成后的SNR,就可以用于接收更高速率的数据。FSC所需的阵元SNR较小,非常契合小口径天线大规模组阵的发展趋势。此外,采用高带宽效率调制也是深空通信的发展趋势,FSC对此适应性更强。已有文献<sup>[25-26]</sup>研究各种调制方式下的FSC。下面重点讨论FSC的相关算法。

### 2.2.1 SIMPLE算法

SIMPLE是FSC的基本相关算法<sup>[2]</sup>,所有天线均与一个固定的参考天线相关直接求得信号差。当阵中有一个大天线,其它天线与之相关所获得相关SNR较高时,用该算法很合适。而当阵元SNR较低、相关时间较短等导致相关SNR较低,两两相关无法直接求出信号差时,就必须合理设计,尽量利用所有可能的阵元对。由此提出了SUMPLE和Eigen等算法。

### 2.2.2 SUMPLE算法

SUMPLE算法<sup>[27]</sup>中的参考天线不固定,而是由当前选定天线外其它所有天线信号加权求和后组成一个虚拟的参考“天线”。它是一种迭代算法,每流转过一个阵元,并与参考“天线”相关加权求和后完成一次迭代。由于参考天线总在变化,SUMPLE算法的复杂度要高于SIMPLE算法。但是合成的参考“天线”SNR要比单个参考天线的SNR高很多,因此相关相位差估计比SIMPLE的更准确,合成效果更好。这也从另一个角度说明SUMPLE可用于更弱的信号。

文献[28],[29]比较了SIMPLE和SUMPLE算法,仿真条件是阵元 $E_b/N_0 = 7\text{dB}$ 。文献[30],[31]的仿真结论为SUMPLE算法更优且更适合硬件实现。文献[31]验证了采用SUMPLE算法时FSC的合成效率与阵元数、阵元SNR、相关带宽和相位差闭环带宽的关系,仿真所设阵元SNR为20 dBHz。

文献[33]假设我国 50 m 大天线与附近多个 10 m 天线组阵,将均匀阵 SUMPLE 算法的权值估计性能推广到这种非均匀阵。阵等效口径较小时,该方法的性能优于均匀阵,但当等效口径增大时两者合成性能趋于一致。在算法收敛性方面,文献[34]分析了算法的权值更新公式,将 SUMPLE 看成类 LMS 自适应滤波的递归算法,进而通过将迭代步长与估计误差联系起来,使改进后的 SUMPLE 算法收敛更快,更能适应相位的快速变化。

### 2.2.3 Eigen 算法

Eigen 算法<sup>[35-37]</sup>通过迭代求解信号互相关的协方差矩阵的特征向量的最优线性组合,从而获得各信号的复加权系数。该算法性能与 SUMPLE 接近,额外的好处是能处理来自背景行星的噪声,通过将所需信号的相位对齐和背景行星信号的相位打乱,两者共同作用使合成 SNR 最大<sup>[2]</sup>。Eigen 算法的复杂度比 SUMPLE 算法高,因此研究重点是采用各种数值处理方法减少计算量。文献[38]介绍了基于归一化权值的 Matrix-free Eigen 算法,改进了<sup>[37]</sup>的算法,减少了计算量,精度略有提高。文献[39]提出自适应 Eigen 算法,引入积分步长因子并将其设置为随相位而变化,自适应调整最优积分时间,跟踪信号相位变化的能力更强,减小噪声和干扰对相位权值的影响。通过改进常规 Eigen 算法避免了特征值分解运算,也无需计算相关矩阵。

FSC 方案还有其它相关算法,包括样本矩阵求逆和最小均方<sup>[40]</sup>等。尽管低 SNR 下这两种算法合成损失小,但均需参考(训练)序列,其应用受限。

