

# 圆柱共形阵天线赋形方向图的混合粒子群优化算法

高明泉,张小苗,魏红波

(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)

**摘要:**将遗传算法(GA)中的排序选择策略和交叉操作引入到粒子群优化(PSO)算法中形成混合粒子群优化(HPSO)算法,用该算法对一副具有方向性单元的共形阵天线(CPAA)进行综合,得到与期望方向图接近的平顶赋形方向图。

**关键词:**混合粒子群优化算法;遗传算法;方向性单元;共形阵天线

中图分类号:TN821

文献标识码:B

文章编号:1004-373X(2006)增刊-340-03

## 1 引言

与平面相控阵天线相(PAA)比,共形相控阵天线(CPAA)可以与载体具有相同的气动外形而具有更好的空气动力学性能和更大的空间扫描范围,被广泛地应用于车载、机载以及舰载等移动卫星通信系统及雷达系统中,并在未来的个人移动通信系统和无线局域网络系统中有潜在的应用前景。

为提高雷达系统的抗干扰能力和解决特定区域的通信问题,要求CPAA具有波束赋形能力,这就需要完成CPAA的方向图综合,属于复杂的高维非线性优化问题。综合PAA的经典方法如Taylor方法,Fourier变换法和Wood方法<sup>[1]</sup>显得无能为力,基于解析的优化方法如共轭梯度法等也不太有效,而基于随机搜索的优化方法,如模拟退火法(SA)、遗传算法(GA)和粒子群优化算法(PSO)则以其较强的全局搜索能力已应用于PAA综合<sup>[2-4]</sup>。文献[4]使用基本PSO算法综合圆柱共形阵的低副瓣方向图,其中阵列单元取为点源形式,为减少优化变量的个数引入Bernstein多项式,得到-30dB的低副瓣,完成方向图的扫描,但是Bernstein多项式是单峰值函数,因此只能优化锐波束方向图。

基本PSO算法在算法早期有着收敛快的特点,但也存在着精度较低等缺点,其改进主要集中在两个方面:一方面是根据PSO算法的特点改进,如:为加快收敛速度引入修正惯性权重和收敛因子,为避免收敛到局部最优采用新的速度和位置更新公式,为加快信息流动采取不同的粒子群体组织形式等;另一方面是结合其他进化算法形成混合算法,如:为增强搜索能力而引入自然选择机制,为增加搜索空间对粒子进行GA的交叉和变异操作等。

本文首先将GA的排序选择策略和交叉操作引入基本PSO算法,形成一种混合PSO(HPSO)算法,使用HPSO算法对分别采用振子型和微带型辐射单元的CPAA的

方位面波束进行赋形。优化结果表明,与实数编码的GA综合CPAA的结果相比,HPSO算法的效率更高,综合的方向图副瓣更低。

## 2 HPSO 算法

PSO算法是一种全新的仿生优化算法<sup>[5]</sup>。他主要基于如下公式:

$$V^i = w \cdot V^i + c_1 \cdot \text{rand}_1() \cdot (P_{\text{best}}^i - X^i) + c_2 \cdot \text{rand}_2() \cdot (G_{\text{best}} - X^i) \quad (1)$$

$$X^i = X^i + V^i \quad (2)$$

式中  $X^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i)$  和  $V^i = (v_1^i, v_2^i, \dots, v_N^i)$  表示第  $i$  个粒子的位置和飞行速度,  $P_{\text{best}}^i = (p_1^i, p_2^i, \dots, p_N^i)$  表示粒子  $i$  自身经历的最好位置,称为局部最优;所有粒子经历过的最好位置用  $G_{\text{best}} = (g_1, g_2, \dots, g_N)$  表示,称为全局最优。 $w$  为惯性权重,  $c_1$  和  $c_2$  为加速常数,  $\text{rand}_1()$  和  $\text{rand}_2()$  为两个在  $[0, 1]$  范围内变化的随机数。式(1)的第一部分是粒子先前的速度,平衡全局和局部搜索能力;第二部分为“认知”部分,表示粒子本身的思考,使粒子有足够的全局搜索能力,避免局部极小;第三部分为“社会”部分,表示微粒间的信息共享与相互合作,体现粒子之间信息的共享。这 3 个部分共同决定了粒子的空间搜索能力,使粒子能有效地到达最好位置。

