

· 光子学与光子技术 ·

随机馈相条件下相控阵天线 波瓣性能的遗传优化^{*}

李秋生^{1,2}, 刘小燕¹, 黄隆胜¹

(1. 赣南师范学院 物理与电子信息学院,江西 赣州 341000;2. 深圳大学 ATR 国防科技重点实验室,广东 深圳 518060)

摘要:针对随机馈相条件下相控阵天线波瓣性能的优化问题,提出了一种基于多目标遗传算法的随机馈相方案优化方法。文中以泰勒幅度加权的线阵为例对随机馈相的数学模型进行了分析,并在此基础上,对提出的遗传优化算法进行了计算机仿真实验。仿真分析表明,优化后的天线方向图峰值副瓣电平和波瓣指向精度两个性能指标均得到了显著改善,算法具有良好的收敛性能,采用该算法对随机馈相方案进行优化设计,可以有效提高设计的效率和质量,因而值得在实际应用中加以推广。

关键词:相控阵天线;随机馈相;波瓣性能;多目标遗传算法

中图分类号:TN821⁺.8

文献标识码:A

文章编号:J004-8332(2010)06-0033-04

现代相控阵雷达多采用数字式移相器进行相位控制,其优点是结构简单、移相值稳定和便于计算机控制,但它只能实现某个最小相位值整数倍的相移,对于所需的移相值,通常需要舍去或进上一定的尾数,使之成为最小相移值的整数倍,以便能在数字式移相器上实现^[1]。由于相位量化的影响,在阵列天线的波瓣中将产生一系列寄生副瓣,并使天线波瓣指向产生误差。

为降低相位量化对相控阵天线副瓣电平和波瓣指向的影响,一般采用随机馈相法,即对移相器不能精确移相的尾数不用舍入法,而是按一定的概率函数随机确定为进位或舍尾。文献[2]提出了随机馈相的通用数学模型,文献[3-7]研究了如何改善相位量化条件下相控阵天线寄生副瓣电平和波瓣指向精度的问题,文献[8-9]进一步给出了相位量化条件下相控阵天线波瓣指向精度与移相器控制位数 k 之间的定量关系,并指出一般要求 $k \geq 7$ 才能满足工程需要。然而,在目前的技术条件下,移相器控制位数很难做高(通常不大于 6),这就势必带来一个馈相方案的优化选择问题,但对于随机馈相方案的优化,目前为止尚未有一个理论上最佳的准则。为此,文献[10-12]提出用遗传算法对随机馈相方案进行优化,但它们均只考虑到天线峰值副瓣电平的优化,未能兼顾波瓣指向精度的优化。因此,必须对算法进行改进。

在文献[10-12]的研究基础上,本文提出了一种基于多目标遗传算法的随机馈相方案优化方法,算法综合考虑了峰值副瓣电平和波瓣指向精度两个天线波瓣性能目标的优化,并通过仿真验证了算法的有效性。

1 随机馈相的数学模型

为简便起见,这里以泰勒幅度加权的线阵为例进行分析。线阵采用完全分布式随机馈相,其形式和参数如下:单元型式为全向天线;单元数目 N 为 32;阵元间距 d 与波长 λ 的比值为 0.5;扫描角度 θ_B 为 20°;移相器位数 n 为 4。

假定 φ_i 为线阵第 i 个天线单元的精确移相值, $\Delta = 2\pi/2^n$ 为数字式移相器能够实现的最小移相值,则 φ_i 可表示为 $\varphi_i = m\Delta + s\Delta$, 其中 $m = [\varphi_i/\Delta]$, ($[\cdot]$ 表示取整), $0 \leq s < 1$ 。由于相位量化,移相器实际所能实现的移相值只能为 Δ 的整数倍,若进一步假定 φ'_i 为第 i 个天线单元移相器的实际移相值,则随机馈相法的实质就是,对于每个天线单元给定概率 p_i , 使

* 收稿日期:2010-10-15 修回日期:2010-11-01

基金项目:赣南师范学院自然科学研究基金资助项目(09KYZ07)

作者简介:李秋生(1976-),男,汉族,赣南师范学院物理与电子信息学院讲师,深圳大学信号与信息处理专业在读博士,主要从事智能信息处理方面的研究。

$$\psi_i = \varphi_i - \varphi'_i = \begin{cases} -(1-s)\Delta & (\text{概率为 } p_i) \\ s\Delta & (\text{概率为 } q_i = 1 - p_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ψ_i 为第 i 个天线单元的相位误差. 采用不同的 p_i 计算方法, 即可得到二可能值法、预加相位法、零相位误差法等随机馈相法.

