

自适应动态 Meta 粒子群优化算法综合多方向图共形阵列

赵菲* 齐会颖 邱磊 柴舜连 毛钧杰
(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 基于全波仿真得到的广义阵元有源方向图, 该文提出一种用于综合多方向图共形阵列的新方法: 自适应动态 Meta 粒子群优化(ADMPSO)算法。在传统 Meta 粒子群优化(MPSO)算法基础上, 定义了优势子群和非优势子群的概念, 并通过植入非优势子群裁减、优势子群规模膨胀以及惯性权重自适应更新等机制, 实现了优化过程中多子群的自适应动态调整, 全面提高了算法性能。ADMPSO 成功用于 12 元微带锥面共形阵列非赤道面的多方向图综合, 综合过程考虑了由共形载体导致的阵元极化指向各异特征, 在公共激励存在约束情况下, 使阵列同时实现了笔形、平顶, 以及余割平方波束总功率方向图, 其与该阵列全波数值仿真完全吻合, 优化结果和收敛速度相比于其他算法均有显著改善。

关键词: 共形天线阵; 粒子群优化算法; 多方向图阵列; 方向图综合; 互耦

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1476-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01187

Adaptive Dynamic Meta Particle Swarm Optimization Algorithm Synthesizing Multiple-pattern Conformal Array

Zhao Fei Qi Hui-ying Qiu Lei Chai Shun-lian Mao Jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the general element active pattern achieved by full wave simulation, a novel Adaptive Dynamic Meta Particle Swarm Optimization (ADMPSO) algorithm is proposed for synthesizing multiple-pattern conformal array. The dominated subgroup and nondominated subgroup are defined on the basis of traditional Meta particle swarm. Meanwhile, the adaptive dynamic modulating for multiple-subgroup is realized by introducing the downsizing of nondominated subgroup, the dominated subgroup expansion, and the updating for the adaptive inertia weights, which improve the optimization performance of ADMPSO. Furthermore, ADMPSO algorithm is applied to synthesizing multiple-pattern in 12-element microstrip conic sector conformal array in non-equatorial plane successfully, with the polarizing deterioration of the element considered. And the pencil beam, the flat-top beam, and the cosecant squared beam patterns are achieved simultaneously, with the common amplitude of the excitation restricted. The simulation shows that the optimization results and convergent speed are significantly improved compared with other algorithms.

Key words: Conformal antenna array; Particle Swarm Optimization (PSO); Multiple-pattern array; Pattern synthesis; Mutual coupling

1 引言

鲜明的形象和特殊的使命使阵列天线成为现代雷达、通信系统的重要组成部分^[1]。而日益复杂的多功能的电子设备需要不同辐射特性的多副阵列天线来支持, 这必将增加天线的研制成本和载体的负荷。基于相控阵体制的发射阵列能够在保持天线各阵元馈电幅度不变的情况下, 仅仅通过改变阵元激励相位即完成对阵列的多方向图重构^[2,3], 为缓解上述矛盾提供了有效途径。共形天线阵列作为更加广义的

阵列天线形式, 其表面与载体表面相贴合^[4], 突破了传统平面阵列拓扑结构限制, 其较传统平面阵列不仅可以增加口径面积、扩展扫描角度范围, 而且不会影响载体本身的外形设计, 已日益得到重视^[4-8]。多方向图共形天线阵通过设计可以同时兼备“一阵多用”和“载体共形”的优点, 极大地节省了天线研发成本和安装空间, 因此具备更加广阔的应用前景^[9]。

对于共形阵列, 其单元电流(或极化)的取向各异, 此不但使阵元不再具有相同的方向图形状以及最大值指向, 更造成了共形阵的辐射由各阵元对远区观察方向的单一极化标量和升级为各极化矢量贡

2011-11-14 收到, 2011-12-29 改回

*通信作者: 赵菲 bitzhaofei@163.com

文献的几何和, 这给共形阵列的综合带来了困难。而基于进化机制的优化算法为该问题的解决提供了可能: 模拟退火算法(SM)^[10]、遗传算法(GA)^[11]以及粒子群优化算法(PSO)^[12-14]均已被较好地用来综合共形阵列。Díaz 等人^[2]利用模拟退火算法, 仅通过优化阵元激励相位实现可以重构双方向图的平面阵列; Durr 等人^[3]采用 Woodward-Lawson 综合方法实现了平面阵列的三重方向图的重构; 关于多方向图共形阵列设计的研究目前出现的文献较少, 李文涛等^[9]采用增强粒子群算法, 完成了具备笔形波束和平顶波束辐射能力的 9 元扇形共形天线阵列设计, 获得了满意的效果。

