

文章编号 1005-0388(2010)03-0477-08

# 增强粒子群优化算法设计 共形可重构天线阵

李文涛<sup>1</sup> 黑永强<sup>2</sup> 史小卫<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;  
2. 西安电子科技大学综合业务国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要** 提出一种设计共形可重构天线阵的新方法: 增强粒子群优化算法(EPSO)。在常规PSO算法的基础上, 通过引入邻极值平衡速度更新, 最优粒子克隆选择以及优胜劣汰等进化机制, 来改善粒子群算法的全局收敛性和收敛速度。算法的有效性通过对圆柱共形阵列的方向图重构来验证。在优化设计过程中, 阵列方向图直接通过叠加单元在阵列中的有源方向图来获得以提高计算结果的可靠性, 而采用数字衰减器和移相器目的在于验证所提算法应用于工程实际的可行性。综合结果通过与其他算法相比较表明: 所提算法的收敛速度和收敛精度得到很大程度的改善, 从而证明了所提算法在天线阵列综合中的有效性。而综合结果与全波分析结果能够很好的吻合则说明了该设计过程的正确性。

**关键词** 共形天线; 粒子群优化算法; 互耦; 方向图可重构

**中图分类号** TN820 **文献标志码** A

## 1. 引言

现代雷达和无线通信的迅猛发展使得信息平台对天线的功能要求日益增多, 为了满足这些不同的功能, 需要设计很多不同性能的天线, 导致平台负载重量增加和费用成本提升。而可重构天线<sup>[1-3]</sup>则提供了一种解决上述问题的有效思路, 它能够在同一通用的天线口径中通过实时改变某些结构来获得期望的天线性能。而且, 可重构天线具有系统成本低、电磁干扰小、重量轻等优点, 因而广泛应用于各种领域的天线设计中。近年来, 与载体相吻合的天线系统——共形天线的研究日益得到重视, 这是因为它不仅可以提供所要求的天线性能, 而且不会影响载体本身的机动特性<sup>[4-6]</sup>。而共形可重构天线具有更加广阔的应用场景是因为通过合理的设计它能够同时发挥“共形”和“可重构”的优势, 因此, 发展共形可重构天线阵具有非常重要的意义。然而, 目前国内外关于这一领域的研究甚少, 缺乏有效分析和设计这类天线的电磁理论及方法。如何有效设计共形可

重构天线阵则是本文研究的出发点。

在天线阵列综合中, 通常都是直接采用单元方向图乘以阵因子的形式来获得阵列的方向图, 但是对于共形天线阵而言, 所有阵列单元均难以保证在观察方向具有相同的方向图形状以及最大值指向, 因而在辐射场的数学表达式中, 矢量单元因子和阵因子无法分离。这将导致阵元间的互耦问题在共形阵列中显得尤为突出。因此, 目前共形天线阵的分析尤其是综合成为困扰学者的一大难题。近年来基于进化的各种智能算法, 如遗传算法、粒子群算法、克隆选择算法等取得了长足的进步, 并有效地应用于方向图综合中<sup>[9-12]</sup>。目前, 这些算法已广泛应用于线阵和平面阵方向图综合中, 并且能够获得不错的应用效果, 然而在共形阵天线综合中的应用却相对较少, 且这些算法受自身缺陷的影响难以取得令人满意的结果。此外, 目前对共形阵列的研究大都采用简化模型, 而许多关键因素如单元之间互耦尚未加以考虑, 因而所得到的结果需进一步的验证。

收稿日期: 2009-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号 60801039)

联系人: 李文涛 E-mail: wtli@mail.xidian.edu.cn

本文重点研究了共形阵列方向图可重构的设计问题。首先,在研究常规 PSO 算法的基础上,提出一种新的增强粒子群优化(EPSO)算法,通过引入邻极值平衡速度更新,最优粒子克隆选择以及优胜劣汰等进化机制来改善粒子群算法的全局收敛性和收敛速度,并将其应用于圆柱共形阵列的综合来验证算法的有效性。其次,在优化设计过程中,考虑到载体及阵元互耦对共形阵方向图综合带来的影响,单元在阵列中的有源方向图直接叠加用于计算阵列方向图,以提高计算结果的可靠性。进一步,优化设计过程采用数字衰减器和移相器,这将很大程度增强所得结果应用于实际工程的可行性。

