

文章编号 1005-0388(2005)02-0260-05

# 混合遗传算法优化设计宽带加载螺旋天线<sup>\*</sup>

纪奕才<sup>1,2</sup> 刘其中<sup>1</sup> 尹应增<sup>1</sup> 葛德彪<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, ycji@mail.xidian.edu.cn, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 研究了遗传算法和模拟退火法相结合的方法来快速优化设计宽带加载螺旋天线。采用该算法对加载螺旋天线上的加载集总元件的值、加载位置以及匹配网络参数进行一体化优化设计。采用一种简单有效的方法来快速求解加载元件值和加载位置改变后的阻抗矩阵方程, 提高了优化设计的效率。利用该方法成功地设计了两副宽带小型化加载螺旋天线。

**关键词** 遗传算法, 模拟退火法, 加载螺旋天线, 矩量法

**中图分类号** TN820      **文献标识码** B

## Design of broadband loaded helical antennas using a hybrid genetic algorithm

JI Yi-cai<sup>1,2</sup> LIU Qi-zhong<sup>1</sup> YIN Ying-zeng<sup>1</sup> GE De-biao<sup>2</sup>

(1. National Laboratory of Antennas and Microwave Technology

Xidian University, ycji@mail.xidian.edu.cn, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. School of science, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract** This paper investigates a hybrid approach of genetic algorithm (GA) and simulated annealing (SA) for the fast optimal design of broadband loaded helical antennas. The loading circuit parameters, locations of the loads along the antenna, as well as matching network parameters, are optimized simultaneously. An efficient approach is applied in the design procedure for the fast calculation of the impedance matrix equation when the loading configurations are changed, which greatly enhances the optimization efficiency. Two broadband miniature loaded helical antennas are designed successfully, one of which is manufactured and the numerical result agrees well with the experiment result.

**Key words** genetic algorithm, simulated annealing, loaded helical antennas, method of moment

## 1 引言

现代移动通信系统中的跳扩频技术的应用, 要求其所配备的天线实现宽带化和小型化<sup>[1~3]</sup>。对天线进行合适的加载及加入匹配网络可以增加天线的工作带宽和减小天线的尺寸, 文献[6~8]采用遗传算法<sup>[4,5]</sup>成功地优化设计了许多宽带加载线天线。

为进一步减小天线的尺寸, 可采用加载螺旋天线的形式<sup>[10,11]</sup>, 例如文献[12]采用遗传算法优化设计了一副加载法向模螺旋天线, 成功地实现了该频带上天线的宽带化和小型化。遗传算法的缺点是局部搜索能力差, 会导致算法收敛速度很慢, 而且法向模螺旋天线阻抗特性随频率变化剧烈, 十分难于匹配, 这样在优化设计加载法向模螺旋天线时, 调用目标函

\* 收稿日期: 2003-12-19.

万方数据

基金项目: 国家部委预研项目资助(41001020204; 40106030502)

数的次数非常多,需要花费大量的计算时间。研究表明,引入其它局部搜索能力强的优化算法与遗传算法相结合,形成混合算法,可以克服遗传算法局部搜索能力差的缺点,极大地提高优化算法的效率。本文采用遗传算法和模拟退火法相结合的方法来优化设计宽带小型化加载法向模螺旋天线。这两种优化方法互相取长补短,可形成性能优良的全局搜索算法。采用该算法设计了两副宽带小型化加载螺旋天线,通过比较可以看出混合遗传算法的搜索效率比遗传算法要高得多。

## 2 混合遗传算法优化设计加载螺旋天线

加载法向模螺旋天线的几何结构如图1所示,图中 $b$ 是螺旋半径, $p$ 是螺距, $h$ 是天线高度, $\Psi$ 是螺距角, $a$ 为螺旋线半径, $N$ 为螺旋线圈数。螺旋天线通过一段长度为 $h_w$ 的直线段与特性阻抗为 $50\Omega$ 的同轴线馈源内芯相连接,同轴馈线外皮接地面,地面下方的馈线上插入一个宽带匹配网络。天线上采用集总元件加载, $h_i^L$ 是第*i*个加载的位置。