现有的绝大部分有关共形阵列方向图综合的文献^[9-14], 均以柱面共形阵列为模型, 其所有阵元极化方向一致垂直于阵列赤道面, 综合过程未涉及共形阵辐射特性矢量叠加的难点, 致使该类共形阵列模型沦为: “退化共形阵”。本文针对实际工作条件下多方向图共形阵列的综合目标, 引入基于多子群协同优化体制的 Meta-PSO^[15, 16](MPSO)算法, 并在此算法基础上提出一种新的自适应动态 Meta-PSO(ADMPSO)算法, 其通过引入非优子群规模收缩、优势子群膨胀、以及惯性权重自适应更新等机制, 实现了各子群的自适应动态调整, 显著提高了收敛速度。该算法成功用于 12 元背腔层叠微带锥面共形阵列非赤道面的多方向图综合, 利用数值仿真得到的各阵元有源方向图, 实现了在考虑阵元互耦和激励幅度约束情况下的笔形波束、平顶波束和余割平方波束的三重方向图重构, 综合过程严格考虑了共形载体上各阵元所有极化分量的贡献。

2 锥面共形阵列模型

构建共形阵列电磁模型, 用以进行实际工作条件下共形阵多方向图综合算法的研究。其包括阵列单元设计、阵列结构设计以及基于阵列信息的目标函数建模。

2.1 阵列单元模型

阵列单元采用具有低剖面、低增益适宜于构建共形阵列的微带天线, 用叠层贴片技术以扩展工作带宽, 采用背腔结构提高表面波抑制制度, 以减弱天线口径场受高次模的不规则扰动。

经过优化设计, 双层背腔微带天线结构如图 1 所示, 下层贴片为 25 mm×28.5 mm, 由同轴探针直接馈电; 上层贴片为 24 mm×27.5 mm, 属寄生贴片, 通过一定厚度的介质层与下层贴片相耦合; 同轴馈线在 x 方向下层贴片中心位置, y 方向(极化方向)距离贴片中心 11 mm; 上、下层基板分别厚

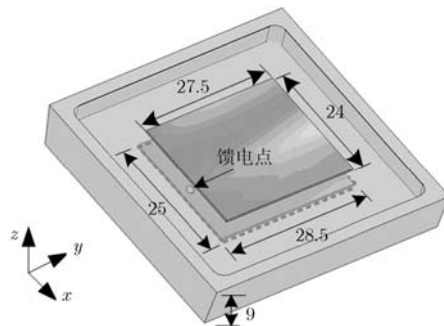


图 1 天线结构图(mm)

3.93 mm 和 2.93 mm, 相对介电常数均为 2.55; 金属背腔内壁边长 45 mm, 壁厚 2.5 mm, 整个天线厚度不到 9.5 mm。

通过全波数值优化设计, 天线中心工作频率为 3 GHz, 电压驻波比 $VSWR \leq 2$, 阻抗带宽大于 10% (2.82-3.14 GHz); 3 dB 增益带宽达到 19.3% (2.61-3.19 GHz), 带内最大增益仅为 6.7 dB。该天线单元具备了低剖面、宽频带以及低增益的特征, 适合用于构建共形阵列。

2.2 共形阵列构建

以双层背腔微带天线为阵元, 构建的 12 元锥面共形阵列如图 2 所示, 锥面载体中心半径 R 为 573 mm, 锥面底角为 60° , 取阵元中心弧长间距为 50 mm(半个中心频点空间波长)、角度间隔为 5° , 阵列二面张角为 70° , 从右至左阵元依次编号为 1~12, 阵列两边各保留一个阵元尺度的金属边沿, 以减少载体边沿绕射对边缘阵元的影响。以阵列口径面中心点 o 为全局坐标系原点, 确定全局坐标系 $o-xyz$, 各阵元主极化方向沿锥面母线方向。

