

多约束天线阵列遗传优化中的初始群体构造方法

李伟勤¹, 李新献², 施岱松¹

(1 西南石油大学, 四川 成都 610500; 2 南阳医学高等专科学校, 河南 南阳 473061)

摘 要: 针对运用遗传算法进行圆形口径的平面稀布天线阵列的优化设计, 提出了一种有效的初始群体构造方法, 它能满足多个实际工程设计的约束条件. 由此方法构造的初始可行解可作为遗传算法的个体, 从而组建初始群体, 它为多约束遗传优化算法的运用提供了可行性. 该方法的正确性和有效性也得以认证.

关键词: 阵列天线, 遗传算法(GA), 旁瓣电平, 优化布阵

中图分类号: TN 820.1+5 TN 820.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)02-0133-05

A Scheme to Construct Genetic Feasible Group for the Plane Arrays Optimization

LI Wei-qin¹, LI Xin-xian², SHI Dai-song¹

(1 Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2 Nanyang Medical College, Nanyang 473061, China)

Abstract: For the problem of optimum design of the sparse circular aperture arrays with multiple constraints, an new approach to build the initial feasible solution which meet multiple design constraints are presented in this paper. This approach can meet the multiple design constrains of the engineering design. The initial group formed by this method is always feasible group for the genetic algorithms. It has provided the necessity and the feasibility for the application of GA, at last, the correctness and effectiveness of the algorithm are verified.

Key words: antenna arrays; genetic algorithm (GA); sidelobe level; optimum arrays

1 引言

圆形阵列天线在诸如舰船、飞机等运动载体上和地面雷达系统中都具有重要的应用价值^[1-2]. 当阵列口径较大时, 半径间隔半波长的均匀同心圆环平面阵需要相当多的阵元, 这使得天线系统的成本较高^[3-4]. 为保证高的空间分辨率, 低的副瓣特性等性能, 同时又尽量降低天线系统的成本, 可采用稀布天线阵元位置的方法来设计圆口径天线阵列, 以提高性价比.

由于遗传算法的普遍适用性, 它在阵列天线设计等电磁学问题中被广泛应用^[4-8], 常被用于求解非线性优化, 适合求解圆口径阵列的稀布优化问题, 这里将它选为优化设计的优化工具是适宜的.

在圆形口径天线阵列的实际工程优化设计中,

经常需要约束天线阵列的口径、阵元数和最小阵元间距来控制天线系统的成本和性能. 约束最小阵元间距能控制阵元间的互耦对天线性能的影响. 在这种多约束优化问题的解决方法中, 常规的线性最优化方法难以应对这个多约束非线性的最优化问题, 本文针对遗传算法优化过程中有效初始群体的生成寻求解决方法, 使它为遗传算法的运用提供可行的技术途径.

2 多约束条件下遗传优化算法应用中的关键问题

遗传算法属于一种全局性概率搜索算法, 核心思想是模拟生物进化过程. 主要特点是利用简单的编码技术和繁殖机制来表现复杂的现象, 通过采取群体搜索策略和在群体中个体之间进行信息交换,

此算法不受搜索空间的约束,不考虑如连续性、可导和单峰等。

在 GA 的实际应用中,面对多个约束条件时,关键是对约束条件的处理,原理上可以按无约束问题那样进行遗传操作(譬如随机生成个体的染色体,再进行交叉和变异),再检查个体是否违反约束,如果没有违反,则表明是可行解,否则就是不可行解,然而这样的处理实际上是行不通的(实际应用中计算量大,效率低),因为要找到一个可行解同样是很困难的^[9]。所以在多约束条件下,遗传算法应用中的重要问题是算法开始时有效地生成可行的初始解群体,为遗传算法的有效运用提供可行的解决途径。

