

# 基于粒子群算法的天线阵方向图优化

齐美清, 汪伟, 金谋平

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 雷达阵列天线常涉及方向图综合, 而天线阵综合常常是利用优化算法优化单元幅相及间距等参数的过程。粒子群算法具有理论简单、参数少和易于实现等特点, 文中基于这一简单易行的优化算法, 给出一种阵列天线赋形波束综合方法。通过优化阵列天线中各单元的馈电幅度和相位同时实现主瓣的赋形和副瓣电平的抑制, 或通过仅相位加权实现主瓣波束赋形, 得到优良的余割平方赋形。通过实例设计验证了粒子群算法优化天线阵方向图的有效性。

**关键词:** 粒子群算法; 天线阵; 波束赋形; 优化

中图分类号: TN957.2; TN821+.8 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2008)03-0231-04

## Synthesis of Antenna Arrays Using Particle Swarm Optimization

QI Mei-qing, WANG Wei, JIN Mou-ping

(No. 38 Research Institute, CETC, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The radiation pattern synthesis is usually required in radar antenna array design such characteristics as the amplitudes and phases of the radiating elements, the distances between the elements in an array are optimized by use of optimization algorithm. In this paper, a synthesizing method for the shaped pattern of an antenna array is presented using particle swarm optimization (PSO) which is simple and robust. The phases and amplitudes, or phases only of the elements in the array are optimized to get a perfect desired pattern. It is validated that the method is a practical, powerful, but simple procedure for optimizing a shaped array pattern.

**Key words:** particle swarm optimization; antenna array; shaped-beam; optimization

## 1 引言

在雷达和通信等领域, 常需要阵列天线方向图形成指定波束形状, 如笔形波束、扇形波束、余割平方赋形波束等。对于阵列天线而言, 这一要求通过综合天线阵辐射单元的幅度和相位来实现。系统设计中, 为了得到所需方向图, 对于集中馈电天线阵, 天线阵列可通过功分网络实现幅相加权进行波束赋形; 而对于分布式激励或相控阵天线, 发射态一般采用仅相位加权来完成波束赋形, 其接收态采用幅相加权, 当然也有在发射态采用台阶式幅度的幅相加权方式, 这一方法会带来发射机或 T/R 组件种类较多的缺点。

阵列天线阵波束综合是一个复杂的非线性优化问题。通常天线阵单元数量较多, 需要调整的

参数多(与单元数有关)。使用 Woodward-Lawson 抽样法计算此类问题, 在赋形区间基本可以达到精度要求, 但副瓣电平通常较高, 天线增益低。使用微扰法进行调整优化, 工作量大, 需要丰富的调试经验和理论分析。目前, 通常利用优化算法如遗传算法(GA)<sup>[1]</sup>、模拟退火法(SA)<sup>[2]</sup>等进行方向图优化。遗传算法首先对需要优化的参数进行编码以生成染色体的初始群体, 执行遗传繁殖操作以生成下一代群体, 设计适应度函数并根据适应度函数对下代群体作选择, 设置控制参数形成繁殖加检测的迭代搜索过程。模拟退火算法是模拟材料处理中“退火”过程的一种优化算法。这两种算法需要调节的参数繁多, 对设计人员来说要求较高。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization)<sup>[3]</sup>是继遗传算法之后又一全局优化算法。

该算法可调参数少,简单、运行快,易于实现并且功能强大,其优化程序仅20余条语句就可以完成。目前该算法已广泛应用于诸如多目标优化、模式识别、调度、信号处理、决策控制等多方面,最近粒子群算法也逐渐被引入电磁工程及天线阵设计领域<sup>[4-7]</sup>。

本文利用结构简单、通用有效且运行快的粒子群优化算法,分别对天线阵幅相和仅相位加权两种方式实现余割平方赋形波束优化,验证此优化方法的高效可行性。

## 2 粒子群优化算法及应用

粒子群算法首先初始化一群随机粒子,然后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。一个是粒子本身找到的最优解,即个体极值。另一个是整个种群目前找到的最优解,称之为全局极值。

