

文章编号 1005-0388(2009)02-0193-07

平面稀布天线阵列的优化算法

陈客松 何子述

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要 基于一种改进的实数遗传算法, 以降低平面稀布阵旁瓣电平为优化目标, 提出了一种综合有阵元数约束、孔径约束和最小阵元间距约束的稀布面阵的新方法。与稀疏布阵相比, 该方法利用了阵元在布阵时更大的自由度, 因而在阵元数、孔径和最小阵元间距相同的条件下可以获得更优的峰值旁瓣性能, 仿真试验显示了改进的实数遗传算法应用到该多约束稀布平面阵优化问题中是稳健和高效的。

关键词 阵列天线; 稀布阵; 遗传算法(GA); 旁瓣电平; 优化布阵

中图分类号 TN 820.1¹⁺⁵; TN 820.1¹⁺³ **文献标志码** A

Synthesis approach for sparse plane arrays

CHEN Ke-song HE Zi-shu

(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract For the element position synthesis of sparse rectangular plane arrays with the design constraints of the element number of, aperture and minimum element spacing, an improved genetic algorithm (IGA) is presented in this paper. It effectively improves performance of GA by real valued coding of chromosome. Compared with the synthesis method of thinned arrays, this new approach can exploit more degree of freedom of elements to control the characters of the sparse arrays. When the aperture, element number and minimum element spacing are fixed identical, the new approach make the sparse plane array produce lower peak side lobe level (PSLL). The simulated results show that the approach is high efficiency and robust, and can apply to problem of sparse plane antenna array synthesis with the constraint of minimum element spacing and aperture.

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

引言

综合稀布阵时, 由于阵元的非均匀布置将导致复杂的非线性优化^[1~5], 因而在稀布阵列天线长达六十年的优化设计历程中, 布阵研究常规地采取了按均匀间隔阵列稀疏化设计的方式来规避这个非线性优化问题, 大大地简化了设计过程^[5], 其作法是简单地采取从均匀间隔阵列中稀疏部分阵元^[6~13], 这

样就自然地形成了阵元间距约束为某个基本量(通常为半波长)的整数倍的阵列, 文献[2]中称这种阵元在均匀间隔的栅格上布置的非均匀阵为稀疏阵。近年来, 另一种阵元间距约束下的优化布阵受到相当的重视, 它从尽可能地优化阵列的旁瓣性能出发, 考虑了工程实际中需要减小阵元间的互耦和消除栅瓣, 将阵元间距从规则栅格约束简化为只有上、下限约束^[1,2]或下限和孔径约束^[3,4,11]。由于当阵元间距

下限与稀疏阵的栅格间距相同时,这类新的阵元间距约束能使阵元在优化布阵过程中有更大的自由度,相同阵元数和阵列孔径条件下可以获得比稀疏阵更优的峰值旁瓣特性,近年来受到越来越多的研究^[1,2,6],文献[2]中称按这类阵元间距约束设计的非均匀阵列为稀布阵。文中讨论的阵元间距约束为给出一个基本量作为阵元间距的最小值,同时约束孔径,按文献[2],这类阵列应称为稀布阵。

由于遗传算法适用于非线性优化问题,所以用于解决栅格约束的“稀疏”平面阵优化布阵问题已进行过不少的研究^[8,9]。但对于第二类约束下的“稀布”平面阵综合问题(文献[1][2]讨论了用分数阶勒让德变换法进行综合),至今国内外还未见有文献报道过基于遗传算法的实现。该文将进一步研究文献[3][4]的方法,将它拓展应用于平面稀布阵列的优化问题中。

