

# 遗传算法应用于超低副瓣线阵天线方向图综合

李东风, 龚中麟

(北京大学电子学系, 北京 100871)

**摘 要:** 基于对标准遗传算法中收敛依赖于初始群体选择的困难所作的分析, 提出交替使用两种遗传繁殖操作产生后代群体以摆脱收敛对初始群体选择的依赖. 对于超低副瓣线阵天线的方向图综合问题, 建立了改进的遗传算法优化模型. 计算实例说明改进后的遗传算法其收敛不依赖于初始群体的选择, 具有实际应用前景.

**关键词:** 遗传算法; 阵列天线; 天线辐射方向图

**中图分类号:** TN82      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2003) 01-0082-03

## Application of Genetic Algorithms in the Pattern Synthesis of Ultra-Low Sidelobe Linear Array Antenna

LI Dong-feng, GONG Zhong-lin

(Dept. of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** An analysis is made on the difficulty of genetic algorithms, in which the convergence is strongly dependent on the selection of initial population. A measure is proposed to alleviate the dependence of convergence on the initial population, in which two reproduction operations of different types are alternatively used in generating chromosoms. The model of improved genetic algorithm for the pattern synthesis of ultra low side lobe linear array antenna is established. A worked out example is given to demonstrate that the independence of convergence on the selection of initial population is realized in the improved genetic algorithm, showing its good application potentials.

**Key words:** genetic algorithms; array antennas; antenna radiation patterns

### 1 引言

遗传算法<sup>[1~5]</sup>是通过模拟自然进化过程搜索问题最优解的优化方法, 隐含并行性和对全局信息的有效利用能力是遗传算法的两大显著特点. 前者保证了遗传算法的有效性, 后者使遗传算法具有极强的鲁棒性. 这些特点使得遗传算法尤其适于处理传统优化方法解决不了的复杂和非线性问题.

近几年来, 遗传算法在微波技术和天线设计领域获得了广泛的应用发展<sup>[6~11]</sup>. 而且, 在应用过程中, 遗传算法自身也在不断地发展<sup>[6, 8, 10]</sup>. 文献[6]使用二进制遗传算法以降低天线副瓣为目的对线天线阵和天线单元矩形分布的平面天线阵进行了稀疏优化处理; 文献[8]使用十进制遗传算法以降低天线副瓣为目的对线天线阵和圆环形天线阵的天线单元激励电流进行了优化处理; 文献[10]使用符号遗传算法对包含有一个有源单元的线天线阵结构进行了优化处理. 在这三项应用中, 我们可以清楚地看到遗传算法自身的发展, 染色体中的遗传材料由文献[6]中的二进制编码发展为文献[8]中的十进制数, 后又发展为文献[10]中的结构符号. 但是, 他们的算法都没有脱离标准遗传算法的单一交叉和单一变异模式, 使得算法的有效性和应用范围受到限制. 为提高遗传算法的实用

性和有效性, 本文提出了对标准遗传算法所作的改进, 并将其应用于超低副瓣线阵天线方向图综合问题.

在第2节中给出了对遗传算法收敛困难的分析. 第3节叙述了在超低副瓣线阵天线方向图综合问题中改进的遗传算法的具体执行方案, 第4节给出了一个40单元超低副瓣线阵天线方向图综合的优化结果.

### 2 遗传算法的收敛困难

标准遗传算法的基本过程为: 首先对需要优化的参数进行编码以生成染色体的初始群体, 执行遗传繁殖操作以生成下一代群体, 设计适应度函数并根据适应度函数对下代群体作选择, 设置控制参数形成繁殖加检测的迭代搜索过程. 文献[1~3]已对此进行了详细的论述.