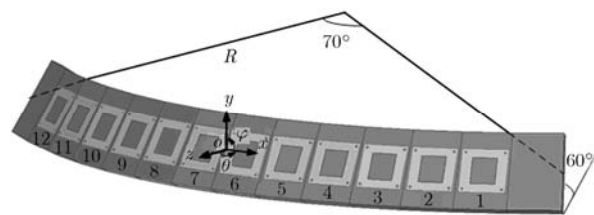


图 2 12 元锥面共形阵列模型

2.3 定义目标函数

由图 2 可知, 各阵元经旋转和极化变换后的 φ 向极化和 θ 向极化的场方向图分别为 $f_{\varphi_i}(\theta, \varphi)$ 和 $f_{\theta_i}(\theta, \varphi)$, 单元位置坐标为 $x_i = R \sin \theta_i$, $z_i = R \cos \theta_i - R$ 。再由方向图叠加原理可得此锥面共形阵列的总场为

$$\begin{aligned}
F(\theta, \varphi) &= \sum_i w_i \left[f_{\varphi_i}(\theta, \varphi) \hat{\varphi} + f_{\theta_i}(\theta, \varphi) \hat{\theta} \right] \\
&\quad \cdot e^{jk(x_i \sin \theta \cos \varphi + z_i \cos \theta)} \\
&= \sum_i w_i \left[\left(f_{\varphi_i}(\theta, \varphi) \hat{\varphi} + f_{\theta_i}(\theta, \varphi) \hat{\theta} \right) \right] \\
&\quad \cdot e^{jk(R \sin \theta_i \sin \theta \cos \varphi + (R \cos \theta_i - R) \cos \theta)} \\
&= \sum_i w_i \left[\left(\tilde{f}_{\varphi_i}(\theta, \varphi) \hat{\varphi} + \tilde{f}_{\theta_i}(\theta, \varphi) \hat{\theta} \right) \right] \quad (1)
\end{aligned}$$

式中 w_i 为阵元激励系数, $\tilde{f}_{\varphi_i}(\theta, \varphi)$ 和 $\tilde{f}_{\theta_i}(\theta, \varphi)$ 分别定义为两个极化方向的广义阵元方向图^[17], 其不但包含了阵元本身方向图的幅相信息, 还计入了阵元空间位置相移贡献, 可直接用来叠加阵列总场。 $\hat{\varphi}$, $\hat{\theta}$ 分别为 φ 和 θ 向的单位矢量。共形阵列总功率方向图表示为

$$\begin{aligned}
G(\theta, \varphi) &= |F(\theta, \varphi)|^2 \\
&= \left| \sum_i w_i \left(\tilde{f}_{\varphi_i}(\theta, \varphi) \hat{\varphi} + \tilde{f}_{\theta_i}(\theta, \varphi) \hat{\theta} \right) \right|^2 \\
&= \left| \sum_i w_i \tilde{f}_{\varphi_i}(\theta, \varphi) \right|^2 + \left| \sum_i w_i \tilde{f}_{\theta_i}(\theta, \varphi) \right|^2 \quad (2)
\end{aligned}$$

借助 Ansoft HFSS V.13 建立阵列模型进行全波数值计算, 分别获取各个阵元在中心工作频率 3 GHz 处于阵列环境中的全极化广义有源方向图。该共形阵列设计的目标是在保持各个阵元馈电幅度不变的情况下, 仅仅靠改变馈电相位即分别获得: 笔形波束、平顶波束以及余割平方波束 3 类功率方向图。因此该设计目标的适应度函数定义为

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{P_s} \text{ERR}_{ij}(\theta, \varphi) \quad (3)$$

式(3)中, N_p 为阵列可重构的方向图数, 在本文中该值取 3, P_s 为阵列方向图的空间采样点数, $\text{ERR}_{ij}(\theta, \varphi)$ 表征对于第 i 个方向图综合目标, 实际阵列方向图在第 j 个空间采样点上的误差, 具体表示为

$$\text{ERR}_{ij}(\theta, \varphi) = \begin{cases} 0, & M_{Lij}(\theta, \varphi) \leq \sqrt{G_j(\theta, \varphi)} \leq M_{Uij}(\theta, \varphi) \\ \sqrt{G_j(\theta, \varphi)} - M_{Uij}(\theta, \varphi), & \sqrt{G_j(\theta, \varphi)} > M_{Uij}(\theta, \varphi) \\ M_{Lij}(\theta, \varphi) - \sqrt{G_j(\theta, \varphi)}, & \sqrt{G_j(\theta, \varphi)} < M_{Lij}(\theta, \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $M_{Lij}(\theta, \varphi)$ 与 $M_{Uij}(\theta, \varphi)$ 分别为第 i 个方向图综合目标在第 j 个空间采样点上的上边界和下边界值。