本文将GA的排序选择策略和交叉操作引入到PSO算法中,得到HPSO算法。排序选择的具体过程是:首先对粒子进行PSO操作,对产生的新粒子按相邻交叉的规则进行交叉操作,交叉产生的粒子不取代PSO操作产生的粒子,然后将PSO产生的和PSO-GA操作产生的粒子与前一代的粒子混合,形成规模三倍于前代的粒子群;计算粒子的适应度,将其按照适应度从优到差进行排序,按顺序选取与原始群规模相同的较优的粒子组成新一代的粒子群。排序选择策略一方面保证适应度高的粒子在算法运算过程中不会丢失,另一方面保证上一代粒子的信息也可以参与新粒子的竞争。

引入PSO算法中的交叉操作基于如下公式:

$$\begin{cases} X^i = \text{cross} \cdot X^i + (1 - \text{cross}) \cdot X^{i+1} \\ X^{i+1} = \text{cross} \cdot X^{i+1} + (1 - \text{cross}) \cdot X^i \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} V^i = \frac{V^i + V^{i+1}}{|V^i + V^{i+1}|} \cdot V^i, \\ V^{i+1} = \frac{V^i + V^{i+1}}{|V^i + V^{i+1}|} \cdot V^{i+1} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $X^i$  和  $X^{i+1}$  是相邻的两个粒子;  $V^i$  和  $V^{i+1}$  分别是  $X^i$  和  $X^{i+1}$  对应的速度向量;  $\text{cross}$  是均匀分布在  $[0, 1]$  内的随机数。

对于粒子的位置和速度的越界问题采用阻尼反射边界条件处理:若位置粒子  $x_d^i > x_{\max}$ , 则  $x_d^i = x_{\max} + \Gamma \cdot \text{rand}() \cdot (x_d^i - x_{\max})$ ; 若速度粒子  $v_d^i > v_{\max}$ , 则  $v_d^i = v_{\max} + \Gamma \cdot \text{rand}() \cdot (v_d^i - v_{\max})$ ; 其中,  $x_d^i$  和  $v_d^i$  分别为位置粒子  $i$  的第  $d$  维,  $x_{\max}$  和  $v_{\max}$  分别为位置和速度的最大值;  $\Gamma$  为阻尼反射系数, 文中取  $\Gamma = -0.5$ 。

最终得到的 HPSO 算法步骤如下:

步骤 1: 初始粒子的位置、速度, 计算粒子的适应度; 计算全局最优和局部最优;

步骤 2: 根据公式(1)、(2)分别更新粒子群中的所有粒子的速度和位置;

步骤 3: 对新粒子根据公式(3)、(4)进行交叉操作, 混入前一代粒子, 形成三倍于原始群大小的新粒子群;

步骤 4: 计算粒子的适应度, 将粒子按照其适应度从优到差进行排序, 根据适应度选取与原始群规模相同的粒子组成新的粒子群, 更新全局最优和局部最优;

步骤 5: 如果算法达到最大迭代次数, 输出全局最优, 算法结束; 否则执行步骤 2。

### 3 采用方向性单元的 CPAA 的远场方向图

与圆柱共形的天线阵如图 1 所示。

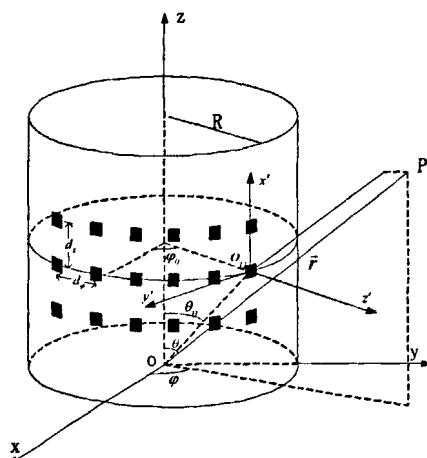


图 1 圆柱 CPAA 坐标示意图

圆柱半径为  $R$ ,  $M \times N$  的矩形栅格天线阵沿周向和  $z$  轴方向的间距分别为  $d_\theta$  和  $d_z$ , 单元具有方向性。远区任意一点  $P$  在总坐标系下的方向为  $(\theta, \varphi)$ , 经过坐标变换, 在局

部坐标系下的方向为  $(\theta', \varphi')$ <sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} \theta' = \cos^{-1}[\sin \theta \cos(\varphi_i - \varphi)] \\ \varphi' = \tan^{-1}[\frac{\sin \theta \sin(\varphi_i - \varphi)}{\cos \theta}] \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\varphi_i$  是单元  $(i, j)$  在总体坐标下的  $\varphi$  坐标。以总坐标系原点  $o$  为参考点, 阵列的总辐射场为<sup>[6]</sup>:

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = C \frac{e^{-jk_r}}{4\pi r} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} \vec{f}_{ij}(\theta, \varphi) e^{jk_r(\sin \theta \cos(\varphi - \varphi_i) + x_i \cos \theta)} \quad (6)$$

