

文章编号:1008-8652(2007)03-030-05

# 一种基于遗传算法的阵列天线方向图综合

董亮 张军 蔡兴雨

(西安电子工程研究所 西安 710100)

**【摘要】** 基于排序的实数码遗传算法实现对阵列天线方向图综合,并对遗传参数作了一些改进。该算法使得搜索效率有很大的提高,有效避免了早期收敛。通过计算机仿真实验,该算法成功地实现了阵列天线的方向图综合。通过对阵列天线的阵元电流幅值进行优化,同样可以达到传统方法所能实现的效果。良好的仿真结果体现了遗传算法在阵列天线方向图综合中的优越性能。

**关键词:** 阵列天线; 方向图综合; 遗传算法**中图分类号:** TN821<sup>1</sup>.8; TP301.6      **文献标识码:**A

## A Pattern Synthesis of Array Antenna Based on Genetic Algorithm

Dong Liang, Zhang Jun, Cai Xingyu

(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100)

**Abstract:** Application of array antenna pattern synthesis based on a real coded genetic algorithm (GA) is carried out in this paper and some genetic parameters are improved. This algorithm enhances greatly searching efficiency by avoiding premature convergence effectively. Computer simulation proves that pattern synthesis of array antenna is realized successfully using this approach. The optimization of the current range of each unit in the array has achieved the results which can be obtained by the traditional method. The excellent results of computer simulation show the advantage of array antenna beam patterns shaping using GA.

**Keywords:** array antenna; pattern synthesis; genetic algorithm

### 1 引言

在雷达等众多领域中,阵列天线已经得到广泛的应用。其中阵列天线的副瓣电平是评价天线性能的一个重要参数。通过确定阵元的电流幅度、相位或者阵元位置,从而使得天线阵在远区方向图满足一定副瓣要求。阵列天线方向图综合是天线波瓣形状控制的一类综合问题,已有众多文献对此进行了讨论<sup>[1,2,3]</sup>。由于天线优化问题中的目标函数一般为多参数、非线性、甚至不连续的约束条件,因而基于梯度寻优的传统方法无法有效地在工程上达到满意的结果。传统优化方法的缺点表现在:须选择良好的初始设计以保证优化目的的实现;对目标函数连续性可微性有特殊要求等。近年来一种通过模拟自然进化过程的搜索问题最优化算法—遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)开始应用于电磁工程领域<sup>[4]</sup>,该算法在阵列天线方向图综合中体现出了非常好的优越性。文中采用一种基于排序的实数码遗传算法<sup>[5]</sup>应用于幅度控制等间距线天线阵方向图综合。由于采用了基于排序的选择方法和新颖的交叉与变异操作,有效地避免了早熟现象。计算结

\* 收稿日期:2007-03-21

果表明遗传算法对解决天线系统中大量复杂的优化问题十分有效。

## 2 理论

### 2.1 阵列天线方向图综合

R. F. Hyneman 和 R. M. Johnson 利用近似等波纹函数,建立了阵列天线微扰方程<sup>[3]</sup>。对于微扰方程来说,波纹的形状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  $F(x)$ 。再利用 Woodward 抽样方法,便可以获得阵列天线的口径分布函数。

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

其中  $2N$  是主瓣区的零点数,  $2M$  是副瓣区零点数。从(1)可以导出阵列天线口径激励幅相分布。假设天线辐射单元为理想单元,天线波瓣图为:

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

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

### 2.2 遗传算法

#### 2.2.1 编码方式

首先要对实际问题进行编码,这种编码符号串被称为染色体。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。目前,遗传算法的编码方式主要有二进制位串编码和十进制编码等。如果待求变量是离散的,则应采用二进制编码;但对于连续型变量,二进制编码的求解精度受染色体长度的限制,并且还需解码,增加了计算量。因此,对于连续型变量的非线性函数优化问题,宜采用十进制编码方式,直接将待求变量依次排列构成染色体<sup>[5]</sup>。染色体  $V$  可表示为图 1 所示。

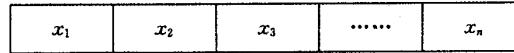


图 1 染色体示意图

#### 2.2.2 选择机制

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。这里采用基于排序的选择机制,其方法是先将群体中的染色体由好到坏排序,即序号越小,相应的染色体越优,并定义序号  $i$  对应的染色体  $V_i$  被选中的概率  $p_i$  为<sup>[6]</sup>:

$$p_i = \frac{1}{\text{popsize}} + \alpha(\text{gen}) \frac{\text{popsize} + 1 - 2i}{\text{popsize}(\text{popsize} - 1)} \quad (3)$$

