

# 多映射混沌免疫算法及其在天线阵 方向图综合中的应用

叶剑锋, 王玉峰, 庞伟正

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对基本免疫算法中产生初始抗体群的盲目随机性和冗余性、补充自然消亡抗体细胞的单一性以及现有搜索方式易陷入小区域局部收敛的问题, 融合免疫算法和混沌优化算法各自的优点, 提出了一种新的混合优化算法。该算法采用 Hénon 序列来生成抗体群, 采用 Logistic 序列来产生并补充自然消亡部分的抗体细胞, 2 种不同规则的混沌序列使得抗体群具有足够的多样性, 扩大了搜索范围; 同时采用了 Logistic 映射混沌变异和 Gauss 变异相结合的混合变异, 提高了算法的搜索效率和收敛速度, 克服了早熟现象。阵列天线方向图综合是智能天线的一项重要技术, 采用提出的算法对阵列天线方向图进行了综合, 仿真结果表明, 与现有算法相比, 该算法优化能力强, 能有效避免局部收敛并且收敛速度快。

**关键词:** 混沌优化; 免疫算法; 天线阵; 方向图综合

中图分类号: TN823 文献标识码: A 文章编号: 1006-7043(2007)11-1273-05

## A multi-mapping chaotic immune algorithm and its application in pattern synthesis for antenna arrays

YE Jian-feng, WANG Yu-feng, PANG Wei-zheng

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The immune algorithm has several defects: the generation of the initial antibody community is blind, random and redundant; the addition of naturally vanished antibody cells is monotonous; finally, existing searching modes easily fall into local convergence. This paper proposed a mixed optimal algorithm by fusing the advantages of both the immune algorithm and the chaotic optimal algorithm. In this method, the antibody community is produced using the Hénon sequence, but antibody cells that replace the naturally vanished ones are generated using the Logistic sequence. Two chaotic sequences produced in different ways bring adequate diversity to the antibody community. As a result, the searching area is widened. Meanwhile, the simultaneous mapping of Logistic mutations and Gaussian mutations improves searching efficiency and convergence rates, thereby eliminating premature convergence. The pattern synthesis technique for array antennas is one of the key technologies in smart antenna systems. The proposed algorithm is used in calculating the optimal pattern of an antenna array. Simulation results show that the proposed algorithm can remarkably improve optimization performance and avoids local convergence while producing a high convergence rate.

**Keywords:** chaotic optimization; immune algorithm; antenna array; pattern synthesis

收稿日期: 2006-10-27.

作者简介: 叶剑锋(1978—), 男, 博士研究生, E-mail: yjf97811@163.

com;

庞伟正(1944—), 男, 教授, 博士生导师。

随着卫星通信和移动通信的迅速发展, 空间的电磁环境恶化、电磁干扰增强, 使得通信质量下降, 为了解决这些问题, 副瓣低、方向性强、抗干扰能力强的智能天线得到了极大的关注, 天线方向图综合

问题成为人们研究的热点。近年来,采用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 来解决天线方向图综合问题成为了一个研究热点,并且取得了明显的成效<sup>[1-3]</sup>。免疫算法<sup>[4]</sup> (immune algorithm, IA) 是模拟免疫系统的免疫机理开发出来的一种最优解搜索的优化方法,和 GA 相比,IA 有着明显的优势:1)它在记忆单元基础上运行,确保了快速收敛于全局最优解;2)分散式和独立式的搜索方式,保证了搜索群体的多样性;3)它通过促进或抑制抗体的产生,体现了免疫反应的自我调节功能<sup>[5]</sup>。但基本 IA 和 GA 一样存在搜索盲目随机、有较多冗余计算、在小区域内无法有效克服早熟等现象。

混沌(chaos)是自然界广泛存在的一种非线性现象,利用混沌运动的随机性、各态历经性和规律性<sup>[6]</sup>设计的混沌优化算法(chaos optimization algorithm, COA)是一种新型搜索算法,其基本思想是把混沌变量从混沌空间映射到解空间,然后利用混沌变量的随机性、各态历经性和规律性的特点进行搜索。混沌运动的特点使其具有了避免陷入局部极小的优化搜索能力。混沌扰动在搜索空间不是很大时,最优点搜索效果显著<sup>[7-9]</sup>,这刚好可以弥补基本 IA 在小区域内无法有效克服早熟现象的缺陷。