1 IGA 用于稀布面阵优化

遗传算法作为一种搜索工具和优化方法,在阵列天线设计等电磁学问题中受到广泛研究^[14,15],本文的多约束稀布阵综合是基于一种改进的遗传算法。

1.1 优化变量的实值编码和 GA 适应度函数

不妨设优化布阵问题为对称结构的矩形稀布阵,阵元位于 xoy 平面上,阵元数为 $4N$ (N 为正整数),阵元关于 x 轴和 y 轴对称,约束阵列孔径为 $2L \times 2H$,任一阵元的坐标 $|x_i| \leq L$ 且 $|y_i| \leq H$,可保证阵列孔径约束为 $2L \times 2H$ 。设 (x_n, y_n) 为第 n 阵元在 xoy 平面内的坐标,它们组合成复数 $d_n = x_n + jy_n$ 。求解其余的阵元位置 (d_1, \dots, d_{N-1}) ,满足 $|d_k - d_l| \geq d_c$,其中 d_c 为最小阵元间距约束, $0 \leq l, k \leq N$,使该阵的峰值旁瓣电平(PSLL)最低,即

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \text{PSLL} = f(d_1, d_2, \dots, d_{N-1}) \\ \text{s. t. } 0 < \text{Re}(d_k) \leq L \\ 0 < \text{Im}(d_k) \leq H \\ |d_k - d_l| \geq d_c \\ k, l \in \mathbb{Z}, \quad 1 \leq k, l \leq N, k \neq l \end{array} \right. \quad (1)$$

这是一个含有非线性约束的非线性优化问题,其中的最小阵元间距约束 d_c 可取为欧式空间的间距,即

$$d_c = \sqrt{(\text{Re}(d_k) - \text{Re}(d_l))^2 + (\text{Im}(d_k) - \text{Im}(d_l))^2} \quad (2)$$

也可简单地取为切比雪夫距离

$$d_c = \max\{|\text{Re}(d_k - d_l)|, |\text{Im}(d_k - d_l)|\} \quad (3)$$

两种距离定义导致优化问题不等价,但国内外还未见到有阵元间距约束的“稀布”面阵优化的文献,所以取式(3)进行研究仍是有意义的。容易证明,若阵列结构满足切比雪夫距离约束,则满足最小阵元间距约束,本文取式(3)定义的阵元间距。

取阵元位置矢量 (d_1, \dots, d_{N-1}) 作为遗传算法的优化变量,它是复变量元素构成的复矢量。将稀布阵列的阵元位置矢量作为一个个体,个体的每个基因值的实部和虚部用某一范围内的一个浮点数表示,即所谓实值编码,应用实数 GA 进行优化。

GA 适应度函数评价每个个体(染色体)的优劣,考虑 N 元相同天线在三维空间任意排列所组成的阵列,如图 1 所示。位于 (r_n, θ_n, Φ_n) 的第 n 个单元的激励记为 $I_n \exp(j\Phi_n)$,对电场强度,可以写出阵

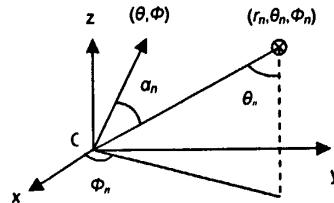


图 1 任意天线阵的坐标系统

因子为

$$E(\theta, \Phi) = \sum_{n=1}^N I_n \exp[j(\varphi_n + kr_n \cos \alpha_n)] \quad (4)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为工作波长;

$$\cos \alpha_n = \sin \theta \sin \theta_n \cos(\Phi - \Phi_n) + \cos \theta \cos \theta_n \quad (5)$$

$0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \Phi \leq 2\pi$,所有阵元相同且均匀等幅激励,即 $I_n = 1$, $\varphi_n = 0$,针对文中考虑的面阵结构,式(4)可化为

$$\begin{aligned} E(\theta, \Phi) &= \sum_{n=1}^{4N} \exp[jk \sin \theta (\text{Re}(d_n) \cos \Phi + \\ &\quad \text{Im}(d_n) \sin \Phi)] \\ &= 4 \sum_{n=1}^{N-1} \cos(k \text{Re}(d_n) \sin \theta \cos \Phi) \cdot \\ &\quad \cos(k \text{Im}(d_n) \sin \theta \sin \Phi) + \\ &\quad 4 \cos(kL \sin \theta \cos \Phi) \cdot \\ &\quad \cos(kH \sin \theta \sin \Phi) \end{aligned} \quad (6)$$

