

# 基于粒子群优化算法的天线方向图综合研究

段丽,薛永毅,赵亦松

(北京联合大学信息学院,北京 100101)

**[摘要]** 空间多路复用天线阵技术是第四代移动通信网采用的抗干扰关键技术。其核心技术包括天线阵方向图综合技术,目前各种算法均存在计算量大和收敛速度较慢等缺点,如何提高系统性能成为一个重要课题。本文阐述了基于粒子群优化算法的天线方向图综合技术,对PSO的参数设置进行了改进,提出了边界溢出的具体解决方法,并进行了仿真实验。理论分析及仿真结果表明,与目前其它方法相比,该方法具有简单、计算量小、容易实现、没有许多参数需要调整并且稳健性好等优点,有较强的实用性。

**[关键词]** 天线;粒子;群;优化;算法

**[中图分类号]** TN 820.1    **[文献标志码]** A    **[文章编号]** 1005-0310(2013)02-0073-04

## Study On The Particle Swarm Optimal Algorithm in Antenna Pattern Synthesis

DUAN Li, XUE Yong-yi, ZHAO Yi-song

(College of Information Technology, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Multiplexing Antenna Arrays is the anti-interference key technology of 4G mobile communication. The core is the antenna pattern synthesis. Yet some of the algorithm have the problem of needing lots of data, high computational complexity and slow speed of convergence. In this paper the antenna pattern synthesis based on particle swarm optimal algorithm is presented, PSO parameter settings are improved, and boundary overflow is solved. Then the simulation is carried out. Compared with others, it has a small calculation quantity, easy realization, steady performance, small parameter demand adjusting and wide application.

**Key words:** Antenna; Particle; Swarm; Optimization; Algorithm

### 引言

方向图综合是天线设计中的一个重要问题,无论是对于传统的天线,还是新一代移动通信中的智能天线,方向图综合都发挥着重要作用。方向图综合从本质上说,就是根据所需要的空间辐射方向图来选择一组合适的阵元激励权值或优化天线的空间分布形式。改变阵列天线辐射方向图的方法有3种:调整阵元激励大小、调整阵元激励相位、调整阵元空间分布。这三者可以单独使用,也可以同时使

用。

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是一种进化计算技术(Evolutionary Computation),由Eberhart博士和Kennedy博士在1995年提出,源于对鸟群捕食行为的研究,是一种基于迭代的优化工具。算法初始值为一组随机解,通过迭代搜寻最优值。同目前其他算法比较,PSO的优势在于简单、容易实现并且没有许多参数需要调整,目前已广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制以及其他遗传算法的应用领域。<sup>[1-2]</sup>

**[收稿日期]** 2012-12-29

**[基金项目]** 北京市教委科技项目(2008KJ085)。

**[作者简介]** 段丽(1959—),女,北京市人,北京联合大学信息学院教授,研究方向为移动通信技术。

## 1 改进的粒子群优化算法

粒子群优化算法(PSO)源于对鸟群捕食行为的研究。设想这样一个场景:一群鸟在随机搜索食物,在这个区域里只有一块食物,所有的鸟都不知道食物在哪里,但是它们知道当前的位置离食物还有多远,那么找到食物的最优策略是什么呢?最简单有效的办法就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域。

PSO就是从这种模型中得到启示并用于解决优化问题。PSO中,每个优化问题的解都是搜索空间中的一只鸟,称之为“粒子”。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值(FitnessValue),每个粒子还有一个速度决定他们飞翔的方向和距离,然后粒子们追随当前的最优粒子在解空间中搜索,再通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解叫做个体极值 pbest;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值 gbest。另外,也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居,那么在所有邻居中的极值就是局部极值。在找到这两个最优值时,粒子根据下式来更新自己的速度和新的位置:

$$v[n+1] = \omega \times v[n] + c1 \times \text{rand1} \times (pbest[n] - \text{present}[n]) + c2 \times \text{rand2} \times (gbest[n] - \text{present}[n]) \quad (1)$$

$$\text{present}[n+1] = \text{present}[n] + v[n+1] \quad (2)$$

其中: $v$  [ ] 是粒子的速度; $\text{present}$  [ ] 是当前粒子的位置; $pbest$  [ ] 和  $gbest$  [ ] 分别是单个粒子的迭代最优值和所有粒子的全局最优值; $\text{rand1}$ 、 $\text{rand2}$ 是介于(0,1)之间的独立随机数; $\omega$  是速度惯性因子; $c1, c2$  是学习因子,通常选取  $\omega \in [0.4, 0.9]$ ,  $c1 = c2 = 2$ 。

