

基于改进遗传算法的波导缝隙阵天线设计方法

史 龙¹, 严明治¹, 李永峰², 赵裔昌¹, 马 捷¹

(1. 机电动态控制重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:针对毫米波引信波导缝隙阵天线在固定的小体积内难实现低副瓣的问题,提出了一种基于改进的遗传算法降低毫米波导缝隙阵天线副瓣电平的设计方法。该方法利用 Matlab 编程计算得出缝隙参数及其泰勒线阵阵元激励幅度,通过改进的遗传算法优化泰勒线阵阵元激励幅度,有效地降低了毫米波导缝隙阵天线副瓣电平。仿真结果表明,采用这种基于改进遗传算法的波导缝隙阵天线设计方法,使得天线的副瓣电平降低了 3.83 dB。

关键词:毫米波;波导缝隙阵天线;泰勒分布;遗传算法

中图分类号: TN820.15

文献标志码: A

文章编号: 1008-1194(2014)01-0071-05

Optimization Design of Millimeter Wave Waveguide Slot Array Antenna Based on Improved Genetic Algorithm

SHI Long¹, YAN Mingzhi¹, LI Yongfeng², ZHAO Yichang¹, MA Jie¹

(1. Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: An improved genetic algorithm was put forward to solve the problems of the lower side lobe of millimeter wave fuzes waveguide slot array antenna for the space limitation. The method used improved genetic algorithm to reduce side lobe level. In this paper, the Matlab program were used to compute Taylor distribution of slot array antenna. And because of the improved genetic algorithm applying to the optimization design of the Taloy array distribution, the side lobe was effectively reduced. Simulation results showed that this design method of millimeter wave waveguide slot array antenna could reduce the side lobe by 3.83 dB lower.

Key words: millimeter wave; waveguide slot antenna; Taylor distribution; genetic algorithm

0 引言

但凡定向探测、低副瓣赋形的线阵,大都采用波导缝隙线阵的天线形式,波导缝隙阵天线具有口面场分布容易控制、没有能量漏失、天线口径效率高、结构简单紧凑、强度高、抗风力强等优点,而且容易实现窄波束、低副瓣乃至超低副瓣。波导缝隙线阵天线的 E 面方向图宽, H 面方向图能够实现有特殊取向的窄波束低副瓣,两根天线就可以形成漏斗状的方向图。因此,波导缝隙阵天线的这些优良特性很好地适应了无线电引信的要求^[1-2]。但是由于尺

寸的限制,无线电引信天线通常难以实现高增益、窄波束和低副瓣,因此本文提出了一种基于改进遗传算法的波导缝隙阵天线设计方法,使得体积受限的无线电引信天线在单元数量有限的条件下将副瓣电平控制在较低水平。

1 波导缝隙天线理论、泰勒线阵分布和遗传算法

1.1 波导缝隙理论

波导缝隙阵天线通常是多个开在波导窄边的倾斜缝隙,或波导宽边的纵向缝隙以及波导中心线的倾斜缝隙。波导缝隙阵既可以是谐振式驻波阵也可

* 收稿日期:2013-10-12

作者简介:史龙(1978—),男,陕西长安人,硕士,工程师,研究方向:微波毫米波技术。E-mail:shialong@126.com。

以是非谐振式的行波阵^[2]。行波阵天线是由开在宽边的间距不等于半波长的纵向缝隙阵和终端匹配负载构成。行波阵如图 1 所示,缝隙间距不等于 $\lambda_g/2$ 。行波波导纵向缝隙阵在天线的滚动面能自然形成宽波束,在天线的轴向面通过设计可以得到不同指向的窄波束。天线的轴向面的波束指向由波导宽边 a 和阵元间距 d 决定。

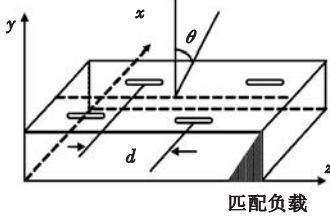


图 1 波导缝隙行波线阵示意图

Fig. 1 Antenna of travelling-wave linear array

波束指向公式为:

$$d = \lambda_0 \lambda_g / 2 (\lambda_g \sin \theta_{\lambda_0}) \quad (1)$$

其中 λ_0 为自由空间波长, λ_g 为波导波长, $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}$ 。为了得到唯一的主瓣方向 θ , d 的值应该满足下列关系:

$$\frac{\lambda_0 \lambda_g}{2(\lambda_g + \lambda_0)} < d < \frac{3\lambda_0 \lambda_g}{2(\lambda_g + \lambda_0)} \quad (2)$$

