

文章编号 1005-0388(2002)05-0539-05

# 遗传算法在阵列天线赋形波束综合中的应用<sup>\*</sup>

刘 昊<sup>1</sup> 郑 明<sup>1</sup> 樊德森<sup>1</sup> 鲁加国<sup>2</sup>

(1. 中国科技大学,安徽 合肥 230024; 2. 华东电子工程研究所,安徽 合肥 230031)

**摘 要** 基于遗传算法,提出了一种新的阵列天线赋形波束综合方法。在阵列天线单元数、单元间距一定的情况下,对阵列天线单元馈电幅度、相位进行优化选择,使赋形波束达到设计要求。解决了遗传算法在阵列天线赋形波束应用时的关键技术和实现方法,进行了实验例证,获得了优良的赋形波束形状,显示了遗传算法在天线设计中的广泛应用前景。

**关键词** 遗传算法 赋形波束 优化设计

**中图分类号** TN82 **文献标识码** A

## Synthesis of antenna arrays shaped-beam using genetic algorithm

LIU Hao<sup>1</sup> ZHENG Ming<sup>1</sup> FAN De-sen<sup>1</sup> LU Jia-guo<sup>2</sup>

(1. University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230024, China;

2. East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei Anhui 230031, China)

**Abstract** A new pattern synthesis technique which uses Genetic Algorithm to optimize antenna arrays shaped-beam patterns is proposed in this paper. Given the determinate number and space between the antenna arrays units, the feeding-back amplitudes and phases are optimized and selected by this way to make the shaped-beam patterns satisfy the designing request. This paper solves the key technique and way to apply Genetic Algorithm to antenna arrays shaped-beam patterns, proves it by experiment. There is good agreement between the desired and calculated radiation patterns. All these show the abroad application foreground of Genetic Algorithm in antenna designing.

**Key words** genetic algorithm, shaped-beam, optimization methods

## 1 引 言

在雷达、通讯等众多领域中,往往需要特殊形状的天线波束(如余割平方的波束、宽波束等),即天线赋形波束。根据波束形状求解阵列天线激励幅、相值的过程称为综合。阵列天线波束综合是一个十分困难的非线性优化问题。虽然已有许多经典的优化方法(如微扰法等)可以借用,但是这些方法都是针对某一类特定的问题而提出的。在一些更复杂的综合实例如已知方向上有多个主波束和一个或多个零

点,经典方法就很难实施,因为有很多可能的情况。而检查所有可能的幅相值非常困难,因为这些经典方法有着自己的既定规则。经典优化方法还有其他难以避免的缺点:如必须仔细选择良好的初始设计以保证优化过程的成功实现;对目标函数的连续性、可微分性有特殊要求等。因此需要研究发展一种更加有效的启发式的优化方法。而遗传算法以其稳健性、随机性,很适合于解决此类复杂的非线性优化问题,而且对搜索空间也没有什么特殊要求。近年来,遗传算法在天线设计领域已经得到广泛的应用。

在一些特殊的应用中,对天线波束方向图有特殊要求,在给定天线形状与阵元个数的前提下,如何通过恰当地选择各阵元的间距、馈电电流幅值及相位来获得指定的天线方向图是阵列天线优化中的一类重要课题。对于形状复杂的大阵列天线,传统的解析优化方法(如道尔夫——切比雪夫综合法、泰勒阵等)难以计算,采用数值分析方法较为适宜。但是天线最优化问题中的目标函数或约束条件大多呈多参数、非线性、不可微甚至不连续,因此基于梯度寻优技术的传统数值优化方法无法有效地求得工程满意解。本文利用遗传算法对 32 单元线阵的 30°余割平方的赋形波束方向图进行优化,得到规定要求的方向图,并且应用于天线设计中。

