

稀疏圆阵的降维优化方法

于 波^{*①} 陈客松^① 朱 盼^② 王国强^②

^①(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

^②(中国民用航空总局第二研究所 成都 610041)

摘 要: 针对有阵列孔径, 阵元数目和最小阵元间距 3 种约束下的稀疏圆形阵列综合问题, 该文提出了一种基于修正遗传算法的降维优化方法。为了充分利用阵元布阵的自由度, 同时使稀疏阵列满足多个设计约束, 在阵元排布时将 2 维平面阵列优化设计降维成 1 维的稀疏直线阵列, 计算阵列性能后再还原为平面阵列。该方法改进了现有圆阵综合方法中轨迹圆半径和轨迹圆上阵元数分布优化的不足, 实现了全部阵元的联合优化, 降低了算法的复杂性, 同时保证了阵列的旁瓣性能, 仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 稀疏阵列; 圆形阵列; 旁瓣性能; 遗传算法; 降维

中图分类号: TN 820.1⁺ 5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)02-0476-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00526

An Optimum Method of Sparse Concentric Rings Array Based on Dimensionality Reduction

Yu Bo^① Chen Ke-song^① Zhu Pan^② Wang Guo-qiang^②

^①(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 611731, China)

^②(The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: A dimensionality reduction method based on modified genetic algorithm is presented under the constraints of fixing the aperture, the number of elements and the minimum element spacing. In order to utilize effectively the freedom of array element, the proposed method transforms the positions of two-dimensional concentric rings array optimization design into one-dimensional linear array when sparse array meet multiple optimization constraints, and then restore to the concentric rings array when calculating its performance. The proposed method reduces greatly the computation time and the complexity of the model. Meanwhile, due to the combined optimization of all elements, the optimization design is improved. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Sparse array; Concentric rings array; Side lobe level; Genetic algorithms; Dimensionality reduction

1 引言

圆环阵列天线在很多应用中起着很重要的作用, 例如声呐、雷达、卫星通信系统等领域^[1]。阵列天线的最大相对旁瓣电平(maxRSL)是评价天线性能的一个重要参数, 在给定阵列孔径、阵元数目和最小阵元间距等约束条件的前提下, 综合出尽量低的旁瓣电平是阵列天线研究的重要课题之一^[2,3]。近 60 年来, 均匀间隔阵列的综合已获得了广泛而深入的研究, 在保持原始阵列的辐射特性下减少阵元数的研究已有很多方法, 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、傅里叶逆变换法和数值优化等方法实现阵列综合; 相对而言, 非均匀阵列的综合是尚未解决的难题。阵元间约束条件下的优化有两种途径, 一种是阵元从相距半波长的规则栅格上稀疏的稀疏阵^[4]; 另一种是天线单元在设计时约束其阵元间距在一定孔径范围内随机稀疏的稀疏阵^[5]。近年来, 为了得到峰值旁瓣性能良好的稀疏阵, 已经出现了统计优化法、动态规划法、遗传算法^[6,7]、模拟退火法、粒子群法^[8]等综合方法。

过去的同心圆环阵列的旁瓣性能优化研究对象, 大多是阵元只能在各圆环等间距栅格上分布的稀疏同心圆环阵列^[7-9]。文献[10]中首先固定稀疏同心圆环阵列各个圆环上的阵元位置和数目, 然后分

2013-04-19 收到, 2013-10-08 改回

国家自然科学基金(U1233103)和中国博士后科学基金(2012M511919)资助课题

*通信作者: 于波 yubo1125@163.com

别运用遗传算法和粒子群算法优化阵元的激励幅度和相位来降低阵列的峰值旁瓣电平,文献[11]运用经典的遗传算法先固定或者先优化各个圆环上的阵元数目,再优化阵元的分布位置,从而实现旁瓣性能最优的稀疏同心圆环阵列。如果阵元在各圆环上随机分布,则有更大的自由度来稀疏同心圆环阵列,国内外却鲜有研究。

