

遗传算法在天线阵自适应算法中的应用¹

李晋文 毛钧杰 柴舜连 姚德森

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘要 本文采用一种新的基于遗传算法的天线阵列的自适应算法。根据实际的硬件限制, 不改变阵列的幅度加权, 而通过遗传算法对相位加权作全局优化。为减小对天线方向图的破坏, 并希望干扰源来波方向实时置零, 因而采用只优化搜索数字移相器的最后几位。计算机模拟结果证实了这种方法的有效性。

关键词 遗传算法, 自适应天线阵, 和差方向图

中图分类号 TN823, O224

1 引言

天线阵列系统为消除干扰源的影响, 希望在尽量不影响其方向图的前提下, 使方向图在对准干扰来波方向上形成尽可能深的零点。这个问题自提出已有数十年之久, 而且也已有多种实现方法^[1], 归纳起来有以下三种: 第一种方式是控制每个单元的幅度和相位, 即幅相加权; 第二种方式是控制单元相位, 即仅相位加权; 第三种是选择单元子集或子阵的组合控制方式。一般经典的自适应天线阵都采用第一种方式, 然而无论哪一种方式都有各自的缺陷。

基于仅相位置零的自适应算法已有三类主要方法, 随机搜索法^[2]不易陷入局部最小值, 且不需每个阵单元都有一个昂贵的接收机, 但由于搜索空间太大而使得天线阵波束扫描太慢, 并没有得到实际应用。快速下降法及类似的鲍威尔 (Powell) 法和共轭梯度法^[3]等等, 这类方法得到的相位权值通常并不是整数, 而且输出功率对微小相移不敏感, 所以收敛速度也并不快。第三种方法波束空间法, 在干扰来波方向形成抵消波束, 通过调整波束幅度抵消副瓣并置零, 该算法相当快, 但要求必须知道干扰的来波方位, 且对每个单元的相位加权要有相当准确的估计。遗传算法 (GA)^[4]是近年来得到广泛应用的一种随机搜索算法, 最近 K.K.Yan 等人^[5]采用基于遗传算法的仅相位部分位置零技术, 仅考虑了和方向图抑制多干扰问题; 事实上对于单脉冲天线阵, 差方向图自适应抑制干扰更为重要, 我们采用与 Yan 类似的方法, 仅对数字移相器的最后几位作搜索, 以得到相位加权使天线阵方向图在干扰来波方向置零, 分别对和和差两种情况都做了考虑。本文以最简单的线阵为例作了计算机模拟, 结果证明了这种方法的有效性, 它在一定程度上克服了其它几种算法的缺陷, 收敛速度快, 零深可达 -50dB 且对天线阵方向图影响很小。这种方法对相控阵天线特别适用。

2 问题的数学模型

我们仅考查如图 1 所放置的一个点源线阵, 分别考虑和差两种情况的激励, 以产生所需和波束及差波束。对于放置在 X 轴上的点源线阵, 它在信号的来波 ϕ 方向的方向图为

$$AF(u) = \frac{\sin \phi}{2N} \sum_{n=1}^{2N} \omega_n e^{j(n-N-0.5)\Psi}, \quad (1)$$

其中 $2N$ 为阵单元数, ϕ 为信号来波的入射角, $\omega_n = a_n e^{j\delta_n}$ 为第 n 个阵单元的复权值, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, d 为阵元间距, $u = \cos \phi$, τ 为波束扫描相位, $\Psi = kdu + \tau$ 。

¹ 1998-07-09 收到, 1999-02-29 定稿

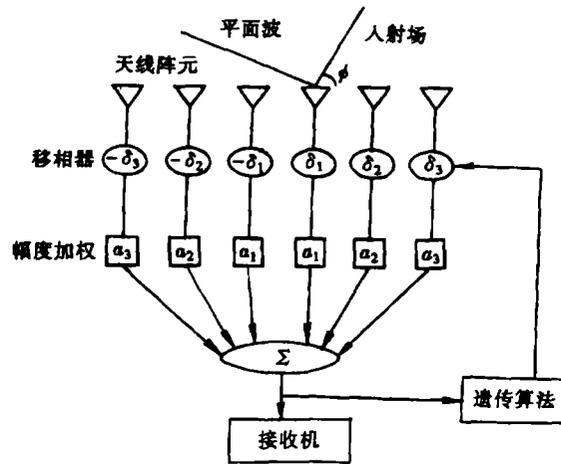


图 1

幅度加权固定不变, 由于相对阵列中心偶数相移对降低副瓣电平有利^[6], 而奇数相移对置零有利^[7], 在这里置零更重要, 则 (1) 式可简化为

$$AF(u) = 2 \sin \phi \sum_{n=1}^N a_n \cos[(n - N - 0.5)\Psi + \Delta_n + \delta_n]. \quad (2)$$