2 理论

2.1 阵列天线赋形波束综合

R. F. Hyneman 和 R. M. Johnson 利用近似等波纹函数,建立了阵列天线在赋形区域的微扰方程。对于微扰方程来说,波纹的形状和零点位置随着迭代过程不断变化,在迭代收敛时,就可以得到近似函数  $F(x)$  和零点位置。再利用 Woodward 抽样方法,便可以获得阵列天线的口径分布函数

$$\alpha(a) = \sum_{p=-(M+N)}^{M+N} F(p) e^{-j\pi p u} \tag{1}$$

式中  $2N$  是赋形主瓣区的零点,  $2M$  是副瓣区域的零点。从离散方程(1)可以导出线阵天线的口径激励幅相分布。文献[2]成功地运用近似等波法,对 S 波段 16 单元线阵天线 20°余割平视赋形波束进行综合,并且对少数单元,小空域赋形波束综合方法进行了发展<sup>[4]</sup>。

根据上述综合理论,得到 32 单元线阵天线的口径激励系数。在假设天线辐射单元为理想全向单元的情况下,天线波瓣图与天线单元的激励幅度和相位关系式为

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^N I_i e^{jkd(i-1)\sin\theta} \tag{2}$$

式中  $I_i$  是复数,  $I_i = |I_i| e^{j\phi_i}$ ,  $d$  是天线单元的间距,  $k$  是波数,  $k = 2\pi/\lambda$ 。

2.2 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm)只需利用目标的取值,而无需梯度等高价值信息,简单通用、稳健性强、适于并行处理,尤其适用于处理传统搜索方法难于解决的复杂和非线性问题。遗传机制主要包括选择、交叉和变异。它们构成了所谓的遗传操作,使遗传算法具有了其他传统方法所没有的特性。

遗传算法的基本流程图 1 所示。

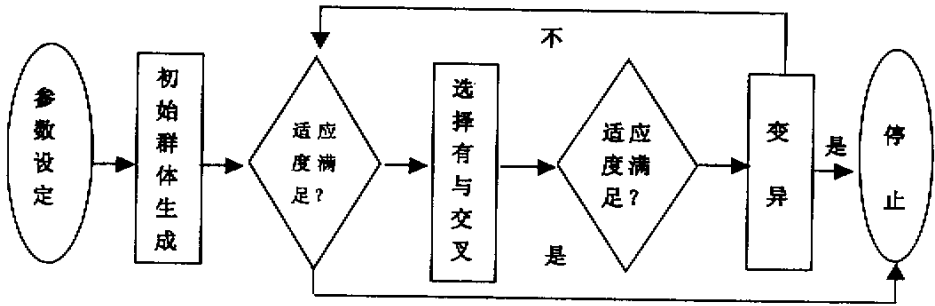


图 1 遗传算法流程图

- 遗传算法中包含了如下四个基本要素：
- (1)参数设定:由于遗传算法不能直接处理解空间的解数据,因此必须通过编码将他们表示成遗传空间的基因型串结构数据。通常使用的是二进制编码。
  - (2)初始群体的生成:由于遗传算法的群体操作需要,所以必须为遗传操作准备一个由若干初始解组成的初始群体。
  - (3)适应度评估检测:遗传算法在搜索进化过程

- 中一般不需要其他外部信息,仅用评估函数值来评估个体或解的优劣,并作为以后遗传操作的依据。评估函数值又称作适应度。
- (4)遗传操作设计,包括选择、交叉和变异：
  - a.选择机制:选择是遗传算法中最主要的机制,也是影响遗传算法的最主要的因素。从群体中选择优胜个体,淘汰劣质个体的操作叫选择。选择的目的是把优化的解直接遗传到下一代或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代。判断个体优良与否

的准则就是各自的适应度,个体适应度越高,其被选择的机会就越多。常用的选择算子有:按适应度比例选择、期望值法、排序选择、最佳个体保存等。

b.交叉:交叉算子在遗传算法中起核心作用,是群体演化发展的最基本操作。交叉是指把两个父代个体的部分结构互相交换重组而生成新的个体,即两个染色体数组中的某一段或某几段互相交换。交叉的方式多种多样,有一点交叉、两点交叉、多点交叉等。

c.变异:变异算子的基本内容是对群体中的个体串的某些位置上的基因值作变动。

遗传算法导入变异的主要目的是使遗传算法具有局部的随机搜索能力以及维持群体多样性,以防止出现未成熟收敛现象。

遗传算法中,交叉算子以其全局搜索能力作为主要算子,而变异算子则作为辅助算子。

上述这些具有特色的技术和方法使得遗传算法使用简单通用、稳健性强、易于并行化,从而在各个领域得到广泛的应用。

3 编程实现

3.1 天线优化具体的设计 requirements 是:

线阵天线如图2所示,工作频段为 2.73.0GHz,中心频率为 2.85GHz,天线阵单元数为 32,单元间距 60.0mm,波束最大点角度 -8°。要求方向图形状为 30°余割平方波束,所有副瓣电平低于 -35dB,空域在 30°以上。

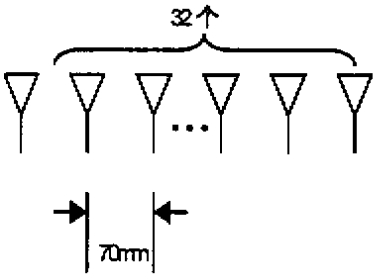


图 2 天线阵列形式

3.2 优化的主要操作及实现

(1)基本操作 遗传算法的基本操作包括选择、交叉和变异,在这之前还需要通过编码做一个解空间到染色体空间的变换以便群体的演化。

a.编码方案 进行天线阵综合时,每个染色体代表一个具体的天线阵型式,染色体的每个基因代表每个单元激励系数(幅度或相位)。激励系数是实

数,如果用二进制编码表示,除了造成精度上的损失外,还会带来大量的编码、译码运算,增加不必要的程序运行时间。因此,编码时,染色体的每一个基因用十进制数表示,可以直接求染色体的适应度,而不必进行译码操作。与此相对应,交叉和变异算子也要设计相应的十进制形式的操作。

b.选择算子:使用了期望值方法。首先计算群体中每个个体在下一代中的期望数目:

$$M = f_i / f = f_i / \sum f_i / n \tag{3}$$

然后若某个个体被选中并要参与配对和交叉,则它在下一代中的生存的期望数减去 0.5;

若不参与配对和交叉,则该个体的生存的期望数减去 1。最后,若一个个体的期望数小于零时,则该个体不参与选择。

c.交叉算子:不象传统的二进制一点甚至多点交叉算子,本文提出十进制逻辑线性交叉算子,而不用刻意寻找基因的交叉位置。对于两个父代在同一交叉点位置上的基因,设交叉前的值为  $p_1$  和  $p_2$ ,则交叉后的值的子代为:

$$c_1 = (2p_1 + p_2) / 3, c_2 = (p_1 + 2p_2) / 3 \tag{4}$$

这样,当  $p_1$  和  $p_2$  相等或接近时,  $c_1$  和  $c_2$  等于或接近  $p_1$  和  $p_2$ ;当  $p_1$  和  $p_2$  不同时,则产生了新的基因,达到了全局搜索的目的,这是子代遗传父代优良特性的重要方法。

d.变异算子:某一位置上的基因根据变异概率决定是否变异。需要变异时只需简单的把它变到允许范围内的任意一个随机值。

(2)适应度函数设计 适应度函数表示天线型式所产生的方向图与目标方向图的差异大小。首先计算出每个染色体的方向图与规定的理想方向图的误差,再对这个误差作变换得到适应度。误差越大,适应度越低;误差越小,适应度越高。在计算误差时,采用了最大误差的形式,即计算实际天线阵方向图与规定方向图在各个取样点的误差,然后找出误差的最大值,优化的目的就是使最大误差减小到最小,这样实际的方向图就最接近规定方向图。

该程序用 Fortran power station 4.0 编写,在 Dell-GX150 PIII 866 MHz 计算机上,Windows 98 操作系统中运行编译通过。

4 优化与实验结果

先用 Agilent 公司的 8719ES 矢量网络分析仪,在微波暗室测得未调试前 32 单元线天线阵的各点幅相值(从 2.7GHz 到 3.0GHz,每 6MHz 采一个点,共

