

文章编号 1005-0388(2008)05-0917-05

# 随机错位子阵阵列天线及其优化设计

黄 飞<sup>☆</sup> 盛卫星 马晓峰

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 针对大型的二维平面阵列天线, 将随机布阵的概念应用于子阵布阵中, 提出基于子阵的随机错位布阵方式, 并采用二进制粒子群算法对随机错位子阵的错位方式进行了优化。仿真结果表明: 采用随机错位子阵布阵方式, 通过粒子群算法优化后, 平面阵列天线可以在扫描范围内得到较低的旁瓣, 避免了栅瓣的出现。

**关键词** 随机错位子阵; 二进制粒子群算法; 阵列天线

中图分类号 TN821<sup>+</sup>. 91 文献标志码 A

## Plane antenna arrays with randomly staggered subarrays and its optimal design

HUANG Fei SHENG Wei-xing MA Xiao-feng

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract** For the large plane antenna arrays with subarrays, the randomly staggered structure is applied to decrease the grating lobes. Binary particle swarm optimization (BPSO) algorithm was used to find the optimal structure of the randomly staggered subarrays. Simulated results show that the plane antenna arrays with subarrays of this new structure can get low side lobe in the scanning range.

**Key Words** randomly staggered subarray; binary particle swarm optimization; antenna array

## 1 引言

阵列天线的口径越大, 则波束越窄, 增益越高, 但所需的阵元数也越多, 设备量越大。大型阵列, 特别是数字波束形成天线或固态有源相控阵天线, 包含了 T/R 组件, 其阵列的阵面造价十分昂贵, 是雷达耗资的主要部分。在不影响天线增益和波束宽度的情况下, 为了减少 T/R 组件的数目, 常采用子阵技术。

邻接的, 大小相等的子阵会导致天线方向图出现大的栅瓣<sup>[1,2]</sup>。为此, 有人提出了部分重叠子阵<sup>[3]</sup>和周期等效重叠子阵<sup>[4]</sup>的阵列方案, 也有人提出了子阵大小随机变化的随机子阵设计方案<sup>[5]</sup>和将一定

规模的随机间距子阵周期化<sup>[6]</sup>设计方案。重叠子阵的技术在子阵间有交错馈线, 馈线网络复杂, 不便于加工。周期排列的等效重叠子阵结构<sup>[4]</sup>的出现, 消除了某些方向的栅瓣, 但在另外一些方向上又产生了新的栅瓣。子阵规模随机变化的随机子阵设计不便于加工, 而随机间距子阵周期化设计, 其性质也不太理想, 子阵大了加工不方便, 子阵小了栅瓣电平就会上升。

针对大型的二维平面阵列天线, 本文将随机布阵的概念<sup>[7,8]</sup>应用于子阵布阵中, 提出了基于子阵的随机错位布阵方式。这种布阵方式中, 平面阵列的每列阵列采用周期等间距子阵方案, 即子阵大小相同, 间距也相同, 只是相邻列的错位方式不同, 其

与标准排列方式的错位量是随机的。本文还利用粒子群优化算法对错位量的随机方式进行了优化设计。仿真结果表明:这样的布阵方式不仅便于加工和系统实现,而且具有较好的栅瓣抑制性能。

## 2 随机错位子阵阵列结构

子阵的形式有很多种<sup>[1~4]</sup>,最简单,易于工程实现的一种如图1所示:为统一的不重叠的子阵结构的平面阵列天线<sup>[1]</sup>。即所有列采用统一的邻接的,大小相同的子阵结构。图1中的平面天线阵列 $z$ , $y$ 方向均为等间距排列。 $z$ 方向阵列采用相同的子阵排列方式,每个子阵由四个阵元组成。 $z$ 方向相邻子阵的子阵中心间距为 $d = 4 \times dz$ , $dz$ 为 $z$ 方向阵元间距, $dy$ 为 $y$ 方向的阵元间距。由公式(1)可得,栅瓣出现在角度 $\theta_n$ 上。

$$\sin\theta_n = \sin\theta_0 + \frac{n}{d}\lambda \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