PSO应用于智能天线的方向图综合,通过优化阵列的激励电流大小实现低旁瓣的方向图分布,同时在指定的干扰位置形成具有指定深度的零陷值。<sup>[3]</sup>具体算法流程如下:

- 1) 种群随机初始化;
- 2) 对种群内的每一个个体计算适应值,适应值与最优解的距离直接有关;
- 3) 种群根据适应值进行复制;
- 4) 如果终止条件满足的话,就停止,否则转步骤2。

除此之外,在算法的具体实现中,还需要考虑以下两个问题:

### 1) 粒子越界

若按照迭代速度公式计算出粒子在解空间的某一维越界时,则可以采用以下3种方法解决这个问题。

① 吸收边界:粒子在这一维上取其边界值。

② 反射边界:粒子在这一维上速度取其大小不变,方向取反。

③ 隐形边界:粒子若越界,则不评估其适应度,也不参与下一轮最优个体的竞争。

### 2) 速度越界

为了使粒子在解空间中能够均匀而全面地搜索,避免陷入局部最优,需要对于粒子的运行速度进行一定的限制。在解空间的每一维方向上确定一个最大速度  $v'_{\max}$ ,若按照速度计算公式得到:

$$|v'_{\text{new}}| = v'_{\max},$$

则取

$$v'_{\text{new}} = \frac{v'_{\max}}{|v'_{\text{new}}|} v'_{\text{new}}. \quad (3)$$

对于PSO而言,同样存在着与遗传算法相似的问题——收敛速度过快、陷入局部解导致优化失败。可以采用一些改进算法来克服这个问题:

① 每一次迭代过程后增加新粒子,同时删除适应度差的粒子,保持总量平衡,开辟新的搜索方向。由于传统的粒子群优化算法没有类似于遗传算法的变异操作,一旦粒子迅速向一个局部最优解集中,就很难能够再跳出来,从而导致优化效率降低甚至算法失败。而经过现在的改进以后,算法中不断引入新的粒子参与竞争,明显提高了算法的寻优能力。

② 采用多路并行处理机制,同时进行多个优化过程,在迭代一定次数后,挑选出各个子种群中的优势粒子重新组合成新的种群,从而保证了算法初期各个相对的最优解具有大致均衡的发展,最大可能地避免陷入局部解中。

在采用了上述的两个改进措施之后,PSO算法能够在收敛速度和优化效果之间获得一个很好的平衡,从而获得很好的优化效果和相对更快的优化速度。以下将采用计算机仿真来说明该算法的具体优化性能。

## 2 PSO 的参数设置及改进

应用PSO解决优化问题的过程中有两个重要

的步骤:问题解的编码和适应度函数。

PSO 的一个优势就是采用实数编码,不需要像遗传算法一样是二进制编码(或者采用针对实数的遗传操作)。寻优过程是一个迭代过程,中止条件一般设置为达到最大循环数或者最小错误。

下面列出了 PSO 中需要调节的参数及设置。

1) 粒子数:一般取 20~40,其实对于大部分的问题,10 个粒子已经足够可以取得好的结果,不过对于比较复杂的问题或者特定类别的问题,粒子数可以取到 100 或 200。

2) 粒子的长度:由优化问题决定,就是问题解的长度,一般由优化变量的多少决定。

3) 粒子的范围:由优化问题决定,每一维可设定不同的范围,一般由优化变量的取值范围决定。

4)  $v'_{\max}$ :最大速度,决定第  $i$  维粒子在一个循环中最大的移动距离,通常设定为粒子的范围宽度,例如,粒子( $x_1, x_2, x_3$ )中  $x_1$  属于  $[-10, 10]$ ,那么,  $v'_{\max}$  的大小就是 20。

5) 学习因子: $c_1$  和  $c_2$  通常等于 2,不过在文献中也有其他的取值。但是一般  $c_1$  等于  $c_2$  并且范围在 0 和 4 之间。