粒子在找到上述两个极值后,就根据下面两个公式来更新自己的速度和位置:

$$V = w \cdot V + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (pbest - present) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (gbest - present)$$

$$present = present + V$$

式中,  $V$  是粒子的速度;  $present$  是粒子的当前位置;  $\text{rand}$  是 0~1 之间的随机数;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子,通常,  $c_1 = c_2 = 2$ ;  $w$  是加权系数,取值在 0.1~0.9 之间。实验证明,如果  $w$  随算法迭代的进行而线性减小,将显著改善算法的收敛性能。设  $w_{\max}$  为最大加权系数,  $w_{\min}$  为最小加权系数,  $iter$  为当前迭代次数,  $iter\_m$  为算法的总迭代次数,则有:

$$w = w_{\max} - iter \cdot (w_{\max} - w_{\min}) / iter\_m$$

粒子通过不断学习更新,最终飞至解空间中最优解所在的位置,搜索过程结束。最后输出的  $gbest$  就是全局最优解。在更新过程中,粒子每一维的最大速率被限制为  $V_{\max}$ , 粒子每一维的坐标也被限制在允许范围内。图1描述了粒子群优化算法的框架。

考察算法是否收敛通常要选择一适应度函数。适应度函数不同,表明优化的问题不同。在天线阵综合波束赋形中主瓣常使用目标方向图作为优化目标。而对于波束展宽,PSO适应度函数可设为

$$F = A \left| \frac{sl - sl_0}{sl_0} \right| + B \left| \frac{\theta_{3dB} - \theta_{3dB0}}{\theta_{3dB0}} \right| + C \left| \frac{\Delta}{\Delta_0} \right|$$

式中,  $sl$  为当前的方向图副瓣电平;  $sl_0$  为允许的最大副瓣电平;  $\theta_{3dB}$  为当前的主瓣的3dB宽度;  $\theta_{3dB0}$  为目标的主瓣宽度;  $\Delta$  为主瓣内的最大波纹;  $\Delta_0$  为主瓣允许的最大波纹;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为加权系数,加权系数不同,得到的副瓣电平,主瓣宽度及主瓣波纹则有所不同,适当增大某个加权系数则可使相应的指标更逼近目标值。通常我们优化前并不能确定怎样的优化系数合适,需要根据优化的结果来调节,使适应度函数更好地逼近0。某项指标距离目标较远,则增大相应的加权系数。足够的迭代次数(常取数百次)和合适的加权系数,可确保优化得以实现。

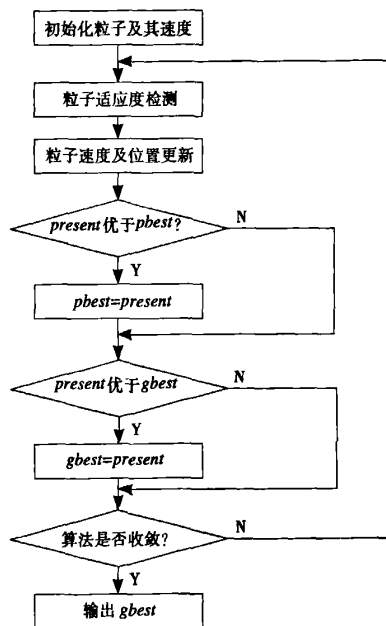


图1 PSO程序框图

## 3 设计实例

作为对该算法在电磁工程中的应用研究,我们使用MATLAB编写了粒子群优化算法的通用主程序,然后针对不同的优化目标独立编写目标子程序供主程序调用,实现优化步骤。在众多波束赋形的天线中,余割平方赋形方向图具有代表性,这种天线主要解决搜索雷达在搜索时间和辐射能量之间的矛盾。对其综合已有较多方法给出,此处给出的基于粒子群方法得到优化结果,验证该方法的有效性和实用性。

3.1 幅相加权波束赋形实例

优化设计对象是一直线阵,单元数为 16,单元间距为 0.64 波长。方向图形状为  $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$  余割平方赋形,所有副瓣电平低于  $-35\text{ dB}$ ,空域在  $30^{\circ}$  以上。

优化的目标方向图函数可由下式得到,其方向图如图 2 虚线所示。

$$f_0(\theta)=\begin{cases} 20\lg(\csc(\theta+8^{\circ})/\csc(8^{\circ})), & 0^{\circ}\leq\theta\leq 30^{\circ} \\ -37\text{ dB}, & \text{其他} \end{cases}$$