依据 $\Phi = 0^\circ$ 和 $\Phi = 90^\circ$ 平面最大峰值旁瓣电平(PSLL)之和构造适应度函数^[9]

$$\text{fitness}(d_1, d_2, \dots, d_{N-1}) = \max \left\{ \left| \frac{E(\theta, 0)}{FF_{\max}} \right| + \left| \frac{E(\theta, \pi/2)}{FF_{\max}} \right| \right\} \quad (7)$$

式中, FF_{\max} 是主瓣峰值, θ 的取值区间需排除主瓣区域。

目标函数取为

$$f(d_1, d_2, \dots, d_{N-1}) = \min \{ \text{fitness}(d_1, d_2, \dots, d_{N-1}) \}$$

1.2 创建初始群体

第一象限的阵元数为 M , 设初始群体由个体组成, 为方便处理, 将个体的描述由阵元位置矢量变形为矩阵, 即每个个体由一个 Q 行 P 列的二维复数稀疏矩阵来描述(当约束的阵元数 $N = Q \times P$ 时为满阵), 这样初始群体就是一个 Q 行 P 列 M 页的三维稀疏矩阵。考虑在 x 和 y 两个正交方向分配阵元数 N , 矩阵的行数 Q 和列数 P 通过下面的最优化求得

$$\begin{cases} \min \{ \text{mod}(P \times Q, N) \} \\ \text{s. t. } P \times Q \geq N \\ P \leq \lfloor L/d_c \rfloor \\ Q \leq \lfloor \frac{H}{d_c} \rfloor \\ P, Q \in \mathbb{Z}^+ \end{cases} \quad (8)$$

个体矩阵元素的实部代表阵元的 x 坐标, 设阵中心坐标为 $(0, 0)$, 为满足 x 方向的孔径约束, 只需所有元素的实部均满足不大于 L , 同理, 所有元素的虚部均满足不大于 H , 就可使 y 方向的孔径约束得到满足。分析约束式(3), 为满足最小阵元间距约束 d_c , 个体矩阵每行元素的实部(代表 x 坐标)需满足第 l 阵元的 x 坐标即 $\text{Re}(d_l) \geq d_c/2$, 所以半孔径 L 上还剩余的区间长度为 $L - 0.5d_c$, 稀布 P 个阵元, 由于 P 个阵元之间要满足最小阵元间距约束, 将有长为 $(P-1)d_c$ 的区间上不能布置阵元, 这样, x 方向半孔径 L 上共剩余的区间为

$$S_x = L - 0.5d_c - (P-1)d_c = L - (P-0.5)d_c \quad (9)$$

同理, 可以求得 y 方向分配 Q 个阵元时, y 方向半孔径 H 上将剩余的区间

$$S_y = H - 0.5d_c - (Q-1)d_c = H - (Q-0.5)d_c \quad (10)$$

定义 Q 行 P 列约束矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} 0.5d_c + j(Q-0.5)d_c & 1.5d_c + j(Q-0.5)d_c \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 0.5d_c + j1.5d_c & 1.5d_c + j1.5d_c \\ 0.5d_c + j0.5d_c & 1.5d_c + j0.5d_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dots & (P-0.5)d_c + j(Q-0.5)d_c \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & (P-0.5)d_c + j1.5d_c \\ \dots & (P-0.5)d_c + j0.5d_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