3 稀布面天线阵列优化中初始群体的创建

假设用图 1 所示的半径为 R 的圆口径平面阵来表示优化布阵问题, xoy 平面上,阵元位置的极坐标为 $d_n = r_n e^{j\phi_n}$,阵元数为 $N+1$ (N 为正整数,1 表示口径心处布置有一个阵元),所有阵元都一样,并均匀等幅激励,为了保持口径圆约束为 R ,使 $r_N \leq R$,求取阵元位置 $D = (d_1, \dots, d_N)$,满足约束 $\min\{|d_i - d_j| \geq d_c, 1 \leq j < i \leq N, \text{保证该天线阵的峰值旁瓣电平(PSLL)为最低. 该约束最优化问题可以描述为}$

$$\begin{cases} \min \text{PSLL} = f(d_1, d_2, \dots, d_N) \\ \text{s. t. } |d_m - d_n| \geq d_c > 0 \\ |d_m| < R \\ m, n \in Z, 1 \leq m, n \leq N \end{cases} \quad (1)$$

即优化目标是旁瓣电平尽量低,优化变量是阵元位置,约束条件是阵元数目为 N 、最小阵元间距不小于 d_c ,天线阵列的圆口径约束为小于 R 。

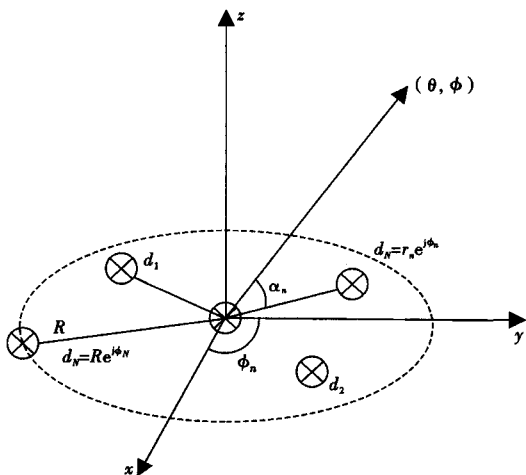


图 1 稀布圆口径面阵的阵列结构

选取复向量阵元位置矢量 $(d_1, \dots, d_N)$ 充当上述最优化问题的决策变量,各元素的模和相位角用一定范围内的一个浮点数来表示,即所谓浮点数编码方法,又叫真值编码方法,它不仅可以保持 GA 的变异操作具有更好的种群多样性,也大大提高了二进制编码方法运行性能,保证了 GA 的高精度和运算效率。

设阵元为全向性阵元,该平面阵列的方向图函数可以表示为^[2,7]

$$E(\theta, \phi) = 1 + \sum_{n=1}^N I_n \exp[j(\psi_n + k r_n \cos \alpha_n)] \quad (2)$$

这里

$$\cos \alpha_n = \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \lambda \text{ 为工作波长}; 0 \leq \theta \leq \pi; 0 \leq \phi \leq 2\pi, \text{所有}$$

阵元等幅同相激励,即取 $I_n = 1, \psi_n = 0$ 取适应度函数为整个 ϕ 平面的旁瓣电平,则

$$\text{fitness}(D) = \max \left\{ \left| \frac{E(\theta, \phi)}{FF_{\max}} \right| \right\} \quad (4)$$

式中, $FF_{\max}$ 为主瓣最大值,除主瓣外的所有旁瓣区域与 ϕ, θ 所对应。最优化模型如下:

$$f(d_1, d_2, \dots, d_N) = \min\{\text{fitness}(D)\} \quad (5)$$

为了方便运用遗传算法,使创建的初始群体满足最小阵元间距约束,并充分利用约束条件下各阵元的布阵自由度,我们构造了用于间接描述个体的模板辅助矢量 C 。由图 2 所示的半径相隔 d_c 的均匀同心圆环阵列的阵元位置分布特性可知,以此为基础来构造满足多个约束的可行解个体,然后构建多个可行解个体组成的集合,从而可以构建初始群体。

