

应用遗传算法进行阵列天线综合¹

刘 源 邓维波 许荣庆

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所 哈尔滨 150001)

摘 要: 该文采用了两种基于遗传算法的方法对线阵列天线进行了综合。仿真结果表明,这两种方法均能够逼近 Chebyshev 综合的结果。与 Chebyshev 法相比,具有灵活性强,不受天线工作频率限制等优点。其中第二种方法将遗传算法与 Schelkunoff 法结合起来,能够方便精确地在指定位置得到零点并满足其它的优化条件。

关键词: 遗传算法, 阵列天线, Chebyshev, Schelkunoff

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)03-0400-05

Synthesis of Antenna Arrays Using Genetic Algorithm

Liu Yuan Deng Wei-bo Xu Rong-qing

(Research Inst. of Electron. Eng., Harbin Institute of Tech., Harbin 150001, China)

Abstract In this paper, two methods for the synthesis of the pattern of a linear array, based on Genetic Algorithm(GA), are discussed. The results of the two methods can all approximate the results of the Chebyshev's method. Compared with the method of Chebyshev, the two methods using GA have more flexibility and have no restriction on the frequency of the antenna. By using the second method which combines Schelkunoff's method with GA, arbitrary locations of nulls can be got in the pattern with other optimizing conditions.

Key words Genetic algorithm, Array antennas, Chebyshev, Schelkunoff

1 引言

天线阵列的综合是指在给定天线辐射方向图,或给定天线的性能参量的要求来设计天线阵的元数、单元间距、单元上电流的幅度与相位分布^[1]。对一个给定阵元数目和阵元间距的天线阵而言,这一问题就是要寻求各个阵元上激励电流的幅度和相位分布。针对这一经典问题人们提出了很多方法,具有代表性的是 Chebyshev 综合法^[2],它能够在给定主瓣宽度条件下得到最低的旁瓣电平。但是它将全部旁瓣都限定在同一电平上,并且在阵元间距满足 $d \geq \lambda/2$ 的条件下其结果才是最优的。对高频天线而言,其工作频率为 4-12MHz,若 d 取值为 15m,则当频率低于 10 MHz 时, d 已经小于 $\lambda/2$,此时 Chebyshev 法得到的结果已不再是最优的了。针对 Chebyshev 法存在的问题,我们应用遗传算法对阵列天线进行了综合。

遗传算法(GA)是在上世纪六、七十年代由 Holland^[3]等人提出的一种仿效生物进化与遗传,根据“生存竞争”和“优胜劣汰”原则,通过选择、交叉、变异等算法,使要解决的问题逼近最优解的一种全局概率搜索算法。电磁场中的最优化问题通常呈现出多参数、非线性、不可微甚至不连续的特性,基于梯度寻优技术的传统数值优化方法无法有效地求得满意的结果,并常常会陷入局部极值点,作为全局寻优的遗传算法已开始应用于电磁工程领域^[4,5],并得到了一些令人满意的结果。本文以最大相对旁瓣电平为优化目标,采用了两种基于遗传算法的方法对阵列天线进行了综合。它们均能够逼近 Chebyshev 法的最优结果,并且对工作在工作带宽内

¹ 2002-12-01 收到, 2003-05-06 改回

的任意频率的天线阵均能找到最优解,也不需要旁瓣固定在同一电平上。其中,基于Schelkunoff单位圆法的遗传算法,对阵因子多项式根的幅值和相位进行编码,能够方便准确地对多个零点处于任意需要位置的阵列进行综合并得到满足优化条件的最优解。

