

文章编号:1000-582X(2010)12-127-06

深空探测天线快速扫描方法

曹海林, 杨力生, 谭晓衡, 杨士中

(重庆大学 通信与测控中心, 重庆 400044)

摘要:针对深空探测中地面站的窄波束天线对深空探测器的捕获问题,提出了在粗轨道预报情况下集馈源阵列电波束扫描和反射面机械扫描于一体的多波束-螺旋快速扫描方法。该方法将馈源阵列布置在反射面的焦平面进行馈电,利用物理光学法对每个馈源激励反射面产生的次级远场方向图进行计算、分析,应用共轭场匹配技术在一定空域同时形成多个正交电扫波束,结合天线反射面的螺旋机械扫描对指定空域进行搜索。最后,对提出的多波束-螺旋扫描捕获方法与传统螺旋扫描方法的性能进行比较分析,结果表明:利用阵列馈电的多波束反射面天线具有更广的可视范围,在更短时间内完成对指定空域的搜索,实现对深空探测器的捕获的同时获得了阵列增益,使更远的深空探测成为可能。

关键词:深空探测;多波束;扫描;物理光学;焦平面;天线阵列

中图分类号:TN822.8

文献标志码:A

A fast scanning method for deep-space exploration antennas

CAO Hai-lin, YANG Li-sheng, TAN Xiao-heng, YANG Shi-zhong

(Center of Communication and Telemetry, Tracking & Command, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A hybrid multi-beam spiral scanning method for deep-space exploration antennas is proposed, which can be used to estimate the true spacecraft position. Physical optics is used to compute and analyze the far-field pattern of the antenna for excitation of each of the individual array elements. The utilization of a focal-plane array in place of a standard single-mode feed improves the field of view of large high-frequency antenna. Multiple closely overlapping beams are synthesis with conjugate field matching technique. Results show that, combined with spiral scanning method, the multiple beams reflector antenna can reduce the scanning time by one third, and the array gain in multi-beam reflector antenna can improve the distance of deep-space exploration.

Key words: deep-space exploration; multi-beam; scanning; physical optics; focal plane; antenna

随着美国重返月球计划启动,人类又掀起了 1 次航天活动的热潮。深空探测是人类在新世纪的 3 大航天活动之一^[1]。深空探测的主要目的是开发和利用空间资源、探索太阳系和宇宙的起源和演化、扩

展人类的生存空间、为人类社会的长期可持续发展服务。

深空探测比静地轨道通信的距离更远,空间传输损耗增加,采用大口径反射面天线及提高工作频

收稿日期:2010-08-15

基金项目:教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-07-0909);重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC2010BB2243);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR11160007)。

作者简介:曹海林(1981-),男,重庆大学博士,主要从事运载器测控、天线、微波信道技术方向研究,
(Tel)02365105925-616;(E-mail)hailincao@cqu.edu.cn。

率是弥补远距离路径损耗实现通信和测控目的主要手段^[2-3],这也使得深空站天线的波束宽度变窄。由于地球和被探测星球的自转、运动及探测器本身的运动,深空测控站和探测器之间只能断续(8~12 h)进行测控和通信,通信链路处于不断地建立、断开状态。因此,在深空探测中,深空站的大口径窄波束天线对探测器的捕获、跟踪是深空探测中 1 项重要任务,是保障整个通信测控链路建立的首要条件。为了克服地球自转对深空站与深空探测器的通信和测控的影响,国际上目前采用的方法是在地球表面建立全球性的陆基深空网。因为,理论上只要在地心角相距 120°的地方各建 1 座深空站,即可对探测器进行全天候联系观测。高精度的定位导航是深空站对探测器进行捕获和跟踪的前提。通过在地球两端建立深空站,增加甚长基线干涉测量(very long base-line interferometry, VLBI)的基线长度,提高 VLBI 的测角精度^[4]。由于安全、保密等原因,目前的国情决定了中国不可能在全球范围建立 3 座深空站。针对高精度定位导航,国内外学者也做了大量的研究^[5-6],利用有限长度的基线提高导航精度。中国目前轨道预报精度不高,若以卫星轨道预报误差约为±0.4°为例,Ka 波段深空站的窄波束大天线(频率为 32 GHz 的 5 m 大的反射面天线半功率波束宽度<0.2°,相对轨道预报范围很小)如何在短时间捕获粗略预报轨道的探测器是个关键问题。因此,在粗轨道预报情况下,研究深空站窄波束天线对探测器实现快速扫描捕获技术具有十分重要的价值。