注意, 上式中 $\Psi = kdu$, 而波束扫描相位已量化, 由 Δ_n 表示, δ_n 为零位相位权值。

设采用 B 位数字移相器, B 应在能够保持低副瓣的同时尽可能的小, 以减小硬件实现难度及降低成本. 阵元 n 的量化扫描相位为

$$\Delta_n = \text{round} \left\{ \text{rem} \left\{ \frac{(n-1)\tau}{2\pi} \right\} \frac{2^B}{2\pi} \right\} \frac{2\pi}{2^B}. \quad (3)$$

而用于置零相位可表示为

$$\delta_n = 2\pi \sum_{p=B-P+1}^B b_p 2^{-p}, \quad (4)$$

其中 B 表示 B 位数字移相器, P 表示用于零位的位数, $[b_1 \ b_2 \ \dots \ b_p]$ 为表示已包含置零相位的 δ_n 的向量, $\text{round} \{*\}$ 表示对 $\{*\}$ 取四舍五入到最近的整数, $\text{rem} \{*\}$ 为除法求余. 为使尽可能小地影响天线方向图, 显然应有 $P < B$.

对于差方向图, 以阵中心把整个阵列分成两半, 对称位置反相激励, 与以上和方向图有类似的结论. 幅度加权固定不变, 为尽可能降低副瓣电平, 对和方向图采用 Taylor 综合得到和权向量 a ; 对差方向图采用 Bayliss 综合^[8] 得到差权向量 b .

3 自适应遗传算法

遗传算法是一种全局优化搜索算法, 近几年它已经在电磁场工程中有了广泛的应用^[9], 特别是用作天线阵列方向图的综合. 仅相位自适应算法根据天线阵的总输出功率调整量化相位权值, 无干扰来波时, 算法将使所需信号最小, 为避免这种情况, 算法只在天线阵系统信噪比低于一定门限时打开. 而且事实上我们只调整移相器中的有限几位用于自适应置零, 对天线主波束的影响也是非常有限的. 我们的自适应算法以阵列的总输出功率为目标函数, 应

用遗传算法对数字移相器的最后 P 位作优化搜索, 得到最优相位加权。对于有多个干扰源的情况下, 以天线阵的总输出功率为代价函数, 可表示如下:

$$\cos t = 20 \log_{10} \left\{ \sum_{i=1}^{N_I+1} S_i \sin \phi_i \left| \sum_{n=1}^N a_n \cos[(n-1)kd \cos \phi_i + \Delta_n + \delta_n] \right| \right\}, \quad (5)$$

上式中 S_i 为第 i 个信号的强度, ϕ_i 为第 i 个信号的入射角, i 为有用信号序号, N_I 为干扰源个数。

遗传算法的实现及基本流程在许多文献中都已详细描述, 本文只给出简要的说明。

(1) 染色体的构成 不失一般性, 染色体表示所有阵元数字移相器的相位值, 对于 B 位数字移相器, 共有 2^{NB} 种可能的相位取值, 如此大的搜索空间, 采用随机搜索法和梯度法都是不切实际的。

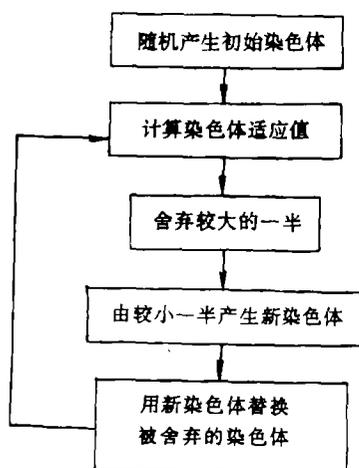


图 2

(2) 子代的产生, 即繁殖过程 繁殖过程包含三个基本的遗传算子: 复制 (mating), 杂交 (crossover) 及变异 (mutation), 其中最重要的是杂交算子。复制算子的目的是提高群体的平均适应值, 杂交算子可以产生新的个体, 变异算子的目的在于恢复群体中失去的多样性, 避免搜索陷入局部最优点。一般来说, 变异率不应超过 1%。