## 2. 柱面共形阵列模型

### 2.1 单元设计

微带天线具有体积小、重量轻、低剖面、易与载体共形等优点,因而广泛应用于各种共形天线阵。为了有效展宽天线带宽,减小天线尺寸以及降低阵列单元间的互耦,本文采用双层分形微带贴片天线形式设计工作于中心频率 3.2 GHz 处的天线单元,其结构如图 1 所示。介质板的介电常数为 2.65,厚度为 1 mm。上下层辐射贴片所占的面积分别为 28.2 mm×28.2 mm 和 24.6 mm×24.6 mm,而谐振于相同频率的矩形贴片上下层辐射贴片所占的面积分别为 31.3 mm×31.3 mm 和 27.1 mm×27.1 mm。因而所设计的微带天线单元的面积可分别减少 18.83% 和 17.6%。单元的驻波比如图 2 所示,实测单元驻波从 3.0~3.51 GHz 驻波比小于 2,相对带宽为 15.67%。

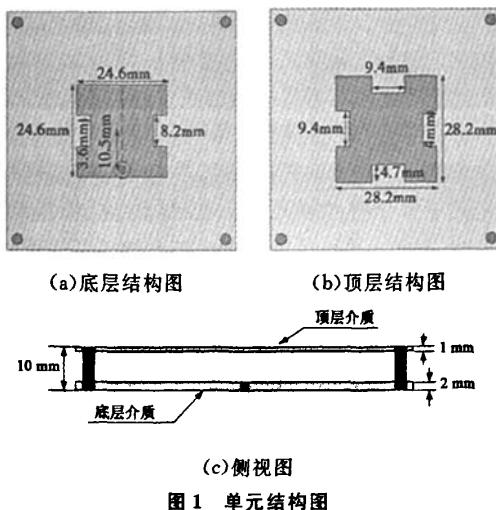


图 1 单元结构图

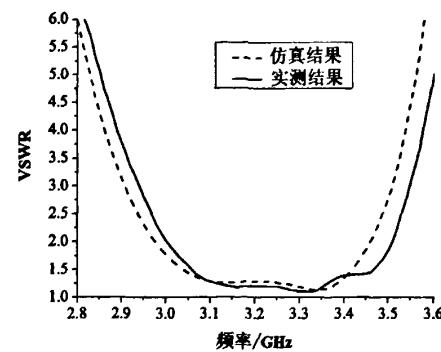


图 2 仿真和实测驻波比图

### 2.2 目标函数的建立

考虑一个半径为  $R$ ,以  $z$  轴为旋转轴,由  $M \times N$  个微带单元组成的圆柱面共形阵,  $M, N$  分别是  $z$  向和  $\phi$  向的单元数,其结构如图 3 所示。假定单元的

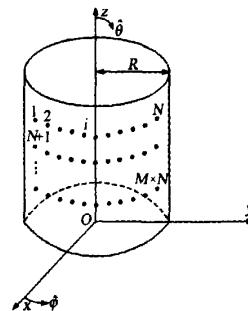


图 3 柱面天线阵示意图

柱坐标为  $(R, \varphi_m, Z_m)$ ,激励电流为  $I_{mn} \exp[j\Psi_{mn}]$ ,则柱面共形天线辐射方向图函数为

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{mn} f_{mn}(\theta, \phi) \times \exp[jk[R \sin \theta \cos(\phi - \varphi_m) + z_m \cos \theta] + j\psi_{mn}] \quad (1)$$

式中:  $f_{mn}(\theta, \phi)$  为单元方向图;  $I_{mn}$  为激励电流的幅值;  $\psi_{mn}$  为激励相位。

对于具有相同馈电幅度,可以通过只改变相位来产生笔形波束和平顶波束的方向图可重构共形天线阵,其目标函数可以定义为

$$fitness = fitness_p + fitness_f \quad (2)$$

式中:  $fitness_p$  为综合笔形波束时的远场误差均方差,定义为

$$fitness_p = \left( \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [U(e_d(\theta, \phi)) \times e_d(\theta, \phi)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$e_d(\theta, \phi) = F_o(\theta, \phi) - F_d(\theta, \phi) \quad (4)$$