$\theta_n$ 为波束的扫描角度。

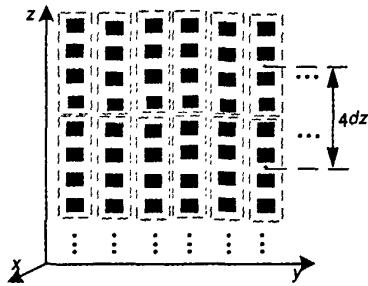


图1 统一非重叠子阵阵列结构

文献[7]中对于阵元间距大于 $0.5\lambda$ 的大型平面阵列,提出了三角形栅格阵的结构,用来抑制特定区域的栅瓣。把三角形栅格阵的思想运用到如图1所示的统一非重叠子阵平面阵列,可以得到如图2所示的周期排列的等效重叠子阵结构的平面阵列天线<sup>[4]</sup>。平面阵列天线在 $z$ , $y$ 方向均为等间距排列。 $z$ 方向采用相同大小的子阵,每个子阵由四个阵元组成。如图2所示,采用周期排列的等效重叠子阵结构后, $z$ 方向的子阵间距等效为 $dz$ ,避免了图1中排列方式由于在 $z$ 方向存在大的子阵中心间距带来的栅瓣。但采用图2的子阵排列方式,由于周期性的存在,在其它方向上仍有大的子阵阵元间距,在阵列三维方向图的某些角度上仍会有新的栅瓣的出现。

本文结合文献[7]及文献[8]中对于阵元间距大于 $0.5\lambda$ 的平面阵列,采用阵列所有行的错位量都

不同来抑制栅瓣的思想,对于含子阵结构的大型的平面阵列,采用随机错位的子阵结构如图3所示,来抑制由于子阵间大的阵元间距带来的栅瓣问题。图3中平面阵列天线在 $z$ , $y$ 方向均为等间距排列。 $z$ 方向采用子阵,每个子阵由四个阵元组成。 $z$ 方向子阵阵列的排列方式为每列与标准的统一子阵阵列排列方式错位排列,错开的天线阵元数在0至3中随机选取。即可以把第一列的子阵阵列做为标准的子阵阵列排列方式,其后每列的阵列排列方式则随机与其错开0、1、2或3个阵元数。图3为随机的一种错位排列方式。随机错位子阵的不规则的,随机的排列结构破坏了图1和图2中排列结构的周期性,避免了栅瓣的出现。

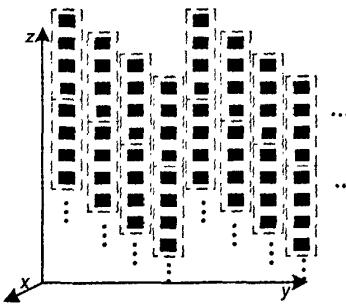


图2 周期等效重叠子阵阵列结构

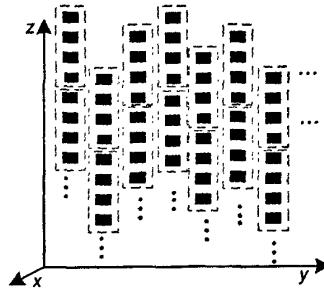


图3 随机错位子阵排列阵列结构

## 3 粒子群优化算法

GA 和 PSO(particle swarm optimization)都是受自然界的启发而形成的优化方法,其求解过程都是先初始化一组随机解,然后根据适配值更新种群中的个体进行迭代搜索,以逐渐接近最优解。

粒子群算法最初由 Eberhart 和 Kennedy 提出<sup>[9]</sup>,不同于 GA 模拟自然界中的进化过程,PSO 在机理上是对简单社会系统的模拟,是群体智能的

体现。在迭代更新的方式上,GA 采用进化算子繁殖个体,而 PSO 则是根据每个粒子自身及其它个体的最优适配值对其速度进行动态调整,所有粒子在当前最优粒子的引导下在解空间中搜索<sup>[10]</sup>。PSO 具有收敛速度快,结构简单,易于实现等优点。

### 3.1 连续形式的 PSO

在连续形式的 PSO 中,粒子的运动轨迹为多维解空间中位置的变化过程,问题的每个可能解用  $N$  维空间中的一个粒子  $i$  表示。PSO 用一群随机粒子(随机解)进行初始化,然后通过迭代寻求最优解。每次迭代过程首先计算全局极值和各个粒子的个体极值,然后用式(2)和式(3)更新粒子速度和位置。

