



ChinalInfo

系统工程与电子技术

SYSTEMS
ENGINEERING
AND
ELECTRONICS
1999年 第2期
No.2 1999

科技期刊

基于整体退火遗传算法的 不等间距天线阵的综合

韩明华 袁乃昌

摘要 将一类非时齐(整体退火选择)、保证收敛且易于判断收敛的新型遗传算法应用于不等间距天线阵的综合，对天线阵的位置及加权系数进行了优化。实验实例表明：该算法收敛速度快，有极强的避免过早收敛及避免局部极值的全局优化的能力。本文为大型天线阵的优化设计提供了方法。

主题词 遗传算法，天线阵，优化。

Synthesis of Unequally Spaced Arrays by Genetic Algorithm
Combined with Simulated Annealing

Han Minghua and Yuan Naichang

Department of Electronic Technology Section 403 of NUDT, Changsha 410073

Abstract: A new type of genetic algorithm combined the parallel simulated annealing with the advantages of guaranteeing convergence and deciding convergence easily was proposed to the synthesis of unequally spaced arrays. The position and the weighted coefficients can be optimized at the same time. The cases showed that this method had a strong ability to find to global optimization solution. This method provides a strong tool to design the large antenna arrays.

Keywords: Genetic algorithm, Antenna array, Optimization.

1 引言

大型天线阵已经在通信、军事、射电天文学等领域得到广泛的应用^[1~4]。由于天线阵阵元的数目影响到了整个系统的费用及控制系统的复杂度。因此，在保证天线孔径的尺度、天线方向图的约束下减少天线单元的数目就成为一种关键问题。为了减少天线阵元的数目及阻止栅瓣的产生，一个方法就是增大阵元间的距离。这种操作将导致天线阵元的平均间距 d_{av} 为奈奎斯特准则的几倍($/2$)^[1]。只要天线的数目及天

线的物理孔径已定，则不等间距天线阵与等距天线阵具有相同的主波束宽度，而副瓣电平则明显降低。

不等间距天线阵副瓣电平的优化问题研究已久 [5~9]。传统的方法主要是基于梯度法 [8]、动态规划 [5] 等方法。这些方法在一定程度上解决了天线阵的优化问题，但在寻找全局最优解的能力上显得不足。近几年，又相继提出了模拟退火算法(SA) [6, 10]、遗传算法 [11] 等最新的优化技术，并进行了实验计算，优化结果进一步提高。但是由于标准的SA、GA方法有过早收敛的弱点，使其在大型天线阵的设计应用中受到限制。

SA和GA方法已经在电磁学中得到了应用 [10~17]。本文通过将模拟退火的方法引入遗传算法的选择策略和生存策略—整体退火遗传算法 [18, 19]，使该算法比标准的算法有快得多的收敛速度及更强的逃脱局部极值和避免过早收敛的全局优化能力。而且已经证明 [19]，该方法所产生的种群的每个个体均以概率1收敛到最优解(一般的GA方法只能保证群体中的最优个体以概率1收敛到最优解)，从而种群适应值的集中程度可作为判定当前解是否达到最优的合理标度。文中对一25单元，孔径为50 的不等天线阵进行了优化。不等间距优化和权优化结果分别比文献 [6] 中结果降低了1.6dB和0.78dB，说明该方法在寻找全局最优解的方面要优于单纯的SA方法。

2 不等间距天线阵的波束公式

本文中研究的天线阵如图1所示。天线的波束模图 $p(x)$ [5] 可表示如下

$$p(x) = \left| \sum_{i=0}^{M-1} W_i e^{j \frac{2\pi}{\lambda} X_i^n} \right| \quad (1)$$

其中 X_i 表示天线阵中第*i*个阵元的位置， W_i 表示天线阵中第*i*个阵元的加权系数。 $u=\sin(\alpha)-\sin(\theta_0)$ (α 及 θ_0 分别是入射波方向及波束扫描角)。由u的表达式可知， $u \in [-2, 2]$ ，将天线阵的模式图视为u的函数，则当 $u=0$ 时， $p(x)$ 达到极大值，并且天线阵的波束宽度与天线阵的扫描角无关。