针对圆环上阵元数目和阵元分布位置不能联合优化的问题,本文提出一种将属于2维平面阵列的稀疏同心圆环阵列(圆环半径等间距)阵元分布优化设计降维成1维的稀疏直线阵列阵元分布优化设计,建立2维同心圆环阵列与1维线阵的关系,基于修正遗传算法进行线阵阵元位置的优化,获得圆阵尽量低的峰值旁瓣电平,降低了优化的计算量和模型的复杂性,又对所有阵元进行了联合优化,提高了阵列优化的自由度,在优化阵元分布位置的同时,也确定了各个圆环上的阵元数目。

2 稀疏圆阵的多约束优化模型

在特定的工程应用中,需要采用多个天线按一定规则排列组成的阵列天线,组成阵列天线的天线单元简称阵元,由多个阵元沿圆环排列所组成的平面阵列称圆环阵列,当不同半径的圆环阵列具有相同的圆心,且天线单元在设计时约束其阵元间距在一定孔径范围内随机稀疏时,构成了稀疏同心圆环阵列^[12]。一个稀疏率为 f ,稀疏后的阵元数目为 N ,阵元间距 $d \geq 0.5\lambda$ 的稀疏同心圆环阵列如图1所示,坐标原点位于同心圆环阵的圆心,圆心处固定一个阵元,其它阵元排列在 xoy 平面上。

极坐标 (r_n, φ_n) 表示第 n 个阵元的位置,其相应的激励为 $I_n \exp(j\psi_n)$,且阵元均为理想的全向性天线单元,远场模型^[13]同心圆环阵列的阵因子^[14]为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \exp \left[j\psi_n + j \frac{2\pi}{\lambda} r_n \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) \right] \quad (1)$$

式中 λ 为工作波长, $0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 分别为波束方向的俯仰角和方位角。

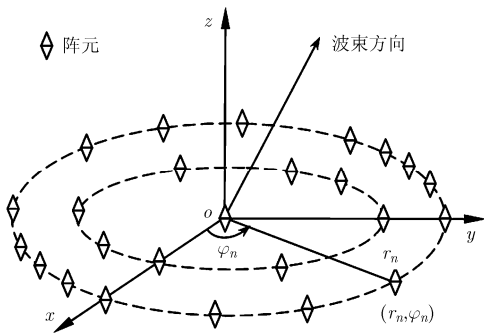


图1 稀疏同心圆环阵列模型

当优化设计的稀疏同心圆环阵列共有 M 个圆环,各圆环的半径为 $r_0, r_1, \dots, r_M$ 时,优化变量为阵元的分布位置,优化设计的目标是要获得可视区的峰值旁瓣电平(PSL)最低的稀疏同心圆环阵列。由此可得如式(2)的最优化问题的数学描述。

$$\left. \begin{aligned} & \min \{ \text{PSL}(r_0, r_1, r_2, \dots, r_M) \} \\ & \text{s.t. } r_0 = 0 \\ & d \geq 0.5\lambda \\ & \sum_{i=0}^M S_i = N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中

$$\text{PSL}(r_0, r_1, \dots, r_M) = \max \left\{ \frac{F(\theta, \varphi)}{FF_{\max}} \right\} \quad (3)$$

式中 S_i 表示第 i 个圆环上的阵元数目, d 为阵元间距, $FF_{\max}$ 是主瓣峰值, θ 和 φ 的取值区间为除主瓣区域以外的所有区域。

3 圆阵阵元的降维排布方法

在运用基于修正遗传算法的降维优化方法前,建立圆环阵列和直线阵列的相互转换关系。分析图1所示的稀疏同心圆环阵列,将圆阵的 M 个圆环轨迹从与 x 正半轴相交处断开逆时针方向展成 M 条线段,第 i 个圆环轨迹对应的线段长度为

$$l_i = 2\pi r_i \quad (4)$$

式中 $i \in \{0, 1, \dots, M\}$, r_i 表示第 i 个圆环的半径,且 $r_0 = 0$ 。按圆环序号依次相接形成1维的直线段轨迹,如图2所示,2维同心圆环阵列上的阵元可以转换为1维线阵阵列,且一一对应。