用随机数生成器生成所有元素属于区间 $[0, S_x]$ 的 Q 行 P 列的随机数矩阵, 并将该矩阵每行元素按列从小到大排序后得到矩阵 R ; 再生成所有元素属于区间 $[0, S_y]$ 的 Q 行 P 列的随机数矩阵, 并将该矩阵每列元素按行从大到小排序后得到矩阵 I , 然后按下面的矩阵运算生成一个个体

$$F_i = R + jI + C \quad (12)$$

令随机复矩阵 F_i 的第一行第 P 列元素固定为 $L + jH$, 则满足孔径约束。若 N 不能整除 $(P \times Q)$, 即 $\text{mod}(P \times Q, N)$ 非零, 即 $P \times Q > N$, 则从行数为 Q 列数为 P 的随机复矩阵 F_i 中随机选取 N 个元素(为保持孔径, F_i 的第一行第 P 列元素必须选取), 这样就保证了阵元数被约束为 N 。这样得到的稀疏矩阵记为 F , 显然, 若 $N = P \times Q$ (即 $\text{mod}(P \times Q, N) = 0$), 则 F_i 就是矩阵 F , 这时矩阵 F 成为满阵。由阵结构的对称性, 不难将 F 变换为阵元数为 $4N$ 的全阵列结构, 以矩阵 F_A 表示, 可以证明, 以矩阵 F_A 的元素为位置的稀布面阵描述的是一个可行解(满足阵元数 $4N$, 孔径为 $2L \times 2H$, 阵元间距不小于 d_c)。独立地重复上述过程 M 次, 得到 M 个矩阵 F , 即可组成 Q 行 P 列 M 页的随机复数稀疏矩阵 U , 它的每页表示的个体都是同时满足三个约束的个体, 所以 U 是 M 个可行解组成的集合。下面定义种群索引矩阵。

定义 1 种群索引矩阵 对应于随机复数稀疏矩阵 U , 若 U 的第 m 页 q 行 p 列元素被稀疏, 则种群索引矩阵 S_M 的第 m 页 q 行 p 列元素取“0”, 元素非空, 则取为“1”, 称 S_M 为对应于种群 U 的种群索引矩阵。

例如 U 的第 m 页表示的个体(以该页矩阵 F 为稀疏矩阵的形式为例)为

$$U_{(m)} = \begin{bmatrix} d_{Q,1,m} & 0 & \dots & \dots & \dots & d_{Q,P,m} \\ d_{Q-1,1,m} & d_{Q-1,2,m} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ d_{1,1,m} & d_{1,2,m} & \dots & \dots & \dots & d_{1,P,m} \end{bmatrix} \quad (13)$$

则对应于种群 U 的种群索引矩阵 S_M 的第 m 页为

$$S_{M(m)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot \\ 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

1.3 遗传操作预处理及后处理

遗传操作预处理是遗传操作(广义交叉和变异)之前的基因信息提取和变换,遗传操作后处理是遗传操作后形成子代群体的必要过程。本文设计遗传操作预处理和后处理,为避免子代中出现不可行解做准备。

定义2 整体约束矩阵 每页都由约束矩阵 C 组成的 M 页三维矩阵称为整体约束矩阵 C_{whole} 。

定义3 种群约束矩阵 以种群索引矩阵 S_M 为索引从整体约束矩阵 C_{whole} 取得的元素所组成的三维稀疏复数矩阵 C_M 称为该种群的种群约束矩阵 (S_M 元素为“1”则取出对应 C_{whole} 相应位置上的元素,为“0”则不取)。

定义4 遗传操作预处理 由形如 U 的父代群体 U_1 得到遗传操作(广义交叉和广义变异)前的基因信息矩阵 P 的如下变换为遗传操作预处理

$$P = U_1 - C_M \quad (15)$$

式中, C_M 是种群 U_1 的种群约束矩阵; U_1 是代表所有父代个体阵元位置的复数稀疏矩阵。

定义5 遗传操作后处理 由遗传操作(广义交叉和广义变异)后的基因信息矩阵 P' 得到子代群体 U_2 的如下变换为遗传操作后处理

$$U_2 = P' + C_M' \quad (16)$$

式中, C_M' 是对应于基因信息矩阵 P' 的种群约束矩阵; P' 是 P 经广义交叉算子和广义变异算子作用后得到的基因信息矩阵,它经遗传操作后处理式(16)重构成为子代群体。