由上式可得主瓣的容许范围为:

$$-\frac{\pi}{2} < \theta < \arcsin \frac{2\lambda_0 - \lambda_g}{3\lambda_g} \quad (3)$$

通过对 d 、 a 的合适调节可以满足行波阵不同波束指向的设计要求。

1.2 泰勒线阵分布

泰勒线阵幅度分布,有两个独立的设计参数,副瓣电平 R (主瓣与副瓣之比),另一个是正整数 \bar{n} ,它表示在 $0 < u < \bar{n}$ 内有 $\bar{n}-1$ 个近似相等的副瓣,以后副瓣单调次递减。由主副瓣电平比 R 可以确定参数

$$A = \cos h [\cos h^{-1}(R)/(N-1)] \quad (4)$$

主瓣一侧的等副瓣数目设为 \bar{n} , σ 称为展宽因子,由式(5) 确定

$$\sigma = \frac{\bar{n}}{u_n} = \frac{\bar{n}}{\sqrt{A^2 + (\bar{n}-1/2)^2}} \quad (5)$$

泰勒阵列各单元的激励幅度为:

$$h_n(p) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\bar{n}-1} S_n(m) \cos mp \quad (6)$$

其中

$$S(u, A, n) = \frac{[(\bar{n}-1)!]^2}{(\bar{n}-1+u)!(\bar{n}-1-u)!} \cdot \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} \left[1 - \left(\frac{u}{\sigma \cdot u_n} \right)^2 \right] \quad (7)$$

当单元总数是奇数 $2N+1$ 时,

$$p = \frac{2\pi \cdot dn}{L}, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

当单元总数是偶数 $2N$ 时,

$$p = \frac{\pi \cdot d(2n+1)}{L}, n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (9)$$

式中 $L = Nd$ 为线阵长度, N 为单元个数。

1.3 遗传算法

遗传算法(Gas)是借鉴生物进化机制的全局寻优算法,其作为一种基于高效并行计算和鲁棒性强的优化技术,可以有效解决电磁问题求解与设计中的并行计算和非线性搜索寻优问题^[3]。遗传算法概念由来已久。早在 20 世纪 70 年代由美国 Michigan 大学的 John. Hollnad 教授提出以后,无论是在理论研究方面还是实际应用领域都获得了长足发展。尤其是阵列天线和波束赋形天线设计方面得到了广泛的应用^[4]。

遗传算法应用于 n 元阵列天线设计时,每个阵列单元对应一个基因位,阵列单元的电流幅度相当于一个基因,个体位串长度和阵列单元数相同。这里用 n 个记号 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 来表示。则 n 元阵列的电平幅度所组成的 n 维向量就可以用 $\mathbf{X} = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$ 来表示,记为 \mathbf{X} 。此时,每个 x_i 代表一个遗传基因,它的每一种可能取值称为等位基因,那么 \mathbf{X} 就相当于由 n 个遗传基因组成的一个染色体。然后,选择适当的适应度函数和最大进化代数,对缝隙电流幅度 \mathbf{X} 进行遗传操作。

1.3.1 编码

遗传算法不能直接处理问题空间的参数,必须通过编码的方式把它们转化成一串由基因按一定结构组成的染色体或个体。然后对个体编码进行交叉、选择、变异遗传运算实现优化。编码规则对于遗传操作有很大影响,在很多情况下决定了遗传操作进行的方式和遗传运算的效率。遗传算法常常采用二进制编码。

1.3.2 遗传算子

选择是从当前群体中选出优良的个体作为父代遗传到下一代群体中,该环节的操作是依据适应度值选择再生个体。选择是为了避免基因缺失、提高全

局收敛性和计算收敛率,常用几种选择方法有:比例选择(也称为轮盘赌法)、最优保留方法、基于排序的选择和基于局部竞争机制的选择。

交叉又称基因重组,通过基因重组可以得到组合了父辈特性的新一代个体。基因重组是遗传算法获取新优良个体的重要手段。交叉算子的二进制编码方式包括:顺序交叉、循环交叉、均匀交叉、多点交叉和单点交叉等。对于实数编码方式而言,交叉算子通常包括离散杂交和算术杂交等方式。