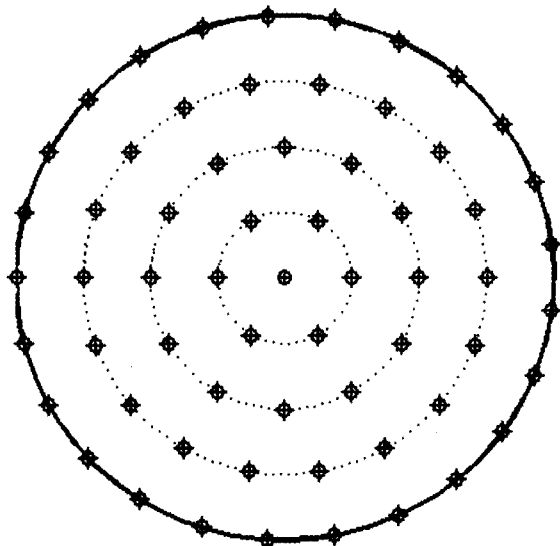


图 2 均匀同心圆环栅格上布阵的均匀圆口径面阵

设图2所示的圆形阵列的口径为 $R=(a+1)d_c$, $a \in \mathbb{Z}$, 我们在半径相隔 d_c 的均匀同心圆环栅格上, 在均布阵元间距不小于 d_c 的情况下, 布设尽可能多的阵元, 这种分布特性充分地运用了阵元的布阵自由度, 同时也满足了优化约束 $|d_m - d_n| \geq d_c > 0$. 在每个辅助圆环上的阵元间距是凭相角的差值保证的, 而任意两个相邻辅助圆环的半径相差正好是 d_c , 可以证明, 在这种情形下, 任意两个阵元间距不小于 d_c .

取如下复矢量

$$\begin{aligned} C = [& d_c e^{j\Delta_1}, d_c e^{j2\Delta_1}, \dots, d_c e^{jk_1\Delta_1}, \\ & 2d_c e^{j\Delta_2}, 2d_c e^{j2\Delta_2}, \dots, 2d_c e^{jk_2\Delta_2}, \\ & \dots \end{aligned} \quad (6)$$

$$ad_c e^{j\Delta_a}, ad_c e^{j2\Delta_a}, \dots, ad_c e^{jk_a\Delta_a}]^T$$

为模板辅助矢量, 它表示的阵列满足最小阵元间距约束. 式中 $a = \lfloor \frac{R}{d_c} \rfloor - 1$ 为栅格圆的数目, $k_1, k_2, \dots, k_a$ 分别为第 1, 2, $\dots, a$ 层栅格上可以布置的阵元数目最大的最大值, $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_a$ 为第 1, 2, $\dots, a$ 层栅格圆上布置最多阵元数目时相位角坐标值的间隔. C 与阵元间距约束和相角间隔约束有关, 因而又称为约束矢量. 取最小阵元间距约束为 $d_c = \lambda/2$, 如表1所示, 半径相隔 d_c 的均匀同心圆环的各栅格圆上的最多阵元数目和各栅格圆上阵元相位坐标值的最小间隔.

表1 各栅格圆上最大可能阵元数目及阵元相角间隔

层序号	圆形栅格半径	栅格圆的周长	最大阵元数 k (阵元间弧长不小于半波长)	最大阵元数 k (阵元间线段长不小于半波长)	阵元相角间隔 Δ (rad)
1	0.5λ	$\pi\lambda$	$\lfloor 6.282 \rfloor = 6$	$\lfloor 6.00 \rfloor = 6$	1.047
2	λ	$2\pi\lambda$	$\lfloor 12.56 \rfloor = 12$	$\lfloor 12.43 \rfloor = 12$	0.524
3	1.5λ	$3\pi\lambda$	$\lfloor 18.84 \rfloor = 18$	$\lfloor 18.76 \rfloor = 18$	0.349
4	2λ	$4\pi\lambda$	$\lfloor 25.13 \rfloor = 25$	$\lfloor 25.06 \rfloor = 25$	0.251
5	2.5λ	$5\pi\lambda$	$\lfloor 31.41 \rfloor = 31$	$\lfloor 31.36 \rfloor = 31$	0.203
6	3λ	$6\pi\lambda$	$\lfloor 37.69 \rfloor = 37$	$\lfloor 37.65 \rfloor = 37$	0.169
7	3.5λ	$7\pi\lambda$	$\lfloor 43.98 \rfloor = 43$	$\lfloor 43.94 \rfloor = 43$	0.146
8	4λ	$8\pi\lambda$	$\lfloor 50.26 \rfloor = 50$	$\lfloor 50.23 \rfloor = 50$	0.126
9	4.5λ	$9\pi\lambda$	$\lfloor 56.54 \rfloor = 56$	$\lfloor 56.52 \rfloor = 56$	0.112
10	5λ	$10\pi\lambda$	$\lfloor 62.83 \rfloor = 62$	$\lfloor 62.81 \rfloor = 62$	0.101
11	5.5λ	$11\pi\lambda$	$\lfloor 69.11 \rfloor = 69$	$\lfloor 69.09 \rfloor = 69$	0.091