3 方法介绍

PSO 算法程序实现简单, 运行速度迅捷, 性能稳健, 近来广泛用于阵列天线的综合中。由 Selleri

等人^[16]于 2006 年提出的 MPSO 算法便是针对其的成功改进算法之一, 其将传统单一粒子群分解为多个子群, 每个粒子被标记为隶属于第 $j=1, \dots, N_s$ 个子群的 $i=1, \dots, N_{pj}$ 号粒子, 于是各粒子的位置向量和速度向量分别为 $\mathbf{X}_{j,i}=(x_{j,i,1}, x_{j,i,2}, \dots, x_{j,i,D})$ 与 $\mathbf{V}_{j,i}=(v_{j,i,1}, v_{j,i,2}, \dots, v_{j,i,D})$, 其中 D 为待优化问题的维数。粒子的位置对应于目标适应度函数值, 粒子的速度和位置的迭代更新公式^[15, 16]由式(5), 式(6)决定:

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}_{j,i}^{(k+1)} &= a_{j,i}^{(k+1)} \mathbf{V}_{j,i}^{(k)} + c_1 \eta_1 (\mathbf{P}_{j,i} - \mathbf{X}_{j,i}^{(k)}) \\
&\quad + c_2 \eta_2 (\mathbf{S}_j - \mathbf{X}_{j,i}^{(k)}) + c_3 \eta_3 (\mathbf{G} - \mathbf{X}_{j,i}^{(k)}) \\
&\quad - \sum_{s \neq j}^{N_s} c_4 \eta_4 \frac{\mathbf{B}_j^{(k)} - \mathbf{X}_{j,i}^{(k)}}{\left| \mathbf{B}_j^{(k)} - \mathbf{X}_{j,i}^{(k)} \right|^2} \quad (5)
\end{aligned}$$

$$\mathbf{X}_{j,i}^{(k+1)} = \mathbf{X}_{j,i}^{(k)} + \mathbf{V}_{j,i}^{(k+1)} \quad (6)$$

式中, 上标 k 代表粒子处于第 k 次迭代更新中, $a_{j,i}$ 为粒子自身惯性权重, $\mathbf{P}_{j,i}$, \mathbf{S}_j 以及 \mathbf{G} 分别为粒子个体历史最优、子群历史最优和全局历史最优位置, c_1 , c_2 和 c_3 为对应上述最优位置的学习因子, c_4 为群间排斥因子, 用来维持子群间的散布状态以提高算法的全局寻优特性, η_1 , η_2 , η_3 和 η_4 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数, \mathbf{B}_j 对应于子群的中心位置, 具体定义如下:

$$\mathbf{B}_j = \frac{1}{N_{pj}} \sum_{i=1}^{N_{pj}} \mathbf{X}_{j,i}^{(k)} \quad (7)$$

由式(5)可知, 不同于传统 PSO 算法, MPSO 算法中粒子的迭代更新将由 5 个因素共同作用。虽然 MPSO 较基本 PSO(BPSO)算法已在全局搜索能力和收敛速度方面已有了显著改善, 尤其在迭代初期, 全局最优粒子随机交替出现于各个子群之间, 表现出算法良好的全局寻优性能, 但是算法在进入迭代中期后, 全局最优粒子基本稳定与某一子群中, 及少转入其他子群, 这表明该子群已经进入局部寻优阶段, 由于 MPSO 算法中含有群间排斥因素, 因此其他子群少有机会参与该子群的局部寻优过程, 却依然占有大部分的计算资源, 这不利于算法的高效运行。鉴于上述情况, 本文在 MPSO 基础上提出一种改进的 ADMPSO 算法, 即继承了 MPSO 算法的优良全局寻优特性, 又高效地利用了计算资源, 下面将分述各项改进措施。

3.1 非优势子群规模裁减

基于多子群机制 ADMPSO 算法的优化过程, 类似于资金开支受限情况下, 多团队同时完成某项作业。作业初期, 各个团队均分配给同样的资源, 一段时间后, 为了降低开支, 就要对业绩非优团队的不良个体进行裁员缩编。对于 ADMPSO 算法,

