

非均匀线天线阵优化布阵研究

陈客松, 何子述, 韩春林

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 610054)

摘要: 针对有阵元数、孔径和最小阵元间距约束的稀布直线阵列综合问题, 提出了一种基于修正遗传算法 (MGA) 的综合方法. 该方法采用真值编码, 个体的描述方式可使搜索空间减小, 通过设计用于处理约束的矩阵变换和广义的交叉算子和变异算子, 有效地避免了基因重组和变异时出现不可行解. 在约束阵列孔径和阵元数的条件下, 高效地实现了任意最小阵元间距约束下抑制峰值旁瓣电平 (PSLL) 的稀布阵综合. 文中给出了修正遗传算法的流程, 该算法的有效性和鲁棒性在稀布阵列综合的仿真实验中得到了验证.

关键词: 稀布阵; 遗传算法 (GA); 旁瓣电平; 优化布阵

中图分类号: TN820.1⁺5, 820.1⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2263-05

Research on Synthesis of the Linear Sparse Arrays

CHEN Ke song, HE Zi shu, HAN Chur lin

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: A modified genetic algorithm (MGA) for the element spacing synthesis of linear sparse array is described. Under the optimization constraints of the number of element, the aperture and the minimum element spacing, the MGA has been utilized to reduce the peak sidelobe level (PSLL) of the array. It improves the optimization efficiency of GA by the application of real valued coding of chromosome, the manner of individual description allows the GA to search a smaller solution space. For the sake of avoiding infeasible solution during the process of recombination and mutation, constraint matrix and its transforms are designed, and the broad sense crossover operator and mutation operator of GA are applied. When the aperture and the number of elements are a priori fixed, the synthesis of linear sparse arrays using this new method can run with the adjustable minimum element spacing. The flow chart of the MGA and the simulated results confirming the validity and the robustness of the algorithm are provided.

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

1 引言

六十多年来, 均匀间隔阵列的理论已获得广泛而深入的研究, 例如给定阵元数和阵列响应, 可以利用传统的道尔夫-切比雪夫综合法、泰勒综合法、傅立叶逆变换法和数值优化等方法实现阵列综合. 相对而言, 非均匀阵列的综合 (给定阵元数和阵列响应, 确定阵元位置和激励分布) 一直是未解决得很好的难题. 其中, 给定阵列天线形状与阵元数的前提下, 如何通过适当地选取各阵元的间距, 馈电流幅值及相位来最大限度地降低阵列的峰值旁瓣电平是阵列天线综合中的一类重要课题^[1], 其原因在于非均匀阵列综合受限于两方面的因素^[2, 3], 一方面阵列响应是阵元位置的复指数函数, 所以阵元间距综合是一个非线性优化问题; 另一方面, 从工程应用的角度考虑, 为减小阵元间的互耦, 阵元间距必须满足一定的约束 (比如不小于某一给定值). 针对问题的第一方面, 已经出现了动态规划法^[4]、统计优化方法^[5]、模拟退火法^[6]、遗传算法^[7, 8]等综合方法; 对于第二方面, 相应地出现了两类解决阵

元间距约束的途径, 其一是阵元只允许从相距半波长的规则栅格上稀疏的稀疏阵^[4, 6~11], 其二是天线单元在一定孔径范围内随机稀疏的稀布阵^[2, 3, 12, 13], 设计时约束其阵元间距, 由于第二种途径使优化布阵具有更大的自由度, 相同阵元数和阵列孔径条件下可获得更优的 PSLL, 近年来已受到相当的重视^[2, 3, 13].