PSO 适应度函数可设为

$$F=A\left|\frac{sl+37}{37}\right|+B\cdot x$$

式中,  $x=\max(|f(\theta)-f_0(\theta)|)$ ,  $\theta\in[0,30]$

采用幅度相位同时加权,使用 MATLAB 程序实现 PSO 优化,迭代次数设为 500,粒子群规模为 40,幅度取值范围为  $[0,1]$ ,相位用  $360^{\circ}$  归一后取值范围也为  $[0,1]$ ,通过适当调整适应度函数的加权系数  $A,B$ ,最终优化得到的天线阵单元幅相见表 1。方向图如图 2 所示。从图 2 可以看出,主瓣基本与目标方向图重合,尽管单元数较少,副瓣电平也达到了一  $36.6\text{ dB}$ 。可见,粒子群优化算法能很好地用于方向图赋形的优化。

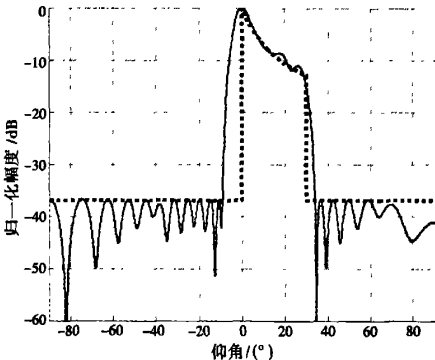


图 2 PSO 实现天线幅相加权余割平方赋形

表 1 余割平方赋形各单元的幅度和相位

幅度	0.0905	0.0500	0.1059	0.2151
	0.5301	0.6580	0.5229	0.6649
相位	26.2058	0	81.7177	72.8892
	123.3557	115.9277	116.8786	139.2660
幅度	0.1865	0.2511	0.3986	0.3975
	1.0000	0.9481	0.5917	0.2075
相位	67.6195	103.8385	102.2362	106.5578
	123.0506	89.5791	49.1855	10.1887

3.2 仅相位加权波束赋形实例

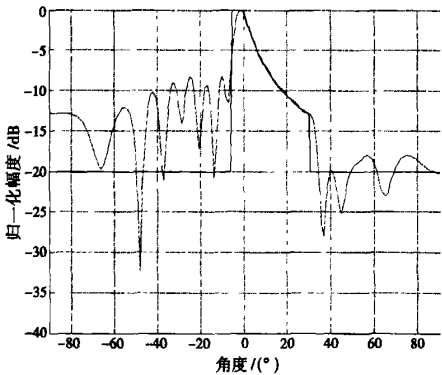
仅相位加权波束赋形时,单元幅度分布为均

匀分布,单元相位通过移相器实现加权,从而实现空间波束赋形。

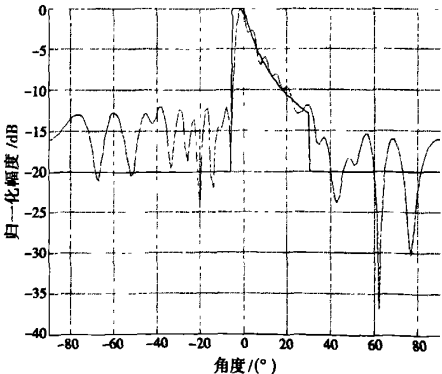
优化设计对象是一直线阵,单元数为 24,单元间距为 0.5 波长。各单元幅度相同,通过相位加权实现方向图形状为  $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$  余割平方赋形,所有副瓣电平低于  $-10\text{ dB}$ ,空域在  $30^{\circ}$  以上。

仅相位加权时,主瓣相对于余割平方赋形目标通常会有较大起伏,尤其要求副瓣较低时,起伏更大。在优化过程中,主瓣区、副瓣区加权系数不同,优化得到的结果也有所不同。若主瓣区加权系数加大,则余割平方赋形吻合较好;若加大副瓣加权系数,则副瓣会变低,而此时主瓣区的余割平方赋形起伏变大,因此,应根据实际需要的侧重点不同设置加权系数,以达到符合要求的指标。

通过对算例仿真优化发现,副瓣为  $-8\text{ dB}$  时,主瓣与余割平方赋形目标曲线很好吻合,如图 3(a)所示;而要求副瓣达到  $-12\text{ dB}$  时,  $30^{\circ}$  覆盖空域方向图有一定的起伏。但是,对于高仰角比较容易实现低于  $-15\text{ dB}$  的副瓣,如图 3(b)所示。