设粒子群含  $L$  个粒子,每个粒子相当于  $N$  维离散空间中的一个活动点。粒子  $i$  在时刻  $t$  的速度、位置、个体最好位置和全局最好位置分别用  $v_i(t)$ ,  $x_i(t)$ ,  $x_i^{(p)}(t)$  和  $x_i^{(g)}(t)$  表示,那么粒子  $i$  速度和位置的各维分量迭代公式如下<sup>[9]</sup>:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(x_{ij}^{(p)}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(x_{ij}^{(g)}(t) - x_{ij}(t)) \quad (2)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (3)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, L$ ;  $j \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 表示粒子编码中各分量的维数。 $r_{1j}(t)$  和  $r_{2j}(t)$  是  $(0, 1)$  上均匀分布的随机数,  $w$ ,  $c_1$  和  $c_2$  是加速系数。

### 3.2 二进制形式的 PSO

二进制粒子群算法是 1997 年 Eberhart 和 Kennedy 对粒子群算法的改进<sup>[10]</sup>,以便其能应用于离散的问题。

迭代过程中  $v_{ij}$  的计算同连续形式的 PSO,  $x_{ij}$  的计算公式为:

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho < \text{sig}(v_{ij}(t+1)) \\ 1 & \text{if } \rho \geq \text{sig}(v_{ij}(t+1)) \end{cases} \quad (4)$$

$\rho \sim U[0, 1]$ , 是  $(0, 1)$  区间上均匀分布的随机变量; $\text{sig}()$  表示 sigmoid 函数, 本文取  $\text{sig}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$ 。

二进制粒子群优化算法的速度迭代公式与实值粒子群优化算法相同,但参数  $v$  以及加速系数  $w$ ,  $c_1$  和  $c_2$  的意义与其在连续粒子群优化算法中的意义完全不同。一般取  $w = 1$ ,  $c_1 = c_2 = 1$ 。 $v_{\max}$  越大, 算法倾向于当前最优解附近的局部搜索, $v_{\max}$  越小, 算法倾向于全局搜索。特别地, 当  $v_{\max} = 0$  时, 算法变成纯随机搜索算法<sup>[11]</sup>。文献[11]规定粒子的最大速度  $v$  满足  $|v_{\max}| = 4$ 。

## 4 求解最优随机错位子阵阵列结构的粒子群算法

文中采用的阵列模型是一个  $P \times Q$  ( $P$  行  $Q$  列) 的平面阵列,如图 4 所示。阵列天线在  $z$ ,  $y$  方向均为等间距排列。 $z$  方向阵列天线采用子阵形式,每个子阵由四个阵元组成。平面阵列采用随机错位子阵方式。 $\theta$  和  $\phi$  分别代表来波方向的仰角和方位角。

平面阵列的辐射方向图表表达式为:

$$AF = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{q=0}^{Q-1} W(p, q) \times \exp(-ju) \exp(-jv) \quad (5)$$

$$u = 2\pi d z \sin \theta / \lambda, v = 2\pi d z \cos \theta \sin \phi / \lambda \quad (6)$$

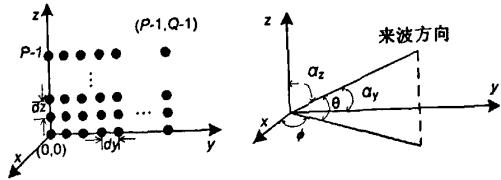


图 4 平面阵列模型

$z$  方向子阵阵列天线不同的随机错位排列方式对应不同的平面阵列方向图,可能产生相当差的波形。我们利用粒子群优化算法对随机错位子阵的平面天线阵列的随机错位方式进行优化,使平面阵列在要求的扫描范围内具有较好的旁瓣。

由于随机错位的位数为 0, 1, 2, 3(一位代表错开一个阵元数), 为离散的数值, 且二进制数比十进制数更易于学习的特点<sup>[12]</sup>, 我们采用二进制粒子群算法来对随机错位子阵阵列的错位方式进行优化。

