

文章编号 1005-0388(2001)02-0172-05

# 阵列天线的遗传算法综合<sup>\*</sup>

马云辉

(中山学院电子系, 广东 中山 528402)

**摘要** 提出了一种基于排序的实数码遗传算法并用于阵列天线的方向图综合。该算法对简单遗传算法的编码方式、选择策略、交叉和变异操作进行了改进, 使搜索效率有了很大的提高, 有效地避免了早期收敛。在实例设计中体现出优良特性, 获得了比有关文献更好的结果。

**关键词** 阵列天线 遗传算法 排序 优化

**中图分类号** TN 820 **文献标识码** A

## Synthesis of the array antennas using genetic algorithm

MA Yun-hui

(Department of Electronics, Zhongshan college, Zhongshan Guangdong 528402, China)

**Abstract** A real coded genetic algorithm based on sorting is presented and applied to synthesizing the array antenna pattern by controlling only the current amplitudes. This algorithm improves on encoding, selection, crossover and mutation operations of SGA. It enhances searching efficiency greatly, and avoids effectively premature convergence. Good property is present in practical designs, the results obtained are better than those reported in the literatures.

**Key words** array antennas genetic algorithm sort optimization

## 1 引言

天线阵列综合的目的是确定阵元的电流幅值或相位或阵元位置, 使天线阵的远区方向图满足一定的要求, 如最大相对旁瓣电平接近某一数值, 在给定方向生成一定深度的零点。由于天线优化问题中的目标函数或约束条件呈多参数、非线性、不可微甚至不连续, 因而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上满意的结果。近年来一种模拟自然进化的遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 开始应用于电磁工程领域<sup>[1]</sup>, 成功地实现了阵列天线稀疏<sup>[2]</sup>, 降低最大旁瓣电平<sup>[3]</sup>, 或通过控制阵元位置、激励电流相位与幅度进行方向图零点生成<sup>[4~6]</sup>。尽管文献中采用的遗传算法是有效地, 但遗传算法在天线阵列综合中的应用远未终结, 如何构

造能克服不成熟收敛、最后可准确求得全局最优解及收敛快的遗传算法仍然是有待深入研究的课题。本文就是一次尝试, 提出了一种基于排序的实数码遗传算法并应用于唯幅度控制等间距线天线阵方向图综合, 其中还包括了零点生成。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。计算结果表明所提出的方法是有效地, 也得到了比有关文献更好的结果。

## 2 排序遗传算法

考虑如下非线性函数  $f(X)$  的全局优化问题

$$\min f(X) \quad (1)$$

式中,

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $a_i < x_i < b_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,  $a_i, b_i$  为变量  $x_i$  的上下限。所以, 问题 (1) 的可行解集  $\Omega =$

\* 收稿日期: 2000-09-02

$\{(x_1, x_2, \dots, x_n) | a_i < x_i < b_i (i = 1, 2, \dots, n)\} \subset R^n$ 。在函数导数未知或求导困难的情况下, 传统的优化算法不能解决这类问题; 或者即使导数可求, 但对于高度非线性多峰目标函数, 传统的优化算法也易陷入局部极值点。而遗传算法在不需其它信息的情况下能有效地求得非线性函数的全局最优解。

## 2.1 编码方式

目前, 遗传算法的编码方式主要有二进制位串式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, 长度过短会影响最优解质量, 长度过长又会增大搜索空间, 降低效率, 并且还需进行二进制解码, 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, 即染色体  $v$  可表示为

$x_1$	$x_2$	$x_3$	.....	$x_n$
-------	-------	-------	-------	-------

## 2.2 选择

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>[7]</sup>

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

式中,  $\text{pop size}$  为种群规模,  $\alpha(\text{gen})$  是世代数  $\text{gen}$  的函数, 其数值决定了种群中相邻染色体选择概率相差的大小。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,  $\alpha(\text{gen})$  宜取较小的数值, 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

$$\alpha(\text{gen}) = \begin{cases} 0.2, & 0 \leq \text{gen} < 60 \\ 0.4, & 60 \leq \text{gen} < 120 \\ 0.6, & \text{gen} \geq 120 \end{cases} \quad (3)$$