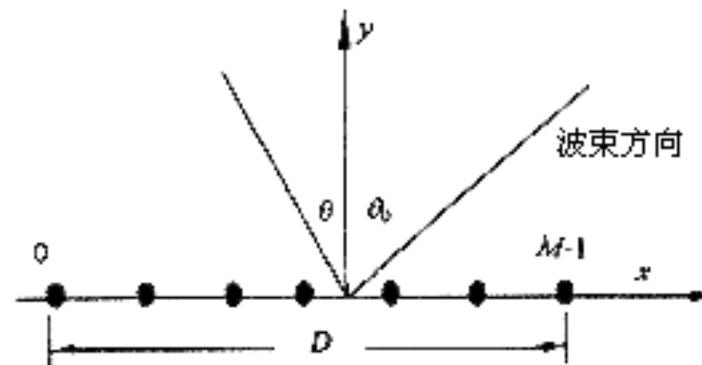


图1 不等间距天线阵的几何结构

为了符合一般的习惯，将天线的波束模图以极大值为标准进行规一化

$$F(u) = 20 \lg [p(u)/Q] \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=0}^{M-1} W_i$$

式(2)中的

由此可以看出，不等间距天线阵的综合问题可简述为确定每个阵元的加权系数及阵元的位置，并使下列的泛函达到最小值

$$\begin{aligned} f(\mathbf{X}, \mathbf{W}) &= \max_{u_{\text{start}} \leq u \leq u_{\text{end}}} F(u) \\ &= \max_{u_{\text{start}} \leq u \leq u_{\text{end}}} 20 \lg(p(u)/Q) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中 X 和 W 分别为阵元位置与阵元加权系数矢量。 u_{end} 取值与所关心的扫描区域有关。为了与以前的文献结果进行比较，本文中取 $u_{\text{end}}=1$ ； u_{start} 的取值应该保证排除主瓣极值，求出所关心区域内的栅瓣最大值。

文献[8]中提出了梯度法、动态规划法、高斯积分法、拉氏变换法、微分方程法、有限差分法等方法，这些方法各有自己的优点，但共同的缺点是一般情况下仅能够得到问题的局部最优，而求解全局最优方面存在不足。本文下面用的整体退火遗传方法是近来进化(SE)算法的改进，该方法具有很强的求全局最优解的能力。

3 算法描述

3.1 整体退火遗传算法

遗传算法是模拟“物竞天择”的自然进化过程算法中重要的一类。通常该算法被描述为求解组合优化问题

$$\max_{x \in B} f(x), \quad B = \{0, 1\}^L \quad (4)$$

其中 $f: B \rightarrow R^+$ 为一实值映射。 B 为被优化参量的二进制编码的集合，其中的每一个元素称为一个基因。在我们所研究的问题中，就是将阵元的位置参量及加权系数进行量化编码。

遗传算法就是在状态空间 B 中的一种群体搜索策略。依照生物学的术语，将 B 中的任意一有限集 $\{b_1, \dots, b_n\}$ 称为一个种群， n 为种群的规模。 B 中的任意一个元素 $b = a_1 a_2 \dots a_L$ 称为一个染色体(即为问题中的参量)，而 b 中的 $a_i=1$ 或0称为基因， L 为每个参量的编码程度(在实际的问题中由于各个参数的作用并不相同，因此编码长度可以不同)。如果存在映射 $J: R \rightarrow R$ 为一严格单调递增且 $J(f(x)) > 0$ ，则称 $J(f(x))$ 为问题(4)的一个适应度

函数。

标准的遗传算法(SGA)如下

$k:=0$

随机初始化种群 P_0

repeat

(1) 从种群 P_k 中按适应度大小，随机的选取父本种群 F_k ；

(2) 由 F_k 经交配产生子代 C_{r_k} ；

(3) 变异 C_{r_k} 得到中间种群 M_{u_k} ；

(4) 由父代种群和中间种群共同组成新的种群 P_{k+1} (父代参与竞争情况)或(4)'以

M_{u_k} 作为新的种群 P_{k+1} (父代不参与竞争情况)