## 1 混沌系统及其特性

混沌是指由确定性方程得到的具有随机性的运动状态,呈现混沌状态的变量称为混沌变量,本文使用 Hénon 和 Logistic 2 种混沌方程来产生混沌变量。

### 1.1 Hénon 映射的混沌特性

Hénon 映射由法国天文学家埃农 1976 年提出,其数学描述为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} x_{k+1} = 1 - ax_k^2 + by_k, \\ y_{k+1} = x_k. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a, b$  为控制参数,当  $a=1.4, b=0.3, k=200$ ,

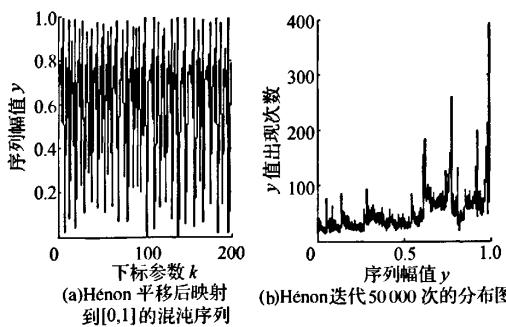


图 1 Hénon 映射的混沌特性

Fig. 1 Chaos characteristics of Hénon

$x_0, y_0$  是  $[0, 1]$  的随机数,然后通过平移将序列映射到  $[0, 1]$ ,得到如图 1(a) 的混沌序列。当  $k=5000$ ,在相同初始条件下得到图 1(b) 的分布图。从图 1(b) 的分布来看,区间  $[0, 1]$  分布是比较均匀的。

### 1.2 Logistic 映射

一维 Logistic 模型是最常用的混沌模型,其描述为

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k), k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中: $\mu$  为控制参数, $\mu$  值确定后,由任意初值  $x_0 \in [0, 1]$ ,可以迭代出一个确定的时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 。当  $\mu=4$  时,该系统没有稳定解,是  $[0, 1]$  区间的满映射,呈现完全的混沌状态。

## 2 多映射混沌免疫算法

### 2.1 算法简介

多映射混沌免疫算法(mutimapping chaos immune algorithm, MMCIA)的主要改进之处在于:1)分别利用 Hénon 映射和 Logistic 映射生成的混沌序列生成初始抗体和补充自然消亡的抗体细胞。混沌序列的随机性、遍历性和初值敏感性等特征保证了数据的取值会均匀分布在解空间之中,而不会集中在一起,因此能克服随机序列可能出现的数据冗余;同时采用与初始抗体不同规律的 Logistic 序列来补充自然消亡的抗体细胞,提高了抗体群的多样性,扩大了算法的搜索范围;2)利用 Logistic 映射实现的混沌变异和 Gauss 变异相结合的混合变异策略来实现变异操作,Logistic 映射混沌变异扩大搜索范围,摆脱局部最优,Gauss 变异控制搜索的速度,提高了算法的收敛速度;同时,Logistic 映射混沌变异和 Gauss 变异是两种不同性质的变异方式,交替使用二者可以提高抗体群的多样性,进一步扩大搜索区域,提高搜索到最优解的能力。

MMCIA 算法实现过程为

- 1) 将 Hénon 映射迭代生成的混沌序列平移后作为初始抗体群;
- 2) 计算抗体群中每个抗体的亲和度;
- 3) 如果满足终止条件,则转 10);否则转 4);
- 4) 根据抗体的亲和度值,采用赌轮选择方法进行选择运算;
- 5) 按照克隆规模函数,根据个体适应度值对通过 4) 的抗体进行繁殖;
- 6) 利用 Logistic 映射混沌变异和 Gauss 变异相结合的混合变异策略进行变异;
- 7) 计算亲和度,并保留亲和度高的抗体;
- 8) 利用 Logistic 映射产生混沌序列补充自然消亡抗体细胞;

9) 转到 2);

10) 结束.

## 2.2 编码及参数设定

采用十进制浮点数编码来表示各个变量, 这种表示方法在迭代运算时方便且可操作性强, 节省时空开销, 计算效率高. 设定种群规模、适应度函数、交叉概率、变异概率、混沌迭代次数等参数.