评价各个子群“业绩”优良的标准为“最优原则”，即定义存在全局最优粒子的子群为优势子群，其它子群则为非优势子群；而目标适应度函数值无疑是衡量子群内粒子优劣的尺度。

在每次迭代过程中，首先要根据全局最优粒子的子群隶属关系筛选出非优势子群，其次对各非优势子群中的粒子分别在群内按照目标适应度函数值大小进行排序，最后泯灭掉各非优势子群中“最劣”粒子，使其群粒子成员数目减1。整个优化迭代过程中，若不加干预，非优势子群粒子成员会持续裁减而导致该子群最终消亡，这有损于算法的全局寻优性能，为防止这一情况的出现，要限定子群最大裁减尺度，定义尺度因子 ζ 为

$$\zeta = \frac{N_{p_min}}{N_{p_ini}} \quad (8)$$

式(8)中， N_{p_min} 和 N_{p_ini} 分别为子群最小保留粒子数和子群初始粒子数。数值试验验证，当 ζ 取0.7~0.9时，算法能达到稳健优良的性能。

3.2 优势子群规模膨胀

上节描述的非优势子群裁减措施，集中反应了ADMP SO算法运行过程中的“惩罚”效应；与之相反，本节采取的优势子群膨胀行为，则是算法“褒奖”措施的具体体现。

在实际作业中，对业绩不佳团队实行裁减后所节省的开支可以用来扩充业绩最佳团队，并鼓励该团队涌现更多的类最优个体，以刺激创造更好业绩。受这一思想启发，ADMP SO算法对优势粒子群进行适当的规模扩张，对该群中的全局最优粒子进行“微扰复制”操作，即在全局最优粒子位置附近产生出一定数量的新生粒子，这样可以有效提高该粒子群在当前最优值附近的局部寻优能力，从而加速整体算法的收敛。新生粒子位置和速度定义如下：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}^{new} &= \mathbf{G} + \sigma(\mathbf{X}_{max} - \mathbf{X}_{min})\mathbf{N}(0,1) \\ \mathbf{V}^{new} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)中 σ 为微扰因子，一般取0.05~0.2， \mathbf{X}_{max} 和 \mathbf{X}_{min} 分别为粒子各维度变量的上限和下限， $\mathbf{N}(0,1)$ 为 D 维标准正态分布随机向量。每次迭代过程中优势子群新生粒子的个数等于所有非优势子群泯灭粒子的个数之和，通过限定子群尺度因子 ζ 及子群数目，便可以控制每次新生粒子的个数，如此ADMP SO算法在维持粒子总数不变的情况下，通过各子群之间的自适应动态规模调整，同时兼备了良好的全局和局部寻优能力。

3.3 自适应惯性权重更新

众所周知，较大的粒子惯性权重能增强算法的全局寻优能力，而较小的权重则侧重强化算法的局

部搜索能力，为了进一步完善算法的智能化程度，在粒子迭代更新中引入基于各子群的时变“自适应惯性权重”，其 $k+1$ 次迭代时第 j 子群中粒子 i 的惯性权重描述如式(10)：

$$a_{j,i}^{(k+1)} = \begin{cases} a_{min} + \frac{(a_{max} - a_{min})(fitness(\mathbf{X}_{j,i}^{(k)}) - fitness_{min j}^{(k)})}{(fitness_{avg j}^{(k)} - fitness_{avg j}^{(k)})}, & fitness(\mathbf{X}_{j,i}^{(k)}) \leq fitness_{avg j}^{(k)} \\ a_{max}, & fitness(\mathbf{X}_{j,i}^{(k)}) > fitness_{avg j}^{(k)} \end{cases} \quad (10)$$

其中 a_{max} 、 a_{min} 分别表示权重能取到的最大值和最小值， $fitness_{min j}^{(k)}$ 和 $fitness_{avg j}^{(k)}$ 分别表示当前子群 j 中所有粒子最小目标适应度函数值和平均值。此时的惯性权重随着粒子的适应度函数值而自动改变，呈现出自适应特性：当粒子的适应度值趋于一致或者趋于局部最优时，惯性权重将增大，而子群中各粒子的适应度值较分散时，将使惯性权重减小，同时目标函数值优于平均适应度值的粒子对应小的权重，从而保护了该粒子，反之差于平均适应度值的粒子拥有大的权重，使得该粒子加速向较好的搜索区域靠拢。

最后，为更清晰地描述ADMP SO算法执行机理，将其算法流程描述如下：

步骤1 初始化粒子种群：按照粒子总数平均划分出各个子群，各粒子初始位置在自变量定义域中随机产生，初始速度均为0。

步骤2 由式(7)计算各个子群的中心位置，并由式(10)计算各个粒子的自适应惯性权重，再根据式(5)，式(6)进行新一代粒子位置和速度的更新，同时对更新粒子的位置进行边界判断和规范。