编码方式为:用 2 位二进制数来代表  $z$  方向每列子阵阵列与作为标准的子阵阵列错开的位数。00 代表与标准子阵阵列排列方式错开一位, 01 代表与标准的子阵阵列错开二位, 10 代表与标准的子阵阵列错开三位, 11 代表与标准的子阵阵列排列方式相同。

我们的目标是使得扫描范围内阵列天线方向图的最大副瓣电平最小。若对扫描范围内所有的波束指向进行优化, 运算量太大。通过仿真证实,  $z$  方向的波束指向与天线阵法线夹角越大, 阵列方向图的最大副瓣越大, 而  $y$  方向的波束指向则对阵列方向图的最大副瓣没有太大影响。所以, 选择扫描范围内, 阵列波束指向的仰角绝对值最大的四个波束指向作为代表指向。把四个代表指向所得的阵列天线

方向图中,副瓣电平的最大值作为适应函数。即当阵列天线的扫描范围为方位角从 $-45^\circ$ 到 $45^\circ$ ,仰角从 $-10^\circ$ 到 $10^\circ$ 时,四个代表指向可取为 $(45^\circ, 10^\circ)$ 、 $(45^\circ, -10^\circ)$ 、 $(-45^\circ, -10^\circ)$ 和 $(-45^\circ, 10^\circ)$ 。当迭代次数达到规定值则停止迭代。在求阵列方向图中引入FFT技术来加快计算速度<sup>[13]</sup>。

## 5 实验仿真

48×64的平面天线阵列,采用如图4所示的阵列模型。 $y$ 方向为全DBF, $z$ 方向采用子阵,每个子阵由四个阵元组成。 $y, z$ 方向阵元间距均为 $0.5\lambda$ 。阵列天线的扫描范围要求为方位角从 $-45^\circ$ 到 $45^\circ$ ,仰角从 $-10^\circ$ 到 $10^\circ$ 。 $y, z$ 方向均进行 $-30$  dB的切比雪夫约束加权。

当波束指向为 $(45^\circ, 10^\circ)$ 时,图5、图6和图7分别为采用统一非重叠子阵阵列结构、周期等效重叠子阵结构<sup>[4]</sup>和优化后随机错位子阵结构所形成三维波束方向图的等高线图(图中把所有小于 $-19.5$  dB的点均视为 $-19.5$  dB)。它们得到的阵列方向图的最大旁瓣电平分别为 $-5.5$  dB、 $-5.2$  dB和 $-19.5$  dB。由此可见采用随机错位子阵结构后,阵列天线方向图旁瓣性能得到了很好的改善。

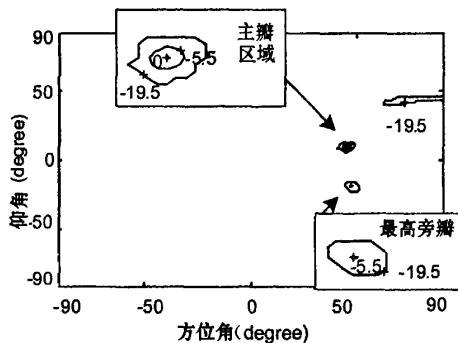


图5 统一非重叠子阵阵列结构  
平面阵列方向图等高线图

利用粒子群算法在扫描范围内优化阵列随机错位方式,优化后阵列天线方向图的最大旁瓣电平为 $-19.5$  dB如图7所示。通过仿证实,  $z$ 方向的波束指向与天线阵法线夹角越大,阵列方向图的最大副瓣越大,而  $y$ 方向的波束指向则对阵列方向图的最大副瓣没有太大影响;当波束指向在扫描范围内变化时,平面阵列方向图的最大副瓣电平均小于 $-19.5$  dB。可见利用二进制粒子群算法对随机错位子阵阵列进行优化后,可以使得含子阵的平面阵