$k:=k+1$

until 停机准则满足

传统的GA方法中，种群 F_k 的规模 n_0 , C_{r_k} 和 M_{u_k} 的规模 n_1 已定，亦即参与竞争的是依

照固定比例进行的。一般情况下，仅具有竞争力的能够参与竞争，但这样容易造成算法的过早收敛，陷入局部极值。避免这种情况发生的一种途径是允许“坏”的个体参与竞争，比如GA欺骗问题，函数表现为适应度高的峰值被一些低谷所包围，低适应度的种群也可能包含有用的模式。因此，在搜索过程中应该接受差解，这种现象在生物进化中是屡见不鲜的。

基于上面的考虑，我们在SGA中的生存策略中引入Boltzmann生存机制，即在SGA算法的步骤(1)中引入一时变选择——整体退火选择。该算法的生存策略为：设新产生的适应度为 f ,变动的阀值为 \bar{f} ,当 $f > \bar{f}$ 时，接受新个体；否则，以一定的概率接受新个体 $P=\exp((f-\bar{f})/T)$,其中 T 为热力学中的温度。

文献[19]中已经证明，引入Boltzmann生存机制的遗传算法与时齐(比例选择)遗传算法是截然不同的，整体退火遗传算法总是整体收敛的，能够保证群体中的任何一个个体以概率1收敛到全局的最优解。这一性质为这一算法提供了一个十分合理的停机判定准则，即以种群适应度函数值的集中程度作为判据，适应度的选取与解的精度有关。

3.2 二次优化

由上面的描述知，遗传算法的第一步是编码。由于本问题中的优化参量为实数，因此，在编码中必然存在量化误差，在收敛情况下得到的是最优解的近似。为此，本文中采用模拟退火法对经整体退火遗传算法得到的优化结果进行二次优化，因为模拟退火算法的步长能够精确地进行划分，使结果进一步精确。在应用SA方法进行二次优化时，应对优化参数的取值范围进行限制，否则将会增加计算时间。实践证明，在SA算法中，初始温度及冷却速度和冷却方式对算法的收敛结果影响很大。一般情况下可通过设置冷却温度下限或控制等待参数作为停机准则，计算表明，这种方法已经能够满足要求。

4 计算实例

本文中对一由25个单元组成的孔径为50 的不等距离天线阵进行了优化^[6]，文中 $u_{start}=0.04$ 。为了表明本文方法的可行性，分别就下面两种情况进行了优化：(1)加权系数固定(等于1)，仅对空间位置进行优化；(2)加权系数与空间位置均进行优化。

在计算中，对位置参数进行如下的编码：以两个阵元间的距离作为优化变量，而且对两个阵元间的距离进行了如下的约束： $/4 \ d \ 8$ 。在文献[9]中提出了电流锥削比(Current Taper Ratio, CTR)的概念，即为阵元最大加权系数与最小加权系数的比值。该约束的出现是基于实际馈电网络的难易程度考虑的，因为在实际情况中，当在同一天线阵中不同阵元的加权系数差别过大时，会增加馈电网络的难度，导致研制费用增加。本文中对加权系数的限制 $w \ [0.3, 1.5]$ ，这一约束条件保证了物理实现的可行性。

为了应用整体退火遗传算法，我们将位置间隔参量 d 的染色体编码取为5bit近似(即用5位二进制串表示每一位参数， $B=\{0,1\}^5$)，系数参量 w 的染色体编码取为4bit近似， w 的量化单位为0.1。适应度函数为 $f(X,W)$ ，变异概率范围 $0.001 \sim 0.005$ ，杂交算子运用标准的单点杂交^[15]。应用退火选择遗传算法与二次优化，退火温度 T

$$\text{按 } T_k = \ln\left(\frac{k}{T_0} + 1\right), T_0 = 200, k = 1, 2, \dots, \text{ 表示演化代数。}$$

对于如此选择的参数，在586型计算机上进行了计算，并与其它方法得到的结果进行比较。其中SGA方法调用MATLAB的标准程序。图2、图3分别形成了(1)、(2)两种情况的结果。

4.1 位置优化

一般情况下，出于馈电方便的考虑，如果密度锥削能够满足要求，不会对幅度进行锥削。因此本文首先对加权系数为固定值(假定 W_i 均为单位值1)时的情况进行了验证，并与其它方法得到的结果进行了比较。比较的指标为：最大副瓣电平、3dB波瓣宽度。