图 1 所示为 $p_i = 0.5$ 时某随机馈相方案的天线方向图. 从图中可以看出, 除在 20° 位置的主瓣外, 天线方向图在 -70° 和 60° 附近均出现了较高的峰值副瓣电平, 该电平高达 -19.33 dB, 且波瓣指向有 0.1° 的偏差. 因此, 必须对随机馈相方案进行优化设计, 以满足系统对天线波瓣性能的要求.

2 喂相方案的遗传优化

由前述分析可知, 随机馈相条件下相控阵天线波瓣性能的优化实际上是一个多目标组合优化问题. 鉴于目前对于随机馈相方案的优化还没有一个理论上最佳的准则, 这里采用多目标遗传算法对馈相方案进行优化搜索. 一般而言, 要使天线峰值副瓣电平和波瓣指向精度同时达到最优是不可能的, 本文采用了折中处理方法, 即在优先保证波瓣指向精度的前提下, 使峰值副瓣电平尽可能达到最优.

2.1 编码

由于随机馈相只是对相位量化方案进行编码, 因此可以采用简单的二进制编码方案. 对于完全分布式随机馈相, 只需采用 1 比特对每一染色体(即天线单元的馈相方案)进行编码, 当相位量化进位时将其编码为“1”, 当相位量化舍尾时将其编码为“0”.

2.2 适应值评估检测

选择(复制)算子取决于给定个体的适应值, 个体适应值越大, 它被遗传到下一代的概率就越大. 一般来说, 判断某种随机馈相方案的优劣, 主要是看天线方向图峰值副瓣电平的高低及其波瓣指向偏差的大小. 因此, 适应值评估函数应以峰值副瓣电平和波瓣指向偏差作为计算的基准.

这里采用向量适应值度量方式^[13]来评价染色体, 染色体适应值包含 f_{SLL} 和 f_{BPI} 两个分量, 分别用以评价对应天线方向图的峰值副瓣电平和波瓣指向精度两个性能指标. 假定群体中各染色体对应天线方向图的峰值副瓣电平和波瓣指向偏差分别为 S_i (dB) 和 B_i ($^\circ$), 则为避免由于个体差距不大, 引起搜索成为随机游走, 选用 S 函数作为适应度评估检测函数, 其形式为

$$\begin{cases} f_{SLL} = \frac{1}{1 + \exp(k_1 \cdot S_i)} & i = 1, 2, \dots, N \\ f_{BPI} = \frac{1}{1 + \exp(k_2 \cdot B_i)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_1, k_2 为正常数因子, 其合理选取可以有效提高优化算法的选择性能.

2.3 选择(复制)

选择(复制)算子采用并列选择法^[14], 具体做法是: 先将群体等分为两个子群体, 对两个子群体分别依据峰值副瓣电平适应值和波瓣指向偏差适应值独立地进行选择运算, 各自选出一些适应值较高的个体组成一个新的子群体, 然后再将所有这些新生成的子群体合并为一个完整的群体, 以备下一步的交叉运算和变异运算.

在各子群体中, 以适应值作为选择原则, 采用按比例进行选择的模式, 即适应值为 f_i 的个体将以 $f_i / \sum f_i$ 的概率被复制到下一代, 其中分母为父代中所有个体的适应值之和.