目前,中继星的星间链路中 Ka 窄波束天线对用户星的扫描搜索捕获采用电机驱动反射面天线进行转动扫描,其中代表性的有恒角速度、恒线速度螺旋搜索方法^[7]、变速度轨迹预处理器规划搜索方法^[8]。在深空探测中,探测器飞越指定空域的时间有限,传输时延大,单一传统的机械扫描方法的扫描速度难以保证捕获成功率。

基于天线阵列的阵列信号处理可实现天线波束综合、自适应波束形成和波达方向估计等提高天线性能的技术^[9-11]。在反射面的焦平面的利用阵列天线对反射面天线馈电的技术已经应用在射电天文、气象雷达等领域中,通过对接收信号加权处理可以补偿反射面失真、在干扰方向形成零限抑制干扰、在更大空域范围内形成电扫波束等功能^[12-16]。在深空通信中,超大反射面(DSS14 天线孔径 70 m,重量达 3 000 t)由于重力引起的形变误差、副反射面位置误差、静态或风致天线指向误差,这种误差现象在 Ka

波段尤为严重。焦平面阵列天线馈电可应用于补偿以上误差引起的能量损失^[17-20]。

从天线扫描的原理出发,深入分析阵列天线对反射面天线馈电的特性。针对深空探测中深空站窄波束天线快速扫描、捕获超远距离探测器的需求,提出了 1 种在粗轨道预报情况下的多波束电扫描和反射面机械扫描相结合的多波束-螺旋快速扫描捕获方法,应用物理光学法逐个对焦平面的馈源阵列中的馈源激励反射产生的次级远场方向图进行计算,利用共轭场匹配技术对馈源接收信号进行加权综合出多个正交波束,仿真结果表明:通过对接接收信号进行加权处理,同时形成的多个波束具有更宽的可视空间并获得了一定的增益。最后对提出的方法与传统螺旋扫描方法的性能进行比较分析,多波束-螺旋快速扫描能明显改善扫描速度。

1 理论与设计

中国载人航天目前采用统一 S 波段(unified s-band, USB)测控体制^[21-22],S 波段天线波束相对较宽,利用传统的圆锥扫描或馈源扫描即可实现快速对飞行器扫描、捕获。深空探测一般指对 2×10^6 km 以远的天体和空间进行探测,其测控距离大大增加。若采用现有统一 S 波段体制或利用 S 波段引导 Ka 波段天线方法,S 波段地面站接收到信号将非常微弱。为了克服地面测控站的微弱信号检测问题,其中 1 个有效的措施就是提高系统的工作频率。自由空间传输损耗 PL_{dB} 为^[23]

$$PL_{dB} = 32.4 + 20\log f + 20\log d, \quad (1)$$

其中: f 为载波频率(MHz); d 为发射天线和接收天线的距离(km)。从式(1)可知,假设深空/地面系统的天线口径、系统噪声系数和发射功率不变,载波频率提高 N 倍,接收到的信号电平将提高 $20\lg N$ dB。但是,频率提高 N 倍同时也将使天线的波束宽带将变为原来的 $1/N$ 。因此,若探测器的预报轨道精度不变,深空站天线扫描、捕获探测器就更难。