如引言中所述, 遗传算法在应用推广过程中已获得一定的改进和发展. 对于等单元间距的线阵和圆阵天线, 以降低最大副瓣电平为目的, 文献[8]用遗传算法进行阵单元激励电流的优化处理时, 使用由优化参数构成的10进数表示染色体, 免去了用2进制数表示染色体所需的编码及解码运算过程. 文献[8]也采用算术运算对10进数染色体作遗传繁殖操作. 但是, 这种单一的遗传繁殖操作使子代染色体完全继承了父

代染色体的特征,失去了进行组合创建具有新特征染色体的能力,导致收敛对初始群体的选择有较强的依赖性,而且容易收敛于局部最优解.文献[12]对于 10 进数染色体采用交叉运算实现繁殖操作,由两个父代染色体互换部分遗传材料生成两个子代染色体.这种交叉繁殖也仅限于对原有遗传材料重新组合,没有创建新的遗传材料.在标准遗传算法中,新遗传材料的产生完全依靠变异操作,但若提高变异操作的概率会使遗传算法变得完全随机,便会失去优化功效,这种只使用交叉运算的遗传算法也遇到同样的收敛困难.因此,需要在遗传算法中作进一步的改进以克服收敛困难.

### 3 超低副瓣线阵天线方向图综合的改进遗传算法模型

在现有的超低副瓣线阵天线方向图综合技术中, Dolph Chebyshev 分布和 Taylor 分布均可实现超低副瓣方向图,但它们的实际应用也受到相当的限制<sup>[13,14]</sup>.使用改进的遗传算法容易实现线阵天线的超低副瓣方向图综合,并可在一定程度上克服上述方法受到的限制.下面我们给出遗传算法应用于不等间距不等幅激励的线阵天线的超低副瓣方向图综合的模型,以具体说明对遗传算法所作的改进.

考虑由  $N$  个各向同性辐射单元组成的不等间距排列的线阵天线,单元排列的直线取作  $z$  轴,阵中心取为坐标原点.对于阵元不等幅激励的普遍情况,由天线阵理论,该线阵天线的远场方向图为<sup>[15,16]</sup>

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

式中,  $\theta$  为从线阵中心的法线开始测量的空间角,  $\lambda$  为工作波长,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $I_i$  为第  $i$  个阵元激励电流的幅值,  $z_i$  为第  $i$  个阵元的坐标.

由于阵几何结构和激励电流实际上关于阵中心是对称的,式(1)可改写为

$$F(\theta) = \begin{cases} I_0 + \sum_{i=1}^{(N-1)/2} 2I_i \cos(k|z_i| \sin\theta) & N \text{ 为奇数} \\ \sum_{i=1}^{N/2} 2I_i \cos(k|z_i| \sin\theta) & N \text{ 为偶数} \end{cases}$$

其中  $I_0$  是坐标原点处阵单元激励电流的幅值.式(2)表明线阵天线的副瓣电平是阵单元位置矢量  $\{z_i\}$  和激励电流幅值矢量  $\{I_i\}$  的函数.设  $d_{i-1}$  为第  $i-1$  个阵元与第  $i$  个阵元的间距,第  $i$  个阵元的坐标  $z_i$  可写作

$$z_i = z_{i-1} + d_{i-1} \quad (3)$$

因此,阵单元位置矢量  $\{z_i\}$  可改用阵元间距矢量  $\{d_i\}$  表示.由决定副瓣电平的两种参数,激励电流和阵单元间距,可如下构成遗传算法的染色体  $C$ :

$$C = \begin{cases} [I_0, d_0, I_1, d_1, \dots, I_{(N-1)/2-1}, d_{(N-1)/2-1}, I_{(N-1)/2}], & N \text{ 为奇数} \\ [z_1, I_1, d_1, I_2, d_2, \dots, I_{(N-1)/2-1}, d_{(N-1)/2-1}, I_{(N-1)/2}], & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (4)$$

以  $\{d_i\}$  代替  $\{z_i\}$  可使计算简化;利用对称性使变量减少了一

半.