2.4 交叉和变异

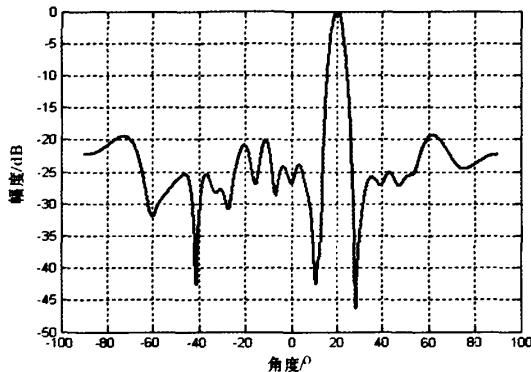


图 1 $p_i = 0.5$ 时某随机馈相方案的天线方向图

这里采用了保留最优个体的交叉算子和变异算子,即对于群体中的最优个体,不让其参与个体的交叉运算和变异运算,而是将最优个体直接保留到下一代群体中.此处的最优个体是指对应天线方向图波瓣指向偏差小于角度量化间隔且峰值副瓣电平最低的染色体.

对于交叉运算,采用单点交叉法^[15],即从群体中随机选取两个个体,随机确定交叉点,将两个个体交叉点后的右半段互换后得到两个新的个体.对于变异算子,就是改变个体某个位置上的编码值,也即对相应位置的编码值进行取反操作.

2.5 优化算法的结构

算法的主要过程描述如下:

初始化种群

循环(代数)

适应值计算

采用并列选择法选择(复制)下一代

保留最优个体的交叉和变异

结束循环(代数)

3 算法仿真与分析

以上述线阵为例进行优化算法的仿真实验.仿真中,取群体规模 N 为 30,交叉概率 P_c 为 0.9,变异概率 P_m 为 0.02;适应值评估检测函数的常数因子 k_1, k_2 分别取 0.1 和 1;为提高初始种群的多样性,随机馈相的概率函数 p_i 取 0.5;繁殖代数为 1000.经过优化搜索,可得如图 2 所示的优化后的随机馈相天线方向图.从图 2 可以看出,优化后的随机馈相方案的天线方向图的峰值副瓣电平已降至 -28 dB 以下,其峰值副瓣电平为 -28.34 dB,比图 1 所示的馈相方案降低了 9.01 dB,且波瓣指向偏差小于角度量化间隔,取得了令人满意的优化效果.

图 3 给出了优化搜索过程中群体中最优个体对应天线方向图的峰值副瓣电平变化曲线.从图中可以看出,随着优化搜索的进行,最优个体对应的天线方向图峰值副瓣电平呈阶梯式下降.曲线大体可以分成三个区:(I) 1~50 代,(II) 50~400 代,(III) 400~1000 代.在(I)区,曲线呈现快速下降趋势,平均每迭代一次最优个体对应的方向图峰值副瓣电平下降 0.079 dB,经过 50 代繁殖,峰值副瓣电平降到 -26.71 dB;在(II)区,曲线下降趋势趋缓,平均每迭代一次最优个体对应的方向图峰值副瓣电平下降 0.0045 dB,经过该阶段的优化,峰值副瓣电平降至 -28.30 dB,已接近于 -28.34 dB 的最终优化结果;在(III)区,曲线基本上趋于稳定,经过该阶段的优化,峰值副瓣电平仅下降了 0.04 dB.由此可见,算法的收敛性能良好,但收敛速度稍嫌不足.

4 结束语

本文提出了一种基于多目标遗传算法的随机馈相条件下相控阵天线波瓣性能的优化算法,并以泰勒幅度加权的线阵为例进行了仿真研究.仿真计算表明,采用该优化算法可以有效地搜索出随机馈相方案的优化解,使得优化后的天线方向图在峰值副瓣电平得到明显降低的同时,其波瓣指向精度也能得到显著改善,在满足设计要求的前提下,可以适当减少繁殖代数,以降低算法的运算量.然而,仿真计算也表明,算法的收敛