设定第1个圆环的起始位置为坐标原点,同心圆环的半径为 $r_0, r_1, \dots, r_M$,第 n 个阵元的极坐标位置为 (r_n, φ_n) , $r_n \in \{r_0, r_1, \dots, r_M\}$,通过式(5)获得该阵元在直线阵列中的位置 x ,将变量为 (r_n, φ_n) 的2维同心圆环阵列降维转化成为了变量为 x 的1维直线阵列。

$$x = \varphi_n \cdot r_i + \sum_{j=0}^{i-1} 2\pi r_j \quad (5)$$

反之,如果已知某一阵元在直线阵列中的位置 x ,则可以将其转换为同心圆环阵列的极坐标位置 (r_n, φ_n) 。首先确定该阵元所在的圆环半径,当圆环数 i 满足式(6)条件:

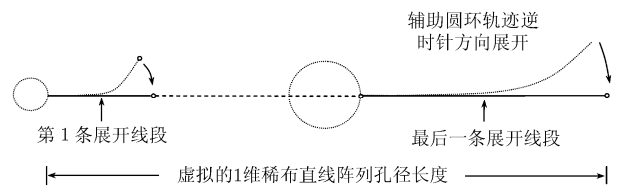


图2 轨迹圆环阵列展开后连接成的线阵模型

$$\sum_{j=0}^{i-1} 2\pi r_j \leq x < \sum_{j=0}^i 2\pi r_j \quad (6)$$

其对应圆环的半径为 $r_n = r_i$, 幅角 φ_n 为

$$\varphi_n = \left(x - \sum_{j=0}^{i-1} 2\pi r_j \right) / r_i \quad (7)$$

式(5)~式(7)就是圆环阵与线阵的相互转化公式, 本文讨论的降维优化设计建立在这个基础之上。针对具体的同心圆环阵的稀布优化设计, 在转化时还存在一些约束条件和近似处理。圆阵转换为线阵后, 同一圆环首尾阵元的最小间距约束问题, 线阵转换为圆阵后前一圆环末阵元与后一圆环首阵元间距约束的问题, 下文会对此问题进行说明。

4 基于遗传算法的优化算法

在遗传算法中^[15], 通常采用二进制码优化变量, 这种编码方式非常适合交叉和变异操作, 但是其搜索空间过大, 运行性能较差, 且存在二进制与十进制之间的转换问题。实数编码的遗传算法以变量的真实十进制编码代表变量的编码方式, 在克服二进制编码缺点的同时, 还具有更好的变异多样性, 反映真实的搜索空间, 简化计算量, 从而提高了遗传算法的效率和精度。文献[16]提出了一种间接描述优化变量的修正遗传算法 (Modified Genetic Algorithms, MGA) 来进行稀布阵列天线的优化设计。该算法回避了优化变量(阵元位置)的直接描述, 并利用阵元的间距约束减小了遗传算法的搜索空间。下面给出基于修正遗传算法的稀布同心圆环阵列降维优化方法的主要步骤。