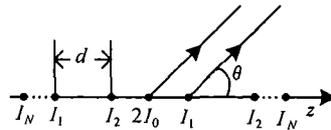


图1 阵元数目为 $2N + 1$ 的线阵示意图

2 基于遗传算法的线天线阵方向图综合

2.1 线天线阵

图1表示的是由 $2N + 1$ 个阵元构成的线阵列,其 $2N + 1$ 个单元在 z 轴等间距排列,阵元间距为 d ,电流幅度是对称的设为 $I_i (i = 0, 1, 2, \dots, N)$,阵元间的馈电相位差相等均为 $-\alpha$ 。其阵因子的方向性函数为

$$F(\theta) = 2 \left| \sum_{n=0}^N I_n \cos n(kd \cos \theta - \alpha) \right| = 2 \left| \sum_{n=0}^N I_n \cos n\varphi \right| \quad (1)$$

其中 k 是波数, $\varphi = kd \cos \theta - \alpha$ 为相邻两单元在 θ 方向辐射场的相位差。

2.2 遗传算法

本文使用的遗传算法与传统的遗传算法相似,主要步骤包括:编码、适应度函数选取、选择操作、交叉操作、变异操作。

编码是应用遗传算法要解决的首要问题。遗传算法不对所求解问题的实际参量直接进行操作,而是对参量的编码进行遗传运算达到优化目的。本文采用二进制编码,这种编码的基因长度与所需的求解精度有关。

适应度函数用来度量群体中各染色体的优良程度。本文以降低天线阵的旁瓣电平为优化目标,所以选择最大相对旁瓣电平(Max. RSL)作为适应度函数,可定义为

$$\text{Max. RSL} = 20 \lg |F_{\text{max_sl}}/F_{\text{max}}|^2 \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

其中 F_{max} 是主瓣电平, $F_{\text{max_sl}}$ 是最大旁瓣电平。

选择算子用来对染色体进行优胜劣汰操作,它确定从父代群体中遗传到下一代的个体。最常用的选择算子是比例选择算子,但它要求适应度函数值为大于零的正实数,这样就不能直接将最大相对旁瓣电平作为适应度函数使用。本文使用被称为随机联赛选择的方法^[6],每次随机地从种群中取出 N 个染色体进行适应度大小的比较,将其中适应度高的个体选中遗传到下一代中,然后将这 N 个染色体均放回种群,将上述过程循环进行 popsize 次,则可以得到 popsize 个复制的染色体 (popsize 为种群规模),通常 N 的值取为 2。文献^[6]表明在优化进行的初始阶段,随机联赛选择比比例选择算子具有更好的收敛性。

交叉运算是对两个相互配对的染色体按照某种方式交换部分基因,从而形成两个新的染色体的过程。通常交叉概率 P_{cross} 取 0.6 ~ 0.8 是最优的^[5]。另外也可以使用自适应的思想来确定交叉概率, Davis^[7] 提出,随着遗传算法在线性能的提高,可以增大交叉概率的取值。

变异以较小的概率发生,通常变异概率 $P_{\text{mutation}} = 0.01 - 0.1$ 。变异操作的存在,扩大了算法的搜索范围,避免了算法因陷入局部极值点而无法得到全局最优解。

经过选择、交叉和变异操作,得到了一个新的种群,如果其中最优秀的染色体的适应度函数满足要求,则停止,否则继续循环进行这 3 个操作直到满足终止条件为止。

2.3 基于遗传算法的线天线阵方向图综合

对阵元间距为 $d = 0.5\lambda$ 的 17 元线阵,以降低最大相对旁瓣电平为优化目标,对各单元的激励电流幅值进行了优化,采用 8 位二进制编码,种群规模为 50,交叉概率取 0.6,变异概率取 0.01,经过 200 次迭代算法终止,对旁射阵得到了如图 2 所示的仿真结果,对主瓣指向为 120° 的阵列仿真结果示于图 3。图中虚线表示旁瓣电平为 -30dB 的 Chebyshev 阵因子的方向