步骤3 计算各个粒子的适应度值，更新粒子个体最优位置 $\mathbf{P}_{j,i}$ ，再通过子群中最优 $\mathbf{P}_{j,i}$ 获得子群最优位置 \mathbf{S}_j ，最后将最优 \mathbf{S}_j 定义为全局最优位置 \mathbf{G} 。

步骤4 通过 \mathbf{G} 确定优势子群和非优势子群，由式(8)判断各非优势子群当前规模是否低于最大裁减尺度，若没有，则泯灭掉该子群中目标适应度函数值最小的粒子；若低于，则不进行该子群的裁减操作。

步骤5 计算当前各非优势子群裁减粒子总数，并按照此数目由式(9)对优势子群的 \mathbf{G} 进行“微扰复制”，扩展优势子群规模。

步骤6 重复步骤2~步骤5，直至待优化问题满足性能要求或者达到最大迭代次数，输出最优结果。

4 计算结果

本节将采用 ADMP SO 算法对图 2 所示的 12 元锥面共形阵列在 $\varphi=30^\circ$ 面进行多重功率方向图设计。该共形阵列所要产生的多方向图要求如下: 1) 笔形波束: 波束指向 0° , 副瓣电平低于 -20 dB; 2) 平顶波束: 3 dB 波束宽度为 58° , 副瓣电平低于 -20 dB; 3) 余割平方波束: 主波束由 5° 到 20° 满足 cosec^2 分布规律, 副瓣电平低于 -20 dB。显然, 以上 3 个方向图的实现难度依次递增, 同时, 为了兼顾阵列工程可实现性, 限制各阵元最小比最大激励幅度须大于 0.25。

由于形成 3 个方向图需要阵列具有共同的激励幅度和不同的激励相位, 对于该共形阵列, 需要完成 48 维变量的优化设计。为了便于对比 ADMP SO 算法在该类高维变量优化问题中的优越性, 同时采用 MP SO 和 BP SO 算法参与该多方向图共形阵列的优化设计。3 种算法的迭代次数为 1000, 粒子群规模为 72。对于 BP SO, 惯性权重选为 0.8, 个体学习因子和全局学习因子均为 2; 对于 ADMP SO 和 MP SO, 子群个数 $N_s=4$, 学习因子 $c_1=1, c_2=2, c_3=1$; 对于 ADMP SO, 惯性权重 $a_{\max}=0.6, a_{\min}=0.3$, 子群尺度因子 $\zeta=0.85$ 。

3 种算法优化得到的多方向图如图 3 所示, 表 1 同时给出了各算法综合方向图相比于预期目标的具体性能, 其中 BP SO 算法优化得到的 3 个方向图均出现了较为严重的恶化: 主波束畸变严重, 最大副瓣电平明显高于 -20 dB, 且赋型波束均有较为严重的展宽; MP SO 算法对笔形波束和平顶波束方向图的综合效果略优于 BP SO, 部分指标已经达到了目标要求; ADMP SO 算法对 3 个方向图的优化结果, 无论是最大副瓣电平压制还是赋型区域的波束控制, 均完全符合设计目标。表 2 给出了由 ADMP SO 算法得到的各阵元激励幅相值, 可以看出阵元激励幅度的动态范围满足了预期限制。将综合得到的阵元激励信息代入到 HFSS 中对整个阵列的全波数值仿真, 其得到的结果与 ADMP SO 优化结果同时绘于图 4 中, 可以发现由于优化过程使用了由全波数值方法得到的完备阵元广义有源方向图信息, 其优化的多阵列方向图与全波阵列仿真结果完全重合, 这验证了该多方向图综合算法的可信度。

为了进一步准确评估 ADMP SO 算法在该多方向图共形阵列设计上的性能表现, 将 ADMP SO, MP SO 以及 BP SO 3 种算法分别独立运行 50 次后, 其得到的平均适应度函数值随迭代次数的收敛曲线

表 1 综合方向图性能

评估指标		ADMP SO	MP SO	BP SO
笔形波束	波束宽度	满足要求	展宽 3°	展宽 9°
	最大副瓣	满足要求	满足要求	高 1.7 dB
平顶波束	波束宽度	满足要求	展宽 4°	展宽 13°
	最大副瓣	满足要求	高 0.1 dB	高 4.6 dB
cosec^2 波束	波束宽度	满足要求	满足要求	展宽 4°
	最大副瓣	满足要求	高 0.1 dB	高 5.5 dB