1.1 天线扫描

地面测控站天线对探测器的捕获是建立测控通信链路、实现对探测器测控的首要任务。由于对探测器的轨道预报存在误差,测控站天线总是要经历 1 个在预报的空域范围内进行扫描搜索,使天线的波束中心与目标方向偏差小于 $1/2$ 个波束宽度从而实现探测器的捕获,再牵引转入自动跟踪的过程,如图 1 所示。

天线反射面的机械扫描过程是伺服计算机按照预设程序控制电机以一定角速度和线速度进行扫描

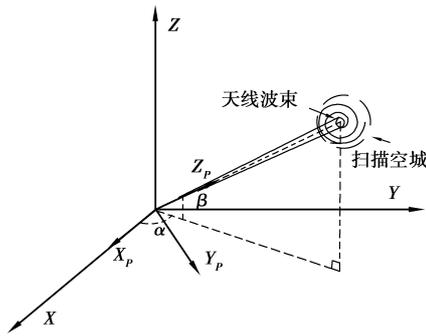


图 1 天线扫描

完成的。扫描轨迹的选择非常关键。阿基米德螺旋扫描方法由于轨迹方程简单、螺距相等、易实现全覆盖扫描及系统稳定等优点在实际工程中常被采用。恒角速度螺旋扫描过程中:角速度恒定易控制;在估计位置的附近空间(目标最可能的区间)以较低的速度扫描,更有利于目标的发现和捕获。设在坐标系 XYZ 内,螺旋扫描开始($t=0$)时刻天线指向的初始方位角为 α_0 ,俯仰角为 β_0 ,恒角速度螺旋扫描开始后 t 时刻天线空间角表达式为^[8]

$$\alpha_t = \alpha_0 + \frac{d\omega t}{2\pi} \cos(\omega t); \quad (2)$$

$$\beta_t = \beta_0 + \frac{d\omega t}{2\pi} \sin(\omega t); \quad (3)$$

其中: d 为阿基米德螺旋线的螺距; ω 为扫描角速度。从式(2)、(3)可以看出通过合理选择螺距和扫描角速度,即可在一定时间内对指定空域(α' , β')进行完全扫描;当角速度 ω 一定,完成指定空域的扫描需要的时间与螺距 d 成反比。而扫描螺距大小选择与扫描天线的波束宽度是相关的,一般来说,扫描螺距取天线 3 dB 波束宽度的 1/2 可保证全空域搜索。因此,天线波束宽度是影响扫描时间的关键因素之一。

1.2 偏馈反射面天线

地面站常用的旋转抛物反射面天线是典型的聚焦系统,平行于反射器主轴的入射波将被聚焦在焦点附近很小的范围内,其方向图为高增益的针状波束,天线波束覆盖的空间范围有限。通常,将整个反射面旋转(如螺旋扫描)可以进行波束扫描,但这种波束扫描的速度和范围也往往受到反射面的体积、重量及伺服系统的速度和精度及天线的波束宽度的限制。但如果将馈源偏离焦点,也会产生偏离的扫描波束^[21],如图 2 所示。

在图 2 中,馈源偏离焦点的横向位移引入了平面波前相对于口径平面的倾斜。波束扫描角 θ_B 和馈源偏离角 θ_F 之间的关系可以用波束偏离因子 (beam deviation factor, BDF) 来定义为^[24]

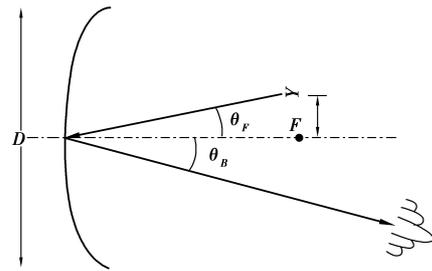


图 2 偏馈反射面天线

$$BDF = \frac{\theta_B}{\theta_F} = \frac{1 + 0.36 \left[4 \frac{F}{D} \right]^{-2}}{1 + \left[4 \frac{F}{D} \right]^{-2}}, \quad (4)$$