模板矢量 F_i 的构造过程如下:

(1) 算法生成的所有元素均位区间 $[0, 0.5\lambda]$ 中

的实随机列向量, 其维数为 $\sum_{m=1}^a k_m$, 并将该列向量的元素按照行从小到大排序可得到向量 M_0 , 假设 M_0 的第一节由第 1 行至第 k_1 行的共 k_1 个元素组成, 第二节由第 k_1+1 行至第 k_1+k_2+1 行的共 k_2 个元素组成, 依此类推, 第 a 节有 k_a 个元素, 参见表1, 第一节取 $k_1=6$ 个元素, 第二节取 $k_2=12$ 个元素, 以此类推. 然后将属于各节的元素按大小随机排列, 得向量

$$\eta = [x_{11}, \dots, x_{1k_1}, x_{21}, \dots, x_{2k_2}, \dots, x_{a1}, \dots, x_{ak_a}]^T \quad (7)$$

该向量的特征是: 节内元素是按大小随机排列

的, 且后一节的最小值元素不小于前节的任一元素, 称其为 η 特性.

(2) 生成元素均为区间 $[0, 2\pi]$ 中的实随机列向量 $[\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_a]^T$, 然后将它扩展成:

$$\zeta = [\underbrace{\xi_1, \dots, \xi_1}_{k_1 \text{ times}}, \underbrace{\xi_2, \dots, \xi_2}_{k_2 \text{ times}}, \dots, \underbrace{\xi_a, \dots, \xi_a}_{k_a \text{ times}}]^T \quad (8)$$

显然, 其维数也为 $\sum_{m=1}^a k_m$. 该向量的特征是: 节内元素是相等的, 各节元素无大小之分, 称其为 ζ 特性.

(3) 将向量 η 的各元素作为模加到模板辅助向量 C 各对应元素的模; 把向量 ζ 的各元素作为相角加到模板辅助向量 C 各对应元素的相角, 得模板矢量 F_i 如式(9)所示.

分析 F_i 的元素可知, 前 k_1 个元素的相角累加

后小于 2π , 可称它们为第一圈阵元坐标表示, 以此类推, 第一圈阵元坐标之后的共 k_2 个元素可称为第二圈阵元的坐标表示, 最后 k_a 个元素可称为第 a 圈阵元坐标表示. 以各圈元素为坐标的阵元数目不相等, 但是, 任意两圈之间间距为 d_c ; 同时, 各圈内部的元素间相角的距离保证了它们之间的最小间距为 d_c , 所以以模板矢量 F_i 的各元素为阵元坐标的圆口径阵列满足两两阵元间距不小于 d_c 的约束.