式中  $\text{popsize}$  为种群规模,  $\alpha(\text{gen})$  是世代数  $\text{gen}$  的函数。在进化的初期,为了防止少数局部最优解迅速占据群体所造成的早熟现象,  $\alpha(\text{gen})$  宜取较小的值,以保持群体的多样性;在进化的中后期,染色体间的竞争力减弱,为了防止由此造成的随机搜索趋势,应取较大的值。本文中  $\alpha(\text{gen})$  是分段不连续函数。例如:

$$\alpha(\text{gen}) = \begin{cases} 0.4, & 0 \leq \text{gen} < 60 \\ 0.6, & 60 \leq \text{gen} < 120 \\ 0.8, & \text{gen} \geq 120 \end{cases} \quad (4)$$

然后通过轮盘赌选择染色体。

#### 2.2.3 交叉

通过交叉可以产生新的个体,达到群体进化的目的。在区间  $[0, 1]$  中产生随机数  $r$ ,如果  $r < p_c$  (交叉概率),则选择  $V_i$  作为一个父代,本文采用一种改进的算术交叉运算,设染色体  $V_A$  和  $V_B$  (双亲染色体),他们按照(5)式进行交叉操作,得到两个新的染色体(子染色体):

$$\begin{cases} V_1 = b_1 V_A + b_2 V_B \\ V_2 = b_2 V_A + b_1 V_B \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $b_1 = 0.5 + b$ ,  $b_2 = 0.5 - b$ ,  $b = 0.95\beta$ ,  $\beta$  为  $[0, 1]$  之间的随机数, 若子染色体不属于可行集, 则改用(6)式进行算术交叉运算:

$$\begin{cases} V_1 = \beta V_A + (1 - \beta) V_B \\ V_2 = \beta V_B + (1 - \beta) V_A \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2.4 变异

变异是群体进化的另一种途径, 其模拟了生物进化过程中的偶然基因突变, 突变概率要远小于交叉概率, 一般为  $0.001 \sim 0.1$ 。设  $p_m$  为变异概率, 其在每代中的取值由下式确定:

$$p_m = p_{m0}(R^s + 1) \quad (7)$$

式中  $p_{m0}$  为初定的变异比率;  $R$  为最佳个体连续未进化的代数;  $S$  为变异参数。变量值的改变是随机的, 在区间  $[0, 1]$  中产生一个随机数  $r$ , 如果  $r < p_m$ , 则第  $i$  个染色体  $V_i$  被选为变异的染色体。变异方向  $d$  是随机的, 给定一定正数  $M$ , 按照(8)式进行变异操作产生后代  $V'_i$ 。即:

$$V'_i = V_i + M \cdot d \quad (8)$$

检验  $V'_i$ , 若属于可行集, 则用它替换  $V_i$ , 否则令  $M$  为 0 到  $M$  之间的随机数, 重新按(8)式进行变异。若在制定循环次数中未得到可行染色体则放弃变异。

遗传算法的基本步骤见图 2。

重复上述操作步骤, 直到算法收敛到最优解或达到设计要求为止。

## 3 设计实例

### 3.1 目标函数

考虑等距的不均匀直线阵。设电流相位均为零(边射阵), 而电流幅度是对称的, 可以证明, 其归一化阵因子为:

$$\begin{cases} F(\theta) = 2 \sum_{n=1}^N I_n \exp[j(n-1)dk(\sin\theta - \sin\theta_0)], \text{ 有 } 2N \text{ 个单元阵子} \\ F(\theta) = I_{N+1} + 2 \sum_{n=1}^N I_n \exp[j(n-1)dk(\sin\theta - \sin\theta_0)], \text{ 有 } 2N+1 \text{ 个单元阵子} \end{cases} \quad (9)$$

目标函数定义为设计方向图与计算方向图的相对误差, 文献[7] 给出了一个通用的用于遗传算法的目标函数:

$$\begin{aligned} \text{fitness} = & w_1 \cdot \frac{|\theta_0 - \theta_{\text{des}}|}{180^\circ} + w_2 \sum_{i=1}^N a_i \cdot \text{abs}(\text{SLL}'_{\text{max}} - \text{SLL}'_{\text{des}}) + w_3 \cdot \frac{\theta_{\text{BWFN}} - \theta_{\text{BWFN_des}}}{2} + \\ & w_4 \sum_{i=1}^M b_i \cdot \text{abs}(\text{NULL}_{\theta_i} - \text{NULL}_{\text{des}_{\theta_i}}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $\theta_0$  和  $\theta_{\text{des}}$  分别是计算主瓣和设计主瓣位置,  $\text{SLL}'_{\text{max}}$  和  $\text{SLL}'_{\text{des}}$  分别是计算的最高旁瓣电平和目标旁瓣电平,  $\theta_{\text{BWFN}}$  和  $\theta_{\text{BWFN_des}}$  是第一零陷主波束计算宽度和设计宽度。 $\text{NULL}_{\theta_i}$  是计算的  $\theta_i$  位置的零陷的深度  $\text{NULL}_{\text{des}_{\theta_i}}$  是相应位置零陷设计深度,  $w_i$  为各项指标的权重。本文中只对幅度加权, 于是计算目标函数简化为:

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \text{abs}(\text{SLL}'_{\text{max}} - \text{SLL}'_{\text{des}}) \quad (11)$$

### 3.2 遗传参数选择

经过初始化过程产生  $\text{popsize}$  个染色体, 在进化初期, 染色体的差异一般较大, 交叉概率  $p_c$  大和变异概率  $p_m$  小有助于加快收敛; 而在进化的中后期,  $p_c$  小和  $p_m$  大有助于防止过早陷入局部最优点。因此  $p_c$  和  $p_m$  随进化代数  $\text{gen}$  的变化关系为:

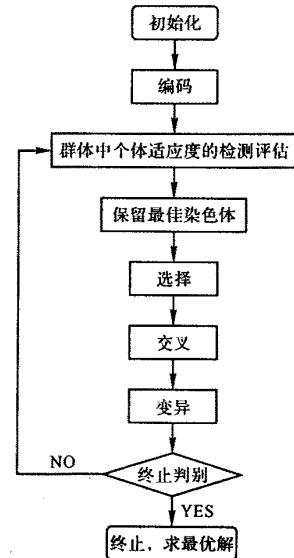


图 2 遗传算法基本步骤

$$\begin{cases} p_c^{\text{gen}} = p_c^{\text{gen-1}} - (p_c^0 - p_{c,\min}) / \text{gen}_{\max} \\ p_m^{\text{gen}} = p_m^{\text{gen-1}} - (p_{m,\max} - p_m^0) / \text{gen}_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $p_c^0$  为初始交叉概率;  $p_m^0$  为初始变异概率,  $\text{gen}_{\max}$  表示最大进化代数,  $p_{c,\min}$  表示设定的最小交叉概率,  $p_{m,\max}$  表示设定的最大变异概率<sup>[8]</sup>。

### 3.3 计算结果

令  $2N = 20, d = \lambda/2$ , 目标函数中  $\text{SLL}'_{\text{des}} = 30\text{dB}$ 。初始优化的电流权值, Chebyshev 计算的权值以及 GA 算法计算的权值分别为:

表 1 天线单元序号对应的电流加权系数

天线单元序号	初始最佳个体	切比雪夫加权的电流系数	GA 计算出的电流系数
1,20	0.7293	0.3175	0.2325
2,19	0.9585	0.2820	0.3388
3,18	0.5095	0.3875	0.4170
4,17	0.9364	0.5013	0.4272
5,16	0.0448	0.6176	0.6681
6,15	0.2778	0.7293	0.7092
7,14	0.8810	0.8296	0.8203
8,13	0.8183	0.9117	0.9444
9,12	0.0778	0.9698	0.9601
10,11	0.5531	1.0000	1.0000

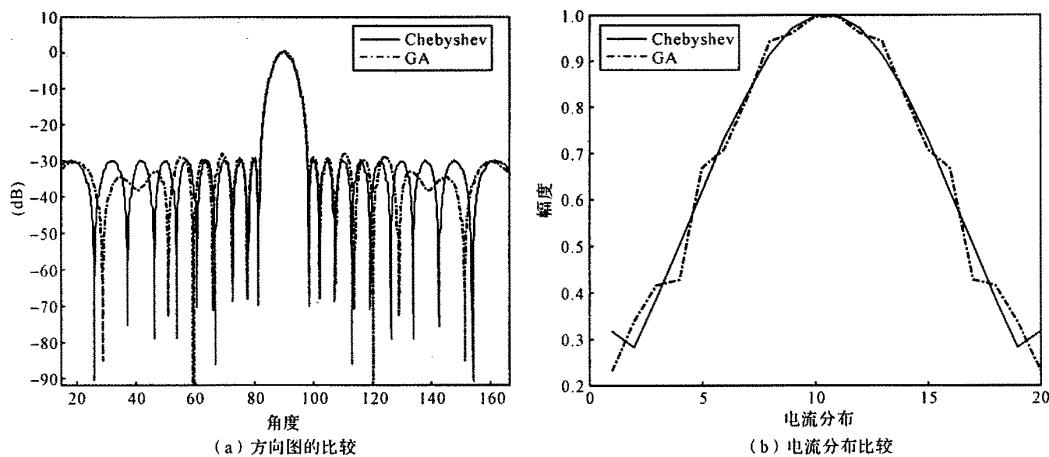


图 3 切比雪夫和 GA 算法的方向图与电流分布比较(30dB)