式中:  $F_o(\theta, \phi)$  和  $F_d(\theta, \phi)$  分别是优化所得方向图

和所要逼近的目标方向图;  $M_s$  是角度取样点数;  $U(t)$  是单位阶跃函数。

而  $fitness_f$  是综合平顶波束的适应度值, 定义为

$$fitness_f = w_s \times E_{sh} + E_{sl} \quad (5)$$

式中:  $w_s$  表示权重因子, 用来控制主瓣赋形区域均方差  $E_{sh}$  和副瓣均方差  $E_{sl}$  在适应度函数中的比重关系。而  $E_{sh}$  和  $E_{sl}$  分别可以表示为

$$E_{sh} = \left( \frac{1}{M_{sh}} \sum_{m=1}^{M_{sh}} [e_d(\theta, \varphi)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$E_{sl} = \left( \frac{1}{M_{sl}} \sum_{m=1}^{M_{sl}} [U(e_d(\theta, \varphi)) \times e_d(\theta, \varphi)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中:  $M_{sh}$  和  $M_{sl}$  分别表示主瓣赋形区域和副瓣区域的采样点数。

### 3. 计算结果

在常规 PSO 算法中, 每个粒子看作是搜索空间中的一个优化问题的解, 它有自己的位置  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  和速度  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ , ( $i=1, 2, \dots, P$ ),  $P$  为粒子的个数,  $D$  为所优化问题的维数。粒子位置坐标对应的目标函数值为该粒子的适应度。在每次迭代中, 各粒子记忆、追随当前的最优粒子, 并通过跟踪两个“极值”位置来不断更新自己: 一个是粒子本身所找到的最优解位置, 即个体极值位置  $pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{iD})$ , 另一个是整个种群目前找到的最优解位置  $gbest = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_P)$ , 粒子按式(8)和式(9)更新其速度和位置<sup>[13]</sup>。

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1 r_{1d} (pbest_{id} - x_{id}) + c_2 r_{2d} (gbest_{id} - x_{id}) \quad (8)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (9)$$

式中:  $c_1, c_2$  是学习因子;  $r_{1d}, r_{2d}$  是  $[0-1]$  之间均匀分布的随机数;  $w$  是惯性权重因子

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T} \cdot \tau \quad (10)$$

式中:  $T$  是最大迭代次数;  $\tau$  为当前迭代次数;  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  分别是惯性权重因子的最大值和最小值。

PSO 算法因简单方便、计算量小、运行速度快, 程序实现非常简洁和需要调整的参数少而广泛应用于工程计算领域。但是常规 PSO 算法在天线综合时具有全局搜索能力差, 收敛速度慢, 早熟等缺陷; 另外作为一种迭代进化算法, 其收敛速度也是影响算法计算效率不可忽视的一个因素。本文从研究

PSO 算法寻优过程入手, 通过引入新的进化机制来改善 PSO 算法粒子的求解效率以及寻优速率。下文将给出这些新进化机制的具体描述。

#### 3.1 邻极值平衡速度更新

PSO 算法的一个很大的缺陷在于进化后期粒子之间缺乏很大的多样性, 从而导致了算法的早熟以及收敛速度慢, 究其原因所在, 是因为粒子之间缺乏竞争使得进化机制过于单一。从进化机制来看, 对于每个粒子而言, 一味跟随单一的个体极值进化很容易导致粒子进化的盲目性, 这将导致粒子收敛到最优解将耗费大量的迭代次数。事实上, 在其进化过程中, 除了最优粒子作为进化目标以外, 每个粒子周围粒子的进化轨迹也具有很大的导向价值, 尤其是在最优粒子与当前粒子之间的位置相距较远的情况下。受此启发, 为了加强粒子间的竞争与合作, 对粒子施行如下速度更新方程

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1 r_{1d} (pbest_{id} - x_{id}) + c_2 r_{2d} (gbest_{id} - x_{id}) + c_3 r_{3d} (pbest_{(i-1)d} - x_{id}) \quad (11)$$

式中:  $pbest_{(i-1)d}$  表示粒子  $x_i$  前面次优粒子的适应度值;  $c_3$  是加速度常数;  $r_{3d}$  是服从  $[0, 1]$  分布的随机数。