本文中得到的天线阵功率模式图如图2所示。优化结果为：最大副瓣电平-13.60dB，主瓣宽度0.0092。各天线阵元的位置为：0, 6.75, 13.32, 18.41, 21.20, 22.26, 22.90, 23.3870, 24.00, 24.40, 25.00, 27.46, 28.05, 29.80, 30.67, 32.42, 33.2996, 34.0300, 34.77, 35.60, 37.32, 38.17, 41.46, 43.00, 50.00。

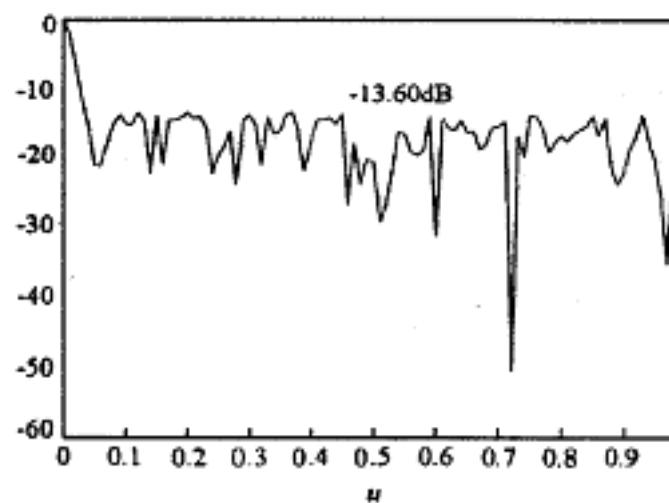


图2 单位系数的天线阵功率模式图优化
结果，最大副瓣电平为-13.60dB

据作者所知，距今为止最好的报道结果为文献[6]中：最大副瓣电平为-12.07dB，主瓣宽度为0.0124。由此看出本文方法在两方面有所改进：副瓣电平降低1.9dB和主瓣宽度减小。与其它方法得到的结果对比如表1所示。

表1 不同优化方法所得结果比较

综合方法	副瓣电平	主瓣宽度(3dB)
整体退火遗传算法	-13.6	0.0092
模拟退火[6]	-12.07	0.0124
动态规划[8]	-10.14	0.0143
梯度法[8]	-10.50	0.0152

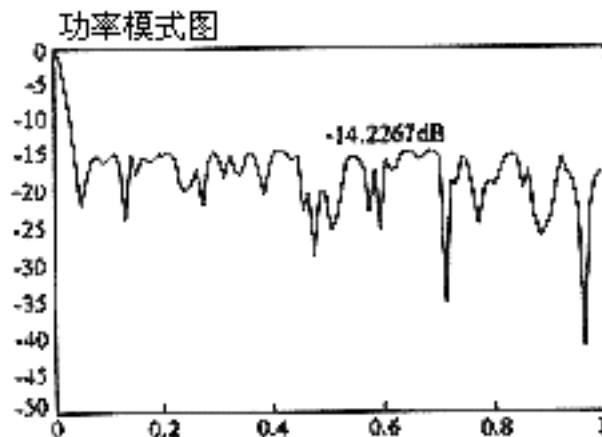
4.2 位置与系数优化

我们已经知道，当位置变量和加权系数变量均进行优化时，所得结果要优于单纯位置变量的优化结果。我们将加权系数的编码与位置参量的编码组合成一个整体的基因，共同参与进化过程。

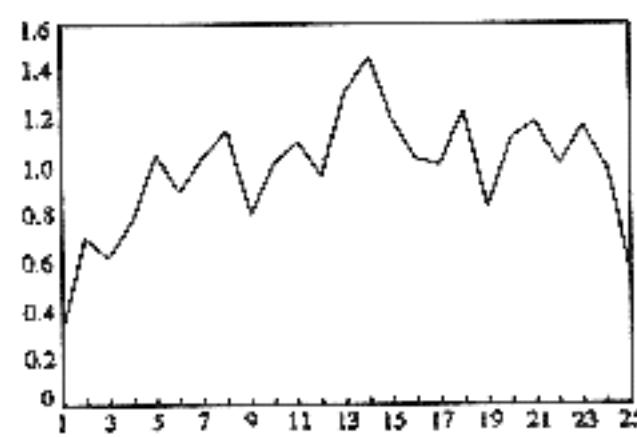
优化结果为：最大副瓣电平-14.27dB，主瓣宽度0.0132，CTR=3.2。优化波束功率模式图如图3(a)所示，阵元加权系数在图3(b)中给出。与其它方法所得结果的比较在表2中给出。