## 3 组阵性能影响因素分析

天线组阵与传统单链路深空通信的最大区别在于组阵要合成多路信号,前提是要准确知道信号间的时间差和相位延迟差等物理量,因此组阵技术的实质更接近于测量。

阵元信号的对齐精度是影响阵性能的决定因素,阵的各子系统均会影响此精度。首先,各阵元天线的一致性会影响组阵性能,这主要体现在两个方面:伺服不一致会产生不同的指向误差;阵元天线本身增益和效率的不一致,会导致各天线对信号的实际增益不一致。而各天线信号的信噪比决定了信号合成权值,未知的增益不一致性必然影响信号合成的准确性,进而影响组阵性能。其次,阵元间表面精度的不一致性会在确定阵元相位中心时产生偏差,

直接影响阵元信号间相位差的确定。最后,典型的相关算法如全频谱合成(FSC),是对各阵元下变频到中频的信号进行数字化处理。在此之前进行了包括低噪声放大(LNA)在内的各级信号放大。这些预处理过程会影响中频 A/D 采样,使系统噪声增大,进而产生阵元信噪比的估计偏差。

在一定的性能约束下,阵能处理的不理想因素是有限的。需要针对组阵各环节给组阵性能带来的影响,进行完整合理的建模分析,为建造实用的组阵系统提供确切依据。以 DSN 阵为例,设 Ka 波段相位对齐精度要求为  $18^\circ$  (RMS, 对应的合成损失为 0.2 dB),误差分配见表 2<sup>[41]</sup>。

表 2 NASA 阵的相位误差分配  
Table 2 Phase error allocation of NASA array

误差源	均方根误差( $^\circ$ )
大气	12
天线位置	12
天线电子器件误差	3
传输中频信号的光纤链路	4
信号处理	3
频率,定时及其地面通信	3

在上述误差源中,有些可看成系统误差,可通过标定来部分消除,比如天线的不一致性,电子设备延迟等。有些则应看成随机误差,例如大气引起的相位差。对流层波动会引起信号相位变化,不同阵元的信号穿越了大气层的不同区域,引起的相位延迟不同。在一定空间范围内不同路径的信号延迟在短时间内可以保持高度的相关性,此时间被称为大气相干时间,文献[2]给出了典型值。再如,参考频率抖动造成的相位误差也应看成是随机的。这种随机因素对阵性能的影响更大,主要通过相关等信号处理的方法来部分消除。

## 4 发展趋势

天线组阵是一个开放性的前沿课题,本节重点从小口径阵元天线大规模组阵以及与射电天文的融合两个方面讨论天线组阵技术的发展趋势,其它包括干扰存在时的组阵<sup>[42-43]</sup>、多目标通信组阵<sup>[44]</sup>、上行链路组阵<sup>[45]</sup>、组阵测控<sup>[46]</sup>等方面的理论研究刚刚开始,在组阵的工程实现中也有许多具体问题需要进一步研究。

### 4.1 小口径阵元天线大规模组阵

为满足未来更高速率的传输,需要大规模组阵

以大幅度提高等效接收面积。从成本和实现角度考虑,小口径天线更适于大批量生产。因此 JPL 在实现一个 DSCC 内的大天线组阵后,转而研究小天线组阵<sup>[47]</sup>,重点包括相关算法在内的大规模阵的信号处理方法<sup>[48]</sup>。2005 年 JPL 用两个 6m 天线与一个 12m 天线组成小天线原型阵<sup>[49-50]</sup>。NASA 计划 2010 年在 3 个 DSCC 内各建一个  $4 \times 12$  m 的阵,代替将退役的 26m 站。DSN 的目标是在 2020 年实现 400 个 12 m 天线的大规模组阵,等效口径为 240 m, X 频段的通信能力为目前 70 m 天线的 120 倍<sup>[51]</sup>。

但是阵元直径变小后,其它条件不变时,每一个阵元的信号更微弱,这会直接影响组阵性能。例如,如果原组阵采用 BC 方案,可能会导致阵元不能锁定载波,使得方案失效。对于 FSC 方案,会导致相关 SNR 更低,相干合成效果变差。尽管 SUMPLE 算法可用于更弱的信号。但是相关 SNR 的门限总是存在的。我们针对 SUMPLE 算法的合成损失进行了仿真,结果见图 3。假设阵有 100 个阵元,阵输出 SNR 的理论值为 3 ~ -8 dB。当阵输出 SNR 的理论值较低 (< -5 dB,对应的阵元 SNR < -25 dB) 时,算法估计误差急剧增大,甚至不收敛。在图 3 中表现为合成后阵输出 SNR 的损失非常大,算法已不可用。