为克服收敛对于初始群体选择的依赖,我们采用两种遗传繁殖操作,并在后代生成过程中交替使用这两者.设父代染色体为

$$P_1 = [P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, \dots, P_{110}]$$

$$P_2 = [P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{24}, \dots, P_{210}]$$

在奇次代中使用单点交叉运算生成子代染色体,例如得

$$C_1 = [P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{24}, \dots, P_{210}]$$

$$C_2 = [P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{14}, \dots, P_{110}]$$

对上面的偶数代 10 进数染色体  $C_1$  和  $C_2$  施加算术运算  $(C_1 + C_2)/2$ ,  $2C_1 - C_2$ ,  $2C_2 - C_1$ , 并从中选出两个适应度值高的作为下一个奇数代父代染色体,如此循环进行.虽然还不能从理论上加以证明,但通过实际运算已证明这样有可能使后代染色体摆脱对前代染色体的简单继承而形成新的特征,从而摆脱收敛对于初始群体选择的依赖.由于解决了这个问题,在我们的计算程序中初始群体的产生是完全随机的,单元间距在  $0.5\lambda$  至  $1.0\lambda$  之间随机选取,归一化激励电流幅度在 0 至 1 之间随机选取.

对于染色体中两种性质不同的物理参数,激励电流和单元间距,我们使用了两种不同的变异操作,分别为

$$I_i = R(1) \quad (5)$$

$$d_i = d_i + \alpha \lambda [2R(1) - 1] \quad (6)$$

其中,  $R(1)$  为在  $(0, 1)$  之间取值的随机函数,  $\alpha$  为小正数.而在标准遗传算法中对二进制数码所作的变异仅为  $0 \rightarrow 1$  或  $1 \rightarrow 0$ .

适应度函数的设计应包括所有需优化的性能参数,对于超低副瓣线阵天线,我们所设计的适应度函数  $H$  包括了归一化辐射方向图的最大副瓣电平 ( $SLL_{max}$ ) 和主瓣波束宽度 ( $BW$ ) 两者:

$$H = (1 - SLL_{max})^{\beta_1} + h \left( \frac{1}{BW} \right)^{\beta_2} \quad (7)$$

式中,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  是正整数,  $h$  是正常数,通过对这些常数的选择可以对需优化的参量加权并对  $H$  进行定标.

在算法模型中还施加了单元间距不小于  $0.5\lambda$  的限制.同时,为保证收敛,还采用了最佳保留选择机制<sup>[4,5,12]</sup>.

### 4 计算实例

对一个由 40 个各向同性天线单元组成的不等间距排列

线阵,利用上述改进的遗传算法进行了超低副瓣法向方向图综合.此时,染色体由 40 个参数组成,群体个数取为 100,算法停止条件为最大副瓣电平小于  $-40$  dB,而且算法迭代 30 次时群体最大适应度值不改变,迭代过程中适应度

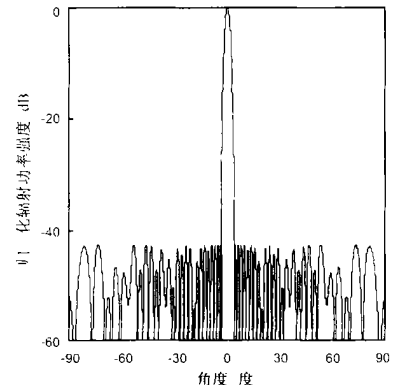


图 1 优化后的 40 单元线阵辐射方向图

函数值逐渐增大, 算法终止时最大适应度函数值所对应的染色体就是所需的优化结果. 表 1 列出了优化后的线阵各单元与阵中心的间距和归一化激励电流幅值. 图 1 示出了天线阵的辐射方向图, 最高副瓣电平为 -42.5dB, 其近等副瓣特性表明该优化结果已与理想的 Taylor 线源分布的结果相近.