式中,  $C$  是常数;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\lambda$  为工作波长,  $\vec{f}_{ij}(\theta, \varphi)$  为单元  $(i, j)$  的矢量方向图;  $a_{ij}$  为复激励系数。

对于具有底板的对称振子单元, 其局部坐标系下的方向图函数<sup>[7]</sup>为:

$$f_{ij}(\theta', \varphi') = \frac{\cos(kl \sin \theta' \cos \varphi') - \cos kl}{\sqrt{1 - (\sin \theta' \cos \varphi')^2}} \cdot \sin(kH \cos \theta') \quad (7)$$

式中,  $l$  是对称振子的长度;  $H$  是对称振子距离底板的高度;  $\sin(kH \cos \theta')$  是等效二元阵的阵因子, 文中采用的是半波对称振子;  $H = 0.25\lambda$ , 其  $H$  面的半功率波瓣宽度 (HPBW) 为  $120^\circ$ 。需要注意的是, 由于 CPAA 弧面的影响, 对称振子单元的相位中心在其中心下方  $0.2 H$  处<sup>[8]</sup>, 这相当于圆弧的半径增加了  $0.8H$ 。

对于微带贴片单元, 其局部坐标系下的方向图函数<sup>[9]</sup>为:

$$f_{ij}(\theta', \varphi') = \cos \theta' \cos \left( \frac{kL}{2} \sin \theta' \cos \varphi' \right) \cdot \frac{\sin \left( \frac{kW}{2} \sin \theta' \sin \varphi' \right)}{\frac{kW}{2} \sin \theta' \sin \varphi'} \cdot \frac{\sin \left( \frac{kh}{2} \sin \theta' \cos \varphi' \right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta' \cos \varphi'} \quad (8)$$

式中,  $L$  是微带贴片的长度;  $W$  是辐射缝隙的宽度;  $h$  是介质的厚度。文中取  $L = 0.267\lambda$ ,  $W = 0.384\lambda$ ,  $h = 0.025\lambda$ , 其  $H$  面半功率波瓣宽度 (HPBW) 为  $77.6^\circ$ 。

### 4 圆柱 CPAA 波束赋形的 HPSO 综合算法

#### 4.1 优化参数的设置

本文优化圆柱 CPAA 的方位面方向图, 因此取  $\theta = 90^\circ$ 。目标函数为:

$$\text{fitness} = \sum |E_o(90^\circ, \varphi_i) - E(90^\circ, \varphi_i)|^2 \quad (9)$$

其中,  $\varphi_i$  为方向图采样点;  $E_o(90^\circ, \varphi_i)$  为采样点的期望方向图值;  $E(90^\circ, \varphi_i)$  为采样点方向图的计算值。

算法的参数设置是: GA 的交叉操作概率为 0.8。 $c_1 = c_2 = 2$ ; 惯性权重  $w$  随迭代步数增加线性从 0.9 减小到 0.5; 幅度区间为  $[0, 1]$ , 相位区间为  $[0, 2\pi]$ ; 幅度速度上限  $v_{\max}$  为 0.4, 相位速度上限  $v_{\max}$  为  $0.8\pi$ 。

#### 4.2 仿真实例

综合要求:  $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$  时,  $E_o(\theta) = 0 \text{ dB}$ ; 当  $\theta$  为其他

值时,  $E_0(\theta) < -25 \text{ dB}$ 。CPAA 参数为:  $R = 10\lambda$ ,  $M=1$ ,  $N=10$ ,  $d_p = d_z = 0.5\lambda$ 。