#### 3.2 最优粒子克隆选择

对于常规 PSO 算法而言, 仿真发现在初始阶段收敛速度较快, 但在搜索后期, 进化却变得非常缓慢。而导致这一缺陷的直接原因是最优粒子的更新完全被动地依靠每一代进化过程所得最优解。事实上在自然界或人类社会团体中, 对于活动群体而言, 为了使群体快速、有效地完成任务, 领导者应该主动积极学习、积累更多的知识和经验来领导整个群体。与此类似, 作为所有粒子的导向——全局最优粒子在粒子群进化过程中应该主动探索更多的区域, 从而领导整个粒子群能快速准确收敛的同时有效降低其他粒子的盲目搜索带来的额外开销。从这一结论出发, 如果能够对最优粒子“分身”出多个最优粒子, 且每个最优粒子均能独立地进行搜索, 这将进一步提高所有粒子的“工作效率”。而事实上, 克隆选择操作<sup>[14]</sup> (依据抗体与抗原的适应度函数, 将解空间的一个点分裂成多个相同的点, 并经过克隆操作后获得新的抗体群) 刚好可以实现这一过程。本文对全局最优粒子引入克隆选择操作, 其克隆规模及超变异算子分别定义为

$$N_c = round(\beta N) \quad (12)$$

$$gbest_d^* = gbest_d + 0.1(x_{d\min} - x_{d\max}) \text{Gauss}(0, 1) \quad (13)$$

式中:  $\beta$  为克隆系数, 其取值范围一般为 10~20 之间, 由于只对最优粒子进行克隆操作, 因而  $\beta$  取值不宜过大, 否则会造成算法早熟; 而取值过小则难以发挥作用。 $x_{d\min}, x_{d\max}$  分别为第  $d$  维变量的下限和上限,  $Gauss(0,1)$  是均值为 0, 方差为 1 的高斯随机变量。

### 3.3 优胜劣汰

在 PSO 算法进化的过程中, 粒子难免会有优劣之分; 质量较差的粒子进化成为较优的粒子会耗费大量迭代次数, 这样将会给算法带来巨大的开销。借鉴达尔文进化论的思想, 自然界总是选择那些能够适应该环境的物种存活下来。受此启发, 所提算法仅保留 PSO 算法中适应度函数较高的粒子参与下一代进化, 而淘汰适应度函数较低的粒子, 并重新随机产生新粒子来弥补空缺, 以保证群体的多样性。其中淘汰粒子占据所有粒子的比例记为  $p$ , 其合理取值范围为 0.15~0.3 之间。可以看出: 优胜劣汰的引入不仅保证了粒子的多样性同时能够有效加剧粒子之间的竞争, 从而加快算法的寻优速率。

为了方便描述, 采用上述新进化机制的粒子群算法称为增强粒子群算法 (EPSO)。在附录中对该算法的收敛条件加以分析, 而算法的具体计算步骤如下:

step1 初始话粒子种群, 并计算每个粒子的适应度值; 设粒子群规模为  $P$ 。

step2 通过比较每个粒子所经历过  $pbest_i$  来获得当前个体最优位置。比较所有粒子所经历  $pbest_i$  和  $gbest$  来确定当前的全局最优粒子。

step3 将所有粒子根据  $pbest_i$  进行递减排序, 并根据式(10)式和(8)进行速度和位置更新。

step4 根据式(12)和式(13)对全局最优粒子进行克隆和超变异, 所得粒子和变异前最优粒子进行比较, 获得当前最优粒子。

step5 淘汰适应度值较低的粒子, 并重新初始化相同数目新粒子以弥补空缺。

step6 重复步骤 2~5, 直到满足性能要求或达到预先设定的最大迭代次数, 输出最优解。

## 4. 共形阵列方向图可重构的设计

考虑由 9 个微带单元所组成的圆柱共形天线阵, 其结构如图 4 所示。其中圆柱半径为 200 mm, 长为 130 mm, 阵列单元在  $\varphi$  向的间距为 50 mm。为了验证在计算阵列方向图函数过程中带入单元因子的必要性, 首先给出阵列中各单元在 HFSS 中的仿