4.1 创立初始种群

根据圆阵转换为线阵的表达式(5), 将一个稀布率为 f , 稀布后阵元个数为 N , 阵元间距 $d \geq 0.5\lambda$, 最小阵元间距 $d_c = \lambda/2$ 的 2 维稀布同心圆环阵列转化成为 1 维稀布直线阵列。为了满足优化后同一圆环的起始和末尾阵元间距约束, 每个圆环的最后 d_c 区间内不能排布阵元, 设同一圆环的阵元间距采用弧长间距作为近似, 则虚拟的 1 维直线阵列的孔径 L 为

$$L = \sum_{i=0}^M (2\pi r_i - d_c) \quad (8)$$

在该虚拟直线阵列孔径上创立初始种群。线阵的起始阵元坐标为 0, 末尾阵元坐标为 L , 固定了 3 个阵元后(圆心处固定了 1 阵元), 为满足阵元间距约束 d , 可分布的线阵孔径长度变为 $L - 2d_c$, 稀布余下 $T = N - 3$ 个阵元, 阵元间距约束下有 $(T-1)d_c$ 的区间不能布置阵元, 所以线阵孔径上的剩余空间为

$$SP = L - 2d_c - (T-1)d_c = L - (T+1)d_c \quad (9)$$

在闭区间 $[0, SP]$ 内生成 T 个独立随机数, 并按从小到大进行排序得 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_T]^T$, 令 $\mathbf{c} = [d_c, 2d_c, \dots, Td_c]^T$, 利用如式(10)所示的方法可获得线阵上阵元位置矢量。

$$\mathbf{x} = \mathbf{y} + \mathbf{c} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + d_c \\ y_2 + 2d_c \\ \vdots \\ y_T + Td_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为真实种群中的真实个体, $\mathbf{y}$ 为修正种群中对应的修正个体, 将固定的 3 个阵元加入真实个体可得个体的阵元位置矢量 $\mathbf{p}$, 生成相互独立的 S 个向量 $\mathbf{p}$, 便创建个体数为 S 的初始种群 $\mathbf{p}$ 。

$$\mathbf{p} = [0, 0, x_1, x_2, \dots, x_T, L]^T \quad (11)$$

如果 $[0, L]$ 内直接生成随机实数向量 $\mathbf{x}$, 需要判断其是否为满足阵元间距约束条件的可行解; 采用式(10)的方法, 间接产生的个体 $\mathbf{x}$ 已经是可行解而不需要判断其可行性。不难证明, 生成的线阵个体转换回同心圆环阵列的个体满足阵元数 N , 阵元间距约束 d , 同时获得每个圆环上的阵元数和阵元位置, 不仅减少了计算量, 缩减了可行解的搜索空间, 而且达到了数目和位置同时优化的效果。

4.2 交叉和变异

修正遗传算法的交叉和变异操作只需在修正种群中进行。假如修正种群中的第 i 个和第 j 个个体被选中, 并在第 k 号基因处发生单点交叉, 则交叉作用后的两个新的个体为

$$\begin{cases} \mathbf{y}'_i = \text{sort}[y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{kj}, \dots, y_{Ti}]^T \\ \mathbf{y}'_j = \text{sort}[y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{ki}, \dots, y_{Tj}]^T \end{cases} \quad (12)$$

假如选定第 l 个个体的第 z 号基因进行变异, 则变异作用后的新的个体为

$$\mathbf{y}'_l = \text{sort}[y_{1l}, y_{2l}, \dots, y_{(z-1)l}, \zeta, y_{(z+1)l}, \dots, y_{Tl}]^T \quad (13)$$

式中随机数 $\zeta \in [0, SP]$ 。发生交叉和变异的基因数由事先给定的交叉率和变异率决定。

经过选择、交叉和变异操作得到的新一代线阵种群为

$$\begin{cases} \mathbf{P}' = [\mathbf{p}'_1, \mathbf{p}'_2, \dots, \mathbf{p}'_k, \dots, \mathbf{p}'_S] \\ \mathbf{p}'_k = [0, 0, x'_{1k}, x'_{2k}, \dots, x'_{Tk}, L]^T \end{cases} \quad (14)$$