然后通过旋转赌轮选择染色体, 具体步骤是

step 1 对每个染色体  $v_i$ , 计算累积概率  $q_i$ :

$$\begin{cases} q_0 = 0 \\ q_i = \sum_{j=1}^i p_j, \quad i = 1 \sim \text{pop size} \end{cases} \quad (4)$$

step 2 在区间  $(0, q_{\text{pop size}})$  内产生均匀分布的随机数  $r_1$ ;

step 3 若  $q_{i-1} < r_1 < q_i$ , 则选择第  $i$  个染色体  $v_i$  ( $1 \leq i \leq \text{pop size}$ );

step 4 重复步骤 2 和步骤 3 共  $\text{pop size}$  次, 可得到

$\text{pop size}$  个复制的染色体;

## 2.3 交叉

首先确定交叉操作的父代, 从  $i = 1$  到  $\text{pop size}$  重复以下过程: 在区间  $[0, 1]$  中产生随机数  $r_2$ , 如果  $r_2 < P_c$  (交叉概率), 则选择  $v_i$  作为一个父代。再将父代染色体随机配对, 如  $(v_1, v_3)$  等, 按下式进行交叉操作产生两个后代  $v_1$  和  $v_3$ <sup>[8]</sup>。

$$\begin{cases} v_1 = cv_1 + (1-c)v_3 \\ v_3 = cv_3 + (1-c)v_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $c$  为区间  $[0, 1]$  中的随机数。如果两个后代属于可行集, 则用它们替代其父代; 否则, 产生新的随机数  $c$ , 再按式 (5) 进行交叉操作, 直到得到可行的后代或循环给定次数为止。

应当指出, 如果参与交叉的染色体十分相近或完全相同, 则交叉不会产生新的模式, 这类似生物界繁衍中的近亲繁殖。为了避免这种现象, 在两个染色体进行交叉之前判断它们是否相近或相同, 为此定义两个染色体之间的距离  $d$  为

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^{(1)} - x_i^{(3)})^2} \quad (6)$$

式中,  $x_i^{(1)}$ 、 $x_i^{(3)}$  分别是  $v_1$  和  $v_3$  的第  $i$  个变量。如果  $d$  大于某一个较小的正数 (如  $10^{-4}$ ), 则直接进行交叉; 否则, 认为两染色体相近或相同, 此时可随机产生一个新串替代一个父代再进行交叉。这种交叉方式可称为避同交叉。

## 2.4 变异

以变异概率  $P_m$  在经过交叉的种群中选择进行变异的染色体, 其过程是从  $i = 1$  到  $\text{pop size}$ , 在区间  $[0, 1]$  中产生一个随机数  $r_3$ , 如果  $r_3 < P_m$ , 则第  $i$  个染色体  $v_i$  被选为变异的染色体。再在  $R^n$  中随机选择变异方向  $d$ , 给定一正数  $M$ , 按下式进行变异操作产生后代  $v_i$ 。即

$$v_i = v_i + M \cdot d \quad (7)$$

然后检验其可行性, 如果  $v_i$  属于可行集, 则用它替代  $v_i$ , 否则, 置  $M$  为 0 到  $M$  之间的随机数, 重新按式 (7) 进行变异。如果在给定的循环次数内没有得到可行染色体, 则放弃变异, 即令  $M = 0$ 。

经过选择、交叉和变异操作, 得到一个新的种群, 准备进行下一代进化。因为最好的染色体不一定在下一代中出现, 所以应把最佳染色体保存下来, 记为  $v_0$ 。如果新种群中出现更好的染色体, 则用它替换原来的  $v_0$ ; 如果新种群的最佳染色体不及  $v_0$ , 则用  $v_0$  替代该种群的最差染色体。在进化完成后,  $v_0$  就是问题的解。对上述步骤完成给定循环次数或满