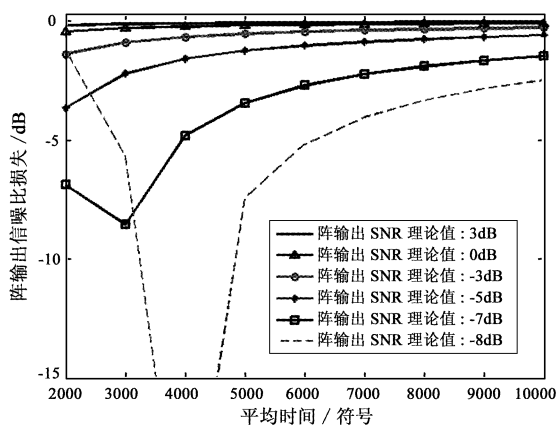


图3 SUMPLE 算法性能

Fig. 3 Performance of the SUMPLE algorithm

综上所述,降低信号处理所需的阵元 SNR,改进阵元在低 SNR 下的合成效果是天线组阵的重要研究方向。

根据 2.2.2 节的总结,现有研究所需的阵元 SNR 仍较高。针对此问题,一个可行的设想是借鉴迭代接收<sup>[52]</sup>的思想:同步器、解调器、译码器作为独立模块单独工作,但以迭代方式相互交换信息,通过后端反馈给前端的软信息提高整体性能。当阵元

SNR 距离检测门限不远时,可以采用改进的迭代同步方案进一步降低解调门限<sup>[53]</sup>,使单个阵元能完成信号检测,这样 BC 方案仍可使用。在 FSC 方案中,可以考虑将信息交换迭代的范围扩展到相关器。通过合理设计译码软信息反馈的迭代方式,将合成后的译码软信息反馈到合成端辅助相关器进行阵元信号相位调整,通过额外信息的增加来降低相关所需的阵元 SNR。

#### 4.2 深空通信与射电天文的融合

天线组阵的另一个重要发展趋势体现在深空通信与射电天文两个学科的融合。如第 2 节所述,机构间组阵就利用了射电天文的大型天线,这是在设备层面的融合。在信号处理层面,如前所述,飞行器信号足够强时可通过相关算法估计信号间的时延和相位差,实现相干合成。如果信号微弱到依靠自身无法相关,可能就要利用其它目标源(如自然参考源),此时可以利用射电天文学上的阵校准方法进行相位差的估计和补偿。图 4<sup>[54]</sup>从宏观角度给出了由大气相干时间和阵输出 SNR 共同确定的阵校准区域。

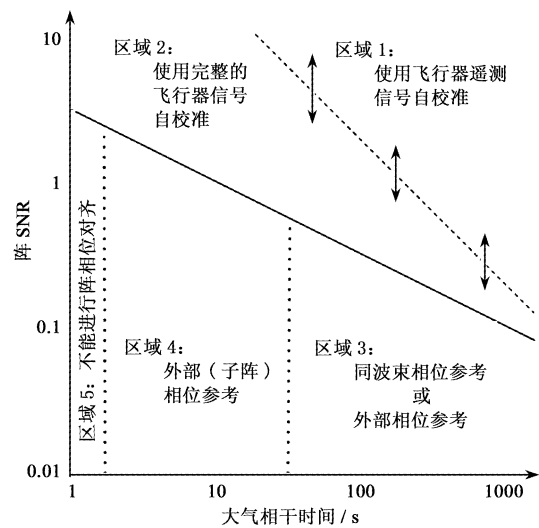


图4 阵校准区域

Fig. 4 Array calibration regimes

在图 4 中,区域 1 表示仅利用飞行器信号的遥测数据(基带)来实现估计,即 BC 方案,此时飞行器信号较强。如果飞行器信号较弱,可以考虑利用飞行器信号的全部频谱来估计信号间的差异,即区域 2,对应于 FSC 方案。当飞行器信号过于微弱,FSC 也不可用时,可采用区域 3 的方案。各阵元分别观察位于阵主波束之内的自然参考源(如射电星),通