由于遗传算法可适用于非线性优化问题, 所以用于解决稀疏阵优化问题已进行了不少的研究^[7, 8, 10, 11, 13, 14]. 对于给定阵列孔径和阵元数的稀疏阵, 求出阵元位置分布使 PSLL 最低这个优化布阵问题, 以前的研究^[7, 8, 10, 11]都是针对第一类约束的稀疏阵综合方法, 第二类约束 (最小阵元间距约束) 下基于遗传算法实现的稀布阵综合仅在文献^[13]中有过讨论, 但该文没有涉及孔径约束. 在约束阵列孔径和阵元数的条件下, 如何运用遗传算法实现任意最小阵元间距约束下抑制稀布阵 PSLL 的阵列综合问题, 国内外还没有文献讨论过, 本文将它作为研究的主题.

2 MGA 其在稀布阵综合中的应用

2.1 决策变量的真值编码和 GA 适应度函数构造

不妨设优化布阵问题为如图 1 所示的对称结构的稀布线阵, 阵列孔径为 $2L$, 阵元数为 $2N+1$ (N 为正整数), 所有阵元相同且均匀等幅激励, 为保持阵列孔径为 $2L$, 使 $d_N = L$, $d_{-N} = -L$, 求取阵元位置 $d = [d_1 d_2 \dots d_{N-1}]^T$, 满足 $\min\{d_i - d_j\} \geq d_c$, 其中 d_c 为最小阵元间距, $0 \leq j < i \leq N$, 使该阵的 PSLL 最低, 即

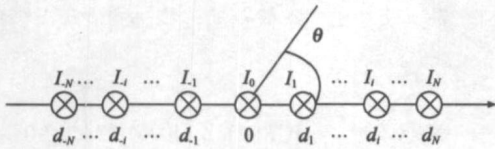


图 1 对称稀布线阵的阵列结构

$$\begin{cases} \min \text{PSLL} = f(d_1, d_2, \dots, d_{N-1}) \\ \text{s. t. } d_i - d_j \geq d_c > 0 \\ i, j \in Z, -N \leq j < i \leq N \end{cases} \quad (1)$$

取阵元位置矢量 d 为决策变量, 将一个稀布线阵的阵元位置矢量作为一个个体. 一个阵元位置矢量为 $[d_{-N}, d_{-N+1}, \dots, d_{-1}, 0, d_1, \dots, d_{N-1}, d_N]^T$ 的 $2N+1$ 元直线阵列, 阵元无方向性时的方向图为^[15]

$$E(u) = \sum_{n=-N}^N I_n \exp(jkud_n) = I_0 + \sum_{n=1}^N 2I_n \cos(kud_n) \quad (2)$$

式中 I_n 为第 n 个阵元的激励, $u = \cos\theta$, θ 是扫描角, $0 \leq \theta \leq \pi$, $k = 2\pi/\lambda$, 本文的讨论中, 设 $I_n = 1$, 又 $d_N = L$, $d_{-N} = -L$, 式(2)为

$$E(u) = \sum_{n=-N}^N \exp(jkud_n) = \sum_{n=1}^{N-1} 2\cos(kud_n) + 2\cos(kuL) + 1 \quad (3)$$

以降低稀布线阵的 PSLL 为优化目标, 依据最大峰值旁瓣电平 ($\max \text{PSLL}$) 构造适应度函数^[7]

$$\begin{aligned} \text{fitness}(d_1, d_2, \dots, d_{N-1}) &= \max \left| \frac{E(u)}{FF_{\max}} \right| \\ &= \max \left| \frac{\sum_{n=1}^{N-1} 2\cos(kud_n) + 2\cos(kuL) + 1}{FF_{\max}} \right| \end{aligned} \quad (4)$$

式中 FF_{\max} 为主瓣峰值, $|u| \geq 2C_0/(2N+1)$, u 的取值区间需排除主瓣区域, 均匀阵列的第一对零点出现在 $u = \pm 2/(2N+1)$, 由于阵元的稀布会造成第一对零点的偏移, 故引入修正常数 C_0 .