变异是由事先设定的变异概率确定需要变异的个体,再利用变异算子对选定的个体进行变异操作。

1.3.3 遗传参数的选择

交叉概率和变异概率的选择对于整个算法的运行效率及收敛性有很大的影响。交叉概率和变异概率如果越大,则产生新染色体越快,但同时也会破坏优良的染色体;反之如果越小,则算法就会收敛很慢,甚至停滞不前。如果染色体较差,就采用较大的交叉概率和变异概率;反之,染色体优良,就采用较小的交叉概率和变异概率。

1.3.4 适应度函数

遗传算法用适应度来度量群体中个体在优化计算中能达到或者接近最优解的优良程度。适应度较高的个体遗传到下一代的概率就较大,而适应度较低的个体遗传到下一代的概率较小。描述个体优良程度的函数称之为适应度函数。为了更利于遗传运算,适应度函数是根据所要解决的问题来确定的,不同的条件采用不同的适应度函数。

2 基于改进的遗传算法的低副瓣设计方法

2.1 改进的遗传算法

遗传算法虽有诸多优点,但也存在很多问题,所以就衍生出很多改进的遗传算法。改进的遗传算法应用于阵列天线的阵元馈电电流幅值优化设计,来实现方向图的旁瓣控制,降低了最大相对旁瓣电平。本文将 n 阵列单元的激励幅度作为基因,每个单元对应一个基因位,个体位串的长度就等于阵列单元数目。在改进的遗传算法中,以泰勒分布为初值缝隙激励幅度,用这种改进的遗传算法对缝隙激励幅度 X 进行遗传操作,实现毫米波波导缝隙阵天线的低副瓣设计。

2.1.1 编码

改进的遗传算法采用十进制编码方式,即实数

编码。减少了把决策变量真实值构成的染色体进行编码、解码的繁琐步骤。

2.1.2 选择

传统遗传算法选择操作因为采用单一的选择方法,无法避免要防止过早收敛就全局搜索但降低进化速度,要加快收敛就缩小搜索范围,甚至陷入局部收敛的问题。因此本文的改进遗传算法在算法运行初期采用能够最大程度保留新的适应度较大的染色体的最优保留选择方法,而在算法运行后期采用能够加快收敛速度的排序轮盘赌选择方法。

2.1.3 适应度函数

为了满足实际的工程应用,天线方向图不仅要使副瓣电平低于一定值(SLVL),而且还希望在给定的 N_0 个方向 $\theta_i (i = 1, 2, \dots, N_0)$ 形成深度为 NLVL 的深零点,则可定义适应度函数为:

$$\text{fitness} = \alpha |\text{MSLL} - \text{SLVL}| + \beta \left| \max_{i=1,2,\dots,N_0} \{F(\theta)\} - \text{NLVL} \right| \quad (12)$$

其中 SLVL 为期望的副瓣电平,MSLL 为最大相对旁瓣电平,MSLL 表示为:

$$\text{MSLL} = \max_{\theta \in S} \{F(\theta)\} \quad (13)$$

式中 \max 为求函数的最大值, S 为方向图的旁瓣区域。这里取 $\alpha = 0.8, \beta = 0$ 。

2.2 设计流程

基于改进的遗传算法的波导缝隙天线低副瓣设计方法的流程:首先,根据天线工作频率选择标准波导,由波束前倾确定单元间距 d 。再由天线增益和天线尺寸确定波导缝隙阵长及缝隙数目。然后根据副瓣电平计算泰勒阵分布主副瓣电平比 R ,选取等副瓣电平数 \bar{n} 。第三步,利用 Matlab 程序计算泰勒阵幅度分布、电导和缝隙偏移量,并利用改进的遗传算法对泰勒阵分布的副瓣电平进行优化。第四步,选取缝隙宽度 w 需要考虑机械加工精度。根据缝隙偏移量由 Ansoft HFSS 优化得出缝隙长度 l 。最后,通过 Ansoft HFSS 仿真验模。

3 实例验证

3.1 实例

为了验证本文方法的有效性,现设计一个毫米波波导缝隙阵天线其步骤如下:

1) 根据天线工作频率 34.5 GHz,选择 BJ320 标准波导。波束前倾 $\theta = 30^\circ$,由式(1)计算缝隙间距 d

=3.366 8 mm。

2)由天线增益 15 dB,可确定缝隙数目为 18,波导缝隙阵长 59.98 mm。

3)副瓣电平-25 dB,由式(4)得: $R=17.78$,等副瓣电平数取 $n=4$ 。

4)改进的遗传算法对泰勒阵分布的副瓣电平进行优化,电流的搜索范围为 $I_n(0,1)$,经过 500 次迭代得到优化后的激励幅度见表 1。

表 1 泰勒分布及遗传算法优化所得的参数

Tab. 1 Taylor distribution and genetic algorithm to optimize the parameters obtained

n	原始 幅度	偏心距	优化 幅度	偏心距	n	原始 幅度	偏心距	优化 幅度	偏心距
1	0.375 8	0.370 4	0.211 1	0.263 9	10	1.000 0	1.014 9	0.8	1.033 2
2	0.416 4	0.410 9	0.313 4	0.392 8	11	0.970 1	0.982 5	0.736 8	0.946 2
3	0.493 3	0.487 8	0.389 9	0.490 1	12	0.909 7	0.917 6	0.720 8	0.924 4
4	0.596 6	0.592 2	0.493 6	0.623 5	13	0.820 8	0.823 5	0.662 7	0.846 1
5	0.711 6	0.709 8	0.574 7	0.729 3	14	0.711 6	0.709 8	0.574 7	0.729 3
6	0.820 8	0.823 5	0.662 7	0.846 1	15	0.596 6	0.592 2	0.493 6	0.623 5
7	0.909 7	0.917 6	0.720 8	0.924 4	16	0.493 3	0.487 8	0.389 9	0.490 1
8	0.970 1	0.982 5	0.736 8	0.946 2	17	0.416 4	0.410 9	0.313 4	0.392 8
9	0.000 0	1.014 9	0.8	1.033 2	18	0.375 8	0.370 4	0.211 1	0.263 9

