

文章编号:1001-9081(2010)07-1739-03

## 基于遗传算法的深空探测天线综合

曹海林, 杨力生, 王韬, 王帅涛

(重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室, 重庆 400030)

(hailincao@cqu.edu.cn; caohailin@gmail.com)

**摘要:**为了改善深空探测中共焦面阵列馈电抛物反射面天线的可视范围,提出一种基于遗传算法的扫描波束综合方法。基于物理光学法计算共焦面阵列中每个馈源照射反射面的次级远场方向图,利用遗传算法优化得到的权值对各次级方向图加权合成期望的波束。仿真和分析结果表明:提出的基于遗传算法的共焦面阵列馈电反射面方向图综合与传统共轭场匹配方法相比,可控制旁瓣电平,更精确综合出期望方向图,扩大深空探测天线的可视范围。

**关键词:**方向图综合; 遗传算法; 深空探测; 共焦面阵列; 共轭场匹配

中图分类号: TN821+.8 文献标志码:A

## Pattern synthesis of antenna in deep-space exploration with genetic algorithm

CAO Hai-lin, YANG Li-sheng, WANG Tao, WANG Shuai-tao

(Key Laboratory of Telemetry Tracking and Command and Communication on Air Vehicle of Ministry of Education,  
Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Genetic Algorithm (GA) was used to synthesize the patterns of the focal plane array feeding parabolic reflector antenna in deep-space exploration. Physical optics was used to compute the far field pattern of the antenna for excitation of each of the individual array elements in focal-plane array. Various scanning patterns were synthesized for deep-space exploration with this GA. The results show the proposed algorithm can control the sidelobe level, more precisely synthesize the expected pattern, and expand the visual range of deep space exploration antenna.

**Key words:** pattern synthesis; genetic algorithm (GA); deep-space exploration; focal-plane array; conjugate field matching

### 0 引言

深空探测是人类在新世纪的三大航天活动之一<sup>[1]</sup>。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和为人类社会的长期可持续发展服务。

深空探测比近地轨道通信的距离更远, 路径损耗更大, 采用大口径反射面天线及提高工作频率是弥补远距离路径损耗, 实现通信和测控目的的主要手段<sup>[2-3]</sup>。随着天线口径加大及工作频率提高, 深空探测地面站天线的波束越来越窄, 这也使得天线对空中目标的捕获更难, 天线可视空域范围越来越小。

天线阵列的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高性能天线技术<sup>[4-6]</sup>。当使用安装在天线反射面的焦平面阵列天线馈电时, 通过对馈源阵接收的信号处理可以补偿重力引起的反射面变形失真和副反射面位置失真, 可以在干扰方向形成零限抑制干扰, 可以在更大空域范围内形成电扫波束改善可视范围<sup>[7-10]</sup>。天线综合是一种根据期望的天线辐射方向图确定天线的类型及激励的科学问题。共轭场匹配(Conjugate Field Matching, CFM)法是阵列馈电反射面天线方向图综合常用的一种方法, 它利用焦面电场的共轭值对馈源信号加权, 可以综合出电扫方向图, 改善天线的可视范围, 但方向图的旁瓣电平等参数不易控制<sup>[11]</sup>。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种借鉴生物的自然选择和遗传进化机制开发的全局优化自适应概率搜索算法, 已

经广泛应用到阵列天线的期望方向图(指向、旁瓣、形状等满足一定要求)综合中<sup>[12-14]</sup>。在此类应用中, 通常假设阵列天线中各阵元的方向图相同, 通过定义合理的适应度函数对每个阵元的权值、位置等参数进行优化, 再利用阵元的方向图与阵列因子相乘获得期望的阵列方向图。但对于深空探测中阵列馈电的反射面天线, 由于共焦面馈源阵列的每个馈源的位置不同, 各馈源激励反射面所产生的次级远场方向图不同, 并不能简单地利用方向图相乘原理。需对每个馈源激励反射面的次级方向图逐个进行计算, 而这种计算往往需要很长时间。若直接利用GA对馈电阵列的每个馈源的权值进行优化, 每次计算个体的适应度都需计算每个馈源激励反射面天线的次级远场方向图, 其计算量之大一般计算机难以胜任。