真辐射特性, 如图 5 所示。

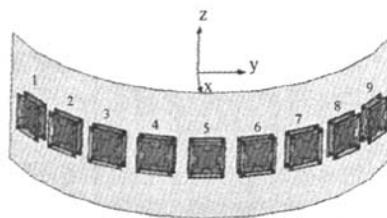


图 4 圆柱共形阵结构图

由图 5 可看出, 由于载体及阵元间互耦等因素的影响, 使得在阵列中工作的各个天线单元的辐射特性存在一定的差异。这直接说明在优化过程中, 不仅要将单元因子记入优化过程, 而且各个单元还应该分别处理。因而, 为了使优化算法快速、准确得到所需阵列方向图的优化阵列参数, 本文将所有单元的有源方向图带入式(1)计算阵列的方向图。

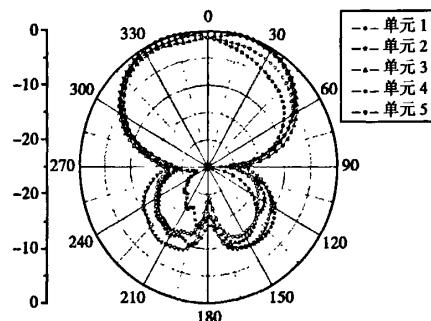


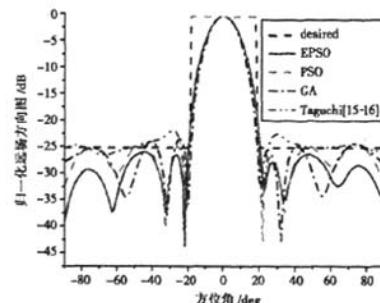
图 5 单元在阵中的有源方向图

对于笔形波束, 其优化目标为副瓣电平低于  $-25$  dB, 而对于平顶赋形波束要求主瓣宽度为  $66^\circ$ , 副瓣电平低于  $-20$  dB。为了验证所提算法的有效性, 其优化结果与 GA 算法、常规 PSO 算法及文献 [15-16] 提及的 Taguchi 算法所得结果一并进行比较。算法的公共参数如下: 种群规模为 24, 最大迭代次数为 1000。对于 PSO, 式(10)中  $w_{\max} = 0.9$ ,  $w_{\min} = 0.4$ , 学习因子  $c_1 = 1.8$ ,  $c_2 = 1.8$ 。对于 EPSO,  $c_3 = 1.5$ ; 式(5)中的权重因子  $w_i = 0.78$ ; 式(12)中的克隆系数  $\beta = 0.2$ 。而粒子淘汰率选取  $\rho = 0.5$ , 其他参数与 PSO 算法相同。对于 GA 算法, 选取变异概率和交叉概率分别为 0.05 和 0.8, 其他参数均与 PSO 算法相同。Taguchi 算法中选正交阵列 OA(81, 15, 3, 2), 其他参数设置均与文献 [15-16] 中相同。

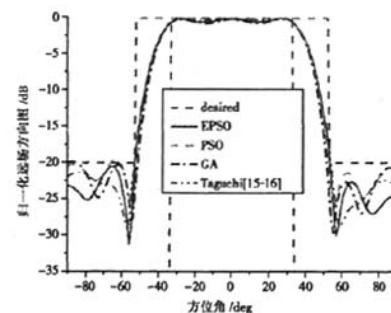
综合实验中,在共同的馈电幅度下,仅通过改变相位实现圆柱共形阵列的方向图可重构,而优化过程采用5位数字衰减器和6位数字移相器的量化值。优化后阵列 $x-z$ 面方向图如图6所示。可以看出EPSO所得副瓣电平均优于常规PSO和GA的优化结果,笔形波束的副瓣电平在-25 dB以下,平顶波束的副瓣电平也达到了设计要求。而GA算法、常规PSO算法所得结果的副瓣电平均不能满足设计要求。Taguchi算法尽管可以获得相对较好的平顶波束副瓣电平,但笔形波束却无法满足设计要求。在预先要求的平顶波束赋形区域内,EPSON所得辐射场强最大波动值仅为0.5537 dB,而GA算法、常规PSO算法及Taguchi算法所得的最大波动值分别为0.7277 dB、0.7682 dB和0.6048 dB。表1给出了EPSO算法优化得到方向图对应的幅度和相位分布。几种算法分别独立运行20次后最大旁瓣电平(MSLL),目标函数计算次数( $N_f$ )的平均值示于表2。可以看出:常规PSO算法和GA算法难以取得理想的优化结果,这是由于这些算法的早熟、局部收敛等自身缺陷造成的。Taguchi算法的收敛速度较快,但笔形波束却远未达到指标要求。为了验证优化结果的正确性,我们将表1中的优化结果带入HFSS仿真软件中进行计算,其结果与EPSO算法的优化结果比较曲线如图7所示。可以看出,在计算阵列方向图函数时带入阵列单元因子后,优化算法结果与仿真计算结果曲线能够很好地吻合,这表明将单元因子计入优化过程确实能够提高优化结果的可靠性,同时也显示了所提算法的有效性。