其中 F 和 D 分别为图 2 中抛物面天线的焦距和反射面的孔径尺寸。

1.3 阵列馈电反射面天线

Ka 波段深空站天线的波束极窄,在深空探测器有限的飞越指定空域时间内,传统的螺旋扫描速度相对太慢,捕获成功率难以保证。根据偏馈反射面天线可产生偏离的扫描波束的特性,可利用多个馈源组成的馈源阵列安装反射面的焦平面进行馈电,如图 3 所示,反射面天线就产生多个扫描波束,相对于单个馈源馈电时可视范围要更广。

值得注意的是:等式(4)中的右半部分仅在较小的偏离 δ 近似成立。随着馈源横向偏移增加,引入作为口径面内馈源位置函数非线性相位明显,将导致天线方向图变差、波束变宽和增益下降。方向图变差 1 个明显的特征就是称为科马瓣 (coma lobe CL) 的第一旁瓣的变大。馈源阵列大小的选择也应综合考虑非线性相位因素。馈源阵列的阵元偏离了焦点(最多只有 1 个馈源在真正焦点),每个馈源的激励反射面产生的次级远场方向图不同。因此,必须对每个馈源照射反射面产生的次级方向图进行计算、分析。

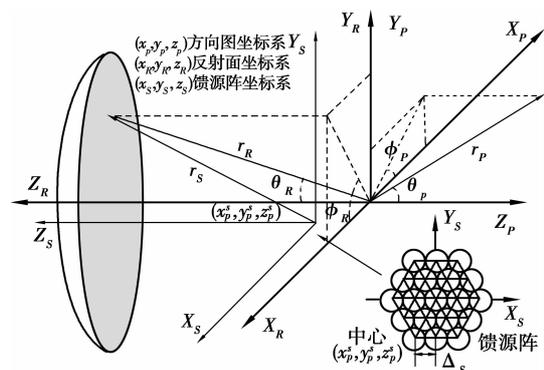


图 3 阵列馈电反射面天线

图 3 中,远场观察点、抛物面、馈源阵分别处于 $C_P = (X_P, Y_P, Z_P), C_R = (X_R, Y_R, Z_R), C_S = (X_S, Y_S, Z_S)$ 3 个坐标系中。3 个不同坐标系关系如图所示,反射面坐标系 C_R 为远场方向图 C_P 坐标系 X, Y 翻转得到,馈源坐标系的原点在 C_P 坐标系的坐标为 (x_P^S, y_P^S, z_P^S) 。 C_P 坐标系中的 X_P 与大地坐标系 X 同方向, Z_P 指向预报轨道的初始方向,如图 1 所示。

深空站天线为了获得高增益,抛物面具有电大曲面半径。当馈源远场照射抛物面时,采用物理光学法可以较精确的计算抛物反射面的辐射场。设反射面是理想电导表面,则利用物理光学法可得到抛物面的表面电流为

$$\bar{J}^{PO} = 2\mathbf{n} \times \bar{H}^i, \quad (5)$$

其中: \mathbf{n} 是指向馈源垂直抛物面的法向矢量; \bar{H}^i 是馈源照射抛物面的入射磁场。对于 y 轴极化馈源,其入射到抛物面电场可以表示为

$$\bar{E}^i(r_s) = [(C_E(\theta_s) \sin \phi_s) \hat{\theta}_s + (C_H(\theta_s) \cos \phi_s) \hat{\phi}_s] \frac{e^{-jk r_s}}{r_s}, \quad (6)$$

其中 $C_E(\theta_s) = (\cos \theta_s)^{q_E}, C_H(\theta_s) = (\cos \theta_s)^{q_H}$ 定义了馈源 E 面和 H 面电场方向图的形状。