目标函数为

$$f(d_1, d_2, \dots, d_{N-1}) = \min\{\text{fitness}(d_1, d_2, \dots, d_{N-1})\} \quad (5)$$

2.2 初始群体的创建

在右半孔径 L 上, 有 $N+1$ 个阵元, 设第 1 阵元坐标为 0, 第 $N+1$ 阵元坐标为 L , 为满足最小阵元间距约束 d_c , 孔径上还剩余的区间长度为 $L - 2d_c$, 稀布余下的 $N-1$ 个阵元, 由于 $N-1$ 个阵元之间要满足最小阵元间距约束, 将有长为 $(N-2)d_c$ 的区间上不能布置阵元, 所以半孔径上共剩余的区间为:

$$\text{SP} = L - 2d_c - (N-2)d_c = L - Nd_c \quad (6)$$

生成 $N-1$ 个闭区间 $[0, \text{SP}]$ 内的随机数并从小到大排序, 得 $X = [x_1 x_2 \dots x_{N-1}]^T$, 运用下面的方法得到右半孔径阵元位置矢量

$$d = X + \begin{bmatrix} d_c \\ 2d_c \\ \vdots \\ (N-1)d_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + d_c \\ x_2 + 2d_c \\ \vdots \\ x_{N-1} + (N-1)d_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

经转换可得一个个体的阵元位置矢量为

$$S = [-L - d_{N-1} \dots - d_1 \ 0 \ d_1 \dots d_{N-1}, L]^T \quad (8)$$

不难证明, 上述方法生成的个体满足了阵元数为 $2N+1$, 孔径为 $2L$, 最小阵元间距约束 d_c . 独立地生成 M 个向量 X , 然后经变换式(7)可得到形如式(8)的个体, 由这些个体即可创建种群数为 M 初始群体. 不仅如此, 经过简单分析即可发现, 这里的实数编码只在区间 $[0, L - Nd_c]$ 内进行, 再加上常数向量即得到了优化变量, 避免了优化变量在其定义域 $[0, L]$ 内编码的常规方式, 使得搜索空间减小为原来的 $(L - Nd_c)/L$, 有利于 GA 快速地收敛到最优解.

2.3 遗传操作预处理及后处理

设父代个体已满足阵元数、孔径和最小阵元间距约束, 将种群数为 M 的父代群体记成矩阵形式

$$F = \begin{bmatrix} -L & -L & \dots & -L \\ -d_{N-1,1} & -d_{N-1,2} & \dots & -d_{N-1,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -d_{1,1} & -d_{1,2} & \dots & -d_{1,M} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ d_{1,1} & d_{1,2} & \dots & d_{1,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N-1,1} & d_{N-1,2} & \dots & d_{N-1,M} \\ L & L & L & L \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 F 的每个列矢量都表示一个个体的阵元位置, 由阵列结构的对称性可知, F 的信息由其子块 F_s 唯一确定, 即存在一一映射 T 及 T' , 使 $F_s = TF_s$, $F = T'F_s + F_0$, 式中

$$F_s(i, j) = d_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, j = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

$$T(i, j) = \begin{cases} 1, j = i + N + 1, i = 1, 2, \dots, N-1 \\ 0, j \neq i + N + 1 \text{ or } j = 2N + 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$T'(i, j) = \begin{cases} 1, i = j + N + 1, j = 1, 2, \dots, N-1 \\ -1, i = N - j + 1, j = 1, 2, \dots, N-1 \\ 0, i \neq j + N + 1 \text{ or } i \neq N - j + 1 \\ \text{or } i = 1 \text{ or } i = 2N + 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$F_0(i, j) = \begin{cases} -L, i = 1, j = 1, 2, \dots, M \\ L, i = 2N + 1, j = 1, 2, \dots, M \\ 0, \text{other} \end{cases} \quad (13)$$

令由阵元数 N 和最小阵元间距 d_c 确定的数量矩阵为约束矩阵

$$C = \begin{bmatrix} d_c & d_c & \dots & d_c \\ 2d_c & 2d_c & \dots & 2d_c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (N-1)d_c & (N-1)d_c & \dots & (N-1)d_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