本文针对深空探测应用中的共焦面阵列馈电的反射面天线波束综合优化问题, 利用物理光学法逐个对馈电阵列中的每个馈源激励反射面产生次级远场方向图进行计算、存储, 选择恰当的适应度函数进行约束, 利用遗传算法对权值进行优化后将各次级方向图加权后得到期望的方向图。因此, 将存储好的方向图加权叠加, 在优化时并不需要每次都对次级方向图进行重新计算, 大大减少了计算量。与传统共轭场匹配法相比, 可有效控制旁瓣电平等参数, 更能综合出期望的方向图, 有利于空间探测的应用。

### 1 共焦面阵列馈电反射面天线

深空地面站常用的旋转抛物反射面天线是典型的聚焦系

收稿日期: 2010-02-10; 修回日期: 2010-03-23。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-07-0909); 重庆市院士基金资助项目(CSTC2008BC2001)。

作者简介: 曹海林(1981-), 男, 江西新余人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 阵列信号处理、天线技术; 杨力生(1972-), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向: 通信与测控中的电路与系统; 王韬(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向: 多飞行器测控技术、嵌入式系统; 王帅涛(1985-), 男, 河南淮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 通信与测控中电路与系统。

统,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。但如果将馈源偏离焦点,也会产生偏离的扫描波束<sup>[15]</sup>。因此,在焦平面利用阵列天线对反射面馈电能同时产生多个波束,增加反射面的可视范围。阵列馈电反射面天线如图1所示。

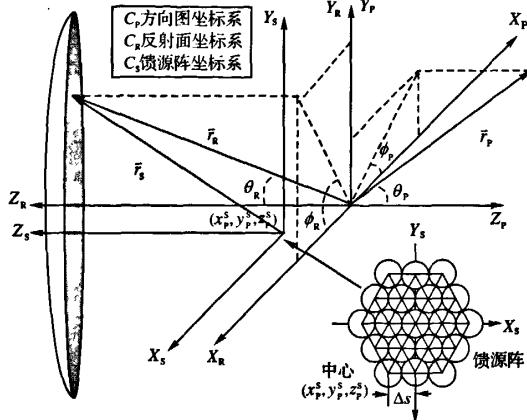


图1 阵列馈电反射面天线

图1中,远场观察点、抛物面、馈源阵分别处于 $C_p = (X_p, Y_p, Z_p)$ ,  $C_R = (X_R, Y_R, Z_R)$ ,  $C_s = (X_s, Y_s, Z_s)$ 三个坐标系中。反射面坐标系 $C_R$ 为远场方向图 $C_p$ 坐标系 $X, Y$ 轴翻转得到,馈源坐标系的原点在 $C_p$ 坐标系的坐标为 $(x_s^s, y_s^s, z_s^s)$ 。利用物理光学法可得到抛物面的表面电流为:

$$J_s^{PO} = 2\hat{n} \times \vec{H}^s \quad (1)$$

其中: $\hat{n}$ 是指向馈源垂直抛物面的法向矢量; $\vec{H}^s$ 是馈源照射抛物面的入射磁场。

在远场观测点 $r_p$ 方向的远场方向图可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$E(r_p) = -jk\eta_0 g(r_p) (I - \hat{r}_p \hat{r}_p) T(\theta_p, \varphi_p) \quad (2)$$

其中: $g(r_p) = \frac{e^{-jkr_p}}{r_p}$ 为空间格林函数; $T(\theta_p, \varphi_p) = \int_S J_s^{PO} e^{jk\vec{r}_p \cdot \vec{r}_s} ds$ 为面电流的积分量。

馈电阵列中的 $N$ 个阵元偏馈能产生 $N$ 个指向不同方向的波束,具有更广的可视范围。但 $N$ 个波束的旁瓣和方向都是馈源空间位置决定的,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,可综合出期望的方向图,提高反射面天线的性能。

## 2 遗传算法天线综合

由于在深空探测的阵列馈电反射面天线中,每个馈源照射反射面形成的次级方向图并不一样,所以不能像常规阵列信号处理那样仅根据阵元空间位置形成的相位差信息来做加权量。阵列馈电反射面天线的方向图综合通常采用共轭场匹配(技术确定焦平面阵元的权)。此方法主要思想是: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所形成的方向图的旁瓣不易控制<sup>[11]</sup>。