1.4 广义交叉算子和广义变异算子

文献[16]指出,将遗传算法应用于约束最优化问题的关键是对约束条件的处理,可以按无约束问题那样进行交叉和变异操作,再检查是否违反约束,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(实际应用中计算量很大,效率低),因为要找到一个可行解同样是很困难的。文中的优化问题中,由于满足最小阵元间距约束的父代个体经常规的交叉或变异产生的子代个体可能不再满足最小阵元间距约束,即子代

中出现了是不可行解的个体,使得优化问题难以求解,所以需要设计新的交叉和变异算子来避免不可行解的出现。

文中设计的广义交叉算子首先选定两个个体(基因矩阵 P 的某两页),然后把随机选定的交叉位置上的对应元素交换,最后将得到的两个基因矩阵的元素排序,方法是取出实部矩阵,将它的每行按列从小到大排序,取出虚部矩阵,将它的每列按行从大到小排序(被稀疏的元素不参与排序,保持原位置),然后由排序后的实部矩阵和虚部矩阵重构成子代个体的基因信息矩阵 P' 。

广义变异算子首先按变异概率随机选定需变异的基因矩阵(基因矩阵 P 的某页),然后将随机选定的变异位置上的元素用实部属于区间 $[0, S_x]$ 虚部属于区间 $[0, S_y]$ 内的一个随机复数取代,最后对该基因矩阵的元素排序,排序方法同上。

一方面,经典简单遗传算法的交叉算子和变异算子作用的对象是个体的编码,而文中的广义交叉和变异的对象不是真正意义上的个体编码,是父代群体经遗传操作预处理后的矩阵,即式(15)得到的基因矩阵 P 。另一方面,本文的广义交叉和广义变异在通常的交叉和变异运算之后,还对子代个体基因矩阵的元素排序,即使得 P' 阵的实部矩阵元素和虚部矩阵元素是有一定大小规律的。基于上述两方面的原因,本文称之为广义交叉算子和广义变异算子。这两种广义遗传算子作用后的基因信息矩阵 P' 经式(16)的遗传操作后处理将得到子代群体 U_2 。

经广义交叉算子和广义变异算子作用后,由于基因矩阵的元素是排序过的(且第 Q 行第一列元素实部和虚部总是所有元素中实部和虚部最小的,第一行第 P 列元素的实部和虚部总是所有元素中实部和虚部最大的),分析简化后的约束式(3)可知,只要证明子代个体所有的实部或虚部元素满足相隔大于 d_c ,就可以证明该个体是满足最小阵元间距约束的可行解。

这里以实部为例,取出基因矩阵 P 的任一个体的实部矩阵,得 $Re(P)$,由于它是每行按列从小到大排序得到的,它的每行的任一元素减去它前面任一元素之差值总是非负的,遗传操作后处理将每行的基因向量的元素实部依顺序加上 $0.5d_c, 1.5d_c, \dots, (P-0.5)d_c$,它使得 $Re(P)$ 的该行的相邻元素(即阵元 x 坐标)都拉开了 d_c 的距离,所以 P 个阵元满足最小阵元间距约束,第 P 个阵元 x 坐标可能的最

大值是 $S_x + (P - 0.5)d_c$, 将式(9)代入即可证明第 P 个阵元 x 坐标可能的最大值是 L , 它保证了 x 方向孔径不超过孔径 L 。同理, P 的虚部有同样的性质(即 y 方向元素相距均大于 d_c , 且孔径不超过 H), 即式(3)可得到满足。

2 算法步骤

改进的遗传算法的算法流程如下:

- (1) 初始群体建立;
- (2) 计算群体中个体的适应度;
- (3) 判断优化准则是否满足, 若已满足则转(9), 否则继续;
- (4) 选择优势个体;
- (5) 遗传操作预处理;
- (6) 广义交叉操作;
- (7) 广义变异操作;
- (8) 遗传操作后处理, 转(2);
- (9) 输出最佳个体, 结束。