定义

(1) 由选择后的父代群体 F_1 到遗传操作(交叉和变异)前的基因矩阵 P 的变换为遗传操作预处理

$$P = F_s - C = TF_1 - C \quad (15)$$

(2) 令 P 经遗传操作得到的基因矩阵为 A , 由 A 到适应度计算前的子代群体 F_2 的变换为遗传操作后处理

$$F_2 = T'(A + C) + F_0 \quad (16)$$

2.4 广义交叉算子和广义变异算子

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^[16], 由于满足最小阵元间距约束的父代个体经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, 使得优化问题无法求解, 所以需要修正交叉和变异算子来避免不可行解的出现。

通常, 经典遗传算法的交叉和变异作用的对象是个体的编码, 一方面, 本文的交叉和变异的对象不是真正意义上的个体编码, 而是父代群体经遗传操作预处理后的群体, 即式(15)得到的基因矩阵 P , 另一方面, 本文的交叉和变异在通常的交叉和变异完成后, 还对子代个体基因向量的元素从小到大排序, 即使得 A 阵的每列元素是从从小到大排列的. 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矩阵 A 经式(16)的遗传操作后处理将得到子代群体 F_2 , 下面证明 F_2 的任一列向量代表的个体满足全部约束, 即本文使用的广义遗传算子可避免子代中出现不可行解。

证明: 不妨设 P 的第 m 列和第 n 列被广义交叉算子选中, 采用离散重组, 父代基因矢量为

$$P_m = [p_{1,m} p_{2,m} \dots p_{k,m} \dots p_{N-1,m}]^T$$

$$P_n = [p_{1,n} p_{2,n} \dots p_{k,n} \dots p_{N-1,n}]^T$$

使用单点广义交叉算子生成子代基因矢量, 得

$$A_m = \text{sort}\{[p_{1,m} p_{2,m} \dots p_{k,n} \dots p_{N-1,m}]^T\}$$

$$A_n = \text{sort}\{[p_{1,n} p_{2,n} \dots p_{k,m} \dots p_{N-1,n}]^T\}$$

A 经式(16)的遗传操作后处理将得到子代群体 F_2 , 显然 F_2 满足阵元数约束和孔径约束。

A 的任一列向量 $A_i = [a_{1,i} a_{2,i} \dots a_{N-1,i}]^T$ 元素间已满足 $a_{1,i} \geq 0$ 且 $a_{k,i} - a_{k-1,i} \geq 0$, 其中 $1 \leq k \leq N-1$, 又 $a_{k,i} \leq SP$, 遗传操作后处理中加约束矩阵 C 时将向量 A_i 的元素按列依次加上 $d_c, 2d_c, \dots, (N-1)d_c$, 可见阵列右半孔径上从第一阵元到第阵元之间的间距均不小于 d_c , 故最小阵元间距约束在靠近中心的 $N-1$ 个阵元间已得到满足。

又 $a_{k,i} \leq SP, 1 \leq k \leq N-1$, 右半孔径上第 $N-1$ 个阵元的最大可能值为 $d_{k,N-1} \leq SP + (N-1)d_c$ (17)

将式(6)代入, 得

$$d_{k,N-1} \leq L - Nd_c + (N-1)d_c = L - d_c \quad (18)$$

即第 $N-1$ 阵元与第 N 阵元之间距离也满足 $d_{k,N-1} \geq d_c$. 综上所述, 子代群体 F_2 满足最小阵元间距约束。

上述单点广义交叉算子可能使子代个体中多个元素异于父个体的元素, 这种现象可以解释为发生了大概率变异, 这在进化开始时是常见的, 但随着 GA 的不断进化, 特别是进化

的后期, 群体中的个体大部分很接近最优解时, 对应位置上的元素交换并不引起新个体元素大小次序发生新变化, 即广义交叉算子退化为通常意义的交叉算子(如果不是这样, 则大概率的变异将使优化过程退化为随机搜索, 使收敛很慢), 这一点虽不易理论证明, 但从快速收敛的仿真试验中可得以验证。