6) 中止条件:最大循环数以及最小错误要求,由具体的问题确定。

除了上述的参数选择外,种群大小的选择也是一个非常重要的因素。种群数较多,当然可以提供更广的搜索范围和搜索精度,但也需要更多的适应度评估和计算时间。对于粒子群算法而言,通过大量的计算机仿真已经表明,使用较少的种群数,可以避免大量的适应度计算,同样能够达到在解空间充分搜索的目的。对于参数研究的进一步深化,可以得到:对于许多的实际问题而言,使用 20 个粒子就可以满足需要;甚至在工程中,15 个粒子也能够很好地工作。

### 3 边界溢出的解决

与传统的粒子群优化算法相同,这里也会遇到边界溢出的问题。在此,吸收边界(粒子在这一维上取其边界值)、反射边界(粒子在这一维上速度取其大小不变,方向取反)、隐形边界(粒子若越界,则不评估其适应度,也不参与下一轮的最优个体)这 3 种方式同样适用。

对于一个给定的边界处理方案,使用粒子群优化算法进行全局搜索,从 5 个随机选择的不同位置开始。使用最好的适应度值对应的迭代的次数,连

续进行 5 次仿真求出平均值。对于每一个测试函数,粒子群优化算法都使用相同的粒子数目 20,且  $c_1 = c_2 = 2.0$ ,惯性权重因子在 100 次迭代中由 0.9 线性下降到 0.4。

### 4 仿真及结论

首先考虑一个由  $N$  阵元构成的直线阵列,其阵因子为

$$A_F(\theta) = \sum_{i=1}^N \omega_i e^{j \frac{2\pi}{\lambda} x_i \sin \theta} \quad (4)$$

其中: $\omega_i$  是阵元激励; $x_i$  是天线阵元相对于原点的位置; $\lambda$  是波长。

对于均匀线性阵列而言,阵列间距为  $d$ ,上式可以写成:

$$A_F(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} \omega_n e^{j 2\pi k d n \sin \theta} \quad (5)$$

考虑由 20 个天线阵元组成的均匀直线阵,设初始电流的相位均为零(边射阵),而电流幅度是对称的。

目标函数定义如下:

$$\begin{aligned} f = & \alpha |MSLL - SLVL| + \beta |NULL\_PAT - NLVL| \\ & + \gamma |NULL\_STD| \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} MSLL = & \max \{ F(\phi) \} \\ \phi \in & S \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $F(\phi)$  是天线方向图函数, $S$  是方向图的旁瓣区域,MSLL 是最高旁瓣电平,SLVL 是设计旁瓣电平,NULL\_PAT 是平均零陷深度,NLVL 是设计零陷深度,NULL\_STD 是多个零陷深度的方差, $\alpha, \beta, \gamma$  是各项的权重。

下面是在 4 种不同设计目标下用该算法进行的仿真结果:

图 1 极坐标方向图的设计目标:主瓣宽度 12°(第一零陷宽度),要求在 20°、25°、30°、35°、40°生成 -45 dB 的零陷,旁瓣电平 -40 dB 以下(使用吸收边界条件)。

图 2 极坐标方向图的设计目标:主瓣的宽度为 15°,旁瓣电平 -40 dB 以下,同时保证在 10°、15°、30°、45° 形成 -45 dB 的零陷(使用反射边界条件)。

图 3 天线归一化方向图的设计目标:主瓣的宽度为 5°,要求在 10°、20°、25°、30°、40°、50°、60° 生成 -100 dB 的零陷,旁瓣电平 -40 dB 以下(使用吸收边界条件)。