过对其信号宽带相关,获得阵元间相位差,再将此差直接应用到飞行器信号上。如果信号微弱且大气波动较大,可用区域 4 的方案,在阵中划分出独立的子阵,专门观测阵主波束外的参考源,得到子阵相位对齐结果,再由几何换算将此结果转换到跟踪目标飞行器的那些阵元上。该方案要求参考源与飞行器的角度间隔在几度范围内,这样参考源和飞行器到地面站的视线基本上穿过对流层同一区域,两者的大气相位误差高度相关。

区域 3 和 4 中的两种方案与飞行器 SNR 无关,其思路来源于射电天文的宽带源干涉成像,能部分地解决无法仅靠飞行器信号自身对齐的问题,但要处理宽带的参考源信号,需要宽带相关器<sup>[48]</sup>,这会大幅度增加设备量和成本。另外这两种方法受校准目标分布和信号强度、转换精度以及天气的影响较大。如何解决上述问题,将是天线组阵未来的研究方向。

## 5 结 论

天线组阵技术是解决深空通信大天线问题的合适方案。本文对天线组阵的关键技术进行了综述,包括阵址布局、阵元直径及数量、阵的构形、信号处理方法等,并对其发展方向进行了初步展望。我国的天线组阵技术还刚刚起步,目前处于演示验证阶段。由于我国卫星天线产业发达,为实现天线组阵提供了良好的基础,天线组阵在我国将具有强大的生命力。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Abraham D. Identifying future mission drivers on the deep space network [ C ]. Conference of Space Mission Operations and Ground Data Systems, Houston, Texas, USA, 2002; 1 - 10.
- [ 2 ] Rogstad D, Mileant A, Pham T. Antenna arraying techniques in the deep space network [ M ]. Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc, 2003, 1, 2, 96, 102, 105.
- [ 3 ] Bagri D. Pros and cons of using arrays of small antennas versus large single-dish antennas for the deep space network [ R ]. IPN Progress Report 42 - 174. August 15, 2008.
- [ 4 ] Potter P, Merrick W, Ludwig A. Large antenna apertures and arrays for deep space communications [ R ]. JPL Technical Report No, 32 - 848. November 1965.
- [ 5 ] Cook J. Deep space communication and navigation study volume 3-system considerations [ R ]. May 1968.
- [ 6 ] Urech J. Telemetry improvement proposal for the 85-foot antenna network [ R ]. Space Programs Summary 37 - 63, 11, JPL, May 31, 1970.
- [ 7 ] Brown D, Brundage W, Ulvestad J, et al. Interagency telemetry arraying for voyager-neptune encounter [ R ]. TDA Progress Report 42 - 102. August 15, 1990.
- [ 8 ] Wilck H. A signal combiner for antenna arraying [ R ]. DSN PR 42 - 25. November and December 1974, 111 - 117.
- [ 9 ] Winkelstein R. Analysis of the signal combiner for multiple antenna arraying [ R ]. DSN PR 42 - 26, 1975.
- [ 10 ] Simon N, Hoynes C. Preliminary telemetry operations experience with the real-time combiner; 1 November 1978 to 1 November 1979 [ R ]. DSN Progress Report 42 - 55, November and December 1979.
- [ 11 ] Stevens R. Applications of telemetry arraying in the DSN [ R ]. TDA Progress Report 42 - 72, October-December 1982.
- [ 12 ] Hurd W, Pollara F, Russell M, et al. Intercontinental antenna arraying by symbol stream combining at ICE giacobini-zinner encounter [ R ]. TDA Progress Report 42 - 84. October - December 1985.