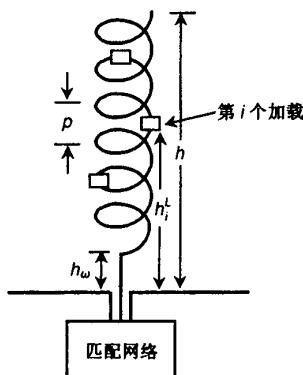


图1 加载法向模螺旋天线

螺旋天线上的电流可采用曲线段划分的矩量法<sup>[9]</sup>求出。当在天线上加上集总加载元件时,采用矩量法求得的加载后的阻抗矩阵方程为

$$\mathbf{ZI} = (\mathbf{Z}^0 + \mathbf{Z}^L) \mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{Z}$ 为加载后的 $N \times N$ 阶阻抗矩阵, $\mathbf{Z}^0$ 为未加载时法向模螺旋天线的 $N \times N$ 阶阻抗矩阵, $\mathbf{I}$ 为加载后天线上电流矩阵, $\mathbf{V}$ 为激励矩阵, $\mathbf{Z}^L$ 为对角阵,其元素 $Z_{mk}^L = Z_k^L \delta_{m,n_k} \delta_{n,n_k}$ , $n_k$ 为第*k*个加载阻抗的位置, $Z_k^L$ 为该位置上总的加载值, $k = 1, \dots, NL$ , $NL$ 为加载的个数。

在优化设计中,当加载和匹配网络改变后天线

的电特性都需要调用天线分析程序重新计算,由于被优化参数数目众多,取值范围广,采样频点也很多,因此优化过程需要成千上万次地调用天线分析程序。如果每调用一次天线计算程序都直接应用矩阵法,在每个频点上都要完成矩阵填充和矩阵求逆两个过程,会使得优化过程非常耗费时间。为克服这一缺点,可采用加载阻抗矩阵分解<sup>[6,7]</sup>的方法来提高计算速度。该方法将加载阻抗矩阵方程(1)转化为求解一个未知数很少的 $NL \times NL$ 阶矩阵方程,求解该矩阵方程可求得加载天线的电流系数矩阵 $\mathbf{I}$ 。一旦天线上的电流知道了,就可以计算出天线的其它电性能。

本文采用在遗传算法中融入模拟退火法的混合遗传算法来优化设计加载螺旋天线<sup>[4,5]</sup>,该方法既克服了遗传算法早熟和局部寻优能力差等缺点,又克服了模拟退火法对整个搜索空间把握能力差的缺点,二者取长补短,提高了优化设计的效率。

对于全向天线,所关心的主要指标是天线在工作频带内的电压驻波比和水平面上的增益,因此优化设计天线时,有必要设计合适的目标函数使天线同时满足电压驻波比和系统增益这两个指标。文献[12]采用的目标函数可以满足这一要求,然而其目标函数对电压驻波比和系统增益等同对待,这样会造成优化算法不断地在驻波指标和增益指标之间徘徊,降低了优化效率。本文采用加权的方法对文献[12]的目标函数进行改进,得到如下目标函数

$$F = -\alpha \sum_{i=1}^{Nf} u(G_i^s, G^s(f_i, \theta_0)) - \beta \sum_{i=1}^{Nf} u(VSWR(f_i), VSWR0) - \sum_{i=1}^{Nf-1} |G^a(f_{i+1}, \theta_0) - G^a(f_i, \theta_0)|^2 \quad (2)$$

式中 $u$ 是一个函数

$$u(x, y) = \begin{cases} |x - y|^2, & x > y \\ 0, & x \leq y \end{cases} \quad (3)$$

$Nf$ 是频带内采样点的个数, $VSWR(f_i)$ 是每个频点上的电压驻波比, $VSWR0$ 是电压驻波比的设计目标。 $G^s(f_i, \theta_0)$ 是天线在每个频点上俯仰角为 $\theta_0$ 时的系统增益, $G_s^s$ 为天线系统增益的设计目标, $G^a(f_i, \theta_0)$ 是天线在每个频点上俯仰角为 $\theta_0$ 时的功率增益,这里希望在天线水平面内得到最大增益,所以取 $\theta_0=90^\circ$ 。系统增益定义为 $G^s=G^a(1-|\Gamma|^2)$ ,式中 $\Gamma$ 是天线的匹配网络输入端的电压反射系数。

虽然系统增益已经包括辐射增益和反射系数,

但如果仅以第一项系统增益进行优化设计,优化过程收敛速度很慢,并且会出现小区间陡峭和天线电特性随加载参数的微小变化敏感的现象。计算中发现,后两项的引入可以有效地克服上述缺点。第二项 VSWR 引入能有效地提高优化设计的收敛速度;第三项能够有效地对天线的功率增益进行平滑,可以使天线在整个频带内的增益趋于平缓,并且间接平缓阻抗特性,使天线更加易于宽带匹配。