图 4 天线归一化方向图的设计目标:主瓣的宽度为 8°,要求在 17°、27°、33°、40°、45°、50°、67°、

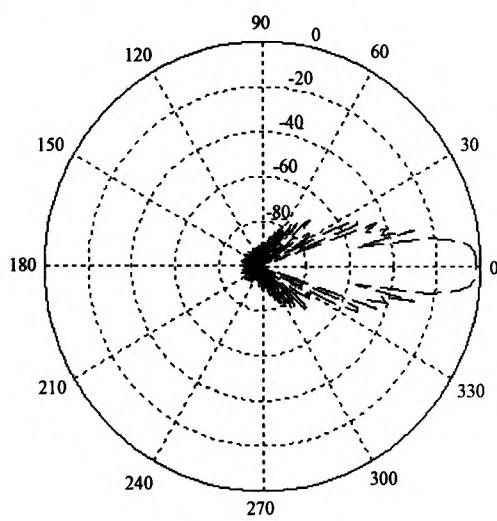


图 1 阵列天线极坐标方向图

Fig. 1 array antenna polar pattern

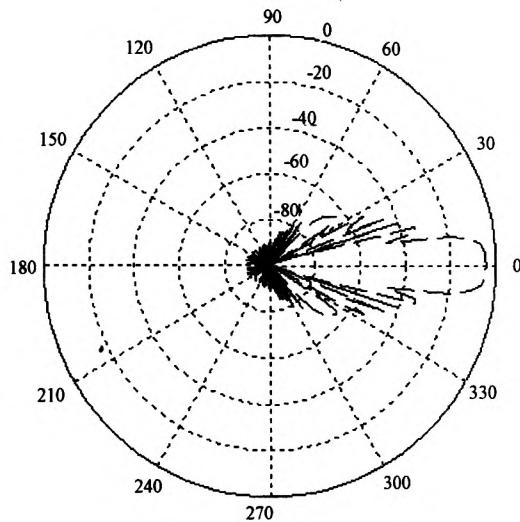


图 2 阵列天线极坐标方向图

Fig. 2 array antenna polar pattern

77°生成 -100 dB 的零陷,旁瓣电平 -40 dB 以下(使用反射边界条件)。

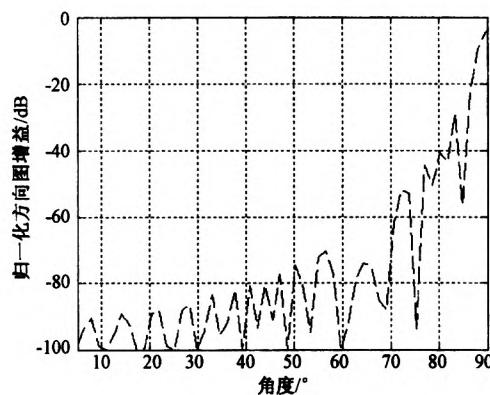


图 3 阵列天线归一化方向图

Fig. 3 Normalized array antenna pattern

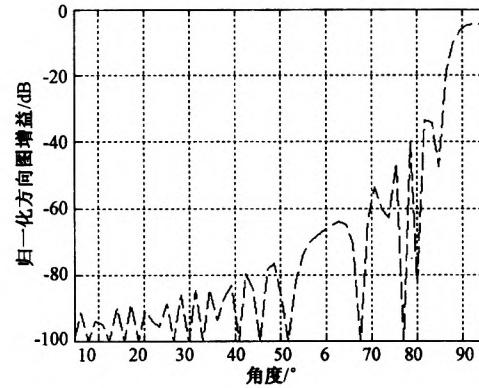


图 4 阵列天线归一化方向图

Fig. 4 Normalized array antenna pattern

以上仿真均使用了 15 个粒子,100 次优化迭代。通过粒子群优化算法的仿真计算,可计算出最终天线阵元激励值的优化结果。

从以上的仿真实例看,该算法应用于阵列天线方向图综合可以满足方向图综合精度和稳定度的要求。通过改进 PSO 的参数设置及边界溢出的解决,算法运行速度及其精度和稳定度可以大大提高,在无线移动通信中具有良好的应用前景。<sup>[4-5]</sup>

### [参考文献]

- [1] Gies D, Rahmat-Samii Y. Particle Swarm Optimization (PSO) for Reflector Antenna Shaping [C]. IEEE Antenna and Propagation Symposium, 2009.
- [2] Gies D, Rahmat-Samii Y. Vector Evaluated Particle Swarm Optimization (VEPSO): Optimization of a Radiometer Array Antenna [C]. IEEE Antenna and Propagation Symposium, 2010.
- [3] Liberti J C. 无线通信中的智能天线 IS—95 和第 3 代 CDMA 应用 [M]. 马凉,译. 北京:机械工业出版社,2002.
- [4] 邓华. MATLAB 通信仿真及应用实例祥解 [M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [5] 薛定宇. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2002.

(责任编辑 李亚青)

## 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>