3 仿真实例

由于至今还未见到有同时约束最小阵元间距、阵元数和阵列孔径的稀布面阵综合的报道, 这里与文献[9]的稀疏面阵对比综合结果。文献[9]用经典的遗传算法实现了稀疏面阵的综合, 阵元约束在相距半波长的规则栅格上。

文献[9]中, 采用 $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=90^\circ$ 平面的最大峰值旁瓣电平(PSLL)之和作为适应度函数, 对总阵元数为 108、总孔径为 $9.5\lambda \times 4.5\lambda$ 的矩形平面阵列实现了稀疏综合, 得到了一例适应度值为 -39.83 dB

($\Phi=0^\circ$ 平面的 PSLL 为 -20.07 dB, $\Phi=90^\circ$ 平面的 PSLL 为 -19.76 dB, 见文献[9]图 9)的稀疏面阵, 阵面的阵元配置如文献[9]图 7 所示。我们可以验证, 当 $u = \sin\theta$ 在区间 $[0, 1]$ 内采样 100 点时, $\Phi=0^\circ$ 平面的 PSLL 为 -20.057 dB, $\Phi=90^\circ$ 平面的 PSLL 为 -19.773 dB, 因此我们可以认为文献[9]的 $u = \sin\theta$ 在区间 $[0, 1]$ 内的采样点数是 100。

运用本文的改进遗传算法, 设定阵元数 $4N$ 为 108, 总孔径 $2L \times 2H$ 为 $9.5\lambda \times 4.5\lambda$, 阵元间距 $d_c \geq 0.5\lambda$, 计算适应度值时也取 $u = \sin\theta$ 在区间 $[0, 1]$ 内的采样点数为 100。GA 的基本参数为: 种群数为 100, 采用截断选择法, 截断阀值为 50%, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.01, 终止代数为 300, 初始群体生成和变异时采用均匀分布随机数生成器, 为保证收敛, 还采用了最佳保留选择机制。为检验本文方法的稳健性, 独立随机地进行了 5 次仿真试验, 最优一例的适应度值为 -45.456 dB($\Phi=0^\circ$ 平面的 PSLL 为 -29.597 dB, $\Phi=90^\circ$ 平面的 PSLL 为 -15.859 dB)。表 1 列出了代表该最优面阵的个体矩阵, 最差一例的 PSLL 为 -43.864 dB。图 2 是 GA 单次和 5 次平均收敛曲线。图 3 是综合得到的最优稀布阵方向图。图 4 是其 $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=90^\circ$ 截平面的波束图。图 5 是该稀布面阵与文献[9]的稀疏面阵的阵元配置对比图。分析可见, 改变阵元间距约束后, 同样的孔径和阵元数条件下, $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=90^\circ$ 平面的最大峰值旁瓣电平(PSLL)之和(文献[9]的适应度值)可以再降低 5.626 dB。由数值结果分析, 该文提出的优化算法的收敛性和稳健性都较好。

表 1 最优阵第一象限阵元位置的个体矩阵(第一、第二个数分别是阵元的 x, y 坐标, 单位: λ)

行	第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列	第 5 列	第 6 列	第 7 列	第 8 列	第 9 列
1	0.263, 1.603	0.763, 1.606	1.266, 2.165	1.821, 1.493	2.349, 1.397	2.849, 1.538	3.375, 1.549	4.222, 2.227	4.750, 2.250
2	0.256, 1.066	0.756, 0.763	1.258, 0.946	1.792, 0.841	2.311, 0.812	2.891, 0.821	3.444, 0.761	4.237, 0.945	4.737, 0.900
3	0.266, 0.267	0.774, 0.255	1.275, 0.279	1.794, 0.318	2.320, 0.257	2.861, 0.277	3.361, 0.258	4.158, 0.288	4.722, 0.265