## 2.3 抗体群及补充抗体细胞的混沌生成

文中初始抗体群采用 Hénon 映射生成. 按式(1)迭代方式来产生混沌序列, 生成的混沌序列具有随机遍历且初值敏感的特点, 生成的序列平移到  $[0, 1]$  区间成为初始抗体群, 抗体群能够在系统状态空间中均匀分布.

采用 Logistic 映射生成补充自然消亡的抗体细胞. 按式(2)迭代方式产生混沌序列, 在生成的混沌序列中选择足够数量的亲和度高的抗体细胞来补充自然消亡的抗体细胞.

## 2.4 克隆规模函数

为了减小对克隆过程的控制, 加大亲和度大的抗体的克隆, 减小亲和度小的抗体的克隆, 引入克隆规模函数<sup>[11]</sup>:

$$N_c = \sum_{i=1}^N \text{round}\left(\frac{\beta N}{i}\right). \quad (3)$$

式中:  $N_c$  为克隆后的抗体群规模,  $\beta$  为克隆系数, 用来控制克隆的规模, round 为取整函数. 由式(3)可知, 亲和力越高的抗体, 克隆的规模也就越大, 使得算法在很大程度上使高亲和力的抗体得以更好的保存和发展.

## 2.5 混合变异策略

利用 Logistic 映射和 Gauss 变异 2 种变异方式来实现变异操作. 迭代时在奇数代时采用 Gauss 变异, 在偶数代时采用 Logistic 映射混沌变异.

### 2.5.1 Gauss 变异

文中采用的是基于自适应值的 Gauss 变异, 其描述为

$$x' = x + aN(0, 1), \quad (4)$$

$$a = (1/\beta)\exp(-f). \quad (5)$$

式中:  $x'$  为变异后的抗体,  $x$  为变异前的抗体.  $N(0, 1)$  是均值为 0、方差为 1 的正态分布随机变量.  $a$  是个体的变异率,  $f$  是每个抗体的亲和度, 即目标函数的适应值.  $\beta$  是一个参数, 用来控制指数函数倒数的大小.

### 2.5.2 Logistic 映射混沌变异

将抗体  $v$  映射到  $[0, 1]$  空间, 并作为混沌初值  $x_0$  代入式(1), 再进行  $r$  次 Logistic 迭代, 得到迭代  $r$  次后的混沌变量  $x_r$ , 并按式(6)计算变异后的混沌

向量  $x'_r$ , 最后再将  $x'_r$  映射到解空间, 完成 Logistic 映射混沌变异, 得变异后的抗体  $v'$ .

$$x'_r = (1 + c_r \eta) \hat{x} + \eta x_r. \quad (6)$$

式中:  $\hat{x}$  为当前最优值;  $\eta$  为  $(0, 1)$  内的参数, 可以随着代数而自适应变化.

## 3 天线阵模型

对于一个  $N$  元间距为  $d$ 、振幅相同的天线元组成的边射直线阵, 则其归一化的方向函数为

$$F(\varphi) = 20 \lg \left| \sum_{n=1}^N A_n e^{j((\pi-1)kd \cos \varphi + \delta_n)} \right|. \quad (7)$$

式中:  $\delta_n$  为第  $n$  个天线元的相位,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $\varphi$  为阵轴线与射线的夹角. 如果  $N$  为偶数, 相位  $\delta=0$ , 阵元的电流幅度值对称. 则式(7)演变为

$$F(\varphi) = 20 \lg \left| \sum_{n=1}^N A_n \cos \left( \frac{(N-2n+1)}{2} kd \cos \varphi \right) \right|. \quad (8)$$

显然,  $F(\varphi)=F(180^\circ-\varphi)$ , 方向图对称.

最大相对旁瓣电平 MSLL 的计算公式为

$$\text{MSLL} = \max_{\varphi \in S} \{F(\varphi)\}. \quad (9)$$

式中: max 为求最大值的函数,  $S$  为方向图的旁瓣区域. 为了得到均衡的零陷, 引入 NULL\_STD 零深方差来克服仅使用最高零陷值作为优化项导致的零深不均衡现象. 其表达式为

$$\text{NULL\_STD} = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i (F(\varphi_i) - \text{NLVL}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

式中:  $m$  是零陷的个数,  $p_i$  是权系数, 在  $0.1 \sim 1$  取值. 则适应度函数 Fitness 表示为

$$\begin{aligned} \text{Fitness} = & \omega_1 | \text{NSLL} - \text{SLVL} | + \\ & \omega_2 \sum_{i=1}^m \beta_i | F(\varphi_i) - \text{NLVL}_i | + \omega_3 \text{NULL\_STD}. \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $\text{SLVL}$  是指定的最大旁瓣值,  $\text{NLVL}_i$  是第  $i$  个零陷深度的期望值,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \beta_i$  为权系数, 在文中的计算中,  $\omega_1=1, \omega_2=0.2, \omega_3=3$ .