图, 实线表示由遗传算法得到的方向图。可看出, 在主瓣几乎没有展宽的情况下, GA 很好地逼近了 Chebyshev 综合的最优解。

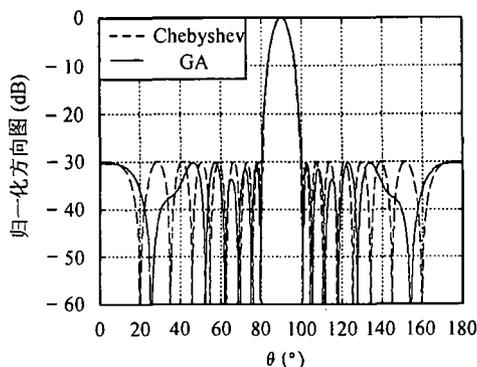


图 2 旁射阵的优化方向图

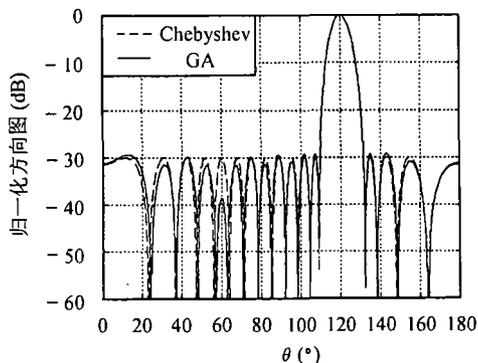


图 3 主瓣指向 $2\pi/3$ 的优化方向图

虽然 Chebyshev 综合法能够在给定的主瓣宽度下得到最低的旁瓣电平, 但这种最优是有条件的, 即要求阵元间距 $d \geq \lambda/2$, 当高频天线工作在低端频率时, 就无法满足这一条件。图 4 对 $d = \lambda/4$ 的 17 元旁射阵进行了综合, 此时 Chebyshev 已不再是最优的, 而遗传算法仍能够有效工作。

在实际应用中, 有时仅需要将一定区域内的旁瓣电平降到最低即可, Chebyshev 综合法的全部旁瓣电平都在同一电平上, 如只对要求的某一区域来讲, 旁瓣值应能降到更低。图 5 实线所示的是对 17 元线阵应用 GA 并要求 θ 在 $[45^\circ \sim 135^\circ]$ 内最大旁瓣电平最小的结果, 此范围内的旁瓣电平值比 Chebyshev 的结果有 2.2dB 的降低。

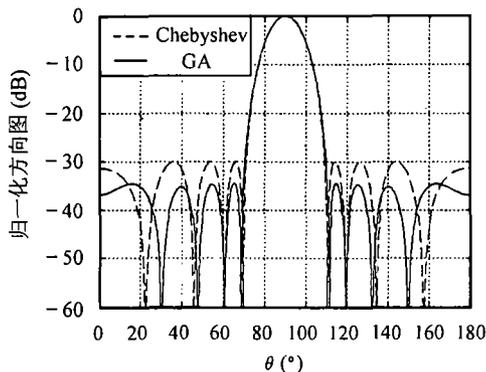


图 4 $d = \lambda/4$ 的旁射阵的优化方向图

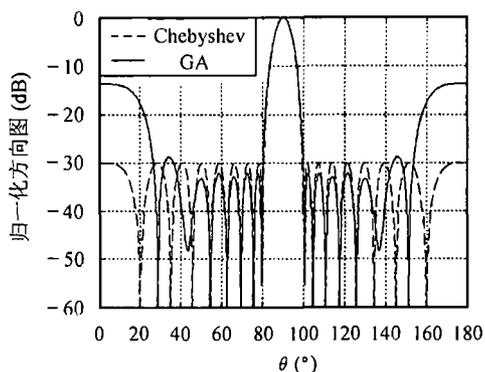


图 5 指定范围内旁瓣最小的优化方向图

以上对阵元数为奇数的线天线阵进行了讨论, 但对阵元数为偶数的情况也同样适用。仿真结果表明, 遗传算法能够有效降低线天线阵的旁瓣辐射, 逼近 Chebyshev 综合法的最优结果, 并且其灵活性强, 寻优能力不受天线工作频率的限制, 适用于各种传统优化算法不易奏效的问题。