从式(6)可以看出,当各个采样频点上的电压驻波比和系统增益都满足设计目标时,其前两项等于 0,这两项值达到最大。 $\alpha$  和  $\beta$  是对系统增益和驻波的加权系数,一般对驻波加权较大,即  $\beta$  取一个很大的正数,而  $\alpha=1$ ,这样优化过程中,驻波会很快的满足设计指标,然后  $\beta$  会紧紧地约束驻波特性,使优化算法全力去优化天线的增益特性,提高了优化设计的效率。

### 3 数值结果

下面采用上述混合遗传算法来优化设计一个工作在 30~512MHz 频带内的宽带小型化加载螺旋天线。法向模螺旋天线的结构参数为  $b = 0.01m$ ,  $p = 0.04m$ ,  $N = 28$ ,  $a = 0.0025m$ ,  $h_w = 0.08m$ ,  $h = 1.2m$ 。将每圈螺旋线分为 2 段,直线段分为 4 段,这样天线共划分为 60 段。未加载天线在 30~512MHz 频率范围内的电特性,如图 4 中的实线所示,未加载天线的驻波远高于 3,特别是在频率低端最高达到 150 多,原因是远离谐振点天线的输入电阻很小,而输入容抗很大。天线在 185MHz 附近以及 370MHz 附近由于反向电流的影响,系统增益都很小,如图 5 所示。对该天线优化设计的目的就是改善其阻抗特性,使其频带内的阻抗与发射机相匹配,电压驻波比小于 3.0;有效地提高天线在 185MHz 附近以及 370MHz 附近的辐射增益,并使整个频带内的系统增益大于 -5.0dB.

优化设计中在天线上的四个位置进行加载,加载的位置在天线上某两段之间,加载形式为电阻、电感和电容并联,匹配网络采用图 2 所示的形式。优化设计中,一些元件的阻抗值会趋于零或趋于开路,说明这些元件是多余的,因此设计目标函数时,将自动去掉这些元件。天线上加载元件以及各网络参数的取值范围是:  $0 < R < 10k\Omega$ ,  $0 < L < 10\mu H$ ,  $0 < C < 0.01\mu F$ ,  $0.1 < n < 5$ 。遗传算法编码时,以上元件的值在遗传算法中都用 20 位二进制码表示。天线分为 61 段,加载位置在相邻两段之间,则加载位置  $n^l$  的取

值范围在 1 到 60 之间,采用 6 位二进制码表示。

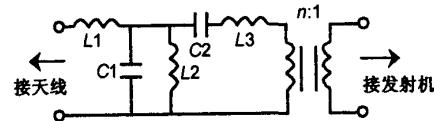


图 2 匹配网络示意图

分别采用遗传算法和混合遗传算法对该加载天线进行优化设计,这两种方法适应度的收敛特性随着调用目标函数的次数变化曲线如图 3 所示。从图中可以看出,混合遗传算法的收敛速度远远高于单纯遗传算法,当调用目标函数次数等于 59570 次时,目标函数达到 0.93,而驻波小于 3,增益大于 -5.2dB;而单纯遗传算法调用目标函数次数等于 100000 次时,目标函数还大于 -24280,而最大驻波在 4.30 左右,增益在 -17.36dB 左右。可见,遗传算法由于其局部搜索能力的不足,致使优化过程冗长,和模拟退火法相结合后,克服了这一缺点,搜索能力显著提高。

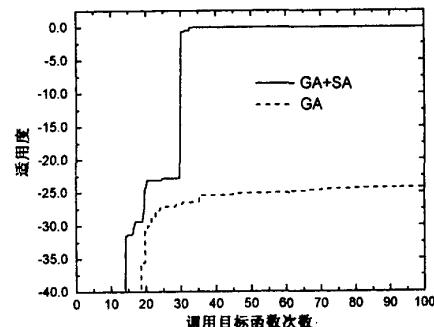


图 3 适应度随调用目标函数次数变化  
曲线 (单位:  $10^3$ )

混合遗传算法优化设计所得加载元件的值以及加载位置如表 1 所示。从表中可以看出,有五个元件的阻抗值趋于开路,已去掉,使得加载元件值仅剩下 7 个,有效地降低天线的加工制作和实验调整的难度。匹配网络中各参数值分别为  $L_1 = 29.8 \text{ nH}$ ,  $C_1 = 0.68 \text{ pF}$ ,  $L_2 = 1.2 \mu H$ ,  $C_2$  的值很大趋于短路已去掉,  $L_3 = 1.2 \text{ nH}$ , 传输线变压器变压比  $n = 2.358$ 。