表2 不同方法优化阵列特性比较

综合方法	副瓣电平	主瓣宽度	CTR
整体退火遗传算法	-14.27	0.0132	3.2
模拟退火[6]	-13.51	0.0143	4.1
文献[9]	-12.20	0.0189	5.8



(a) 功率模式图



(b) 加权系数

图3 应用整体退火遗传算法对位置和系数的优化阵列

5 结 论

本文将一个保证收敛的非时齐遗传算法——整体退火遗传算法用于不等间距天线阵的优化设计。这一算法在SGA算法的父本选择中引入非时齐选择。实践证明：该算法具有整体收敛能力，和较强的避免过早收敛和逃脱局部极值的全局优化能力，而且种群的集中程度可作为这一算法的合理终止准则。同样，该方法还可应用于其它的电磁优化问题，比如与天线阵有关的另一问题——二维天线阵的优化^[20]。目前作者正在将这种方法应用于这一课题。

作者单位：国防科技大学电子技术系403室，长沙 410073

参考文献

- [1] Hansen R C , et al. Micorowave Scanning Antennas. 1996
- [2] Hansen R C , et al. Micorowave Scanning Antennas. 1996
- [3] Hansen R C , et al. Micorowave Scanning Antennas. 1996
- [4] Ma M T. Theory and Application of Antenna Arrays. John Wiley & Sons, Inc, 1974
- [5] Skolnik , et al. Dynamic Programming Applied to Unequally Spaced Arrays. IEEE Trans. , 1964
- [6] Vittorio Murino, Andrea Trucco, Regazzoni Carlo S. Synthesis of Unequally Spaced Arrays by Simulated Annealing. IEEE Trans.on Signal Processing , 1996
- [7] Elliott Robert S. Antenna Theory and Design. 1981
- [8] 泽尔金 E R, 索科若夫 B r. 天线综合法. 陈祥禄, 倪湘译, 宇航出版社, 1986
- [9] Jarske P, Sramaki T, Mitra S K, Neuvo Y. On the Properties and Design of Nonuniformly Spaced Arrays , IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing, 1988, 36:372 ~ 380
- [10] Ruf Christopher S. Numerical Annealing of Low _ Redundancy Linear Arrays. IEEE Trans. on AP, 1993
- [11] Haupt Randy L. Thinned Arrays Using Genetic Algorithms. IEEE Trans.on AP, 1996
- [12] Altshuler Edward E, Linden Derek S. Design of a Loaded Monopole Having Hemispherical Coverage Using a Genetic Algorithm. IEEE Trans.on AP, 1997
- [13] Linden Derek L, Altshuler Edward E. Automating Wire Antenna Design Using Genetic Algorithm. Microwave Jounal, 1996
- [14] Altshuler Edward E, Linden Derek L. Wire-Antenna Designs Using Genetic Algorithm. IEEE Antena and Propagation Magazine, 1997
- [15] Fogel D B. A Introduction to Simulated Evolutionary Optimization. IEEE Trans.on Neural Networks, 1994, 5(1):3 ~ 13
- [16] Haupt Randy L. An Introduction to Genetic Algorithm for Electromagnetics. IEEE Antena and Propagation Magazine, 1995
- [17] Daniel S. Weile and Eric Michielessen. Genetic Algorithm Optimization Applied to

Electromagnetics:A Review,IEEE Trans.on AP,1997

[18]王雪梅 , 王义和.模拟退火算法与遗传算法的结合.计算机学报 , 1997

[19]张讲社 , 徐宗本 , 梁怡.整体退火遗传算法及其收敛必要条件.中国科学E辑 , 1997

[20]束咸荣 , 晏煥强 , 郭燕昌.大型稀布相控阵天线设计及其旁瓣电平研究.微波学报 , 1996

收稿日期 : 1997年9月18日

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>