(3) 适应值选择 以天线阵总输出功率作为适应值, 即代价函数 $\cos t$ ((5) 式)。在我们的算法中, 选择过程采用经典的确定性选择, 即在每代中选取保留适应值小的部分染色体。

自适应遗传算法流程如图 2 所示。

4 模拟结果

选取天线阵单元数 $N = 40$, 对和方向图采用 Taylor 分布, 综合得副瓣电平为 -30dB 的和幅度加权值 a ; 对差方向图采用 Bayliss 分布, 综合得副瓣电平亦为 -30dB 的差幅度加权值 b 。设采用 6 位数字移相器, 最后两位用于置零。遗传算法中初始群体选为 20 个染色体, 迭代群体选为 10 个染色体, 交配池为 4 个染色体, 每次迭代舍弃 6 个染色体, 变异率为 1% 左右。

设在 $u_i = 0.30$ 和 0.40 处有两个强度比所需信号高 60dB 的干扰源, 我们编制了遗传算法计算程序, 经过 50 次迭代, 得到了优化后的和差方向图及阵列输出功率变化曲线 (图 3-图 5)。呈阶梯式收敛, 输出功率下降速度非常快。在两个干扰来波方向的零深均可达 -50dB 以上。为考查算法对天线阵主波束 (和) 的影响, 我们给出了调整用于置零的位数相对应的主波束下降的分贝数 (表 1), 由此表不难发现, 若只用 1-3 位数字用于置零, 对天线阵主波束的影响是非常有限的。显然结果是令人满意的。