足一定的条件之后,遗传算法终止。遗传算法的程序流程为

输入参数 pop size,  $P_c$ ,  $P_m$ ;  
经过初始化过程产生 pop size 个染色体;  
保存最佳染色体;  
重复  
对染色体排序并选择;  
交叉;  
变异;  
保存精英;  
直到满足终止条件。

### 3 设计实例

为了证明本文提出的遗传算法的有效性,下面给出几个数值计算实例。

#### 3.1 目标函数

考虑由  $2N$  个阵元组成的等距不均匀直线阵,设电流相位均为零(边射阵),而电流幅度是对称的,可以证明,其以分贝表示的归一化阵因子为

$$F(\varphi) = 20 \lg_{10} \left[ \left| \sum_{n=1}^N I_n \cos \left( \frac{2(N-n)+1}{2} kd \cos \varphi \right) \right| / \sum_{n=1}^N I_n \right] \quad (8)$$

式中,  $I_n$  为第  $n$  个阵元的电流幅度,  $d$  为阵元间距,  $\varphi$  为阵轴线与射线间的夹角。

最大相对旁瓣电平  $M_{SLL}$  的计算公式为

$$M_{SLL} = \max_{\varphi \in S} \{F(\varphi)\} \quad (9)$$

式中,  $\max$  为求最大值函数,  $S$  为方向图的旁瓣区域, 如果主瓣的零功率宽度为  $2\theta$ , 则  $S = \{\varphi | 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ - \theta \text{ 或 } 90^\circ + \theta \leq \varphi \leq 180^\circ\}$ , 实际计算时需对  $S$  以一定间隔(如  $0.4^\circ$ )离散。

一般情况下, 希望在给定  $N_n$  个方向  $\varphi(i=1, 2, \dots, N_n)$  生成深度为  $N_{LVL}$  的零点外, 还应使  $M_{SLL}$  接近某一数值  $SLVL$ , 因此, 可定义如下目标函数

$$f = \alpha |M_{SLL} - SLVL| + \beta \left| \max_{i=1-N_n} \{F(\varphi_i)\} - N_{LVL} \right| \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  为权系数。在以下的计算中,  $\alpha = 0.8$ ,  $\beta = 0.2$ 。

#### 3.2 遗传参数选择

由于在进化的初期, 染色体的差异一般较大,  $P_c$  大和  $P_m$  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, 交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  随进化代数  $gen$  变化的

关系表达式可设为

$$\begin{cases} P_c^{(gen)} = P_c^{(gen-1)} - (P_c^{(0)} - 0.2) / \max gen \\ P_m^{(gen)} = P_m^{(gen-1)} + (0.5 - P_m^{(0)}) / \max gen \end{cases} \quad (11)$$

式中  $P_c^{(0)} = 0.8$ ,  $P_m^{(0)} = 0.1$ ,  $\max gen$  表示最大进化代数。

变异操作中的参数  $M$  的表达式为

$$M = \frac{f_i}{avgf} \left(1 - \frac{gen}{\max gen}\right) \quad (12)$$

式中,  $f_i$  是变异的染色体对应的目标函数值,  $avgf$  是种群中所有染色体目标函数值的平均值。由式(12)可知, 对于较差的染色体,  $f_i$  较大, 变异量亦大; 而优良染色体,  $f_i$  值小, 则变异量也小。并且,  $M$  随世代数  $gen$  的增大而逐渐减小, 这有助于在进化的后期能较准确地逼近全局最优解。