3 算法流程

修正遗传算法的流程如图 2 所示。

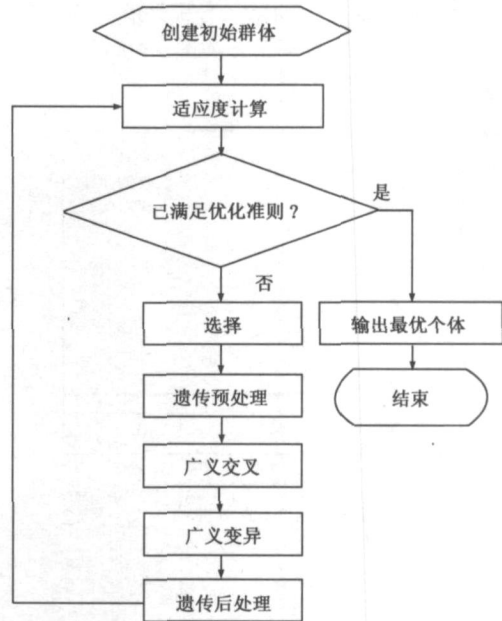


图 2 修正遗传算法流程图

4 仿真实例

文献[2, 3]提出的分数阶勒让德变换法, 实现了阵元间距约束为 $0.5\lambda \leq d_c \leq 1.0\lambda$ 的稀疏线阵的设计, 优化目标是 PSLL 尽量低, 本文提出了 MGA 实现阵元数、孔径和最小阵元间距约束下综合稀疏线阵的方法, 为验证 MGA 的有效性和稳健性, 下面通过仿真试验对比两例稀疏阵列的综合结果。

表 1 仿真实例 1 优化结果的数值对比(单位: λ)

天线单元序号	文献[2]	MGA10 次最差阵	MGA10 次最优阵
0 和 1	0.5	0.5	0.5
1 和 2	0.5	0.501	0.5
2 和 3	0.5	0.516	0.501
3 和 4	0.5	0.554	0.525
4 和 5	0.59	0.601	0.573
5 和 6	0.717	0.673	0.707
6 和 7	0.769	0.869	0.787
7 和 8	0.796	0.658	0.779
PSLL	-19.49dB	-19.361dB	-19.803dB

仿真实例 1: 文献[3]的表 II (a) 左栏的稀疏线阵。

该阵阵元位置关于阵中心对称, 总阵元数为 17, 半孔径阵元数为 $N = 8$, 见表 1, 可算得, 该线阵的孔径是 9.744λ , 峰值旁瓣电平(PSLL)是 -19.49dB 。

运用 MGA, 设定阵元数为 17, 阵列孔径为 9.744λ , 阵元间

距 $d_c \geq 0.5\lambda$ GA 的基本参数为: 种群数为 200, 采用截断选择法, 截断阈值 50%, 交叉概率 0.5, 变异概率 0.01, 终止代数数为 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 10 次仿真试验, 表 1 列出了优化后的 PSLL 最差和最优线阵的各阵元间距和文献[3]的方法所得结果的数值对比. 10 次仿真试验得到的结果中, 平均 PSLL 为 -19.565dB , 7 个线阵的 PSLL 低于 -19.49dB , 图 3 是 MGA 单次和 10 次平均收敛曲线; 图 4 和图 5 分别是最优稀疏阵波束指向阵列法向和偏离法向 30° 时的方向图. 分析可见, MGA 的收敛性能好, 是有效的综合方法.