表 2 阵元激励系数

阵元	公共激励幅度	笔形波束激励相位 ($^\circ$)	平顶波束激励相位 ($^\circ$)	cosec^2 波束激励相位 ($^\circ$)
1	0.2983	-136.7268	-46.3372	-78.2794
2	0.2500	146.5961	-70.0522	-155.6331
3	0.4664	80.1166	-42.2408	169.5079
4	0.6967	38.5890	-47.6444	67.4954
5	0.6683	0.1230	-43.1304	43.6751
6	0.8423	14.7470	5.2268	42.5578
7	1.0000	-24.4467	6.4078	57.8750
8	0.9316	26.3435	-4.7607	93.9533
9	0.9972	16.9275	-24.2634	133.2441
10	0.6878	95.7517	-23.5006	-141.0435
11	0.4324	137.6585	-3.9418	-107.8929
12	0.4347	-152.2198	-36.7159	54.8432

如图 5 所示, 表 3 同时列出了 3 种算法优化结果经统计得到的最大、平均、最小适应度值。由分析, ADMP SO 和 MP SO 算法的收敛速度明显快于 BP SO 算法, 这主要得益于多子群算法优越的全局寻优能力。相比于 MP SO 算法, 由于 ADMP SO 算法采用了子群自适应动态调整措施, 因此其在保持快速收敛性能的基础上, 进一步提高了算法本身的局部搜索能力, 使其收敛于更优的结果。

5 结论

本文基于实际共形阵列的电磁全波数值仿真,

表 3 3 种算法经 50 次独立计算所得目标适应度函数的最大值、最小值和平均值

算法	最大适应度值	平均适应度值	最小适应度值
BP SO	71.227114	40.91627	18.216294
MP SO	31.163471	4.63112	0.8669824
ADMP SO	7.8003354	1.79758	0.1841305

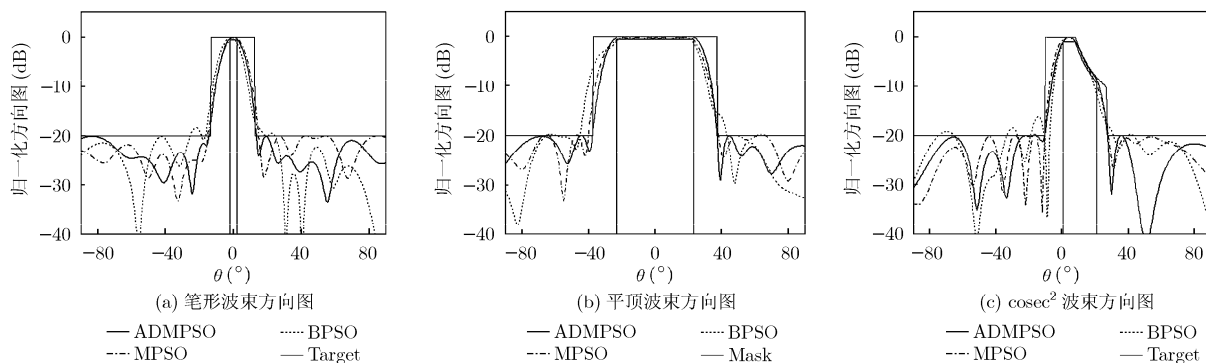
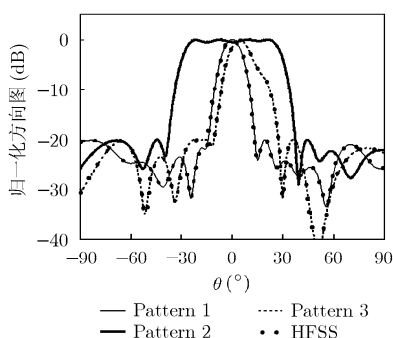
图 3 共形阵列在 $\varphi=30^\circ$ 形成的多方向图