另外, 种群规模  $\text{pop size} = 50$ , 最大进化代数  $\max gen = 1500$ 。

#### 3.3 计算结果

**例子1** 令  $2N = 20$ ,  $d = \lambda/2$ , 各阵元的电流幅度  $I_n$   $(0.0, 1.0, 0)$ , 即问题的可行集  $\Omega = \{(I_1, I_2, \dots, I_{10}) | 0.0 < I_i < 1.0, i = 1, 2, \dots, 10\}$ 。要求在  $70^\circ$  处生成一个零点, 方向图的零功率宽度  $2\theta = 20^\circ$ ; 并且目标函数式(10)中的  $SLVL = -35.0 \text{ dB}$ ,  $N_{LVL} = -80.0 \text{ dB}$ 。由前述遗传算法可求得单元电流幅度(见表1第2列), 图1中实线是本文计算的方向图, 虚线是文献[6]计算的结果, 前者的最大相对旁瓣电平比后者低  $4.949784 \text{ dB}$ , 而零点深度达  $-79.999791 \text{ dB}$ , 也比文献[6]的计算值低  $9.52470 \text{ dB}$ , 图2是求图1方向图对应的幅度分布时最佳染色体的进化曲线, 表明算法收敛较快。

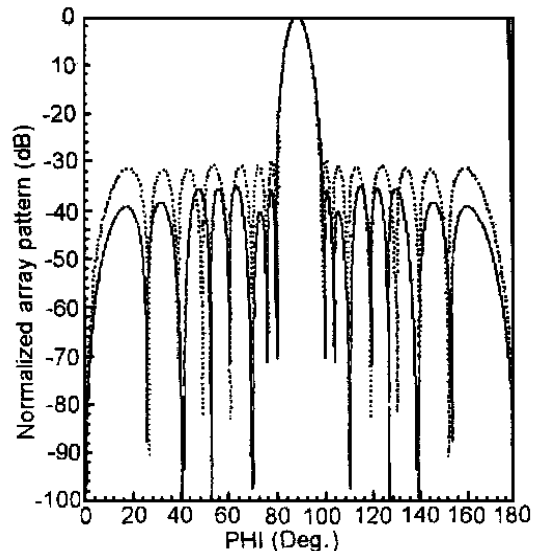


图1 在  $\varphi = 70^\circ$  生成一个零点的方向图

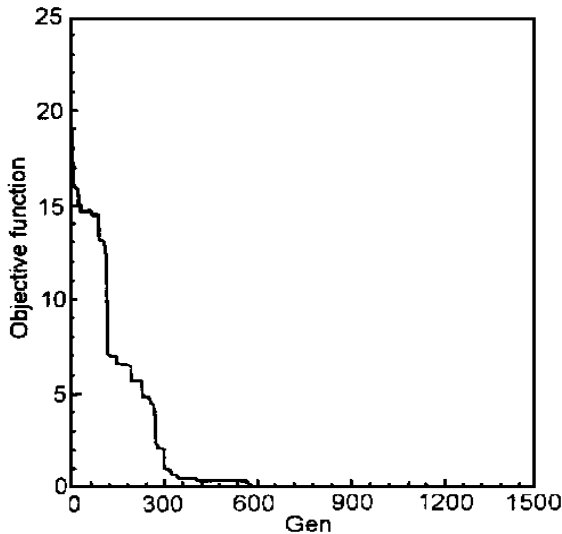


图2 计算图1方向图对应的电流幅度分布时最佳染色体的进化曲线

例子2 要求方向图在  $\varphi = 64^\circ, 70^\circ$  和  $76^\circ$  三个方向形成零点, 其可行集及  $SLVL$  和  $NLVL$  与例子1相同。计算的单元电流幅度由表1第3列给出, 图3中实线是本文计算的方向图, 虚线是文献<sup>[6]</sup>的结果, 前者的最大相对旁瓣电平比后者低  $5.836341\text{dB}$ , 而三个方向的最大零点深度 (绝对值最小) 为  $-79.996480\text{dB}$ , 比文献<sup>[6]</sup>的计算值低  $20.199894\text{dB}$ 。