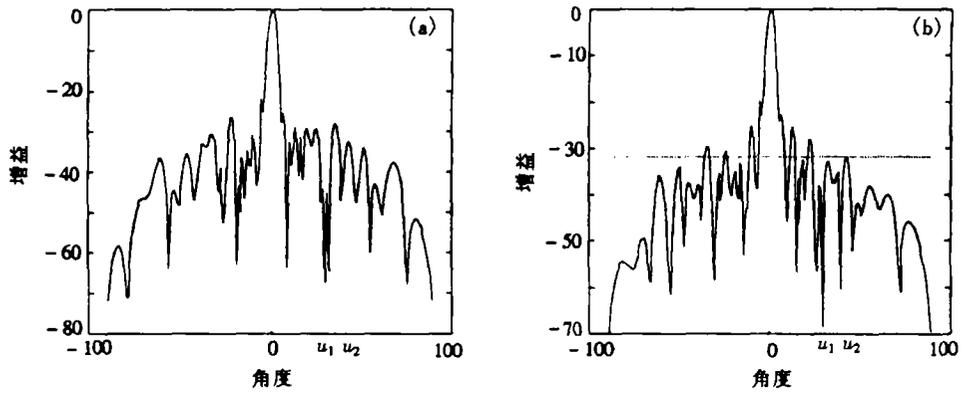


图 3 (a) 随机相位和方向图

(b) 优化和方向图

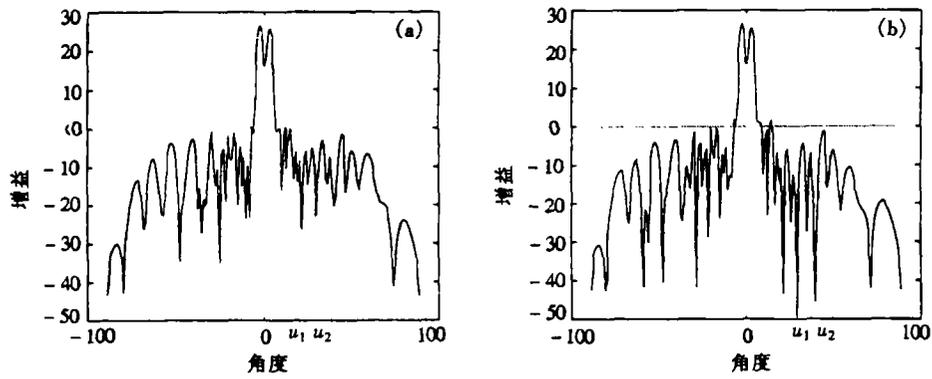


图 4 (a) 随机相位差方向图

(b) 优化差方向图

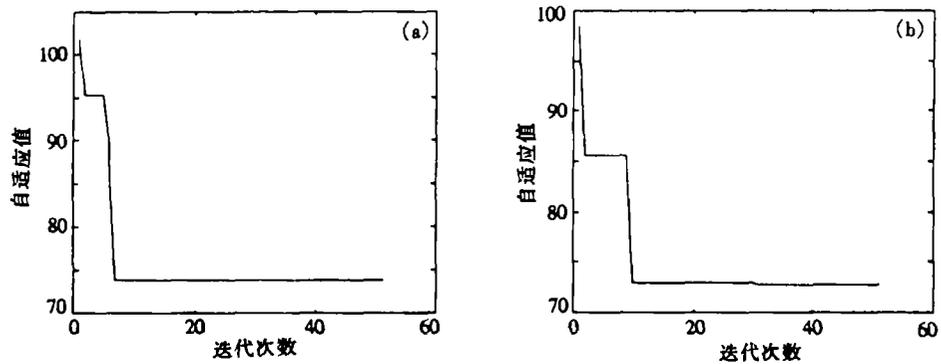


图 5 (a) 算法收敛速度(和)

(b) 算法收敛速度(差)

表 1 无干扰时置零位数对主波束(和)的衰减

用于置零的位数	6	5	4	3	2	1
主波束衰减 (dB)	29.5	11.5	2	0.5	0.1	0.03

5 结 论

由于遗传算法的优良性能, 本文将它实时地用于天线阵列的仅相位自适应置零, 它很好地避免了传统方法无法克服的一些缺陷。但值得注意的是, 遗传算法作为一种全局搜索算法, 并不可能做到真正的全局, 即并没有找到真正的最优值, 得到的也只是局部最优值, 而且每次应用同一算法的收敛速度及最优值会略有不同。

参 考 文 献

- [1] Steyskal H. Methods for null control and their effects on radiation pattern. IEEE Trans. on AP, 1986, AP-34(3): 163-166.
- [2] Monzingo R A, Miller T W. Introduction to Adaptive Antennas. New York: Wiley, 1980, Chapter.2.
- [3] Haupt R L. Adaptive nulling in monopulse antenna. IEEE Trans.on AP, 1988, AP-36(2): 202-208.
- [4] 刘勇等. 非数值并行算法——遗传算法. 科学出版社, 1995 年, 第二章.
- [5] Haupt R L. Phase-only adaptive nulling with a genetic algorithm. IEEE Trans. on AP, 1997, AP-45(6): 1009-1015.
- [6] Deford J F, Gandhi O P, Phase-only synthesis of minimum peak sidelobe patterns for linear and planar arrays. IEEE Trans. on AP, 1988, AP-36(2): 191-201.
- [7] Shore R A. A proof of the odd-symmetry of the phases for minimum weight perturbation phase-only null synthesis. IEEE Trans. on AP, 1984, AP-32(5): 528-530.
- [8] 汪茂光. 阵列天线分析与综合. 成都: 电子科技大学出版社, 1989 年, 第二章.
- [9] Johnson S M, Yahya Rahmat-Samii. Genetic algorithms in engineering electromagnetics. IEEE AP magazine, 1997, APM-39(4): 7-24.

APPLYING GENETIC ALGORITHM TO ADAPTIVE ARRAY

Li Jinwen Mao Junjie Chai Shunlian Yao Demiao

(National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract In this paper, a new approach based on genetic algorithm (GA) is applied to adaptive array, in according to the limitation of hardware, the amplitude weights are not changed, but the phase weights are optimized globally with genetic algorithm. For reducing the perturbations to the far field pattern and placing multiple deep nulls real-time in the directions of interference, a genetic algorithm adjusts some of the least significant bits of the beam steering phase shifters. Simulation results confirm the theoretical work.

Key words Genetic algorithm (GA), Adaptive array, Sum and difference pattern

李晋文: 1975 年生, 博士生, 主要对计算电磁学、宽带天线与毫米波制导感兴趣。

毛灼杰: 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达、微波毫米波技术与天线方面的研究与教学工作。

柴舜连: 1969 年生, 博士, 主要对微带天线、毫米波技术和共形阵感兴趣。

姚德森: 1938 年生, 教授, 主要从事无线电制导、雷达、微波毫米波技术与天线方面的研究与教学工作。