列天线在扫描范围具有较好的旁瓣。在二进制粒子群优化算法中,我们取种群规模为50,迭代次数为300次,  $w = c_1 = c_2 = 1$ 。

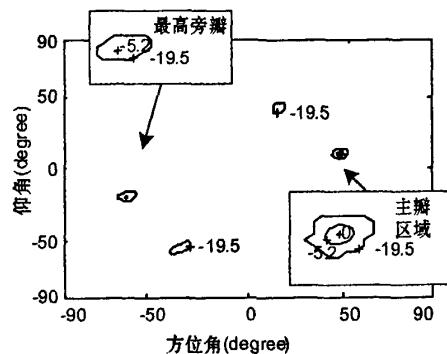


图6 周期等效重叠子阵结构  
平面阵列方向图等高线图

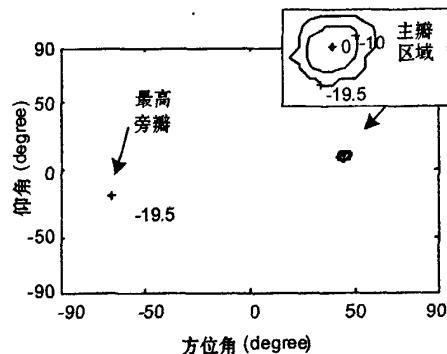


图7 粒子群算法优化后随机错位子阵  
阵列方向图等高线图

## 6 结论

随机错位子阵的阵列结构可以避免统一子阵排列结构和等效重叠子阵结构所存在的栅瓣问题。仿真结果表明,通过二进制粒子群优化算法优化后,采用随机错位子阵方式的平面阵列天线在扫描范围内可以获得较好的旁瓣性能。

## 参考文献

- [1] Mailloux, R. Array grating lobes due to periodic phase, amplitude, and time delay quantization[J]. IEEE transactions on Antennas and Propagation, 1984, 32(12):1364-1368.
- [2] R L Howard, et al.. The relationships between dispersion loss, sidelobe level, and bandwidth in wideband radar with subarrayed antennas[J]. Proc. IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation, 1988, 1: 184-

- 187.
- [3] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [4] L L Wang, D G Fang, W X Sheng. An equivalent overlapping array with optimized subarray pattern[C]. 3rd International conference on Microwave Wave Technology, 2002: 588-591.
- [5] Amit P Goffer, Moshe Kam Senior, Peter R Herczfeld. Design of Phased Arrays in Terms of Random Subarrays[J]. IEEE transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42 (6): 820-826.
- [6] K C Kerby, J T Bernhard. Wideband Periodic Array of Random Subarrays[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004, 1(1): 555-558.
- [7] Robert J Mailloux, 南京电子技术研究所(译). 相控阵天线手册(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] Robert J Mailloux, Lore Zahn, A Martinez III, et al.. Grating lobe control in limited scan arrays[J]. IEEE transactions on Antennas and Propagation, 1979, 27 (1): 79-85.
- [9] R Eberhard, J Kennedy. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory[C]. In: Proceedings of Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995, 39-43.
- [10] Kennedy J and Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]. In: Proc. of 1997 Conf. on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway: IEEE Press, 1997, 4104-4109.
- [11] van den Bergh F. An analysis of particle swarm optimizers[D]. Pretoria: Department of Natural and Agricultural Science, University of Pretoria, 2001.

(上接第 910 页)



赵东峰 (1976—), 男, 山东人, 现为北京邮电大学在读博士生, 研究方向为未来移动通信中物理层技术。



金 鑫 (1980—), 男, 内蒙古人, 现为北京邮电大学在读博士生, 研究方向为未来移动通信中物理层技术。  
E-mail: foxma@gmail.com.

- [12] 莫愿斌, 陈德钊等. 二进制粒子群优化算法在化工优化问题中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2006, 23 (12): 1271-1274.

- [13] 李建新, 徐 慧等. 基于 FFT 的阵列方向图快速计算[J]. 微波学报, 2007, 23 (1): 10-15.



黄 飞 (1983—), 女, 江西人, 现为南京理工大学信息与通信系统专业博士生, 主要研究方向: 智能天线, 雷达阵列信号处理。



盛卫星 (1966—), 男, 江苏人, 博士, 南京理工大学通信工程系教授, 博士生导师, 中国电子学会天线分会委员, IEEE 会员。主要研究方向是: 微波成像、智能天线、雷达信号处理等。



马晓峰 (1981—), 男, 江苏人, 南京理工大学电光学院助教。主要研究方向: 智能天线、软件无线电、雷达成像等。



李道本 (1939—), 男, 河南人, 现为北京邮电大学教授、博士生导师, 研究方向为未来移动通信技术。

E-mail: lidaoben@vip.sohu.com

## 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>