表 1 加载的位置和元件值

加载	$k_l^t(\text{m})$	$R(\Omega)$	$L(\mu H)$	$R(\text{pF})$
$L_1$	0.42	—	—	30.3
$L_2$	0.46	51.63	0.378	1.7
$L_3$	0.66	537.2	1.508	—
$L_4$	1.0	—	—	975.5

天线电特性如图4和图5中所示,天线系统的输入电压驻波比显著减小,在整个频带内VSWR都小于3.0。频率低端的系统增益较低,但在185MHz及370MHz附近,加载减弱了反向电流的影响,使天线增益提高了许多,并且整个频带内系统增益大于-5.2dBi,绝大多数频点的增益都高于-5.0dBi,基本上满足设计要求。天线的工作带宽达到了17倍频,而天线的高度仅为 $0.12\lambda_{max}$ ,充分显示了用加载法向模螺旋天线实现宽带化小型化的优势。

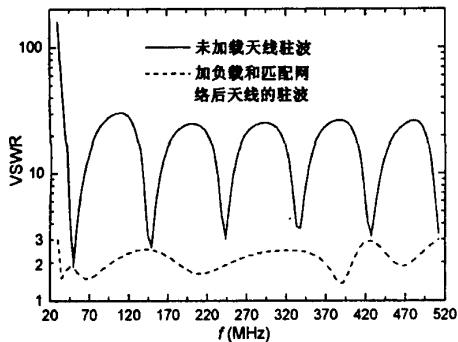


图4 天线的驻波特性

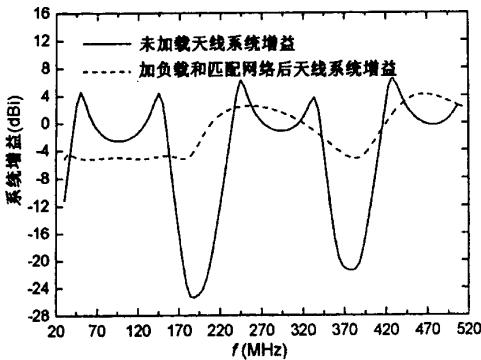


图5 天线的系统增益特性

下面设计一个4~20MHz宽带小型化加载螺旋天线。螺旋天线的结构参数为: $h = 4.0\text{m}$ ,  $b = 0.015\text{m}$ ,  $p = 0.02\text{m}$ ,  $a = 0.002\text{m}$ ,  $N = 190$ ,  $h_w = 0.2\text{m}$ 。加载前该螺旋天线的电压驻波比和系统增益特性如图6所示,从图中可以看出,天线在频率低端的电压驻波比最大达到8928,因为天线高度仅为 $0.053\lambda_{max}$ ,在频率低端的输入阻抗中电阻很小而容抗很大。由于天线的反射损耗特别大,天线在频率低端的系统增益很小,最低达-28.7dBi。

采用混合遗传算法对该天线进行优化设计,设计的目标是电压驻波比小于3.0,系统增益大于-16dBi,并且使频带高端的增益尽量高。优化设计的结果是:

天线上仅有一个加载,位置是1.93m,加载形式是一个 $1289.6\Omega$ 电阻和一个 $21.197\mu\text{H}$ 电感并联。天线的宽带匹配网络的元件值分别为: $L_1 = 5.087\mu\text{H}$ ,  $C_1 = 32.4\text{pF}$ ,  $L_2 = 8.806\mu\text{H}$ ,  $C_2 = 77.6\text{pF}$ ,  $L_3 = 5.598\mu\text{H}$ ,  $n = 3.0$ 。