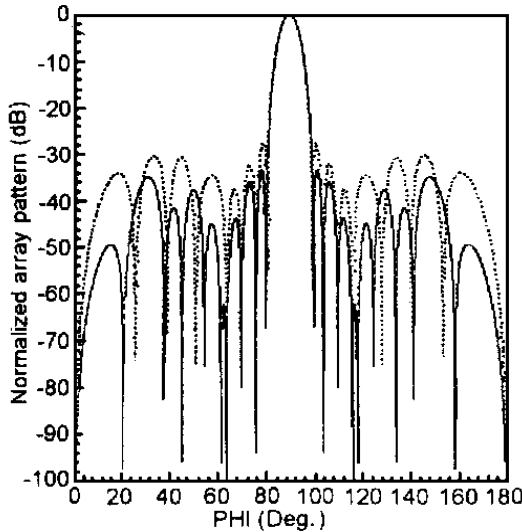


图3 在  $\varphi = 64^\circ, 70^\circ, 76^\circ$  生成三个零点的方向图

例子3 要求在  $\varphi = 23.5^\circ, 36.4^\circ, 43.4^\circ, 50.4^\circ, 55^\circ, 64.8^\circ, 69.8^\circ, 75.6^\circ$  八个方向形成零点, 各阵元的电流幅度  $I_n$  ( $0 \leq I_n \leq 16$ ), 即问题的可行集  $\Omega = \{(I_1, I_2, \dots, I_{10}) \mid 0 \leq I_i \leq 16, i = 1, 2, 3, \dots, 10\}$ ,

目标函数式(10)中的  $SLVL = -30.0\text{dB}$ ,  $NLVL = -80.0\text{dB}$ 。阵元的激励电流幅度见表1第4列, 图4中实线是本文计算的方向图, 最大相对旁瓣电平为  $-30.365719\text{dB}$ , 最大零点深度 (绝对值最小) 为  $-75.264747\text{dB}$ 。虚线是文献<sup>[6]</sup>的结果, 两者十分一致, 在图上难以区分。

以上三个例子的计算结果说明本文提出的遗传算法比文献<sup>[6]</sup>的算法更有效, 也更简便。

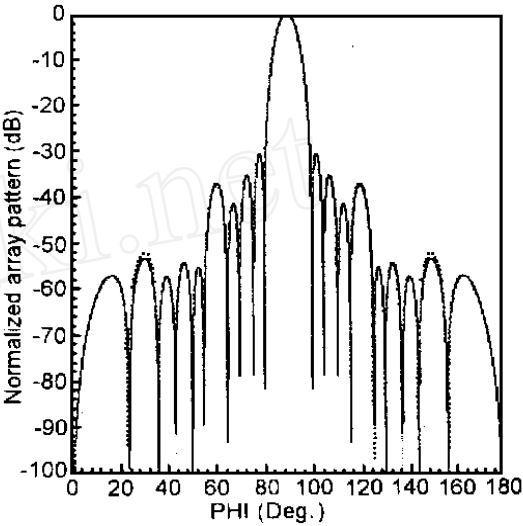


图4 在  $\varphi = 23.5^\circ, 36.4^\circ, 43.4^\circ, 50.4^\circ, 55^\circ, 64.8^\circ, 69.8^\circ, 75.6^\circ$  八个方向生成零点的方向图

表1 计算的单元电流幅度

单元序号	电流幅度		
	Fig 1	Fig 3	Fig 4
1, 20	1.000000	1.000000	1.000000
2, 19	1.392995	1.467115	2.668336
3, 18	2.078423	2.603399	4.480796
4, 17	3.114368	3.961135	6.209238
5, 16	4.514151	4.877292	8.191109
6, 15	5.355602	6.185659	10.394224
7, 14	6.242543	7.172270	12.185808
8, 13	7.205539	8.397379	13.483736
9, 12	7.663546	8.821894	14.580109
10, 11	8.264231	9.376630	15.469339