## 4 数值计算结果

考虑由 20 个天线阵元组成的均匀直线阵, 每个激励幅值用十进制基因段描述, 间距  $d=\lambda/2$ , 且激励幅度对称.

**仿真 1** 要求在  $40^\circ, 45^\circ$  和  $50^\circ$  生成零点,  $\text{SLVL}=-15.0 \text{ dB}, \text{NLVL}=-110 \text{ dB}, 2\theta_0=10^\circ$ , 种群规模取 100, 迭代 400 次后, 得到的结果如图 2 所示.

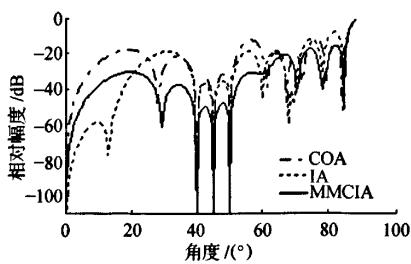


图 2 仿真 1 归一化天线方向图

Fig. 2 Normalized antenna pattern

图 2 给出了文中方法的优化结果。天线在  $40^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $50^\circ$  方向生成了  $-110$  dB 零陷深度。图中同时给出了基本的 IA 和 COA 迭代 400 次后的计算结果，显然，该文的方法达到了设计要求，而另外 2 种方法不是没有达到指定零深就是没有抑制好旁瓣，充分说明了 MMCIA 具有更出色的优化能力。图 3 给出了文中算法的目标函数值收敛过程，在 200 代时完成了收敛过程。

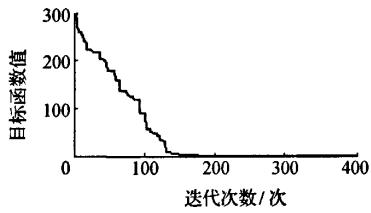


图 3 采用 MMCIA 优化目标函数收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of object function by MMCIA

相比文献[8]在 60 代时就已经收敛到最优值，该文的算法似乎显得收敛缓慢，一方面是由于设计指标的不同，文献[8]要求的是  $-80$  dB，该文要求达到的零深是  $-110$  dB，很明显文中搜索难度加大，要进行更多次的搜索；另外，算法本身也有原因，由于文中算法中在初始抗体群、补充抗体细胞和变异策略这几个步骤上采用序列和方式都提高了抗体群的多样性，特别是在补充抗体细胞时，在本身采用混沌序列的同时还注意到了与初始群体的 Hénon 混沌序列种类和维数均不同的 Logistic 混沌序列，进而扩大了算法的搜索区域，这正是算法相对于 IA 和 COA 能取得更优越的全局最优解的原因，因为搜索具有足够多样性的抗体群，范围越大，可能得到最优解的概率也就越大，但同时搜索更大的范围就使得算法需要耗费更多的时间，这是相互矛盾的，为解决这一矛盾，该文在采用 Logistic 映射混沌变异的同时加入了 Gauss 变异，用亲和度的大小来控制搜索

进程，在一定程度上提高了算法的收敛速度。

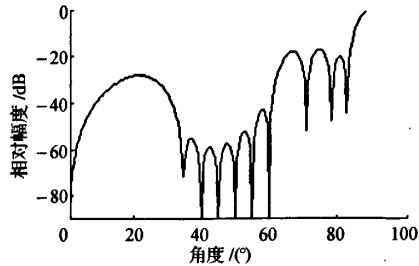


图 4 仿真 2 归一化天线方向图

Fig. 4 Normalized antenna pattern

仿真 2 要求在  $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$  生成零点， $SLVL = -15.0$  dB， $NLVL = -90$  dB， $2\theta_0 = 10^\circ$ ，种群规模取 100，迭代 400 次后，得到的结果如图 4 所示。

图 4 中天线在  $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$  方向生成了  $-90$  dB 零陷深度，并且有效抑制了副瓣，达到了各项设计指标的要求。