表1 EPSO算法优化所得阵列单元激励幅度和相位

单元	共同激励幅度	笔形波束激励相位(度)	平顶波束激励相位(度)
1&9	0.09375	-157.500	-129.375
2&8	0.28125	84.375	-174.375
3&7	0.40625	-78.750	168.750
4&6	0.62500	-135.000	174.375
5	0.96875	-123.750	-118.125



(a)笔形波束



(b)平顶波束

图6 可重构阵列辐射方向图

表2 四种算法的平均最大旁瓣电平和目标函数平均计算次数

波束类型	GA		PSO		Taguchi		EPSO	
	MSLL(dB)	$N_f$	MSLL(dB)	$N_f$	MSLL(dB)	$N_f$	MSLL(dB)	$N_f$
笔形平顶	-23.2968	21744	-24.2150	20952	-21.6988	5913	-25.8338	8496
	-19.8120		-19.4544		-21.3401		-20.4845	

表3 EPSO算法优化所得阵列单元

激励幅度和相位(未量化)

单元	共同激励幅度	笔形波束激励相位(度)	平顶波束激励相位(度)
1&9	0.07633	87.11143	5.86193
2&8	0.24742	-57.25807	-47.40051
3&7	0.37041	42.95003	-64.71350
4&6	0.53797	85.14564	-60.83885
5	0.80793	99.35721	4.62957

为了进一步验证所提算法的灵活性,本文比较EPSO算法在连续空间(激励幅度和相位不进行量化)和量化空间下的优化结果。优化目标及所提算法参数均不变,所得到的方向图如图8所示。可以看出,所提算法在两种情况下的方向图能够很好地吻合,但EPSO算法在连续空间下的优化结果更优一些,原因在于该假设下变量的搜索空间更大。表

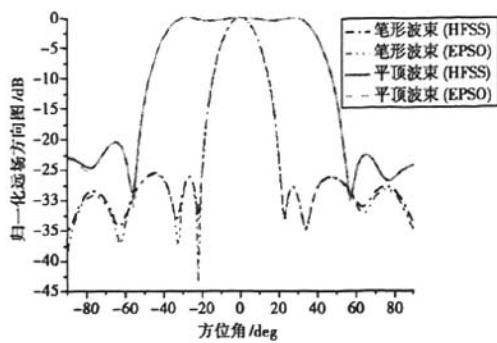


图 7 阵列波束方向图优化结果与仿真结果比较

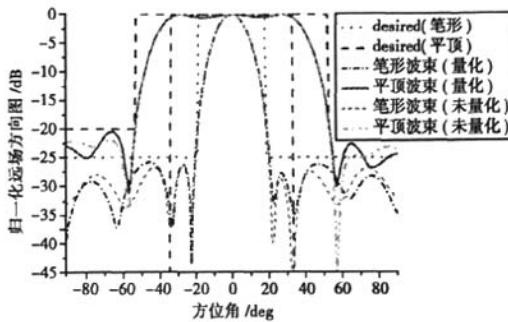


图 8 可重构阵列辐射方向图

3 给出了 EPSO 算法优化得到方向图对应的幅度和相位分布。综合上述四种算法的优化结果可知: EPSO 算法可以很大程度提高算法的局部及全局搜索能力。而从目标函数的计算次数可以看出, EPSO 算法具有较快的收敛速度, 从而其计算效率得到验证。