- [ 13 ] Hurd W, Rabkin J, Russell M, et al. Antenna arraying of voyager telemetry signals by symbol stream combining [ R ]. TDA Progress Report 42 - 86. April - June 1986.
- [ 14 ] Pham T. Tracking the galileo spacecraft with the DSCC galileo telemetry prototype [ R ]. TDA Progress Report 42 - 119. November 15, 1994.
- [ 15 ] Layland J, Rauch L. The evolution of technology in the deep space network-a history of the advanced systems program [ R ]. TDA Progress Report 42 - 130. August 15, 1997.
- [ 16 ] Howard L. Prototype real-time baseband signal combiner [ R ]. TDA Progress Report 42 - 60. September and October 1980.
- [ 17 ] Layland J. Interagency array study report [ R ]. TDA Progress Report 42 - 74. April - June 1983.
- [ 18 ] Brown D, Cooper H, Armstrong J, et al. Parkes-CDS CC telemetry array equipment design [ R ]. TDA Progress Report 42 - 85. January - March 1986.
- [ 19 ] Hurd W, Reder L, Russell M. Symbol stream combiner description and demonstration plans [ R ]. TDA Progress Report 42 - 78. April - June 1984.
- [ 20 ] Gatti M. The deep space network large array [ R ]. IPN Progress Report 42 - 157. May 15, 2004.
- [ 21 ] Addario R. Estimates of atmosphere-induced gain loss for the deep space network array [ R ]. IPN Progress Report 42 - 160. February 15, 2005.
- [ 22 ] Mileant A, Hinedi S. Overview of antenna arraying techniques for deep space communications [ J ]. IEEE Transaction on Communication, 1994, 42(2/3/4): 1856 - 1865.
- [ 23 ] Tkacenko A. Modeling the atmospheric phase effects of a digital antenna array communications system [ R ]. IPN Progress Report 42 - 164. February 15, 2006.
- [ 24 ] Shihabi M, Tan H. Antenna diversity technique for future space telemetry modulation scheme [ C ]. IEEE Aerospace Applications Conference, Snowmass, Colorado, USA, 1995; 259 - 273.
- [ 25 ] Rogstad D. Suppressed carrier full-spectrum combining [ R ]. TDA Progress Report 42 - 107, November 15, 1991.
- [ 26 ] Shihabi M, Tan H. Full spectrum combining of staggered-QPSK signals [ C ]. IEEE, ICC, Seattle, Washington, 1995; 879 - 883.
- [ 27 ] Rogstad D. The SUMPLE algorithm for aligning arrays of receiving radio antennas coherence achieved with less hardware and lower combining loss [ R ]. IPN Progress Report 42 - 162, Au-