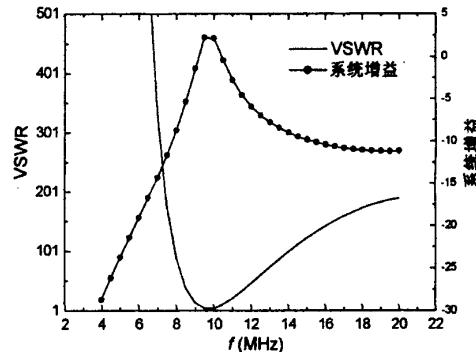


图6 加载前螺旋天线的电压驻波比和系统增益

天线加匹配网络之后的电压驻波比以及系统增益特性分别如图7和图8所示,从图中可以看出,天

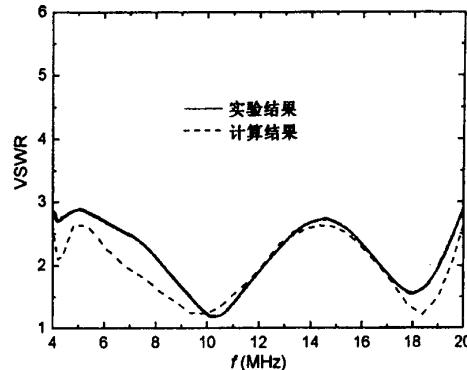


图7 4~20MHz加载螺旋天线的电压驻波比

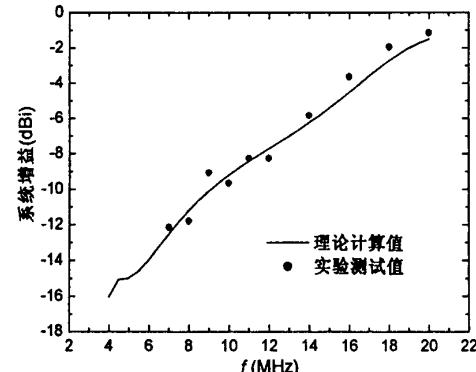


图8 4~20MHz螺旋加载天线的系统增益

线在整个频带内的电压驻波比小于3.0,系统增益

大于 $-16.0\text{dBi}$ 。对该天线加工制作并进行实验测试,其测试结果如图7和图8中的实线或实心点所示。从图中可以看出,理论计算结果与实验测试结果吻合良好,充分说明了本文方法的有效性。

## 4 结论

本文研究了一种利用混合遗传算法来优化设计宽带小型化加载法向模螺旋天线的新技术。该优化方法搜索效率高,缩短了优化设计天线的周期。优化所得的集总元件的数目少,降低了天线的加工制作和实验调整的难度。文中成功地设计了两副宽带小型化加载螺旋天线。数值结果与实验结果吻合良好。

## 参考文献

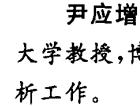
- [1] 王元坤,李玉权.线天线的宽频带技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [2] K Fujimoto and J R James. Mobile antenna systems handbook [M]. Boston: Artech House, 1994.
- [3] R F Harrington. Field computation by moment method [M]. New York: Macmillan, 1968.
- [4] 陈国良,王旭发等.遗传算法及其应用[M].北京:人民邮电出版社,1996.
- [5] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [6] A Boag, E Michielssen and R Mittra. Design of electrically loaded wire antennas using genetic algorithms [J]. IEEE Trans. on AP., 1996, 44(5): 687~695.
- [7] Z Alanan, R Mittra and A Boag. New design of ultra wide-band communication antennas using a genetic algorithm [J]. IEEE Trans. on AP., 1997, 45(10): 1494~1501.
- [8] S D Rogers, K Yegin, A Q Martin and C M Butler. Genetic algorithm optimization and realization of broadband loaded wire monopoles [A]. IEEE International Symposium On AP [C], Boston: IEEE Press, 2001:676~680.
- [9] Ji Yicai, Sun Baohua and Liu Qizhong. A new moment method for the fast and accurate analysis of normal mode helical antennas [J]. Journal of Electronics (china), 2001, 18(4):355~358.
- [10] S D Rogers, K Yegin, A Q Martin and C M Butler. Optimization of loaded normal mode helical antennas [A]. Digest of the Electromagnetic Theory Symposium [C], Thessaloniki: URSI Press, May 1998, 36~38.
- [11] 纪奕才,郭景丽,刘其中.加载法向模螺旋天线的研究[J].电波科学学报,2002,17(6):573~576.  
Y C Ji, J L Guo, Q Z Liu. The loaded normal mode helical antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(6):573~576.
- [12] 纪奕才,贺秀莲,刘其中等.加载螺旋天线的优化设计[J].西安电子科技大学学报,2002,29(6):721~724.



**纪奕才** (1974—)男,山东人,西安电子科技大学博士后,主要研究方向为宽带小型化天线、智能天线以及电磁兼容等。



**刘其中** (1938—),男,重庆人,西安电子科技大学教授、博士生导师。在国内外刊物上发表论文70多篇,主要研究方向为天线数值计算,宽带小型化天线和智能天线、电磁散射以及电磁兼容等。



**尹应增** (1964—),男,河南人,西安电子科技大学教授,博士。主要从事天线理论研究和计算分析工作。

## 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>