因此入射到反射面的磁场 H^i 可表示为

$$\bar{H}^i = \frac{1}{\eta_0} \mathbf{r}_s \times \bar{E}^i(r_s), \quad (7)$$

其中 \mathbf{r}_s 为馈源指向反射面的方向矢量。

在 r_p 方向的远场方向图可以表示为^[24]

$$\bar{E}(r_p) = -jk\eta_0 g(r_p) (I - \hat{r}_p \hat{r}_p) T(\theta_p, \phi_p), \quad (8)$$

其中: $g(r_p) = \frac{e^{-jk r_p}}{r_p}$ 为空间格林函数; $T(\theta_p, \phi_p) = \int_{\Sigma} \bar{J}_S^{PO} e^{jkr \hat{r}_p} d_s$ 为对面电流的积分量。

1.4 多波束—螺旋扫描

由式(2)、(3)可知,扫描角速度一定时,天线波束宽度越宽,螺旋扫描时螺距可设更大,完成指定空域扫描时间更短。共焦面的馈电阵列中的 N 阵元偏馈能产生 N 个指向不同方向的波束,具有更广的可视范围。当轨道预报范围大于可视范围时,若直接将这个 N 个波束用于螺旋扫描,可减少天线扫描的时间。但以上方法不足之处在于:由空间位置决定的 N 个波束的旁瓣和方向都不可调整,不易使用。根据阵列信号处理理论,若将共焦面的各馈源信号分别加权后便可综合出期望的方向图,提高反射面天线的性能。

由于每个馈源照射反射面形成的次级方向图并不一样,所以不能按照常规阵列信号处理中仅根据空间位置的不同形成的相位差信息来做加权量。通常用于焦平面阵元的权的确定采用共轭场匹配

(conjugate field matching, CFM) 技术。此法主要思想是,将平面波从期望方向照射反射面,利用物理光学法计算反射面的共焦面的电场分布,取各个阵元位置上电场的共轭值为各个阵元的权值。这种方法的不足之处在于:在实际应用和仿真过程中很难产生控制旁瓣电平的锥削平面波,因此通过计算焦平面电场获得共轭场匹配权向量形成的方向图旁瓣不易控制^[17]。根据互易定理,可使用间接的方式获得权值:即先计算馈源阵每个阵元单独馈电反射面天线的远场方向图,取期望方向的远场电场共轭值为权值。然后利用约束波束形成的方法对每个馈源进行加权处理,综合期望方向、符合旁瓣电平要求的远场方向图。

因此,为了改善深空站窄波束天线对探测器的扫描、捕获速度,可以将馈源阵列接收的信号加权,同时形成多个正交的波束,结合阿基米德螺旋扫描对指定空域进行搜索,如图 4 所示。由于多波束反射面天线可视范围增加,因此阿基米德螺旋扫描的螺距增加,扫描的时间就可减少。扫描过程中,信号的门限设置应该综合虚警、检测概率、捕获时间、旁瓣错锁等因素。

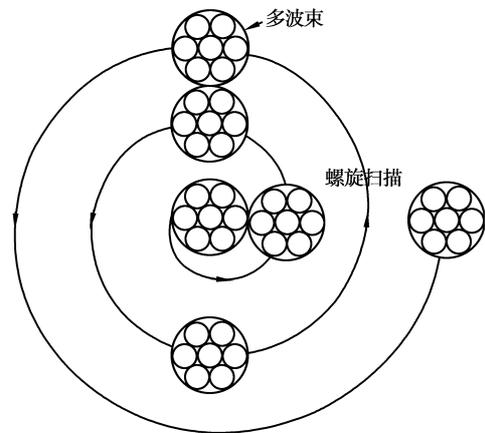


图 4 多波束—螺旋扫描

2 仿真结果和分析

以 5 m 孔径的抛物反射面天线为例, $F/D = 0.8$, 频率 32.05 GHz, 设馈源为圆喇叭, 方向图具有圆对称特性, 且 $q_E = q_H = 6.5$, 此时抛物面边缘锥削电平约为 -11 dB。反射面的焦点与坐标系 C_P 的原点重合。