51 点) 测试框架如图 3 所示, 为分析全面点, 本文给出中心频率 2.85GHz 优化前、幅相都优化、只优化相位的方向图比较。

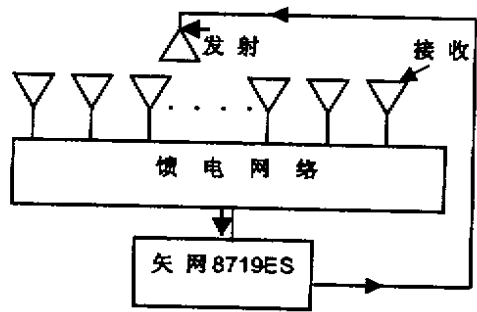


图 3 天线阵方向图的测试方法框图

首先 对所测得的方向图的幅度、相位都进行优化。  
对由如图 3 测试得到的初始单元电 流 幅 度在  $\pm 0.05$  的范围内进行局部搜索。每个个体由 32 个基因组成, 初始群体中每个基因为  $-0.05$  到  $+0.05$  之间的随机数, 表示电流幅度的变化值。每个个体所表示的天线阵的单元电流幅度为初始单元电流幅度加上对应位置基因值。

再对每个单元电流的相位进行局部搜索, 搜索范围在  $\pm 10^\circ$  之间, 因此生成初始个体基因群体时, 是  $-10$  到  $+10$  之间的随机数 表示电流相位的变化值。优化过程中单元相位的实际值为相应的个体基因值加上相位初值。而种群大小为 50, 个体基因长度为 32, 交叉概率为 0.6, 变异概率为 0.006, 优化代数为 1000。对每个个体的适应度函数, 先计算出方向图, 为了降低副瓣电平, 在副瓣区域  $-50^\circ$  到  $-13^\circ$  及  $28^\circ$  到  $50^\circ$  每隔  $1^\circ$  采一次样, 计算副瓣幅度与某一基准电平(如  $-40\text{dB}$ ) 的差值的最大值  $e_s$ ; 同时为了保持主瓣波形, 在主瓣区域也选取几个采样点, 计算实际波形与规定波形的差值, 并分别乘以不同的权系数, 求出主瓣的最大误差  $e_m$ 。再比较  $e_s$  和  $e_m$ , 设较大者为  $e_r$ , 则该个体的适应度函数为:  $f_i =$

$$\left(\frac{5}{5 + e_r}\right)^4 \tag{5}$$

$e_r$  越小 适应度越大;  $e_r$  趋于 0 则适应度趋于 1。通过调整主瓣区域的权系数, 可以获得最合适的适应度函数。实验表明, 局部搜索对主瓣形状的影响非常小, 所以适应度函数中主要起作用的是  $e_s$ 。由图 4 所见, 优化的结果令人满意, 方向图的形状有了大大的改善, 优化前最大副瓣达到  $-19\text{dB}$ , 而幅相优化之后, 主瓣边缘的高副瓣电平全在  $-36\text{dB}$  以下, 副瓣电平降低了  $17\text{dB}$ , 天线辐射能量主要集中在主瓣里, 因副瓣而损失的能量减少到最小, 而主瓣形状基本保持不变。

但在本文中由于应用馈电网络( 双层空气板线) 的内导体长度已经确定并已焊接, 不可能改变长度, 而且为了实际调试的方便, 只对单元电流相位进行优化( 因为相位可以通过贴介质块来改变), 以达到规定的方向图。经过若干次实验后, 得到一组比较好的数据如下表所示。优化后在中心频率 2.85GHz 计算所得的方向图见图 5。由图可见, 主瓣边缘的高副瓣基本上被压低在  $-30\text{dB}$  以下, 天线辐射能量主要集中在主瓣里, 副瓣里损失的能量减少到最小( 最大副瓣由  $-19\text{dB}$  降为  $-30\text{dB}$ ), 而主瓣形状基本保持不变。