### 2.1 遗传算法

遗传算法是一种全局搜索方法,它从某一初始群体出发,遵循一定的操作规则,不断迭代计算,逐步逼近问题的最优

解,具有随机选择初始值和全局寻优的特点。GA已在传统的阵列天线方向图综合中应用,其主要步骤如图2所示<sup>[12]</sup>。

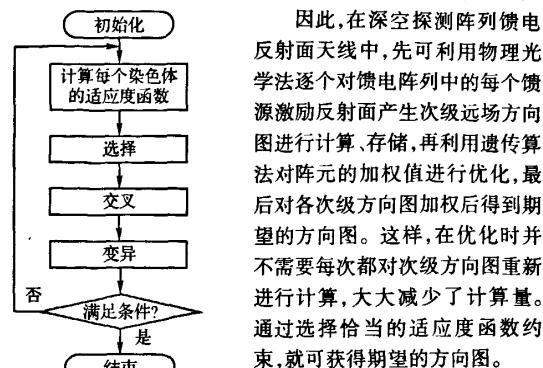


图2 遗传算法流程

因此,在深空探测阵列馈电反射面天线中,先可利用物理光学法逐个对馈电阵列中的每个馈源激励反射面产生次级远场方向图进行计算、存储,再利用遗传算法对阵元的加权值进行优化,最后对各次级方向图加权后得到期望的方向图。这样,在优化时并不需要每次都对次级方向图重新进行计算,大大减少了计算量。通过选择恰当的适应度函数约束,就可获得期望的方向图。

### 2.2 适应度函数

由于在阵列馈电反射面天线中,每个馈源激励反射面得到的次级方向图并不一样。因此应首先利用式(2)逐一计算 $\bar{E}_i(r_p)$ ( $i = 1, 2, \dots, N$ )。对各馈源进行加权后得到的阵列反射面方向图可表示为:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N w_i \bar{E}_i(\theta, \varphi) \quad (3)$$

其中: $w_i = a_i \times e^{\theta_i}$ ,  $a_i, \theta_i$ 分别代表对第 $i$ 个阵元的幅度加权及相位权。为了在指定的方向形成旁瓣电平满足一定要求的方向图。适应度函数可以定义为:

$$Fit(w_1, w_2, \dots, w_N) = \min(a \times (\bar{F}(\theta_0, \varphi_0) - 1) + \beta \times \max_{\theta, \varphi \in S}(\bar{F}(\theta, \varphi))) \quad (4)$$

其中: $\bar{F}(\theta, \varphi) = \frac{F(\theta, \varphi)}{\max(F(\theta, \varphi))}$ 为归一化远场方向图, $S$ 为旁瓣区域, $\alpha, \beta$ 分别为期望方向指向误差和旁瓣电平误差在适应度函数中的权重。

## 3 仿真及结果分析

仿真分析中以5 m孔径的抛物反射面天线为例,焦距比 $F/D = 0.8$ ,工作频率32.05 GHz,设馈源为圆喇叭(方向图具有圆对称特性),反射面的焦点与坐标系 $C_p$ 的原点重合。

### 3.1 偏馈反射面天线分析

在抛物面的焦平面放置类似如图1结构的7阵元六边形喇叭馈源阵,阵元之间距离 $\Delta s$ 为 $0.6\lambda$ ( $\lambda$ 表示电磁波长)。各馈源分别形成的多个波束及共轭场匹配综合形成的方向图如图3所示。

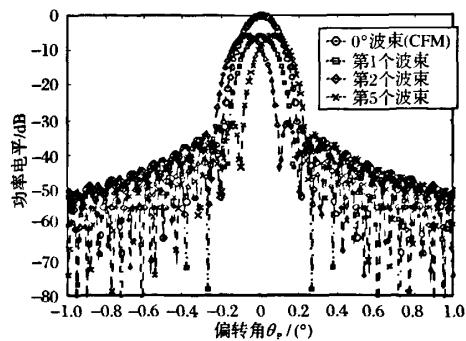


图3 多波束及共轭场匹配综合方向图

在图3中,馈源1、2、5馈电抛物面分别形成了三个独立的波束,共轭场匹配法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。

### 3.2 遗传算法方向图综合

在抛物面的焦平面放置类似如图1结构的61阵元六边形喇叭阵进行馈电,阵元之间距离 $\Delta S$ 为 $0.6\lambda$ 。分别利用共轭场匹配方法和遗传算法优化综合出指向偏离 $0^\circ$ 和 $0.2^\circ$ 的波束。电扫波束如图4所示。