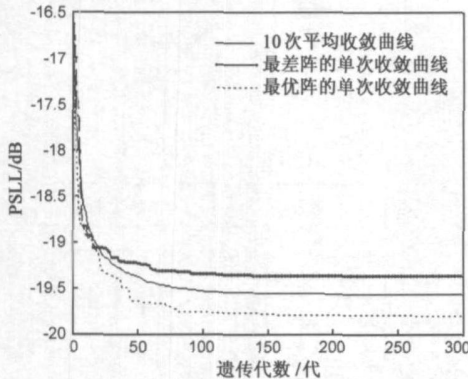


图3 MGA收敛曲线

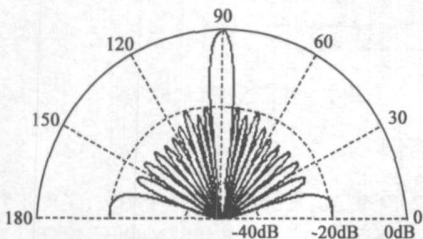
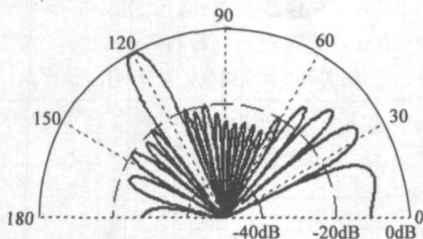


图4 最优稀疏阵主波束指向法向时的方向图

图5 最优稀疏阵主波束指向偏离法向 30° 时的方向图

仿真实例 2: 文献[3]的表 II (b) 右栏的稀疏线阵.

该阵阵元位置关于阵中心对称, 总阵元数为 37, 半孔径阵元数为 $N=18$, 综合出的阵元间距见表 2, 我们可以算得, 该线阵的孔径是 21.996λ , 峰值旁瓣电平 (PSLL) 是 -19.415dB .

运用 MGA, 设定阵元数为 37, 阵列孔径为 21.996λ , 阵元间距 $d_c \geq 0.5\lambda$ GA 的基本参数同仿真试验 1, 独立随机地进行了 5 次仿真试验, 表 2 列出了优化后的 PSLL 最差和最优的线阵的各阵元间距和文献[3]的方法所得结果的数值对比. 5 次仿真试验得到的结果中, 平均 PSLL 为 -20.34dB , 5 个线阵

的 PSLL 都低于 -19.415dB , 图 6 是 MGA 单次和 5 次平均收敛曲线, 分析可见, 本文的方法取得了更好的数值结果, 算法的稳健性好.

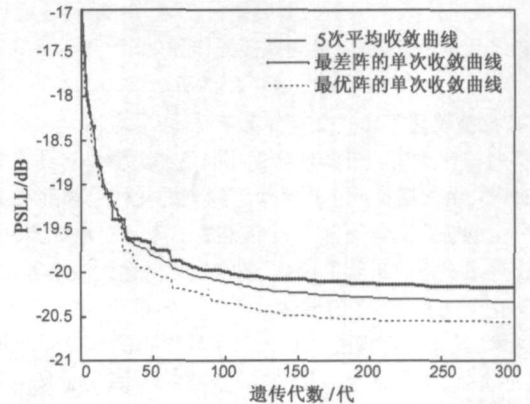


图6 MGA收敛曲线

表 2 仿真实例 2 优化结果的数值对比(单位: λ)

天线单元序号	文献[2]	MGA5 次最差阵	MGA5 次最优阵
0 和 1	0.5	0.5	0.502
1 和 2	0.5	0.502	0.501
2 和 3	0.5	0.502	0.5
3 和 4	0.5	0.504	0.5
4 和 5	0.5	0.501	0.501
5 和 6	0.5	0.533	0.5
6 和 7	0.5	0.521	0.504
7 和 8	0.5	0.508	0.571
8 和 9	0.589	0.562	0.536
9 和 10	0.633	0.59	0.520
10 和 11	0.664	0.607	0.587
11 和 12	0.687	0.635	0.571
12 和 13	0.707	0.696	0.774
13 和 14	0.722	0.671	0.704
14 和 15	0.735	1.172	1.007
15 和 16	0.746	0.764	0.88
16 和 17	0.754	0.729	0.83
17 和 18	0.761	0.501	0.505
PSLL	-19.415dB	-20.176dB	-20.56dB

5 结论

本文提出一种修正的遗传算法, 并应用于综合有阵元数、孔径和最小阵元间距约束的稀疏天线阵列. 它将遗传算法在非均匀阵列优化布阵问题上的应用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. 与 Kumar B P 和 Branner G R 的方法比较^[2,3], 本文的综合方法可以设定孔径约束, 阵元间距约束的设置方便合理, 适用性较强, 方法的数值结果较好, 但是文献[2,3]的方法本质上属于解析方法, 计算量较小, 而 MGA 是迭代算法, 计算量较大的不足有待进一步改善.