$$\begin{aligned} F_i = & [(d_c + x_{11})e^{j(\Delta_1+\xi_1)}, (d_c + x_{12})e^{j(2\Delta_1+\xi_1)}, \\ & \dots, (d_c + x_{1k_1})e^{j(k_1\Delta_1+\xi_1)}, \\ & (2d_c + x_{21})e^{j(\Delta_2+\xi_2)}, (2d_c + x_{22})e^{j(2\Delta_2+\xi_2)}, \dots, \\ & (2d_c + x_{2k_2})e^{j(k_2\Delta_2+\xi_2)}, \\ & (ad_c + x_{a1})e^{j(\Delta_a+\xi_a)}, (ad_c + x_{a2})e^{j(2\Delta_a+\xi_a)}, \dots, \\ & (ad_c + x_{ak_a})e^{j(k_a\Delta_a+\xi_a)}]^T \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u = & [(d_c + x_{11})e^{j(\Delta_1+\xi_1)}, 0, \dots, (d_c + x_{1k_1})e^{j(k_1\Delta_1+\xi_1)}, \\ & (2d_c + x_{21})e^{j(\Delta_2+\xi_2)}, (2d_c + x_{22})e^{j(2\Delta_2+\xi_2)}, \dots, \\ & (2d_c + x_{2k_2})e^{j(k_2\Delta_2+\xi_2)}, \\ & 0, (ad_c + x_{a2})e^{j(2\Delta_a+\xi_a)}, \dots, (ad_c + x_{ak_a})e^{j(k_a\Delta_a+\xi_a)}]^T \end{aligned} \quad (10)$$

应当指明, 以模板矢量 F_i 的各元素为阵元坐标的圆口径阵列满足两两阵元间距不小于 d_c 的要求. 从 F_i 中任意抽取 N 个元素组成式(10), 则它表示的个体是本文优化问题的可行解, 重复这个过程 P 次, 即可创建 P 个可行解个体组成的初始群体.

4 仿真结果

为了验证本方法创建初始群体的有效性, 设置仿真参数后, 用 MATLAB 仿真生成初始个体, 再检验是否满足三个约束条件.

A. 设置口径约束为 4.5λ , 即全部阵元布阵与半径为 4.5λ 的圆口径上, 阵元数为 185, 阵元间距不小于 0.5λ . 按照本文提出的方法和表 1 的相关数据, 可知辅助模板包括 8 个均匀同心圆环, 相邻阵元间距取为弧长, 辅助模板矢量是包括 222 个元素的向量, 设该阵列的稀疏率为 70%, 则该阵列含有 184 个阵元(除原点处的阵元外). 仿真所得的一个稀布圆口径阵列的阵元配置如图 3 所示, 经检验, 这一阵列为满足全部约束的一个可行解, 阵元最小间距为 0.508λ .