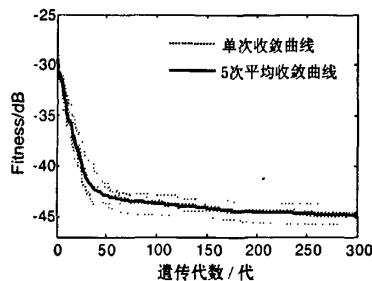


图 2 GA 单次和 5 次平均收敛曲线

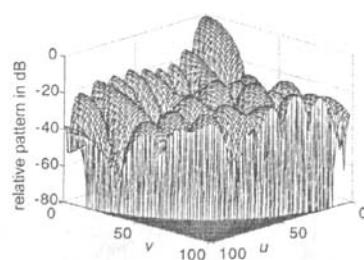


图 3 本文综合得到的最优稀布阵方向图

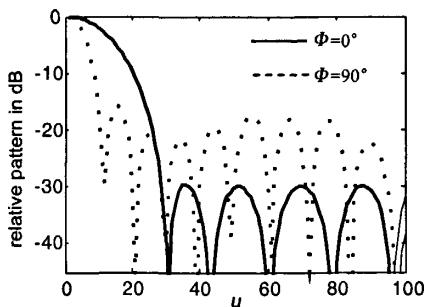
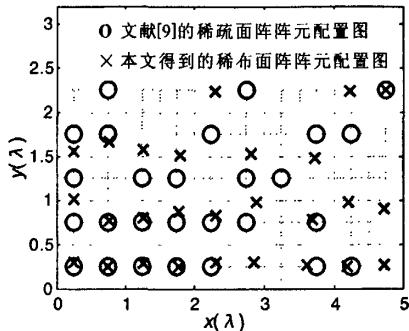
图4 $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=90^\circ$ 方向图截面

图5 第一象限内文献[9]的稀疏面阵和本文得到的稀布面阵阵元配置图

4 结 论

实际工程设计中,在一定约束条件下,寻找稀布平面阵列的阵元位置使阵列的某些性能最优是稀布阵列优化设计的重要内容。文中提出了一种综合阵元数、孔径和最小阵元间距约束的稀布面阵的新方法,它将稀布面阵的综合从规则栅格的稀疏约束拓展为最小阵元间距约束,最小阵元间距可以事先依据阵元间的互耦情况设定,因而这种新方法更大程度地满足了工程设计的需要。

参考文献

- [1] KUMAR B P and BRANNER G R. Generalized analytical technique for the synthesis of unequally spaced arrays with linear, planar, cylindrical or spherical geometry [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 2005, 53 (2): 621-634.
- [2] KUMAR B P and BRANNER G R. Design of unequally spaced arrays for performance improvement [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1999, 47 (3): 511-523.
- [3] CHEN Kesong, HE Zishu, HAN Chunlin. A modified real GA for the sparse linear array synthesis with multiple constraints [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 2006, 54 (7): 2167-2173.
- [4] 陈客松, 韩春林, 何子述. 一种有阵元间距约束的稀布阵天线综合方法 [J]. 电波科学学报, 2007, 22 (1): 27-32.
- CHEN Kesong, HAN Chunlin, HE Zishu. A synthesis technique for linear sparse arrays with optimization constraint of minimum element spacing [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22 (1): 27-32. (in Chinese)
- [5] PETRI J, TAPIO S, SANJIT K, et al. On properties and design of nonuniformly spaced linear arrays [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1988, 36 (3): 372-380.
- [6] RANDY L H. Unit circle representation of aperiodic arrays [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1995, 43 (10): 1152-1155.
- [7] HOLM S, ELGETN B, DAHL G. Properties of the beam pattern of weight and layout-optimized sparse arrays [J]. IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1997, 44 (5): 983-991.
- [8] SALVATORE C, ANDREA L, ANDREA M, et al. Peak sidelobe level reduction with a hybrid approach based on gas and difference Sets [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 2004, 52 (4): 1116-1121.
- [9] RANDY L H. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1994, 42 (7): 993-999.
- [10] TRUCCO A, OMODEI E and REPETTO P. Synthesis of sparse planar arrays [J]. Electronics Letters, 1997, 33 (10): 1834-1835.
- [11] TRUCCO A and MURINO V. Stochastic optimization of linear sparse arrays [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 24 (3): 291-299.
- [12] LAN J, JEFFERS R K and BOUCHER S G. Optimum unequally spaced arrays and their amplitude shading [C] // IEEE Ultrasonics Symposium. Seattle, WA, USA, 1995, 2: 965-969.
- [13] TRUCCO A. Synthesis of aperiodic planar arrays by a stochastic approach [C] // OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings. Halifax, NS, Canada, 1997: 820-825.
- [14] 马云辉. 阵列天线的遗传算法综合 [J]. 电波科学学报, 2001, 16 (2): 172-176.
- MA Yunhui. Synthesis of the array antennas using genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16 (2): 172-176. (in Chinese)