2.1 偏馈反射面天线分析

首先,将馈源分别放在焦点、偏离焦点 $2\lambda, 4\lambda$, 对反射面偏馈方向图进行计算分析。各位置馈电产生的次级方向图扫描波束如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,偏离焦点 $2\lambda, 4\lambda$ 的馈源馈电分别产生了偏移 $0.25^\circ, 0.51^\circ$ 的次级方向图波束。

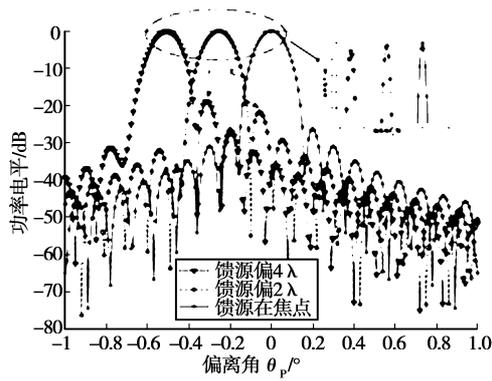


图 5 偏馈反射面天线

与在焦点的馈源产生的波束相比,随着偏移量增加,偏馈产生的扫描波束科马瓣电平增加,增益略有下降(如:偏离焦点 4λ 的馈源产生的波束的第一旁瓣上升了 7 dB,增益下降 0.1 dB)。因此,由于非线性相位因素,馈电阵列中每个馈源激励反射的远场方向图并不一样。馈电阵列大小的选择应考虑遮挡效应及馈源位置函数引起的非线性相位因素。

2.1 多波束-螺旋扫描

在抛物面的焦平面放置如图 3 类似的 37 六边形喇叭阵进行馈电,阵元之间距离 ΔS 为 0.6λ 。先利用物理光学法对每个喇叭阵照射反射面产生的次级远场方向图进行计算、存储,再将计算到的方向图数据利用间接共轭场匹配法综合 7 个正交的波束。其中 3 个波束在 $\phi_p = 0$ 面的方向图如图 6 所示。

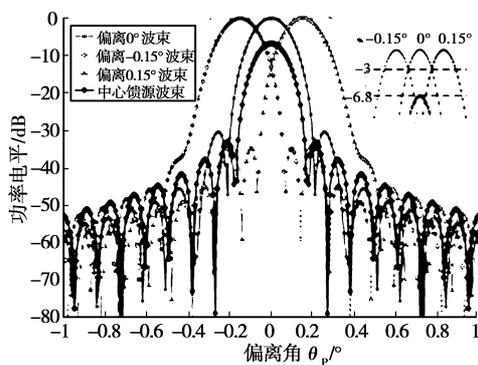


图 6 多波束天线

在图 6 中,形成了指向 θ_p 为 -0.15° 、 0° 、 0.15° 3 个波束,从图中可以看出:各波束正交于 3 dB 处,3 个波束可覆盖 $\pm 0.23^\circ$ 空域,相对于中心单个馈源激励反射面产生波束 0.14° ,其覆盖范围增加为原来的 3 倍;并且,综合形成的波束相对于单个馈源对反射面馈电的方向图有约 6.8 dB 的增益。因此,利用阵列对反射面馈电可以在一定范围内综合出期望方向的波束,增加天线的可视范围。阵列增益提高了信号的信噪比,缓解了深空探测微弱信号接收的困难。

按照螺旋扫描螺距的选择,分别取多波束天线

3 dB 波束宽带的 $1/20$ 、 23° 和单馈源天线 3 dB 波束宽带的一半 0.07° 作为螺距,角速度为 $0.3^\circ/\text{s}$,对 $\pm 0.4^\circ$ 的不定区间进行阿基米德螺旋扫描,扫描轨迹及搜索角度如图 7 所示。