## 4 结论

本文基于一种排序的实数码遗传算法来确定单元电流幅度以实现阵列天线方向图综合。从实验结果(图 3)中可以看出,采用遗传算法可以进行阵列天线方向图的综合。图 5 给出了蒙特卡罗测试连续运行 20 次的结果,可以看出应用该算法对方向图综合都能达到指定的副瓣要求,只是副瓣方位上有差异。由于采用了基于排序的遗传算法和改进的交叉变异算子,有效的避免了早熟现象,提高算法的全局搜索能力。主瓣略有展宽,但不是很明显。实验结果表明该算法有很强的实用性。随着阵列天线的发展,遗传算法将在工程应用中有广阔的前景。

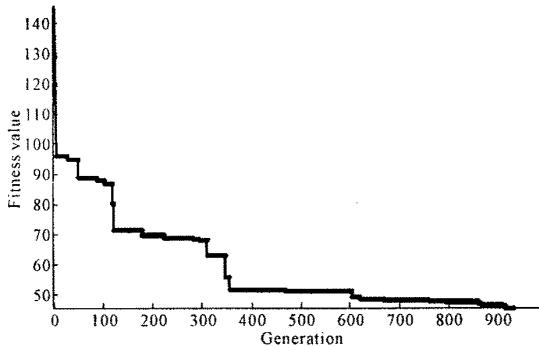


图 4 遗传算法中进化代数与 Fitness 的关系

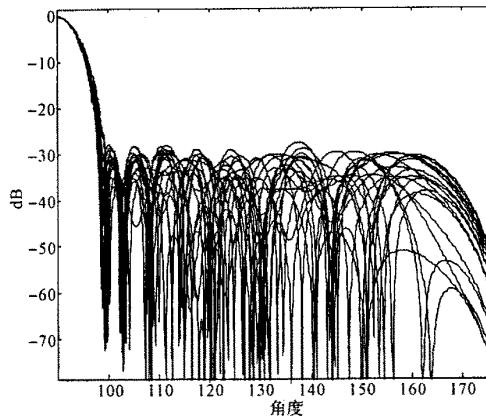


图 5 蒙特卡罗测试(20 个样本叠加)

## 参考文献:

- [1] TAYLOR T T. Design of Line Source Antennas for Narrow Beamwidth and Low Sidewides[J]. IRE Trans. Antennas and Propagation, 1955, 3: 16-28.
- [2] DOLPH C L. A Current Distribution for Broadside Arrays which Optimizes the Relationship Between Beamwidth and Sidelobe Level[A]. Proc IRE[C], 1946, 34: 335-348.
- [3] EDWARD C. DUFORT. Pattern synthesis based on adaptive array theory[J]. IEEE Trans. Antennas and propagation, 1989, 37 (8) : 1011-1018.
- [4] JOHNSON J M , Rahmat-Samii Y. Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetic[J]. IEEE Antennas and Propagation, 1997, 39 (4): 7-21.
- [5] 马云辉. 阵列天线的遗传算法综合[J]. 电波科学学报, 2001, 16(2):173-176.
- [6] 宋爱国, 陆信人. 一种基于排序操作的进化算子自适应遗传算法[J]. 电子学报, 1999 , 27(1):85-88.
- [7] 范瑜, 金荣洪. 阵列天线方向图综合中的遗传算法目标函数研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 801-804.
- [8] 吕善伟, 韩艳菊, 王伟. 遗传算法综合阵列的幅度和相位方向图[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31 (9):1014-1017.

(上接第 24 页)

## 参考文献:

- [1] Chan Y T, Hu G C, Plant J B. A Kalman filter based tracking scheme with input estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979 15(2):237~244.
- [2] G. W. Ng and A. Lau and K. Y. How. Auto-tuning Interactive Multiple Model[J]. Part of the SPIE conference on acquisition, tracking, and pointing XII Orlando, Florida. April 1998.
- [3] Johnston L A, Krishnamurthy V. An improvement to the interacting multiple model (IMM) algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(12): 2909—2923.
- [4] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.

## 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>