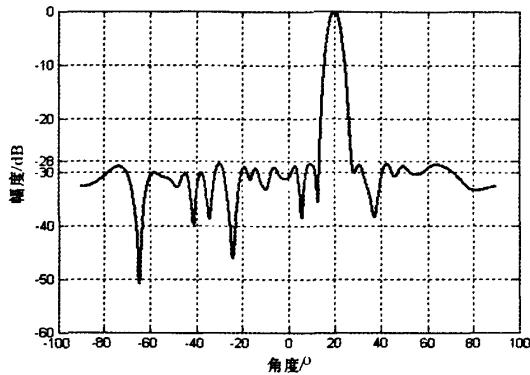


图 2 遗传优化后的随机馈相天线方向图

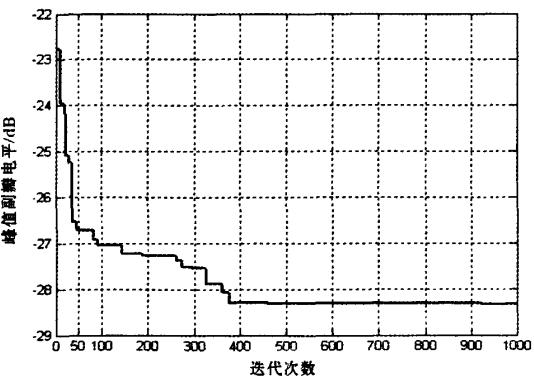


图 3 最优个体对应天线方向图的峰值副瓣电平变化曲线

速度不够快,在下一步的研究中,还须对算法中的选择、交叉或变异等遗传算子进行改进,以进一步提高算法的收敛速度.

参考文献:

- [1] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1994.
- [2] 李秋生.部分随机馈相对相控阵天线波瓣性能的影响分析[J].赣南师范学院学报,2006,27(6):7~10.
- [3] 唐守柱,江卫,郭燕昌.适当预加相位法改进相控阵天线指向精度[C].全国微波毫米波会议论文集,1999.
- [4] Shen Wenhui, Guo Yan-chang, Jiang Wei, et al. Beam-steering optimized by appropriate random phasing quantization methods[C]. ISAPE 2000. 5th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.
- [5] 沈文辉,周希朗,宫新保.提高相控阵天线波束指向精度的方法[J].上海交通大学学报,2004,38(2):233~235.
- [6] 沈文辉,周希朗,彭根建.相控阵天线零相位误差法的波束指向分析[J].上海交通大学学报,2004,38(增刊):87~89.
- [7] 刘兆磊,郭燕昌,张光义.相控阵天线适当随机馈相法对相位量化瓣的抑制[J].微波学报,2008,24(4):53~55.
- [8] 李秋生,谢晓春.数字馈相条件下相控阵雷达最优扫描波位研究[J].航天电子对抗,2009,25(5):18~21.
- [9] 李秋生,谢晓春,袁新娣.数字馈相条件下相控阵天线波瓣指向精度分析[J].微波学报,2010,26(2):19~21.
- [10] 刘昊,樊德森.遗传算法在相控阵子阵量化随机馈相中的应用[J].应用科学学报,2004,22(3):14~17.
- [11] 李秋生.基于遗传算法的相控阵随机馈相方案的优化[J].系统工程与电子技术,2006,28(6):861~863.
- [12] 张浩斌,杜建春,聂在平.相控阵天线随机馈相量化误差的遗传算法优化[J].现代雷达,2006,28(9):74~76.
- [13] 玄光男,程润伟.遗传算法与工程优化[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [14] J. D. Schaffer. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms[C]. In: Proc. of 1st IEEE Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Lawrence Erlbaum Associates, 1985:93~100.
- [15] 周明,孙树栋.遗传算法原理及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.

Genetic Optimization on Lobe Performance of Phased Array Antenna in Condition of Random Phasing

LI Qiu-sheng^{1,2}, LIU Xiao-yan¹, HANG Long-sheng¹

(1. School of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China;

2. ATR Key Laboratory of National Defense Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: To resolve the optimization problem of phased array antenna in condition of random phasing, an optimization method for random phasing schemes based on multiobjective genetic algorithm is put forward. The paper takes an amplitude-Taylor-weighted linear array as the example, and performs this algorithm's computer simulation experiment on basis of analyzing the mathematical model of the random phasing. The simulation results show, through optimization, both the peak value of the side lobe levels of the antenna pattern and its lobe direction accuracy have been distinctly improved, and the algorithm offers a nicer convergent performance in the process of the simulation. Furthermore, in the optimization design of the random phasing schemes, the algorithm can effectively improve the efficiency and the quality of the design, so as to deserve generalization in practical application.

Key words: phased array antenna; random phasing; lobe performance; multiobjective genetic algorithm

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)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)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),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>