

文章编号 1005-0388(2008)05-0982-05

# 一种带尾翼的新型短波宽带偶极天线\*

柳超<sup>1,2</sup>☆ 张志刚<sup>2</sup> 刘其中<sup>1</sup> 姚军<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, 陕西 西安 710071;

2. 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 设计了一副带尾翼和集总电阻加载的短波宽带三角形偶极子线天线。采用矩量法(MoM)对该天线的电特性进行了仿真计算, 优化了天线的电压驻波比和增益特性, 并制作了一副实验天线。数值仿真和测量结果表明: 在3~30 MHz频带内, 该天线电压驻波(VSWR)比小于2.2, 在一般地面上平均增益大于4 dBi。

**关键词** 线天线; 宽带天线; 短波天线

**中图分类号** TN821<sup>+</sup>.4      **文献标志码** A

## Novel broadband HF dipole antenna with tailed wings

LIU Chao<sup>1,2</sup> ZHANG Zhi-gang<sup>2</sup> LIU Qi-zhong<sup>1</sup> YAO Jun<sup>2</sup>

(1. National Laboratory of Antennas and Microwave Technology,

Xidian Univ., Xi'an Shaanxi 710071, China; 2. School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei 430033, China)

**Abstract** A broadband HF triangle dipole wire-antenna with tailed wings and lumped loading resistors is designed and analyzed by using method of moments (MoM). Its voltage standing wave ratio (VSWR) and gain are optimized. An experimental antenna is made. Both numerical results and measured data show that the VSWR is less than 2.2 and the average gain for the average ground is larger than 4dBi in 3~30 MHz frequency range.

**Key words** wire antennas; broadband antennas; HF antennas

## 1 引言

目前用于中、近距离短波通信的基站天线大量采用水平极化天线, 最常见的有双极天线、笼形天线等, 它们为窄带天线, 不能保证发射机免调谐全频段宽带工作, 跳频、扩频、自适应选频、动态频管等抗干扰通信手段无法实施。现代军事通信业务量越来越大, 为了尽量减少通信站的天线数量, 通信距离2 000 km以内的天线应为全向宽带天线, 以满足短波全波段使用和对多个对象通信的要求。

实现天线宽频带特性的有效方法之一就是对天线体进行加载<sup>[1,2]</sup>。Altshuler提出了一种结构简单、具有良好宽频带特性的偶极天线。这种天线是

在距天线末端1/4波长处加载电阻, 使加载点和馈电点之间的线段上电流近似呈行波分布。Altshuler偶极天线的加载电阻可近似为天线平均特性阻抗的一半。加载使得天线的输入阻抗比同尺寸未加载天线的阻抗变化小得多, 通常Altshuler天线在3:1的频率范围内VSWR小于2。当天线长度较短时, Altshuler天线与同尺寸天线的方向图差异不大; 但当天线长度较长时, 加载天线上的行波电流起主要作用, 这时最大辐射方向朝天线轴靠近, 减小了天线轴向附近的低辐射区域<sup>[3]</sup>。此外, 加载天线方向图随频率的变化远没有未加载天线方向图随频率变化剧烈, 有较宽的方向图带宽。然而Altshuler

\* 收稿日期: 2008-10-16.

基金项目: 总装备部研究项目(ZLY2006356)

☆ E-mail: liuchao0817@sina.com

万方数据

天线要求加载点到天线末端的距离为 $1/4$ 波长的奇数倍,一个工作频带很宽(如 $10:1$ 的带宽)的天线显然不能满足这个条件,尤其当加载点到天线末端的距离为 $1/2$ 波长的整数倍时,加载电阻不起作用,天线电流呈驻波分布,天线的输入VSWR明显变大,这就限制了Altshuler天线的带宽。显然,一个典型的Altshuler天线不能满足 $3\sim30\text{MHz}$ 宽频带工作的要求。

三角形天线是一种平面结构,具有重量轻、易架设等优点。当张角较大时(如 $90^\circ$ ),它既是电偶极子天线又是具有类似外形的缝隙天线,二者构成一对互补天线,因而具有较好的宽频带工作特性。但大张角的三角形天线在短波波段尺寸仍然较大,架设不方便。小张角的三角形天线虽然尺寸较小,但其输入电抗与圆柱型偶极子天线输入电抗类似,随频率剧烈变化,因此也不具有较宽的频宽特性。

采用线状小张角三角形偶极子形式,根据Altshuler加载天线的设计思想,通过优化天线的结构参数和元件参数,设计了一副工作在 $3\sim30\text{MHz}$ 频带内的宽带偶极子天线。为克服加载元件距天线末端距离为 $1/2$ 波长整数倍时天线输入VSWR明显变大的缺陷,在天线臂加载单元处设计了一个斜挂的三角形尾翼,进一步改善VSWR特性。