5)缝隙宽度取 $w=0.4$ mm,根据偏心距由 Ansoft HFSS 优化得缝隙长度 l 。

6)仿真验模

在 Ansoft HFSS 仿真软件中建立天线模型如图 2 所示,并由得出毫米波波导缝隙阵天线三维和极坐标方向图,如图 3 所示。

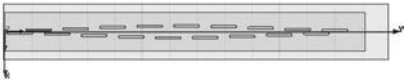


图 2 毫米波波导缝隙阵天线模型

Fig. 2 Millimeter-wave waveguide slot array antenna model

由仿真结果可以看出仿真和理论分析的一致性很好,并且经过改进的遗传优化后的天线方向图的最大副瓣电平比优化前降低了 3.83 dB,见图 4。

3.2 测试与分析

按照经过改进的遗传算法优化所得的毫米波波导缝隙阵天线的实际参数制作了天线实验模型,如图 5 所示。

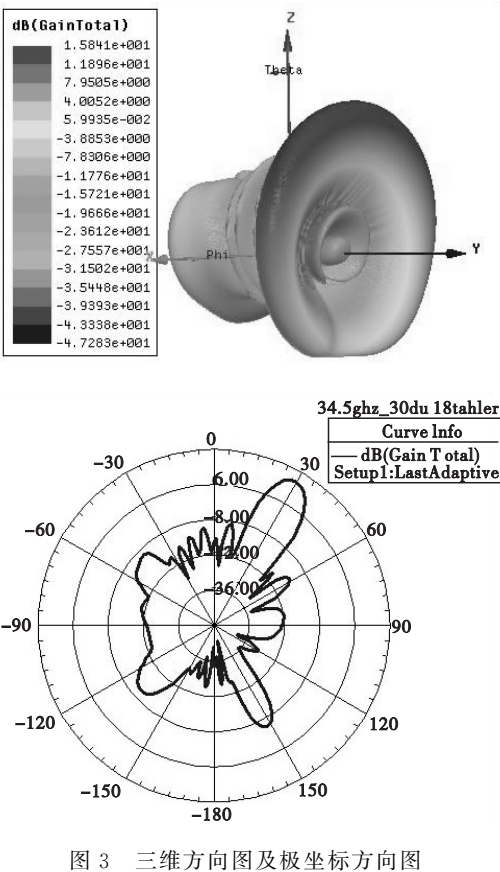


图 3 三维方向图及极坐标方向图

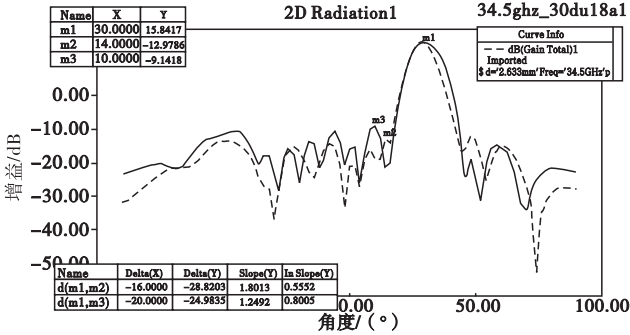


图 4 优化前后方向图

Fig. 4 The result before and after optimization

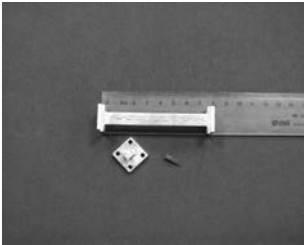


图 5 毫米波波导缝隙阵天线实物图

Fig. 5 Millimeter-wave waveguide slot antenna

实测的天线驻波和方向图如图 6 和图 7 所示。实测方向图与仿真方向图,两条曲线的形状、方向图

3 dB 波瓣宽度吻合较好。

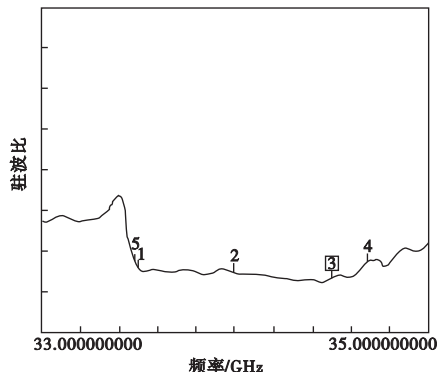


图 6 毫米波波导缝隙天线驻波比实测曲线

Fig. 6 The result of VSWR

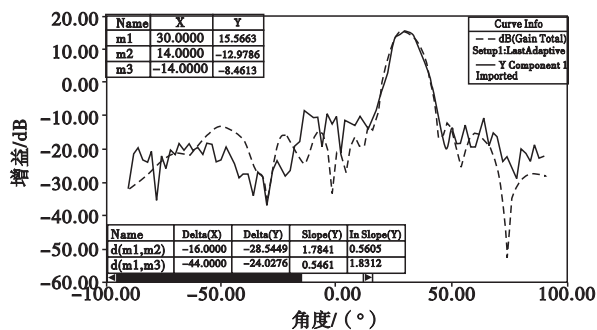


图 7 天线方向图仿真与实测曲线

Fig. 7 Antenna simulation and measured curves

基于有限元法的 Ansoft HFSS 对设计出的缝隙阵天线进行仿真,其中已经考虑了各个缝隙之间的耦合,计算结果已经很接近实际值,且仿真时定义波导为理想导体终端匹配则反射很小,仿真得出的方向图副瓣很低,驻波很小、增益较高,而工程中必然存在加工误差,增益较设计时小,副瓣会抬高几个 dB。造成以上结果的原因有以下几点:

加工精度:仿真建模中的尺寸取值可以精确到小数点后五位,而实际的机械加工精度只能达到 0.02 mm。由于实际加工精度的问题,出现缝隙不在谐振长度上,从而导致制作的天线增益不能达到设计指标。

匹配负载的影响:波导缝隙天线的匹配负载在 Ansoft HFSS 中仿真建模时可以调节到理想状态,使得驻波比可以较小,但是实际制作的匹配负载并不能完全吸收多余的入射波,总会有反射波反射回去,影响天线的辐射性能。

测试环境:由于测试环境的不标准,而引起远场分布的变化,也会造成天线方向图主、副瓣的畸变。基于以上考虑,设计毫米波波导缝隙天线时就要考虑加工精度、测量误差等因素对天线性能的影响,设计指标要留出足够余量,实际制作出的毫米波缝隙阵天线才能满足工程应用。

4 结论

本文提出了一种基于改进的遗传算法的波导缝隙阵天线优化设计方法。该方法首先利用 Matlab 程序计算泰勒线阵幅度分布、电导和缝隙偏移量,再通过改进的遗传算法优化泰勒线阵分布的激励幅度,有效地降低了毫米波波导缝隙阵天线副瓣电平。仿真结果表明,改进的遗传算法应用于波导缝隙阵的优化设计,实现了低副瓣设计。按照提出的方法制作的毫米波波导缝隙阵天线实验模型,实测驻波小于 1.2 的带宽大于 1 GHz,方向图曲线和仿真结果良好吻合。

参考文献:

- [1]杨丽娜.波导缝隙阵的波束赋形研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [2]卢万铮.天线理论与技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [3]杨林.阵列天线综合方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [4]曹雪刚.引信共形微带天线的设计应用研究[D].南京:南京理工大学,2006.
- [5]刘燕.阵列天线方向图综合算法研究[D].西安:西北工业大学,2007.

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)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)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),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>