- gust, 2005.
- [28] 钟晓玲, 周三文, 李海涛, 等. 天线组阵信号合成技术的研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28(增刊): 43-48. [Zhong Xiao-ling, Zhou San-wen, Li Hai-tao, et al. Research on the antenna arraying signal combining technique[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(supplement): 43-48.]
- [29] 卢满宏, 周三文, 谌明, 等. 深空测控通信技术专题研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28(增刊): 11-16. [Lu Man-hong, Zhou San-wen, Chen Ming, et al. Research on deep space TT&C and communication[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(supplement): 11-16.]
- [30] 党宏杰, 袁嗣杰, 史学书. 天线组阵信号 Sumple 与 Simple 算法的仿真研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(4): 78-82. [Dang Hong-jie, Yuan Si-jie, Shi Xue-shu. Simulation of sumple and simple algorithm for aligning arrays of antennas[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(4): 78-82.]
- [31] 李海涛, 丁溯泉, 董光亮, 等. 天线组阵技术研究及其在我国深空测控通信系统中的应用[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(3): 10-14. [Li Hai-tao, Ding Su-quan, Dong Guang-liang, et al. Researches on antenna arraying technology and its applications to deep space TT&C system[J], Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(3): 10-14.]
- [32] 周三文, 卢满宏, 黄建国. 天线组阵全频谱合成效率分析[J]. 遥测遥控, 2009, 30(2): 46-52. [Zhou San-wen, Lu Man-hong, Huang Jian-guo. Analysis on combining efficiency of full-spectrum combining[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(2): 46-52.]
- [33] 孔德庆, 施浒立. 非均匀天线组阵 SUMPLE 权值信噪比及信号合成性能分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 1941-1946. [Kong De-qing, Shi Hu-li. Study of weights performance and combining loss of SUMPLE algorithm for non-uniform antenna arraying[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 1941-1946.]
- [34] 党宏杰, 史学书, 袁嗣杰, 等. 应用于深空阵列信号处理的可变步长 SUMPLE 算法研究[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(6): 27-31. [Dang Hong-jie, Shi Xue-shu, Yuan Si-jie, et al. Study of a variable-step size sumple algorithm applied in deep space array signal processing[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(6): 27-31.]
- [35] Cheung K. Eigen theory for optimal signal combining: a unified approach[R]. TDA Progress Report 42-126, August 15, 1996.
- [36] Lee C, Cheung K, Vlnrotter V. Fast eigen-based signal combining algorithms for large antenna arrays[C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2003, 2: 1123-1129.
- [37] Lee C, Vlnrotter V, Satorius E, et al. Large-array signal processing for deep space applications[R]. IPN Progress Report 42-150, August 15, 2002.
- [38] 赵晓明, 冯恩信, 姜家持. 一种用于深空网天线组阵的基于归一化权的 Matrix-Free Power Method[J]. 遥测遥控, 2009, 30(4): 15-20. [Zhao Xiao-ming, Feng En-xin, Jiang Jia-chi. A normalized-weight-based matrix-free power method in DSN antenna Arraying[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(4): 15-20.]
- [39] 史学书, 王元钦. 深空组阵 Eigen 算法及其低信噪比合成性能分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2347-2353. [Shi Xue-shu, Wang Yuan-qin. Performance of deep space section front eigen combining algorithm in low SNR condition[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(6): 2347-2353.]
- [40] Shi X S, Wang Y Q, Dang H J. Study on array signal processing for deep space communications[C]. IITA'08, Shanghai, China, 2008, 1(20-22): 611-615.
- [41] Gatti M. A phased array antenna for deep space communications[C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2008, paper # 1606: 1-8.
- [42] Vazirani P. Correlated noise effects in spacecraft antenna arraying[D]. Cambridge, Massachusetts, USA; Massachusetts Institute of Technology. May, 1995.
- [43] Dewey R. The Effects of correlated noise in intra-complex DSN arrays for S-band galileo telemetry reception[R]. TDA Progress Report 42-111. November 15, 1992.
- [44] Ye Zhong, Satorius E, Vlnrotter V, et al. Large antenna array techniques for very low SNR channels[C]. IEEE, MILCOM, Vienna, Virginia, USA, 2001:1283-1290.
- [45] Davarian F. Uplink arrays for the deep space network[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10): 1923-1930.
- [46] Bagri D. The effect on spacecraft tracking performance of using an array instead of a single dish for receiving[R]. IPN Progress Report 42-172, February 15, 2008.
- [47] Statman J, Bagri D, Yung C, et al. Optimizing the antenna size for the deep space network array[R]. IPN Progress Report 42-159. November 15, 2004.
- [48] Navarro R, Bunton J. Signal processing in the deep space array network[R]. IPN Progress Report 42-157. May 15, 2004.
- [49] Gatti M. The NASA deep space network (DSN) array[R]. BEACON eSpace at JPL. May, 2005.
- [50] Bagri D, Statman J, Gatti M. Proposed array-based deep space network for NASA[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10): 1916-1922.
- [51] 于志坚. 深空测控通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009, 5:292.
- [52] Hagenauer J. The turbo principle: tutorial introduction and state of the art[C]. Proc. Int. Symposium on Turbo Codes & Related Topics, Brest, France, 1997: 1-11.
- [53] Godtmann S, Pollok A, Hadaschik N, et al. Joint iterative synchronization and decoding assisted by pilot symbols[C]. Proc. of IST Mobile & Wireless Communication Summit, Mykonos, Greece, 2006: 1-5.
- [54] Jones D. Weak-signal phase calibration strategies for large DSN arrays[C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2005, paper # 1167: 1-8.

作者简介:姚飞(1974-),男,博士研究生,信息与通信工程专业,研究方向为通信与测控。  
通信地址:北京市海淀区清华大学主楼12层宇航中心转789实验室(100084)  
电话:13522923202  
E-mail:yflhmyly@sina.com