(a) 主瓣平滑时



(b) 副瓣较低时

图 3 PSO 实现天线仅相位余割平方赋形

## 4 结束语

利用粒子群优化算法的全局搜索能力,我们实现了天线阵方向图的综合,成功地实现了天线阵幅相和仅相位加权波束赋形,优化结果表明了其优化的有效性。该算法结构简单、易于实现且运行快,可以广泛应用于多参数的优化中。

### 参考文献:

- [1] 权琳,陶海红,廖桂生. 基于多目标遗传算法的星载天线干扰抑制算法[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(6): 470-476.  
QUAN Lin, TAO Hai-hong, LIAO Gui-sheng. A Novel Space-Borne Antenna Anti-Jamming Method Based on Multi-Object Genetic Algorithm[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(6): 470-476. (in Chinese)
- [2] 林欢欢,王英民,朱婷婷. 利用模拟退火算法设计方向图的原理和方法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(7): 176-178.
- [3] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia: [s. n.], 1995.

(上接第221页)对抗情报分析意义较大。

## 5 结束语

由于小波去噪法对频率编码信号的去噪效果较差,本文提出了一种新的方法。利用小波去噪对单载频信号效果明显的特点,对接收到的频率编码信号首先进行奇异点的检测,根据奇异点的位置将频率编码信号“分解”为几个单载频信号,将对频率编码信号的去噪转化为对单载频信号的去噪。仿真结果表明,新方法有效可行,为提取编码信号的脉内特征打下了良好的基础。

### 参考文献:

- [1] 郁春来,何明浩,裴立志. 基于改进小波脊线法的 LFM 信号脉内特征提取[J]. 航天电子对抗, 2004, (4): 38-42.
- [2] 刘东霞,赵国庆. 脉内调制信号的分析[J]. 现代雷达, 2003, 25(11): 17-20.
- [3] HE Minghao, Mao Yan, Han Jun. A Method of Extracting Radar In-Pulse Characteristics in Low SNR [C]// ICSP, Guilin, China: [s. n.], 2006: 2712-2715.
- [4] 简涛,何友,苏峰,等. 奇异信号消噪中小波消失矩的选取[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(1): 31-35.

- [4] 杨科,焦永昌,潘雪明. 粒子群算法在阵列天线方向图综合设计中的应用[C]// 中国电子学会第十届青年学术年会论文集, 北京: [出版者不详], 2004.
- [5] Robinson J, Rahmat-Samii Y. Particle Swarm Optimization in Electromagnetics[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2004, 52(2): 397-407.
- [6] Khodier M M, Christodoulou C G. Linear Array Geometry Synthesis with Minimum Sidelobe Level and Null Control Using Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2005, 53(8): 2674-2679.
- [7] 齐美清,金谋平,汪伟. 粒子群优化算法在宽带耦合器设计中的应用[J]. 现代雷达, 2007, 29(6): 64-67.

### 作者简介:



齐美清 男, 1981 年生于安徽枞阳, 2003 年毕业于南京邮电学院电子科学与技术专业, 现为中国电子科技集团公司第三十八研究所工程师, 主要从事微波工程设计。

汪伟 男, 1969 年生于安徽霍山, 博士, 中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师, 主要从事天线与微波技术研究。

JIAN Tao, HE You, SU Feng, et al. Selection of Vanishing Moments of Wavelet in Denoising the Signal with Singularity[J]. Radar Science and Technology, 2006, 4(1): 31-35. (in Chinese)

- [5] 胡昌华,张军波. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 334-339.
- [6] 杜浩藩,丛爽. 基于 MATLAB 小波去噪方法的研究[J]. 计算机仿真, 2003, 20(7): 119-122.
- [7] Delpart N, Escudie B, Guillemain P, et al. Asymptotic Wavelet and Gabor Analysis: Extraction of Instantaneous Frequencies[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 644-664.
- [8] Gao Jinghuai, Dong Xiaolong. Instantaneous Parameters Extraction via Wavelet Transform [J]. IEEE Trans on GRS, 1999, 37(2): 867-870.

### 作者简介:



韩俊 男, 1983 年出生, 安徽合肥人, 空军雷达学院在读博士研究生, 主要研究方向为电子对抗信息处理。

## 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,一直致力和专注于微波、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>