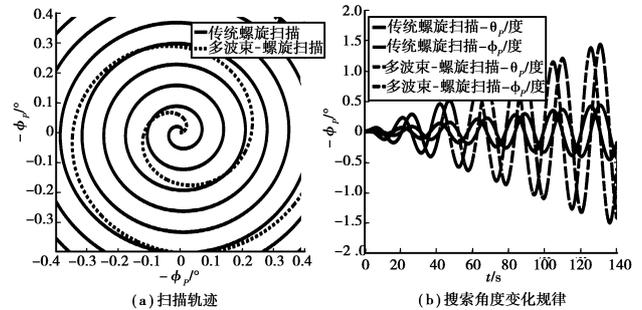


图 7 螺旋扫描曲线

从图 7 中扫描轨迹曲线可以看出:大螺距的多波束-螺旋扫描可以更快的完成对指定空域进行搜索,以图 7 (a) 中的 $(-0.4^\circ, 0^\circ)$ 点为例,多波束螺旋扫描从原点到该点只需约 1.75 圈,而传统螺旋扫描需 5.75 圈才能到达。从图 7 (b) 中搜索角度变化规律可以看出传统螺旋扫描完成 $\pm 0.4^\circ$ 空域的扫描需要 130 s,而多波束-螺旋扫描则只需要大约 45 s,扫描时间缩短约为原来的 $1/3$ 。值得一提的是:若轨道精度进一步提高或馈电阵元增加,当可视范围大于预报的不确定范围时,深空站天线可不需螺旋扫描只通过同时综合多个波束就可捕获探测器。

综上,馈源偏离焦点馈电可产生扫描波束,随着偏馈距离的增加,馈源位置引起的非线性相位效应越明显。通过合理设计在反射面的焦平面的馈源阵列,利用物理光学法对每个馈源馈电反射面产生的次级方向图分析,运用共轭场匹配技术综合出多个期望方向的正交的波束可以大大改善反射面天线的可视范围。多波束反射面天线由于较传统单个馈源激励的反射面天线具有更大的波束宽度,进行扫描时,多波束反射面天线扫描螺距可设更大,能于更短的时间完成指定空域的扫描。综合形成的多波束在改善可视范围的同时通过对各通道的信号进行加权处理获得了阵列增益,改善了信号的信噪比,为超远距离深空探测提供可能。

3 结 语

针对深空探测中地面站窄波束天线捕获深空探测器难的问题,提出了一种电波束扫描和机械扫描相结合的多波束-螺旋快速扫描捕获方法。从天线扫描原理出发,利用物理光学法对偏馈反射面方向图进行分析,对共焦点馈源阵列中每个馈源照射反射面形成的次级远场方向图计算,利用共轭场匹配技术综合出一组正交的波束,形成了具有更广的可

视范围多波束反射面天线,以更大螺距进行螺旋扫描。仿真结果和分析表明多波束一螺旋扫描在较粗预报范围能快速扫描、捕获探测器。利用共轭场匹配技术综合的多波束不但能改善天线的可视范围,而且获得了更高的增益,改善了链路中信号的信噪比,为更远的深空探测提供可能。该方法同样适用中继星星间链路中的窄波束捕获用户星的情况,非常具有实用价值。

参考文献:

- [1] 欧阳自远,李春来,邹永廖,等.深空探测的进展与我国深空探测的发展战略[J].中国航天,2002,13(12):28-32.
OUYANG ZI-YUAN, LI CHUN-LAI, ZOU YONG-LIAO, et al. Evolvement of deep space exploration and strategy of our country's deep-space exploration [J]. Aerospace China, 2002, 13(12): 28-32.
- [2] FARAMAZ D, LUITJENS P. Technical advances in deep-space communication and tracking [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(11):2108-2110.
- [3] 张乃通,李晖,张钦宇.深空探测通信技术发展趋势及思考[J].宇航学报,2007,28(4):786-793.
ZHANG NAI-TONG, LI HUI, ZHANG QIN-YU. Thought and developing trend in deep space exploration and communication [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 786-793.
- [4] 刘嘉兴.向技术极限挑战-深空测控通信的目标[J].电讯技术,2008,48(4):1-7.
LIU JIA-XING. Challenging the technology limit: the goal of deep-space TTC & data transmission [J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(4): 1-7.
- [5] MALCOLM C, HUANG S, ROBERT L. Stable photonic links for frequency and time transfer in the deep-space network and antenna arrays [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10): 1931-1946.
- [6] 郑为民,舒逢春,张冬.用于深空跟踪测量的VLBI软件相关处理技术[J].宇航学报,2008,29(1):18-23.
ZHENG WEI-MIN, SHU FENG-CHUN, ZHANG DONG. Application of software correlator to deep-space VLBI tracking [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 18-23.
- [7] 黎孝纯,于瑞霞,闫剑虹.间链路天线扫描捕获方法[J].空间电子技术,2008,26(7):5-11.
LI XIAO-CHUN, YU RUI-XIA, YAN JIAN-HONG. The antenna scanning method between satellites [J]. Space Electronic Technology, 2008, 26(7): 5-11.
- [8] 孙小松,杨涤,耿云海,等.中继卫星天线指向控制策略研究[J].航空学报,2004,25(4):376-380.
SUN XIAO-SONG, YANG DI, GENG YUN-HAI, et al. The antenna pointing control strategy study of tracking and data relay satellite [J]. ACTA Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 376-380.
- [9] HARRY L. Optimum array processing [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [10] JEFFS B D, WARNICK K F. Spectral bias in adaptive beamforming with narrowband interference [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1373-1382.
- [11] CAO H L, YANG L S, TAN X H, et al. Computationally efficient 2-D DOA estimation using two parallel uniform linear arrays [J]. ETRI Journal, 2009, 31(6): 806-808.
- [12] HANSEN C K, WARNICK K F, JEFFS B D, et al. Interference mitigation using a focal plane array [J]. Radio Science, 2005, 40(5): 1-13.
- [13] POULSEN A J, JEFFS B D, WARNICK K F, et al. Programmable real-time cancellation of glonass interference with the green bank telescope [J]. The Astronomical Journal, 2005, 130(6): 2916-2927.
- [14] NAGEL J R, WARNICK K F, JEFFS B D, et al. Experimental verification of RFI mitigation with a focal plane array feed [J]. Radio Science, 2007, 42(6): 1-8.
- [15] WARNICK K F, JEFFS B D. Efficiencies and system temperature for a beamforming array [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008, 7(1): 565-568.
- [16] JEFFS B D, WARNICK K F, LANDON J, et al. Signal processing for phased array feeds in radio astronomical telescopes [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(5): 635-646.
- [17] BAHADORI K, RAHMAT S Y. An array-compensated spherical reflector antenna for a very large number of scanned beams [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(11): 3547-3554.
- [18] BHATTACHARYYA A K. Projection matrix method for shaped beam synthesis in phased arrays and reflectors [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(3): 675-683.
- [19] KEHN M N M, SHAFAI L. Characterization of dense focal plane array feeds for parabolic reflectors in achieving closely overlapping or widely separated multiple beams [J]. Radio Science, 2009, 44: 1-25.
- [20] SAKA B, YAZGON E. Pattern optimization of a reflector antenna with planar-array feeds and cluster feeds [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(1):93-97.
- [21] 杨士中,杨力生,谭晓衡,等.多飞行器测控技术的研究[J].宇航学报,2002,23(6):12-18.
YANG SHI-ZHONG, YANG LI-SHENG, TAN XIAO-HENG, et al. Study on the TT&C for the multi-vehicles [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(6): 12-18.
- [22] 刘嘉兴.载人航天USB测控系统及其关键技术[J].宇航学报,2005,26(6):743-747.
LIU JIA-XING. Key technologies of the USB TT&C system for manned space flight [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(6): 743-747.
- [23] SAYER C. Complete wireless design [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [24] STUTZMAN W L, THIELE G A. Antenna theory and design (2nd ed) [M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.