4.3 适应度计算

将如式(11)所示的 1 维线阵上阵元的位置转换在同心圆环阵列上的分布, 相邻两个圆环的前一个圆环阵列上的末尾阵元与后一个圆环阵列上的起始

阵元没有阵元间距 d 的约束, 对原直线阵列转换为同心圆阵的范围进行了修正。当确定在直线阵列上第 i 个圆环上第 1 个阵元的位置时, 其直线阵列后面长度 $2\pi r_i - d_c$ 范围内的阵元同属于一个圆环, 都满足阵元约束, 设第 $i-1$ 个圆环第 1 个阵元在直线阵列的位置为 x_m , 第 i 个圆环上的第 1 个阵元在直线阵列的位置为 x_n , x 为直线阵上阵元的位置, 当其满足

$$(x_m + 2\pi r_{i-1} - d_c) < x \leq (x_n + 2\pi r_i - d_c) \quad (15)$$

其对应圆环上的极半径 $r = r_i$, 其幅角 φ 为

$$\varphi = \frac{x - (x_m + 2\pi r_{i-1} - d_c)}{r_i} \quad (16)$$

根据式(15)和式(16), 直线阵列 x 位置的阵元转换为圆阵列 (r, φ) 位置的阵元, 根据式(2)计算适应度函数, 即计算稀布同心圆环阵列的峰值旁瓣电平 (PSL)。如果旁瓣性能满足给定的目标旁瓣要求, 则遗传算法结束; 否则继续进行迭代, 直到达到最大遗传代数。当前种群中旁瓣性能最优的个体所对应的修正个体将保留, 不参与交叉和变异操作, 直接成为下一代种群中的个体, 以保证遗传迭代所得到的最优个体是逐代改良的。

5 仿真结果

设有一均匀同心 9 圆环满阵列, 由 279 个阵元组成, 阵元均为理想的全向性天线单元, 各阵元等幅同相激励, 且阵列主波束指向阵列中心法线方向, 圆环半径为 $r_i = i\lambda/2$, 每个圆环上的阵元间距 $d_i \cong \lambda/2$, 则第 i 个圆环上的阵元数为

$$N_i = 2\pi r_i / d_i \quad (17)$$

由于阵元数必须是整数, 为了满足 $d_i \geq \lambda/2$, 对 N_i 进行向下取整, 其阵元分布如图 3 所示, 计算可得其 PSL 为 -17.40 dB。

运用基于修正遗传算法的降维优化方法, 在稀布率为 66%, 阵元数目 185, 阵元间距 $d \geq \lambda/2$, 孔径 9λ 的约束条件下优化设计稀布阵列, 使其 PSL 最低, 修正遗传算法的基本参数为: 种群数 200, 采用截断选择法且截断阈值为 0.5, 交叉概率 0.2, 变异概率 0.02, 终止代数 200。

优化后的 PSL 为 -23.74 dB, 与均匀同心 9 圆环满阵的 PSL 相比改善了 6.34 dB; 与文献[11]中运用经典遗传算法得到的最优稀疏同心 9 圆环阵列的 PSL 值 -22.44 dB 相比降低了 1.30 dB; 与文献[11]中运用混合遗传算法得到的半径优化后的稀疏同心 6 圆环阵列的 PSL 值 -22.94 dB 相比降低了 0.80 dB。本文方法用更少的阵元数获得了更好的峰值旁瓣电平。

图 4 为优化后的阵元位置分布图, 相邻圆环间距 $\lambda/2$, 阵元间距满足 $d \geq \lambda/2$; 图 5 为阵列方向图, 方向图的采样率为 256×256 , $\mu = \sin \theta \cos \varphi$, $\nu = \sin \theta \sin \varphi$; 图 6 为阵列方向图在 $\mu = 0$ 和 $\nu = 0$ 时的截平面波束图, $\mu = 0$ 时, PSL = -24.42 dB, $\nu = 0$ 时, PSL = -24.77 dB。