图 4 ADMPSO 综合结果与 HFSS 全波数值仿真结果对比

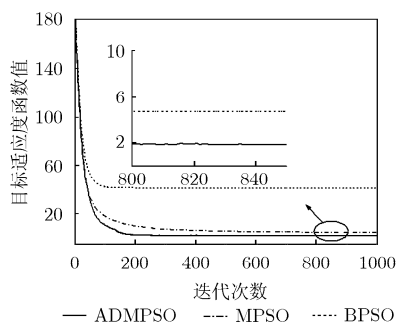


图 5 目标适应度函数值随迭代次数变化曲线

对多方向图共形阵列设计进行了研究。首先，利用阵元广义有源方向图建立了适用于多方向图综合问题的通用目标适应度函数；其次，提出了用于解决该类问题的 ADMPSO 高效优化算法：算法定义了优势子群和非优势子群的概念，并通过植入非优势子群裁减、优势子群规模扩张以及惯性权重自适应更新机制，实现了多子群自适应动态调整的自组织行为，进一步提高了原 MPSO 算法的寻优性能和收敛速度；最后，采用 ADMPSO 算法成功完成了 12 元层叠微带锥面共形阵列在非赤道面的多方向图设计，综合过程考虑了阵元各个极化场的矢量贡献，其在阵元公共激励幅度动态范围受约束情况下，同时实现了笔形波束、平顶波束以及余割平方波束方向图，且设计结果与整体阵列全波仿真结果完全吻合。本文的设计方法可以扩展应用于任意阵列的多方向图重构设计，同时多方向图共形阵列作为阵列理论和技术发展到一定阶段的必然产物，其本身便具有广阔的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] 束咸荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-2.
Shu Xian-rong, He Bing-fa, and Gao Tie. Phased Array Radar Antenna[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 1-2.
- [2] Díaz X, Rodríguez 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] Durr M, Trastoy A, and Ares F. Multiple-pattern linear antenna arrays with single prefixed amplitude distributions: modified Woodward-Lawson synthesis[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(16): 1345-1346.
- [4] Josefsson L and Persson P. Conformal Array Antenna Theory and Design[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 2006: 1-4.
- [5] He Q Q, Wang B Z, and Shao W. Radiation pattern calculation for arbitrary conformal arrays that include mutual-coupling effects[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2010, 52(2): 57-63.
- [6] Yang X S, Qian H, Wang B Z, et al. Radiation pattern computation of pyramidal conformal antenna array with active-element pattern technique[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2011, 53(1): 28-37.
- [7] 张光义. 共形相控阵天线的应用与关键技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 331-336.
Zhang G Y. Applications and key technologies of conformal phased array antenna[J]. *Journal of China Academy of Electronics & Information Technology*, 2010, 5(4): 331-336.
- [8] 张玉洁, 龚书喜, 王文涛, 等. 非规则曲面共形阵列的优化设

- 计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2226-2230.
- Zhang Y J, Gong S X, Wang W T, *et al.*. Optimization design of conformal array on an irregular curved surface[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2226-2230.
- [9] 李文涛, 黑永强, 史小卫. 增强粒子群优化算法设计共形可重构天线阵[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 477-484.
- Li W T, Hei Y Q, and Shi X W. Enhanced particle swarm optimization algorithm for conformal reconfigurable array[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 25(3): 477-484.
- [10] Ferreira J A and Ares F. Pattern synthesis of conformal arrays by the simulated annealing technique[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(14): 1187-1189.
- [11] Allard R J, Werner D H, and Werner P L. Radiation pattern synthesis for arrays of conformal antennas mounted on arbitrarily-shaped three-dimensional platforms using genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(5): 1054-1062.
- [12] Boeringer D W and Werner D H. Efficiency-constrained particle swarm optimization of a modified Bernstein polynomial for conformal array excitation amplitude synthesis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(8): 2662-2673.
- [13] Wang W B, Feng Q Y, and Liu D. Application of chaotic particle swarm optimization algorithm to pattern synthesis of antenna arrays[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 115: 173-189.
- [14] Li W T, Hei Y Q, and Shi X W. Pattern synthesis of conformal arrays by a modified particle swarm optimization[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 117: 237-252.
- [15] Selleri S, Mussetta M, Pirinoli P, *et al.*. Some insight over new variations of the particle swarm optimization method[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, 5: 235-238.
- [16] Selleri S, Mussetta M, Pirinoli P, *et al.*. Differentiated Meta-PSO methods for array optimization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(1): 67-75.
- [17] Zhao F, Xiao K, Qi H Y, *et al.*. Preconditioned alternate projections method to synthesise conformal array[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(13): 735-736.
- 赵菲: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为共形相控阵理论与技术、微波电路与系统.
- 齐会颖: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为微带天线理论、共形天线阵列技术.
- 邱磊: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为阵列天线理论、电磁超材料理论与应用.
- 柴舜连: 男, 1969年生, 教授, 主要研究方向为目标与环境特性、微带天线和共形阵等.
- 毛钧杰: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 电子学会高级会员, 研究方向为电磁场与微波技术、毫米波技术、微带天线等.