## 2 天线结构

带尾翼的短波宽带加载偶极天线结构如图1所示,(a)为天线侧视图,(b)为天线俯视图。天线由两个水平辐射单元组成,用平衡/不平衡转换器(Balun)在两个水平辐射单元的中心馈电。天线两端悬挂在两个支撑桅杆(图1中的A和B)的顶部,桅杆的高度取决于通信距离。由于该天线主要用于通信距离小于 $2000\text{km}$ 的短波天波通信,因此桅杆的高度一般在 $10\sim20\text{m}$ 的范围内选取,典型的天线架高取 $15\text{m}$ 。

为了使天线宽频带工作,且考虑到架设的方便性,天线的水平部分为一个导线结构的小张角三角形偶极子;中部串接一个集总加载电阻单元,用于控制天线臂的反射能量以改善天线的驻波比性能;从加载处向下以一个特定的角度 $\alpha$ 向支撑桅杆伸出一个三角形尾翼,尾翼的末端通过绝缘绳挂在支撑桅杆的中部。天线加载处的前半臂为一个平面结构的三角形,加载处的后半臂为三维锥形结构。合适选择天线臂的张角、长度和加载电阻的数值、位置等以获得 $10:1$ 的工作带宽。天线导线采用直径为 $3$

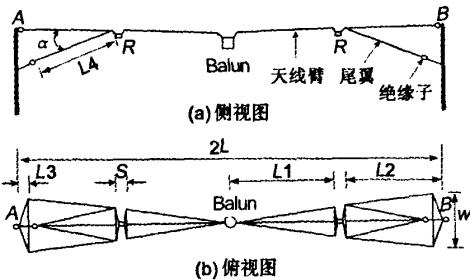


图1 短波加载偶极宽带天线原理图

mm的不锈钢丝绳,钢丝绳的柔软特性可方便天线的重复收放,使之具有可机动架设的特点。

Balun设计为一个传输线变压器<sup>[4,5]</sup>,它既可保证天线两臂平衡馈电,又可较好地实现天线与 $50\Omega$ 同轴馈线的阻抗匹配。传输线变压器具有比普通阻抗变换器宽得多的带宽,可以满足 $3\sim30\text{MHz}$ 频率范围使用要求。

## 3 数值仿真及优化

采用矩量法对带尾翼的短波宽带加载偶极天线进行数值仿真<sup>[6]</sup>。选取电场积分方程为矩量法的求解方程

$$-\hat{s} \cdot \mathbf{E}^I(\mathbf{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L I(s') \left( k^2 \hat{s}' \cdot \hat{s} - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} \right) g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds' \quad (1)$$

式中, $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \exp(-jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ ;  $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ ;  $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ , $s$ 为在 $\mathbf{r}$ 处沿导线轴的距离; $\hat{s}$ 为沿导线轴的单位矢量。

由于加载区长度比天线长度小很多,故可用狄拉克函数来代替加载区及其邻域中加载阻抗的分布规律<sup>[7]</sup>。由于采用集总电阻加载,天线已被加载电阻分为多段,所以每一段上的电流应用一个多项式来表示,第*i*段的电流函数描述如下

$$I_i(z) = \sum_{k=1}^{n_i} I_{i,k} \left| \frac{z}{z_{i+1}} \right|^{k-1} \quad (2)$$

式中, $n_i$ 为第*i*段(即 $z_i$ 点和 $z_{i+1}$ 点之间的线段)所取电流多项式的项数。

由于天线架设在户外,天线的受力与气温、风速和裹冰厚度等气象因素有关,加之天线臂上悬挂有Balun、加载单元和尾翼等集中荷载,因此天线的力学计算非常复杂。考虑到最大风速和最大裹冰不会同时发生,且最大风速通常是影响天线生存安全的主要因素,故可按最大风速来计算天线的受力。最大风速取 $160\text{ km/h}$ 且支撑桅杆档距为 $40\text{ m}$ 时,

结构设计表明天线体最大弧垂(天线体最低点距两端悬挂点的高度)取1.5 m可保证天线的安全使用。为仿真天线的电气性能,采用悬链线公式给出天线导线各点高度与位置的关系<sup>[8]</sup>

$$z = z_0 + 133 \left( \operatorname{ch} \frac{x}{133} - 1 \right) \quad (3)$$

式中,z是天线各点距地面的高度(m); $z_0$ 是天线中点距地面的高度(m);x是天线各点沿天线轴向到天线中心点的水平距离(m)。

在进行天线性能数值仿真时,天线上每段的端点坐标由天线结构和悬链线公式(3)共同确定,每一分段用直线线段近似。天线导线的导电率取 $\sigma = 1 \times 10^{-2}$  S/m,一般地面上的电参数取 $\sigma = 1.4 \times 10^6$  S/m, $\epsilon_r = 15$ , $\mu_r = 1$ 。

为使天线性能达到最佳,以驻波比和增益为优化目标,采用遗传算法对天线进行优化<sup>[9,10]</sup>。目标函数为

$$F = \min \left\{ \sum_{i=1}^N [W_i (\operatorname{VSWR}(f_i) - 1)^2 + \lambda (G_0 - G(f_i))] \right\} \quad (4)$$