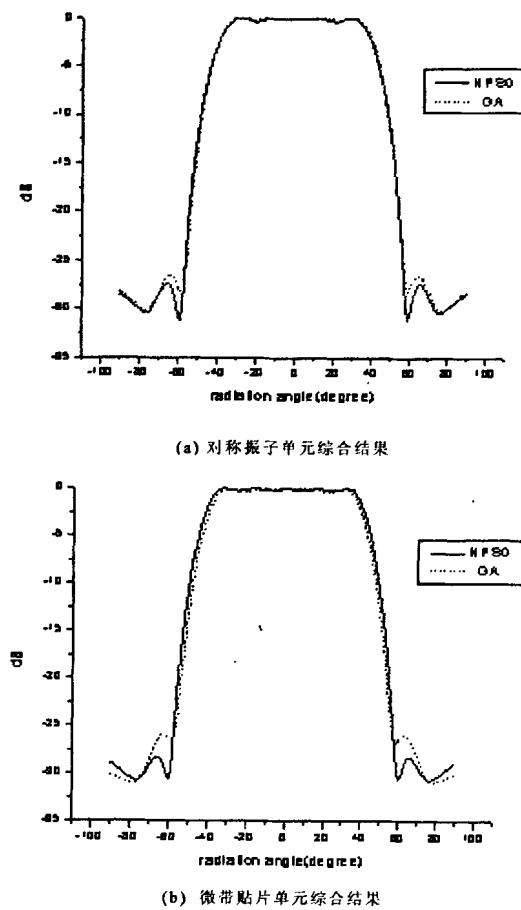


图 2 赋形平顶方向图的综合

HPSO 在粒子群规模为 60, 迭代次数为 40 步时收敛至最优解。为验证文中 HPSO 算法的有效性, 对同一个 CPAA 模型使用基于排序选择的实数编码的 GA 进行综合, 当染色体规模为 200, 迭代 200 步时, GA 收敛至最优解。图 2 和表 1 分别给出综合的方向图和激励系数。从图 2 可以看出 HPSO 算法综合的结果与 GA 综合的结果具有一致性: 主瓣基本重合且平坦度为 0.4dB; 副瓣都在  $-25 \text{ dB}$  以下, 但 HPSO 综合的副瓣更低: 对称振子单元低 1dB, 微带贴片单元低 3dB。单元的激励系数如表 1 所示, 由于对称激励, 只给出了左边 5 个单元的激励系数。

表 1 平顶方向图激励系数的幅度(归一化)和相位

单元	激励系数的幅度(归一化)/相位(度)				
	1	2	3	4	5
对称振子	HPSO 0.157/88.4	0.059/31.1	0.466/225.7	0.534/248.8	1/0
	GA 0.021/18.7	0.249/246.6	0.210/152.6	0.450/75.5	1/0
微带贴片	HPSO 0.152/283.4	0.185/87.6	0.321/138.3	0.243/160.3	1/0
	GA 0.078/342.0	0.370/232.0	0.320/135.7	0.751/75.2	1/0

从表 1 可以看出, 同一种算法综合的不同单元的激励系数存在差异, 这是因为不同单元  $H$  面的 HPBW 不同; 另外, HPSO 算法综合出的两种单元激励系数的差异比 GA 综合出的结果大, 这可能是因为 HPSO 相比于 GA 具有更强的搜索能力造成的, 因为阵列的优化是多值问题, 允许由不同的幅相在同一个阵列上得到相似的方向图。在计算时间方面, 基于 matlab 编程在时钟频率为 2.4 GHz 的计算机运行, HPSO 算法的运行时间是 59.1 s, GA 的运行时间是 306.0 s。

## 5 结 论

HPSO 算法结合 PSO 算法与 GA 的排序选择策略和交叉操作, 不仅保证了全局搜索, 而且提高了收敛速度。从本文的仿真实例可以看出, HPSO 算法与 GA 都收敛到最优解, HPSO 算法具有更高的效率, 粒子规模更小, 迭代步数更少, 综合的方向图副瓣更低。对具有方向性单元的 CPAA, 通过优化阵列单元的激励系数, 可以得到与期望接近的赋形波束。

## 参 考 文 献

- [1] 吕善伟. 天线阵综合[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1988.
- [2] Vittorio Murino, Andrea Trusso. Synthesis of Unequally Spaced Arrays by Simulated Annealing. IEEE Trans. on AP, 1996, AP-44(1): 119–123.
- [3] D. W. Boeringer, D. H. Werner. Particle Swarm Optimization Versus Genetic Algorithms for Phased Array Synthesis. IEEE Trans., 2004, 52(3): 771–779.
- [4] Boeringer D W, Werner D H. Efficiency-constrained Particle Swarm Optimization of a Modified Bernstein Polynomial for Conformal Array Excitation Amplitude Synthesis. Antennas and Propagation. IEEE Transactions on, 2005, 53(8): 2 662–2 673.
- [5] J. Kennedy, R. Eberhart. Particle Swarm Optimization. in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, 1995, 4: 1 942–1 948.
- [6] 郑治泰. 西安电子科技大学论文, 2006.
- [7] 魏文元, 宫德民, 陈必森. 天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [8] Herper J, Hessel A, Tomasic B. Element Pattern of an Axial Dipole in a Cylindrical Phased Array, Part I: Theory, Antennas and Propagation. IEEE Transactions, 1985, 33(3): 259–272.
- [9] 张钧. 微带天线理论与工程[M]. 北京: 北京国防工业出版社, 1988.

作者简介 高明泉 男, 1982 年出生, 西安电子科技大学在读硕士研究生。主要从事优化算法在共形阵天线波束赋形中应用的研究。

## 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>