## 5. 结 论

本文重点研究了共形阵列方向图可重构的设计问题。针对共形阵综合这一难题, 提出了一种增强粒子群优化算法, 在常规 PSO 算法的基础上, 通过引入邻极值平衡速度更新, 最优粒子克隆选择以及优胜劣汰等进化机制, 来改善算法的收敛速度和收敛精度, 并通过圆柱共形阵列的综合来验证算法的有效性。进一步, 本文优化设计过程考虑了载体及单元互耦对天线方向图的影响, 并采用了数字衰减器和移相器, 而优化结果和全波分析结果能够很好地吻合说明该优化算法的正确性和可靠性。同时, 实验结果表明: 与其他算法相比较, 所提算法具有收敛精度高和收敛速度快等优势。此外, 本文优化设计过程显示出的另外一个优点是免去了阵列馈电系

统中的功率控制部件, 并简化馈电系统从而减小馈电系统带来的损耗。有望在电磁领域其它优化设计中得到进一步的应用。

## 附录

根据 EPSO 算法的定义可知, 其进化过程是以  $x_d^t$  为变量的随机过程, 其收敛条件可以定义为:  $\lim_{t \rightarrow \infty} E |x_d^t - p_d|^2 = 0, i \in [1, 2, \dots, D]$ , 即  $x_d^t$  均收敛于  $p_d$ , 其中  $x_d^t$  为第  $i$  个粒子在时刻  $t$  所处的第  $d$  维位置, 而  $p_d$  为对于特定问题的第  $d$  维解。

根据 EPSO 的进化过程可知尽管  $x_i$  和  $v_i$  是多维变量, 但由于每一维变量之间相互独立, 故不失一般性, 算法的收敛性分析可以简化到一维进行。从分析角度出发,  $pbest_i^t$  和  $gbest_i^t$  可以看作是常数, 因而式(11)和式(9)可写为

$$x_d^{t+1} = [1 + w - c_1 r_{1d} - c_2 r_{2d} - c_3 (1 - r_{1d})] x_d^t - w x_d^{t-1} + c_1 r_{1d} pbest_i^t + c_2 r_{2d} gbest_i^t + c_3 r_{3d} pbest_{(i-1)d} \quad (14)$$

$$v_d^{t+1} = [1 + w - c_1 r_{1d} - c_2 r_{2d} - c_3 r_{3d}] v_d^t - w v_d^{t-1} \quad (15)$$

分别计算式(14)和式(15)的数学期望, 可得

$$E(x_d^{t+1}) = \left(1 + w - \frac{c_1 + c_2 + c_3}{2}\right) E(x_d^t) - w E(x_d^{t-1}) + (c_1 pbest_i^t + c_2 gbest_i^t + c_3 pbest_{(i-1)d}) / 2 \quad (16)$$

$$E(v_d^{t+1}) = \left(1 + w - \frac{c_1 + c_2 + c_3}{2}\right) E(v_d^t) - w E(v_d^{t-1}) \quad (17)$$

可以看出式(16)和式(17)具有相同特征方程

$$\lambda^2 - \left(1 + w - \frac{c_1 + c_2 + c_3}{2}\right) \lambda + w = 0 \quad (18)$$

而特征方程的特征根为

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ \left(1 + w - \frac{c_1 + c_2 + c_3}{2}\right) \pm \sqrt{\Delta} \right] \quad (19)$$

$$\text{式中: } \Delta = \left(1 + w - \frac{c_1 + c_2 + c_3}{2}\right)^2 - 4w.$$

为了保证  $E(x_d^t)$  收敛,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  均需满足  $0 < |\lambda_1|, |\lambda_2| < 1$ 。对于此不等式, 需要讨论以下三种情况来确定 EPSO 算法中参数的取值范围:  $\Delta > 0, \Delta = 0, \Delta < 0$ 。受篇幅所限, 本文只给出参数取值范围最终求解结果

$$0 \leq w < 1 \quad \text{and} \quad 0 < c_1 + c_2 + c_3 < 4(1 + w) \quad (20)$$