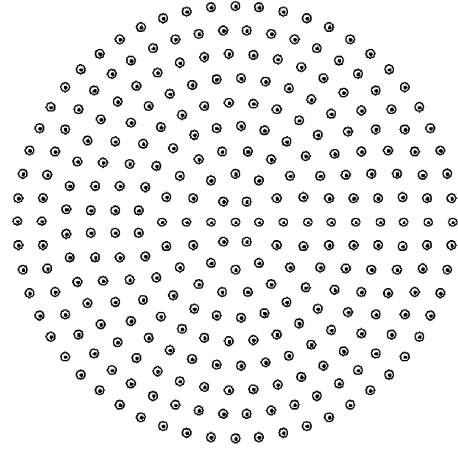


图3 同心 9 圆环阵列

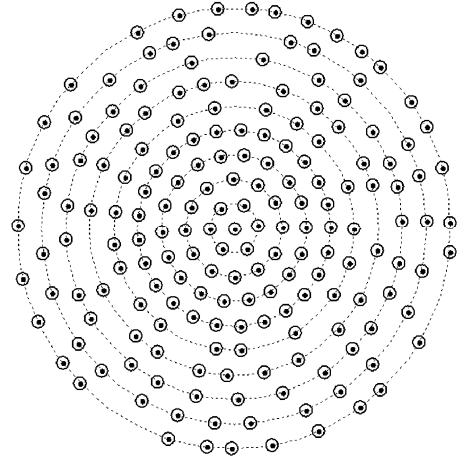


图4 降维优化后的稀布阵列

上述同心 9 圆环阵列的对比结果如表 1 所示。仿真实验在 MATLAB7.10 平台中完成, 计算机配置为: Pentium(R) Dual-Core E5200 处理器, 主频 2.5 GHz。从表中可以看出, 修正遗传算法的降维优化方法与经典遗传算法相比, 能在圆环上阵元数不确定的前提下, 同时优化圆环上的阵元数目和阵元位置, 实现了更好的旁瓣性能, 同时, 优化方法所需要的优化时间也明显减少, 实验结果验证了本文优化方法的有效性。

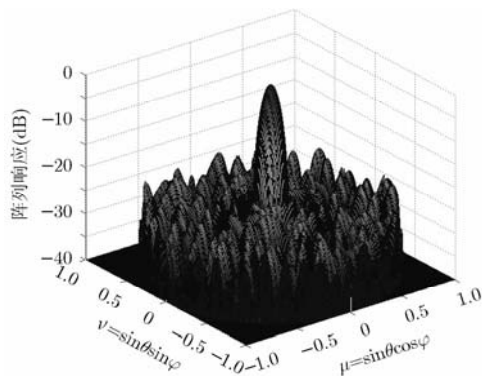


图 5 优化后的阵列方向图

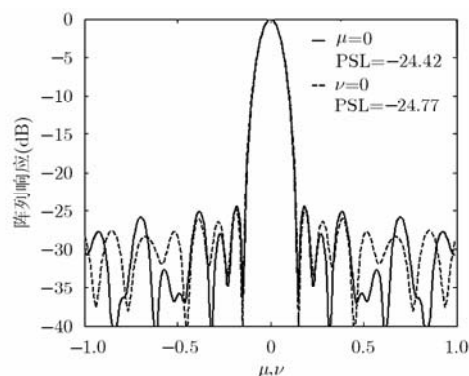


图 6 两个截面的方向图

表 1 同心 9 圆环阵列的优化结果对比

优化方式	优化后的 PSL(dB)	优化时间	阵元数目	n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
均匀间隔 满阵	-17.40	3 s	279	$r_n(\lambda)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
				N_n	6	12	18	25	31	37	43	50	56
降维优化 方法	-23.74	3.5 h	185	$r_n(\lambda)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
				N_n	6	12	18	25	19	22	26	26	30
遗传算法 稀疏 ^[1]	-22.44	23 h	185	$r_n(\lambda)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
				N_n	6	11	18	22	27	26	24	20	30
混合遗传 算法 ^[1]	-22.94	3 h	201	$r_n(\lambda)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	--	--	--
				N_n	12	19	26	36	45	62	--	--	--