注: 各单元电流幅度以边缘单元电流幅度归一。

4 结束语

本文提出了一种基于排序的实数码遗传算法, 并应用该算法确定单元电流幅度以实现阵列天线方

向图综合,其中还包括了零点生成,并同时使最大旁瓣电平与零点深度逼近所要求的数值。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,提高了算法的全局搜索能力。通过对直线阵天线的综合,证明本文提出的遗传算法具有较高的求解效率,是运用改进遗传算法解决实际问题的成功尝试。

## 参考文献

- [1] Johnson J M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithms in Engineering Electromagnetics[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1997, 39(4): 7~ 21.
- [2] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1994, 42(7): 993~ 999.
- [3] Yan K K, Lu Y. Side lobe reduction in array pattern synthesis using genetic algorithm [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1997, 45(7): 1117~ 1121.
- [4] Tennant A, Dawoud M M, Anderson A P. Array pattern nulling by element position perturbations using a genetic algorithm [J]. Electronics letters, 1994, 30(3): 174~ 176.

- [5] Liao W P, Chu F L. Application of genetic algorithms to phase-only null steering of linear arrays [J]. Electromagnetics, 1997, 17: 171~ 183.
- [6] Liao W P, Chu F L. A ray pattern synthesis with null steering using genetic algorithm by controlling only the current amplitudes [J]. Int. J. Electronics, 1999, 86(4): 445~ 457.
- [7] 宋爱国, 陆佳人. 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.
- [8] 刘宝铨, 赵瑞清. 随机规划和模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999, 15~ 36.



篇。

**马云辉** (1961-), 男, 湖南人, 广东省中山市中山学院电子系副教授。1983年、1986年分别获西安电子科技大学天线专业学士和电磁场与微波技术专业硕士学位。研究方向为电磁辐射与散射、电路与信号处理, 发表论文20余

(上接第161页)

## 参考文献

- [1] T. Cwik, R. Mittra. The effects of the truncation and curvature of periodic surfaces: A strip grating [J]. IEEE Trans AP, 1988, 36(5): 612~ 622.
- [2] S. B. Savia, E. A. Parker, B. Philips. Finite planar and curved ring element frequency selective surfaces [J]. IEE Proc H, 1999, 146(6): 401~ 406.
- [3] B. Philips, E. A. Parker, R. J. Langley. Ray tracing analysis of the transmission performance of curved FSS [J]. IEE Proc H, 1995, 142(3): 193~ 200.
- [4] A. Caroglian, K. J. Webb. Study of curved and planar frequency selective surfaces with nonplanar illumination [J]. IEEE Trans AP, 1991, 39(2): 211~ 217.
- [5] A. Ishimaru, R. J. Coe, G. E. Miller. Finite period structure approach to large scanning array problems [J]. IEEE Trans AP, 1985, 33(11): 1213~ 1220.
- [6] A. K. Skrivervik, J. R. Mosig. Analysis of printed array antennas [J]. IEEE Trans AP, 1997, 45(9): 1411~ 1418.
- [7] 万国宾, 万伟, 汪文秉. 阵列结构辐射与散射特性分析的迭代方法[J]. 电波科学学报, 2001, 16(1): 45~ 48.

- [8] C. A. Balanis. Advanced engineering electromagnetics [M]. John Wiley & Sons, 1989.



**万国宾** (1967-), 男, 河南人, 西北工业大学电子工程系副教授, 博士。主要从事雷达罩分析与设计、天线理论及电磁散射数值分析等方面的研究工作。



**汪文秉** (1929-), 男, 浙江人, 西安交通大学电子与信息工程学院教授, 1952年毕业于同济大学, 现为博士生导师。长期从事天线与电波传播、瞬态电磁场理论及其应用等方面的研究工作。

**赵惠玲** (1967-), 女, 河南人, 西北工业大学电子工程系讲师, 博士生。主要从事天线、电磁散射及复杂媒质等方面的研究工作。