从仿真实例看，该算法应用于阵列天线方向图综合可以满足方向图各项指标及其精度的要求，在无线移动通信中具有良好的应用前景。采用 MMCIA 综合得到的图 2 和图 4 对应的激励幅度值如表 1 所示。

表 1 仿真实例中采用 MMCIA 优化得到的激励幅度

Table 1 Optimized excitation amplitude by MMCIA  
in the simulations

序号	激励幅度	
	图 2	图 4
1	0.222 41	0.181 79
2	0.411 38	0.402 13
3	0.643 57	0.656 58
4	0.634 33	0.575 53
5	0.599 19	0.511 82
6	0.467 03	0.420 66
7	0.548 40	0.649 53
8	0.703 97	0.768 03
9	0.731 42	0.828 17
10	0.609 59	0.736 18

## 5 结束语

该文给出了一种基于 IA 和 COA 的多映射混沌免疫算法，相比 IA 和 COA，该算法主要做了如下

几点改进:

- 1) 使用具有随机性、遍历性和规律性的混沌序列(Hénon)来产生初始抗体群,以克服其盲目随机性和数据的冗余;
- 2) 采用混沌序列(Logistic)来改善补充自然消亡抗体细胞的单一性;
- 3) 在产生初始抗体群和补充自然消亡抗体细胞的混沌生成过程中分别采用了2种维数和种类均不同的混沌序列,加大了抗体群的多样性;
- 4) 利用Logistic映射实现的混沌变异和Gauss变异相结合的混合变异策略来实现变异操作,分别改善了搜索范围和速度,提高了算法的搜索效率;
- 5) Logistic映射混沌变异和Gauss变异是2种不同性质的变异方式,交替使用二者可以提高抗体群的多样性,进一步扩大搜索区域,提高搜索到最优解的可能.该算法用于天线方向图综合取得了很好的优化效果,有着广阔的应用前景.

## 参考文献:

- [1] EDWARD E, ALTSCHULER. Design of a loaded monopole having hemispherical coverage using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1997, 45(1): 1—4.
- [2] LIAL W P, CHU F L. Application of genetic algorithms to phase-only null steering of linear arrays[J]. Electromagnetics, 1997, 17(1): 171—183.
- [3] FRANCISCO J. Genetic algorithm in the design and optimization of antenna array pattern[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1999, 47(3): 506—510.
- [4] De CASTRO L N, Von ZUBEN F J. The clonal selection algorithm with engineering applications[A]. Proceedings of GECC'00, Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications[C]. Orlando, 2000.
- [5] 胡朝阳,文福栓. 免疫算法与其他模拟进化优化算法的比较研究[J]. 电力情报, 1998, 13(1): 61—63.
- [6] 李兵,蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论及应用, 1997, 14(4): 613—615.
- [7] LI Bing, JIANG Weisun. Chaos optimization method and its application[J]. Control Theory & Applications, 1997, 14(4): 613—615.
- [8] 张彤,王宏伟,王子才. 变尺度混沌优化算法及其应用[J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285—288.
- [9] ZHANG Tong, WANG Hongwei, WANG Zicai. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application[J]. Control and Decision, 1999, 14(3): 285—288.
- [10] 范瑜,金荣洪. 基于一种新的遗传算法的天线方向图综合技术[J]. 电波科学学报, 2004, 19(2): 182—186.
- [11] FAN Yu, JIN Ronghong. Pattern synthesis of antennas based on a novel genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(2): 182—186.
- [12] 范瑜,金荣洪,耿军平,等. 基于差分进化算法和遗传算法的混合优化算法及其在阵列天线方向图综合中的应用[J]. 电子学报, 2004, 32(12): 1997—2000.
- [13] FAN Yu, JIN Ronghong, GENG Junping, et al. A hybrid optimization algorithm based on differential evolution and genetic algorithm and its applications in pattern synthesis of antenna arrays[J]. Acta Electronic Sinica, 2004, 32(12): 1997—2000.
- [14] HENON M. Two dimensional map with a strange attractor [J]. Commun, Math Phys, 1976, 50(3): 69—73.
- [15] DE CASTRO L N, VON ZUBEN F J. Learning and optimization using the clonal selection principle[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(3): 239—251.

〔责任编辑:李雪莲〕

## 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>