B. 设置阵列天线的口径约束为 5λ , 即口径圆半径为 5λ , 阵元数为 200, 阵元间距不小于 0.5λ . 按照本文提出的方法和表一的相关数据, 可知辅助模板包括 9 个均匀同心圆环, 相邻阵元间距取为弧长, 仿

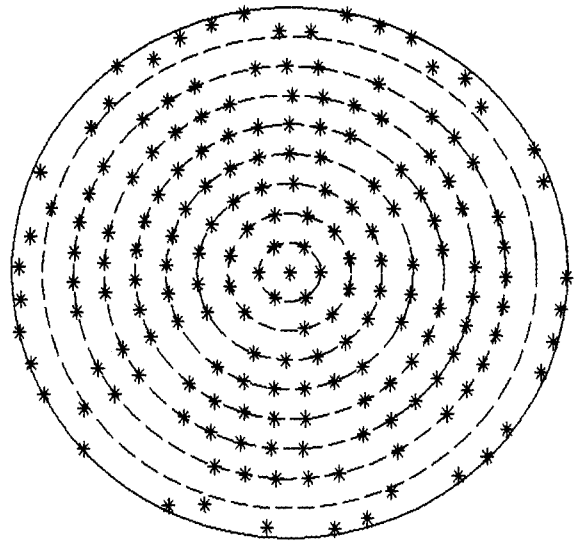


图 3 仿真 A 的初始个体表示的阵列配置图

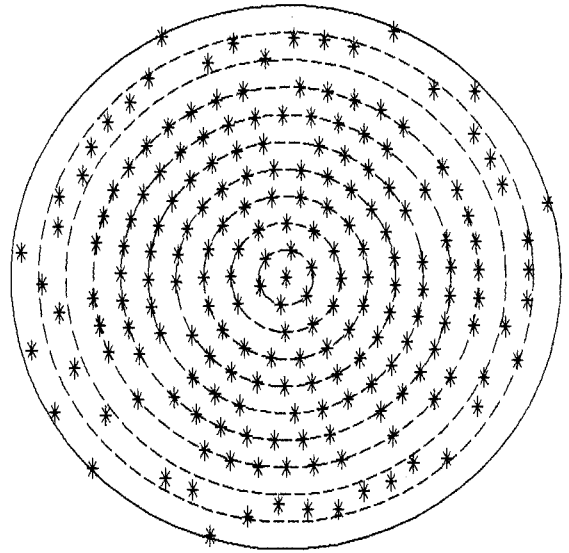


图 4 仿真 B 的初始个体表示的阵列配置图

真所得的一个稀布圆口径阵列的阵元配置如图 4 所示, 经检验, 这一阵列为满足全部约束的一个可行解, 阵元最小间距为 0.511λ .

5 结束语

在约束圆口径天线阵列的阵元数, 口径和最小阵元间距的条件下进行阵列稀布优化设计时, 遗传优化算法的运用仍面临如何找到初始可行解的难题, 本文利用等间距圆环平面阵的阵元位置特性构造了可行的初始解, 提出了一种有变量间距约束条件下的遗传算法的初始群体构造方法, 它为遗传算法的运用提供了可行性, 也为解决遗传算法应用到

其他多约束最优化工程问题提供了有益的参考途径.

参考文献:

- [1] Haupt R L. Unit circle representation of aperiodic arrays [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1995, 43(10):1152-1155.
- [2] 于江,陶海红,廖桂生. 阵列天线干扰抑制的一种改进遗传算法 [J], 系统工程与电子技术, 2005, 27(7), 1157-1159.
- [3] 王玲玲,方大纲. 运用遗传算法综合稀疏阵列 [J]. 电子学报, 2003, 31(12A):2135-2138.
- [4] 陈客松,何子述,唐海红. 对称线阵的优化稀疏研究

[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6):1490-1492.

- [5] Roberto Vescovo, Constrained and Unconstrained Synthesis of Array Factor for Circular Arrays [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1995, 43(12):1405-1409.
- [6] Haupt R L, Werner D H. Genetic algorithms in electromagnetics [M]. Wiley-InterScience publication, 2007.

作者简介:

李伟勤 男, (1976—), 讲师. 研究方向为阵列天线设计、数字系统及优化算法.

李新献 男, (1974—). 研究方向为嵌入式系统.

(上接第 132 页)

- [2] Luo X R, Wang Y, Hao D, et al. Novel low-k dielectric buried-layer high-voltage LDMOS on partial SOI [J]. IEEE transactions on electron devices, 2010, 57(2): 535-538.
- [3] 李琦. 薄漂移区横向高压器件耐压模型及新结构 [D]. 西安:电子科技大学, 2008.
- [4] Bo Z, WenLian W, Wanjun C et al. High voltage LDMOS with charge-balanced surface low on-resistance path layer [J]. IEEE electron device letter, 2009, 30(8): 849-851.
- [5] Luo X R, Bo Z, Tianfei L, et al. Numerical and experimental investigation on a novel high-voltage SOI LDMOS in a self-isolation HVIC [J]. IEEE transactions on electron devices, 2010, PP(99):1-10.

- [6] 石广源, 王新, 孙永斌. 功率 VUMOSFET 器件阈值电压最佳化设计 [J]. 微电子学与计算机, 2010(6): 132-133.

- [7] 李琦. 具有浮空埋层的高压器件新结构和击穿电压模型 [J]. 固体电子学研究进展, 2011, 31(1):35-39.

- [8] Cheng J B, Bo Z, Zhaoji L. A novel 1200-V LDMOS with floating buried layer substrate [J]. IEEE electron device letters, 2008, 29(6):645-647.

- [9] 李琦. 表面注入 D-RESURF 器件耐压模型 [J]. 半导体技术, 2011, 36(5):348-351.

作者简介:

李琦 男, (1976—), 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为模拟 IC 和功率 IC 设计.