3 基于 Schelkunoff 法和遗传算法的阵列天线综合

在进行方向图综合时, 常有需要在方向图的给定位置上得到零点, 这也能够通过上述的遗传算法来实现, 但是适应度函数会比较复杂, 得到的零点也可能满足不了下陷深度的要求。这

里将 Schelkunoff 单位圆的思想与遗传算法结合起来, 能够方便并精确地在指定位置得到零点, 并且满足其它的优化条件。

由 $N + 1$ 个阵元构成的线阵列的阵因子可写为

$$F = \sum_{n=0}^N I_n e^{jnkd \cos \theta} \tag{3}$$

其中 I_n 是第 n 个阵元的复激励, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。应用 Schelkunoff 单位圆方法^[8], 在式中作变换 $\psi = kd \cos \theta$ 和 $w = e^{j\psi}$ 可以得到

$$F = \sum_{n=0}^N I_n w^n = I_N \sum_{n=0}^N \frac{I_n}{I_N} w^n = I_N \prod_{n=1}^N (w - w_n) \tag{4}$$

其中 w_1, w_2, \dots, w_N 是多项式的 N 个根。若令 $I_N = 1$, 则式 (4) 的幅值可以写为

$$|F| = |w - w_1| |w - w_2| |w - w_3| \cdots |w - w_N| \tag{5}$$

由式 (5) 知只有位于单位圆上的根才能对方向图的零点做出贡献, 若 N 个根中有 M 个不在单位圆上, 将它们用 w'_m 表示, 则有

$$|w'_m| \neq 1, \quad m = 1, 2, \dots, M \tag{6}$$

可将式 (5) 进一步写为

$$F = \prod_{m=1}^M (w - w'_m) \prod_{n=M+1}^N (w - w_n) \tag{7}$$

其中 $w'_m = (1 + b_m)e^{j\xi_m}$, b_m 是一个实数, 表明了根在单位圆上的径向位置, ξ_m 表示根的相位。一旦 M 个根的 b_m 和 ξ_m 以及 $(N - M)$ 个位于单位圆上的根都确定了, 就可以得到线阵列的方向图, 通过换算可进一步得到各个阵元的复激励电流。

应用这种方法对 10 元线阵进行了综合, 阵元间距 $d = 0.5\lambda$, 目标函数仍为最大相对旁瓣电平, 算法对 b_m 和 ξ_m 均进行了 8 位二进制编码, 群体规模为 50, 交叉概率取 0.6, 变异概率取为 0.01, 经过 200 次迭代算法终止。图 6 为应用这种方法对旁射阵优化的结果, 其中指定两个零点分别在 72.4° 和 107.6° , 即为应用 Chebyshev 法得到的旁瓣电平为 -30dB 的 10 元旁