参考文献:

- [1] 胡星航, 林德云. 矩形平面阵列天线旁瓣电平优化的遗传算法[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 119– 120.
Hu Xing hang, Lin De yun. Sidelobe reduction of plane array using genetic algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12): 119– 120. (in Chinese)
- [2] Kumar B P, Branner G R. Generalized analytical technique for the synthesis of unequally spaced arrays with linear, planar, cylindrical or spherical geometry[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2005, 53(2): 621– 634.
- [3] Kumar B P, Branner G R. Design of unequally spaced arrays for performance improvement[J]. IEEE Trans Antennas Propagat., 1999, 47(3): 511– 523.
- [4] Skolnik M I, Nemhauser G, Sheman J W. Dynamic programming applied to unequally spaced arrays[J]. IEEE Trans Antennas Propagat., 1964, AP 12(1): 35– 43.
- [5] Mailloux R J, Cohen E. Statically thinned arrays with quantized element weights[J]. IEEE Trans Antennas Propagat., 1991, 39(4): 436– 447.
- [6] Murino V, Trucco A, Regazzoni C S. Synthesis of unequally spaced arrays by simulated annealing[J]. IEEE Trans Antennas Signal Processing, 1996, 44(1): 119– 123.
- [7] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms[J]. IEEE Trans, 1994, AP 42(7): 993– 999.
- [8] 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.
Wang Ling ling, Fang Da gang. Genetic algorithm for the synthesis of thinned array[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 2135– 2138. (in Chinese)
- [9] Lo Y T, Lee S W. A study of space tapered arrays[J]. IEEE Trans Antennas Propagat., 1966, AP 14(1): 22– 30.
- [10] 付云起, 袁乃昌, 毛钧杰. 基于遗传算法和模拟退火的不等间距稀布阵的设计[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(7): 700– 704.
- [11] O' Neill D J. Element placement in thinned arrays using genetic algorithms[A]. OCEANS ' 94 ' Oceans engineering for today' s technology and tomorrow' s preservation' proceedings [C]. 1994, 2(9): 30F 306.
- [12] Haupt R L. Unit circle representation of aperiodic arrays[J]. IEEE Trans Antennas Propagat., 1995, 43(10): 1152– 1155.
- [13] 李东风, 龚中麟. 遗传算法应用于超低副瓣线阵天线方向图综合[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 82– 84.
Li Dong-feng, Gong Zhong-lin. Application of genetic algorithms in the pattern synthesis of ultralow sidelobe linear array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(1): 82– 84. (in Chinese)
- [14] Keer Keong Yan, Yilong Lu. Sidelobe reduction in array pattern synthesis using genetic algorithm[J]. IEEE Trans Antennas Propagat., 1997, 45(7): 1117– 1122.
- [15] 汪茂光, 吕善伟, 刘瑞祥. 阵列天线分析与综合[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1989. 22– 23.
- [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.

作者简介:



陈容松 男, 1973 年 2 月生于四川广安, 电子科技大学电子工程学院博士生, 现主要从事阵列天线、相控阵雷达、优化算法等方面的研究工作. E-mail: cks149@tom.com

何子述 男, 1962 年 10 月生于四川新都新繁, 信号与信息处理专业博士, 电子科技大学电子工程学院教授、博士生导师, 目前主要从事相控阵雷达技术、宽带 MIMO 数字阵雷达技术、第 4 代移动通信中的空时编码及信道估计等方面的研究工作. E-mail: zshe@uestc.edu.cn