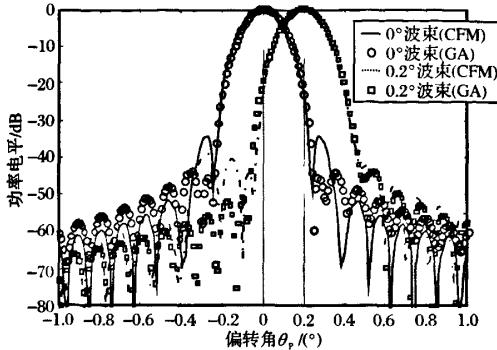


图4 共轭场匹配和遗传算法综合方向图

从图4可以看出:利用共轭场匹配法和遗传算法都能综合出指向 $0^\circ$ 和 $0.2^\circ$ 的波束。基于遗传算法的波束综合方法(带圈和带框表示的结果)比共轭场匹配方法(黑实线)具有更低的旁瓣电平,利用约束准则可控制其旁瓣电平水平。

同理,再利用上述两种方法综合出指向 $0.25^\circ$ 波束,结果如图5所示。

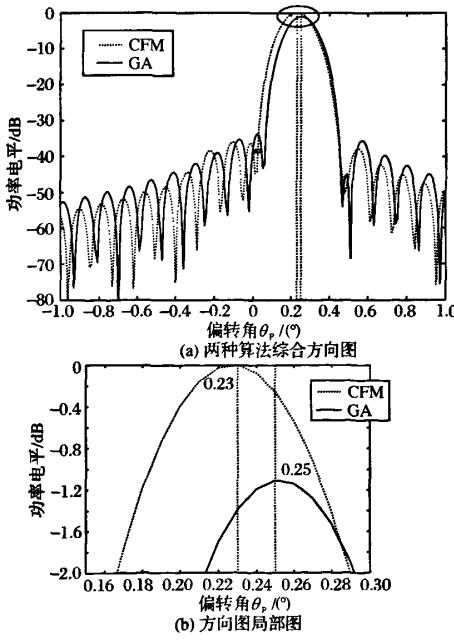


图5 共轭场匹配和遗传算法综合方向图

从图5可以看出,基于遗传算法优化综合出的方向图指向了 $0.25^\circ$ ,而基于共轭场匹配方法综合的方向图实际指向了 $0.23^\circ$ ,指向产生了偏差。这在使用扫描波束法寻找飞行器应用中,会得到错误的方位估计。值得指出:利用遗传算法对阵列馈电反射面天线综合的方向图增益较共轭场匹配方法综合的方向图有约1 dB的下降,这是为了约束使方向图的最

大值指向 $0.25^\circ$ 而抑制了左边波束部分能量所引起的。综上,基于遗传算法的阵列馈电反射面天线方向图综合方法较传统的共轭场匹配方向图综合法具有更宽的可视范围。

## 4 结语

为了改善深空探测中大口径抛物反射面窄波束天线的可视范围,提出一种基于GA的阵列馈电波束综合方法。在用物理光学法计算共焦面馈电阵中每个馈源照射反射面的次级远场方向图的基础上,利用GA对馈电阵列的权值进行优化,再对各个馈源产生的次级方向图加权综合出期望方向图。仿真和分析结果表明:本文提出的方法与传统共轭场匹配方法相比,更能精确指向期望方向,控制旁瓣电平,综合出期望方向图,扩大深空探测天线的可视范围。该法同样也适用于其他地面站天线、空间中继星天线,具有一定的实用价值。

### 参考文献:

- 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.
- FARAMAZ D, LUITJENS P. Technical advances in deep-space communication and tracking[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(11): 2108-2110.
- 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.
- HARRY L. Optimum array processing[M]. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- KEHN M N, 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(6): 1-25.
- 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.
- 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.
- RAHMAT S Y, MICHELSSEN E. Electromagnetic optimization by genetic algorithm[M]. New York: Wiley, 1999.
- 刘源,邓维波,许荣庆.应用遗传算法进行阵列天线综合[J].电子与信息学报,2004,26(3): 400-404.
- 边莉,车向前,杨国辉,等.基于遗传算法的低副瓣阵列天线综合[J].计算机应用,2008,28(7): 1656-1659.
- STUTZMAN W L, THIELE G A. Antenna theory and design[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2006.

## 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](http://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](http://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](http://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>