表 1 优化后的 40 单元不等距不等幅激励线阵

| 天线单元序号  | 与阵中心的间距( $\lambda$ ) | 归一化激励电流 |
|---------|----------------------|---------|
| 20 和 21 | 0.252                | 0.828   |
| 19 和 22 | 0.823                | 0.958   |
| 18 和 23 | 1.429                | 0.944   |
| 17 和 24 | 2.064                | 0.987   |
| 16 和 25 | 2.737                | 1.000   |
| 15 和 26 | 3.363                | 0.754   |
| 14 和 27 | 3.873                | 0.736   |
| 13 和 28 | 4.502                | 0.847   |
| 12 和 29 | 5.152                | 0.709   |
| 11 和 30 | 5.729                | 0.633   |
| 10 和 31 | 6.349                | 0.659   |
| 9 和 32  | 7.025                | 0.602   |
| 8 和 33  | 7.728                | 0.570   |
| 7 和 34  | 8.500                | 0.539   |
| 6 和 35  | 9.332                | 0.474   |
| 5 和 36  | 10.194               | 0.363   |
| 4 和 37  | 11.086               | 0.303   |
| 3 和 38  | 11.993               | 0.212   |
| 2 和 39  | 12.892               | 0.152   |
| 1 和 40  | 13.756               | 0.118   |

## 5 结论

计算实例说明, 交替地使用两种不同的遗传繁殖操作可以摆脱标准遗传算法中收敛对于初始群体的依赖, 改进后的遗传算法容易获得收敛的优化结果. 本文对于超低副瓣线阵天线方向图综合所建立的遗传算法模型可类似地推广至其他阵列天线优化设计问题. 作为一种有效的优化方法, 改进的遗传算法在天线, 特别是非周期阵列天线的优化设计中有很好的应用前景.

## 参考文献:

- [1] J Holland. Adaptation in Nature and Artificial Systems[M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [2] D E Goldberg. Genetic Algorithms[M]. New York: Addison Wesley, 1989.
- [3] L Davis. Genetic Algorithms and Simulated Annealing[M]. Los Altos CA: Morgan Kaufmann, 1987.
- [4] 陈国良, 王煦发, 庄镇泉, 王东生. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [5] 刘勇, 康立山, 陈屏. 非数值并行算法(第二册): 遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [6] R L Haupt. Thinned arrays using genetic algorithms[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1994, 42(7): 993-999.
- [7] S Weile, E Michielssen. Integer code pareto genetic algorithm design of constrained antenna arrays[J]. Electron. Lett., 1996, 32(19): 1744-1745.
- [8] K K Yan, Y Lu. Side lobe reduction in array-pattern synthesis using genetic algorithms[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1997, 45(7): 1117-1122.
- [9] F J Ares Pena, J A Rodriguez Gonzalez, E Villanueva Lopez, S R Rengarajan. Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1999, 47(3): 506-510.
- [10] D Marcano, F Durán. Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(3): 12-20.
- [11] Dong Feng Li, Zhong Lin Gong. Design of hexagonal planar arrays using genetic algorithms for performance improvement[A]. 2000 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings[C], Beijing China: 2000: 455-460.
- [12] 余春峰, 杨华中, 胡冠章, 汪蕙. 浮点遗传算法的收敛性及其在模型参数提取问题中的应用[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 134-136.
- [13] R C Johnson. Antenna Engineering Handbook[M]. Third edition. New York: McGraw Hill Inc, 1993.
- [14] R J Mailloux. Phased Array Antenna Handbook[M]. Boston, Artech House, 1993.
- [15] M T Ma. Theory and Application of Antenna Arrays[M]. New York: Wiley, 1974.
- [16] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

## 作者简介:



**李东风** 男, 1961 年 7 月生于天津市, 航天科工集团二院 23 所研究员, 主任设计师, 电子学会高级会员, IEEE 会员, 1982 年在西北电讯工程学院(现西安电子科技大学)获学士学位, 1989 年在航天工业部第二研究院 23 所获得硕士学位, 1994 年至 1995 年在俄罗斯萨马拉国立航空学院进修, 现为北京大学博士研究生, 主要从事天线和雷达系统方面的研究工作, 已发表论文多篇。



**龚中麟** 男, 1940 年 5 月生于重庆市, 1963 年毕业于北京大学无线电电子学系, 现为北京大学教授, 博士研究生导师, 电子学会会士, 真空电子学会分会委员, IEEE 高级会员, IEEE 北京分会执委会委员, IEEE 天线与传播学会北京 Chapter 主席, 主要研究方向包括: 电磁场理论、天线与电波传播、微波电子学等, 已发表论文 50 余篇, 出版专著两部。