6 结束语

本文将降维处理运用于 2 维稀疏阵列的阵元排布过程中, 成功实现了多约束稀疏圆形平面阵列综合。借助修正遗传算法将阵元在轨迹圆上的位置进行了统一的优化计算, 完成了满足多个设计约束的稀疏圆阵优化。该方法不仅降低了平面阵列优化方法的复杂性, 还为复杂阵列优化问题提供了有效的解决途径, 得到了旁瓣性能较优的稀疏阵列。本文方法为解决此类阵列优化问题提供了有益的启示, 下一步我们将研究将该降维优化方法拓展到矩形口径及椭圆形口径的稀疏平面阵列优化设计中。

参考文献

- [1] Singh U and Kamal T S. Synthesis of thinned planar concentric circular antenna arrays using biogeography-based optimization[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2012, 6(7): 822-829.
- [2] 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 Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(2):

621-634.

- [3] Zhang Wen-ji, Li Lian, and Li Fang. Reducing the number of elements in linear and planar antenna arrays with sparseness constrained optimization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(8): 3106-3111.
- [4] Eva R I and Oscar Q T. Thinned array synthesis including radiation pattern diversity in the elements[C]. *Proceedings of the IEEE Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Torino, 2011: 853-856.
- [5] Li Song-wen. Grate lobes/side lobes suppression for sparse array design by using genetic algorithms[C]. *Proceedings of the IEEE Innovations in Bio-inspired Computing and Applications (IBICA)*, Shenzhen, 2011: 371-373.
- [6] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(7): 993-999.
- [7] Mandal D, Majumdar A, Kar R, et al. Thinned concentric circular array antennas synthesis using genetic algorithm[C]. *Proceedings of the IEEE Research and Development (SCORED)*, Putrajaya, 2011: 194-198.
- [8] Mandal D, Kar R, and Ghoshal S P. Thinned concentric circular array antenna synthesis using particle swarm optimization with

- constriction factor and inertia weight approach[C]. Proceedings of the IEEE Recent Trends in Information Systems(ReTIS), Kolkata, 2011: 77–81.
- [9] Ghosh P and Das S. Synthesis of thinned planar concentric circular antenna arrays — a differential evolutionary approach[J]. *Journal of the Progress In Electromagnetics Research B*, 2011, 29: 63–82.
- [10] Reyna A and Panduro M A. Design of steerable concentric rings array using rotation properties and evolutionary optimization [C]. Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation (EuCAP), Barcelona, 2010: 1–5.
- [11] Haupt R L. Optimized element spacing for low sidelobe concentric ring array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(1): 266–268.
- [12] Sun Xue-jun, Gan Quan, and Tang Bin. Design of sparse concentric multi-circular array using micro-genetic optimum algorithm[C]. Proceedings of the IEEE Communications and Mobile Computing, Yunnan, 2009: 51–55.
- [13] Pathak N N, Mahanti G K, and Singh S K. Synthesis of thinned planar circular array antennas using modified particle swarm optimization[J]. *Journal of the Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, 12: 87–97.
- [14] 薛正辉, 李伟明, 任伍. 阵列天线分析与综合[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 301–308.
- [15] Whitley D. A genetic algorithm tutorial[J]. *Journal of the Statistics and Computing*, 1994, 4(2): 65–85.
- [16] Chen Ke-song, He Zi-shu, and Han Chun-lin. A modified real GA for the sparse linear array synthesis with multiple constraints[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(7): 2169–2173.
- 于波: 男, 1985年生, 硕士生, 研究方向为稀布阵列天线及信号处理.
- 陈客松: 男, 1973年生, 副教授, 研究方向为阵列天线、相控阵雷达及信号处理.
- 朱盼: 男, 1976年生, 工程师, 研究方向为计算机仿真、空管自动化.