## 参考文献

- [1] MAHANTI G K, DAS S, CHAKRABARTY A, et al. Design of reconfigurable array antennas with minimum variation of active impedances[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2006, 5(1): 541-544.
- [2] DIAZ X, RODRIGUEZ J A, ARES F, et al. Design of phase-differentiated multiple-pattern antenna arrays [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, 26(1): 52-53.
- [3] RODRIGUEZ J A, TRASTOY A, BREGAINS J C, et al. Beam reconfiguration of linear arrays using parasitic elements[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(3): 7-8.
- [4] DOHMEN C, ODENDAAL J W, JOUBERT J. Synthesis of conformal arrays with optimized polarization [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2007, 55(10): 2922-2925.
- [5] WINCZA K, GRUSCZYNKI S, SACHSE K. Conformal four-beam antenna arrays with reduced sidelobes[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44 (3): 174-175.
- [6] SIPUS Z, SKOKIC S, BOSILJEVAC M, et al. Study of mutual coupling between circular stacked-patch antennas on a sphere[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2008, 56(7): 1834-1844.
- [7] 欧阳骏, 杨 峰, 聂在平, 等. 基于遗传算法的载体上共形天线阵列优化[J]. *电波科学学报*, 2008, 23 (2): 356-359.  
OU Yanjun, YANG Feng, NIE Zaiping, et al. Optimizing design of conformal antennas array on platform with GA method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(2): 356-359. (in Chinese)
- [8] FRANEK O, PEDERSEN G F, ANDERSEN J B. Numerical Modeling of a Spherical Array of Monopoles Using FDTD Method[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2006, 54(7): 1952-1963.
- [9] 陈客松, 何子述. 平面稀布天线阵列的优化算法[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(2):193-198.  
CHEN Kesong, HE Zishu. Synthesis approach for sparse plane arrays[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(2): 193-198. (in Chinese)
- [10] GENOVESI S, MITTRA R, MONORCHIO A, et al. Particle swarm optimization for the design of frequency selective surfaces[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2006, 5(1): 277-279.
- [11] 郭建明, 刘 波, 毛二可. 米波圆环天线阵的方向图综合研究[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(4): 792-796.
- GUO Jianming, LIU Bo, MAO Erke. Synthesis of circular array patterns of VHF band[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(4): 792-796. (in Chinese)
- [12] JIN N. Particle swarm optimization in engineering electromagnetics [D]. Ph. D. thesis, University of California, Los Angeles, 2008.
- [13] SHI Y and EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization [C]. In: *Evolutionary programming VII: Proc. EP98. Lecture Notes in computer science 1447*, New York, 1998, 591-560.
- [14] DE CASTRO L N and VONZUBEN F J. Learning and optimization using the clonal selection principle [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3):239-251.
- [15] WENG W C, YANG F, ELSHERBENI A Z. Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: a novel optimization technique in electromagnetics[J]. *IEEE Tran. Antennas Propagation*, 2007, 55 (3): 723-730.
- [16] WENG W C and CHOI C T M. Optimal design of CPW slot antennas using Taguchi's method[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45 (3): 1542-1545.

## 作者简介



李文涛 (1983—),女,陕西人,西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生,主要研究方向为:阵列天线设计,优化算法等。



黑永强 (1983—),男,陕西人,西安电子科技大学博士生,主要研究方向为:智能天线、MIMO 以及优化算法。



史小卫 (1963—),男,广东人,西安电子科技大学教授,博士生导师,主要研究方向为:计算电磁学、智能天线以及射频识别。

## Enhanced particle swarm optimization algorithm for conformal reconfigurable array

LI Wen-tao<sup>1</sup> HEI Yong-qiang<sup>2</sup> SHI Xiao-wei<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Antennas and Microwaves, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract** A novel enhanced particle swarm optimization (EPSO) algorithm is proposed for designing conformal reconfigurable arrays. On the basis of conventional particle swarm optimization (PSO) algorithm, the proposed algorithm improves the global convergence and convergent speed of PSO by means of introducing the neighborhood best balancing velocity updating, clonal selecting the best particle and survival of the fittest strategies. Then, the effectiveness of EPSO is verified by the pattern reconfiguration of the cylindrical conformal array. During the optimized design process, the array patterns are obtained by directly importing all the active element patterns to improve the reliability of the designed results, while the quantized values of digital attenuator and phase shifter are employed in the optimization process with the purpose of testifying the implementation feasibility of the proposed algorithm in practice. Simulation results show that the convergent speed and convergence precision are significantly improved when compared with other algorithms, which reveals the effectiveness of the proposed algorithm for antenna synthesis. Besides, the well agreement between the optimized results and the ones obtained by the full-wave method indicates the validity of the proposed design process.

**Key words** conformal antennas; particle swarm optimization (PSO); mutual coupling; pattern reconfiguration

## 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](http://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](http://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](http://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>