(下转第 205 页)

- rections by monostatic HF radar[J]. Wuhan University Journal (Natural Science Edition), 2001, 47(5): 645-648. (in Chinese)
- [15] 黄为民, 王淑融, 吴世才, 等. 从高频雷达海面回波多普勒谱提取风场信息[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1999, 45(1): 115-118.
HUANG Weimin, WANG Shurong, WU Shicai, et al. Extraction of wind field from high frequency radar sea echo Doppler spectra[J]. Wuhan University Journal (Natural Science Edition), 1999, 45(1): 115-118. (in Chinese)
- [16] LONG. A E, TRIZNA D B. Mapping of north Atlantic winds by HF radar sea backscatter interpretation[J]. IEEE transaction on antennas and propagation, 1973, 21(5): 680-685.
- [17] MARESCA J W. High-resolution mapping of oceanic wind fields with skywave radar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1977, 2(1): 128-132.
- [18] GEORGES T M, HARLAN J A. Tracking hurricane Claudette with the U. S. Air Force over-the-horizon radar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic technology, 1993, 10(4): 441-451.
- [19] 浙江省台风路径实时发布系统[DB/OL]: <http://www.zjwater.gov.cn/typhoneweb/tflj.asp>

(上接第198页)

- [15] 刘昊, 郑明, 燮德森. 遗传算法在阵列天线赋形波束综合中的应用[J]. 电波科学学报, 2002, 17(5): 539-542.
LIU Hao, ZHENG Ming, FAN Desen. Synthesis of antenna arrays shaped-beam using genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(5): 539-542. (in Chinese)
- [16] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 108-109.



陈客松 (1973—), 男, 四川人, 电子科技大学电子工程学院副教授, 博士, 现主要从事阵列天线优化设计、自适应天线和智能天线等方面的研究工作。



焦培南 (1939—), 男, 广东人, 研究员, 国家有突出贡献专家, 博士生导师。1962年毕业于武汉大学物理系。获国家科技进步二等奖两项, 三等奖一项、省部科技进步奖十一项, 在国内外发表论文100多篇。目前主要研究方向: 电离层及其电波传播、高频电波传播、特殊介质的波传播和散射等。

李吉宁 (1982—), 男, 山东人, 现为中国电波传播研究所研究生, 主要研究方向为高频海杂波反演海态与电离层数据处理。



凡俊梅 (1964—), 女, 河南人, 研究员, 博士。毕业于西安电子科技大学。在刊物和会议上发表论文多篇, 曾获国家科技进步二等奖一项和部科技进步一等奖一项。目前主要研究方向: 电离层及其电波传播, 信号/数据处理。



何子述 (1962—), 男, 四川人, 电子科技大学电子工程学院教授, 博士生导师, 现主要从事雷达信号处理, 阵列信号处理、数字波束形成, 智能天线、无线通信等方面的研究工作。

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>