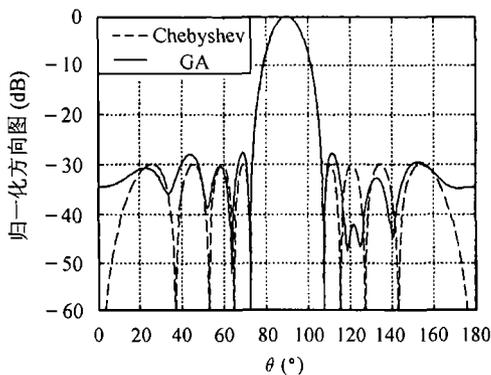


图 6 10 元旁射阵的优化方向图

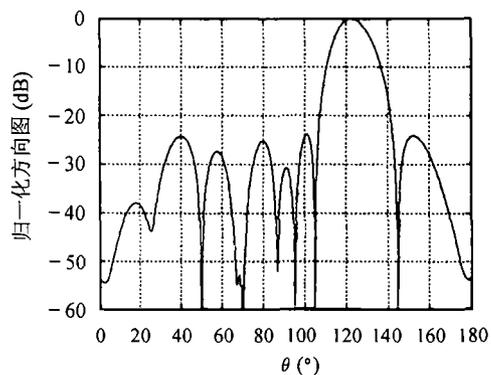


图 7 指定 4 个零点方向的方向图

射阵的方向图的两个主瓣零点。结果表明具有相同的主瓣零点时这种 Schelkunoff 法与 GA 相结合的方法能够逼近 Chebyshev 法的结果。图 7 是指定 4 个零点分别在 50° , 70° , 105° , 145° , 主瓣指向 125° 所得到的结果。表 1 记录了图 7 所对应的方向图多项式的根的值以及换算得到的各阵元对应的激励电流值。

表 1 应用遗传算法得到的多项式的根及各阵元对应的电流值

根	径向长度	$\theta(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	阵元	幅度	相位 ($^{\circ}$)
w_1	1	50	115.70	I_1	1.0101	-150.88
w_2	1	70	61.56	I_2	1.6501	-55.09
w_3	1	105	-46.59	I_3	2.4232	39.02
w_4	1	145	-147.45	I_4	3.2288	140.41
w_5	0.9961	95.29	-16.61	I_5	3.2697	-125.95
w_6	0.9569	25.41	162.58	I_6	3.2810	-27.32
w_7	1.0118	2.82	179.78	I_7	3.2501	67.68
w_8	1.0118	86.82	9.97	I_8	2.3782	168.36
w_9	1.0353	67.06	70.16	I_9	1.6913	-98.99
				I_{10}	1	0

4 结论

遗传算法是一种全局寻优的概率搜索算法, 其迭代结果能够不依赖于初值的选取逼近最优解。本文以降低天线阵的最大相对旁瓣电平为优化目标, 通过遗传算法实现了阵列天线方向图的综合。与 Chebyshev 综合的结果比较表明, 应用 GA 的阵列综合在灵活性和控制方向图形状等方面都有明显的优势, 并且克服了 Chebyshev 法只能在 $d \geq \lambda/2$ 时才能得到最优的弱点。文中进一步将 Schelkunoff 单位圆法与遗传算法结合起来对阵列进行了综合, 除上述优点外, 这种方法还能够方便准确地方向图中得到指定位置的零点, 仿真结果表明了这种方法的有效性。由于文中计算采用的阵元是理想点源, 忽略了阵元间互耦的影响。

参 考 文 献

- [1] 谢处方, 邱文杰. 天线原理与设计. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985: 109-118.
- [2] 王朴中, 石长生. 天线原理. 北京: 清华大学出版社, 1993: 71-75.
- [3] Holland J H. Genetic algorithms. *Scientific American*, 1992, (6): 44-50.
- [4] Haupt R L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetic. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, 37(2): 7-15.
- [5] Johnson J M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithms in engineering electromagnetics. *IEEE Antennas and propagation Magazine*, 1997, 39(4): 7-21.
- [6] Goldberg D E, Deb K. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. *Foundations of Genetic Algorithms*, San Francisco, USA, Morgan Kaufmann, 1991: 69-93.
- [7] Davis L. Adapting operator probabilities in genetic algorithms. Proc. of 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms, San Francisco, USA, Morgan Kaufmann, 1989: 61-69.
- [8] Marcano D, Duran F. Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, 42(3): 12-20.

刘源: 男, 1978年生, 博士生, 主要研究方向为电磁场数值计算、超方向性天线等。
 邓维波: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 主要从事天线、电磁场及电波传播等方面的研究。
 许荣庆: 男, 1958年生, 哈尔滨工业大学电子工程技术研究所所长, 教授, 博士生导师, 承担高频雷达, SAR, ISAR 等相关重要课题研究。