在实际 调试 工作中, 主要 根据 中心 频率 2.85GHz 的优化相位来调节馈电网络的相位。因为不可能截短网络内导体, 所以只能用贴介质块的

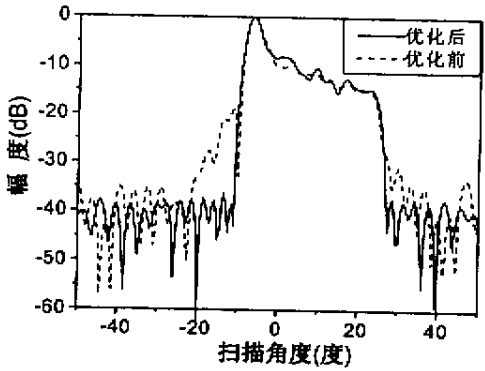
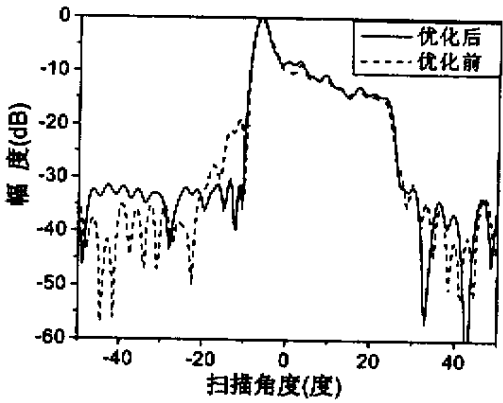


图 4  $f = 2.85\text{GHz}$  幅度和相应都优化方向图比较



方法来调节, 而且介质块不能太长( 会有能量损耗, 这也是优化相位在  $\pm 10^\circ$  内的原因之一)。如图 6 为根据优化的结果来贴介质块调节相位所测得的方向图, 比调节前有明显的改善, 最大副瓣电平由  $-19\text{dB}$  降为  $-28\text{dB}$ 。用遗传算法来优化之后, 不仅改善了方向图形状, 而且大大提高了调试的速度, 给天线的设计与实际调试工作带来了极大得便利。

(上接第 542 页)

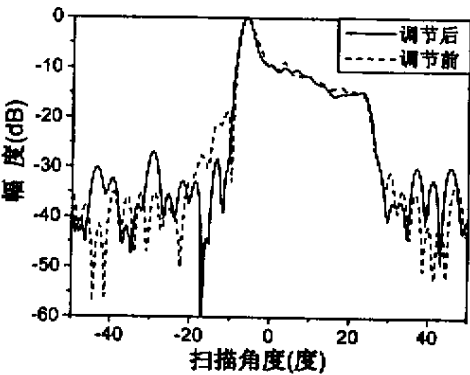


图 6  $f = 2.85\text{GHz}$  相位优化前后方向图比较

5 结论

本文论述了利用遗传算法进行赋形波束阵列天线优化设计的关键理论和技术问题。文中给出了一个 32 单元的赋形波束线天线阵列的优化设计实例，以说明优化设计的方法，步骤和设计结果。只要适当修改适应度函数等若干程序细节，本文方法还可以推广应用到其它阵列天线的优化设计。

参考文献

[1] Diogenes Marciano and Filinto Duran . Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms[ J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine ,2000 42( 3).

[2] 陈国良 王煦法 庄镇泉等 . 遗传算法及其应用[ M]. 人民邮电出版社 ,1996 年 .  
[3] 张文修、梁怡 . 遗传算法的数学基础[ M]. 西安交通大学出版社 2000 年 .  
[4] Keen-Keong Yan and Yilong Lu . Sidelobe reduction in array-pattern synthesis using genetic algorithm[ J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagation ,1997 ,45( 7 ).1112-1117.  
[5] Randy L Haupt . Thinned arrays using genetic algorithm[ J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagation , 1994 ,42( 7 ) .993999.



刘 昊 (1976-),男,江西人,1998 年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系,现攻读博士学位。研究方向为电磁场数值分析方法,雷达天线系统的设计和微波 CAD。

郑 明 (1977-),男,福建人,2001 年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系。

樊德森 (1936-),男,浙江人。1961 年毕业于清华大学无线电系电真空和电子物理专业。教授,博士生导师,兼任物理通报编委。一九八零和一九八一两年,他曾去美国加州柏克莱大学(UC Berkeley)以访问学者身分工作和学习两年从事电磁场数值方法和微波的计算机辅助设计及测量方面的研究工作。他曾在国内外公开发表了学术论文七十余篇,其中包括在国际权威科技期刊上的论文十余篇。

## 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,一直致力和专注于微波、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>