式中, $f_i$ ( $i = 1, 2, \dots, N$ )表示带内N个频率点; $\operatorname{VSWR}(f_i)$ 和 $G(f_i)$ 分别表示频率为 $f_i$ 时天线的驻波比和增益,可由MoM数值仿真来获得; $G_0$ 为额定增益,是优化的目标之一,取为5 dBi; $W_i$ 为不同频率点上驻波比的加权值; $\lambda$ 是一个调节参数,用于在天线阻抗宽带特性和增益特性之间进行均衡。

#### 4 仿真及实验结果

根据优化设计结果,制作了一副带尾翼的短波宽带加载偶极子实验天线,天线的结构尺寸和器件参数为:天线臂长 $L = 19.2$  m,其中 $L_1 = 7.92$  m, $L_2 = 9.26$  m, $L_3 = 1.42$  m;末端宽 $W = 1.8$  m;加载段和馈电段的长度 $S = 0.4$  m;尾翼长 $L_4 = 7.6$  m;尾翼张角 $\alpha = 30^\circ$ ;加载电阻 $R = 160\Omega$ ;传输线变压器的变比为6:1。

短波宽带加载偶极天线VSWR仿真曲线与未加载或无尾翼时天线VSWR仿真曲线的对比见图2。未加载时,除少数频率外,大部分频率上天线的VSWR都很大,天线不具有宽频带特性。加载后天线的VSWR特性已大为改观,但如果不对设置尾翼,则VSWR曲线有三个峰值,分别位于9 MHz、14.5 MHz和27 MHz附近。VSWR曲线在14.5 MHz和27 MHz附近的峰值是由于加载单元距天线末端的距离大约为1/2波长和1个波长引起的,此时流

经加载电阻上的电流较小,电阻作用不大,天线电流的驻波成分较大,致使天线的VSWR变大,尤其在26~28.5 MHz之间天线VSWR较大,最大值约为3.8左右。通过在加载电阻处并联一个尾翼,使得在上述频率上仍有较大的电流流过电阻,克服了加载电阻距天线末端为1/2天线工作波长整数倍时VSWR变差的缺陷。在3~30 MHz整个短波波段内,优化后天线的VSWR最大值约为2.2,呈现出优良的宽频带特性。图3是短波宽带加载偶极天线的VSWR仿真曲线和实测曲线的对比图,两者吻合很好,实测结果是用矢量网络分析仪HP8752C测量得到的。

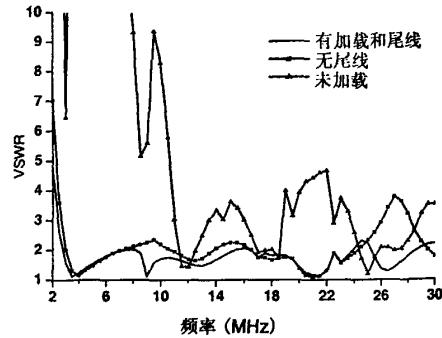


图2 加载和设置尾翼前后天线驻波比仿真曲线

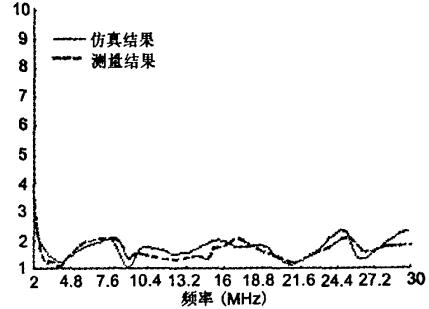


图3 天线驻波比仿真和实测曲线

图4是在一般地面上( $\sigma = 1 \times 10^{-2}$  S/m, $\epsilon_r = 15$ )短波宽带加载偶极天线的增益仿真曲线图。可以看出,低频端增益较低,3 MHz时天线增益仅为-1.86 dBi,但当工作频率大于5 MHz时,天线的增益大于2 dBi;全频段内天线的平均增益大于4 dBi。在理想地面上( $\sigma = \infty$ ),由于没有地面损耗,天线的增益增大,平均增益大于5 dBi。低频端时天线增益较低,这是由于天线上的加载电阻损耗较大使得天线效率较低引起的。

由于短波水平极化天线增益和方向图的测量非

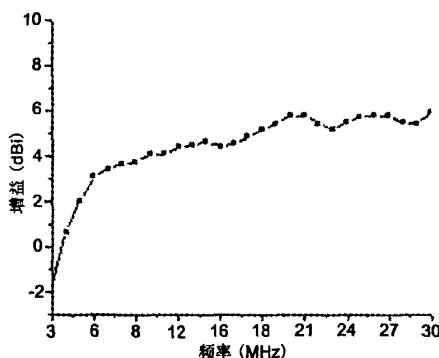
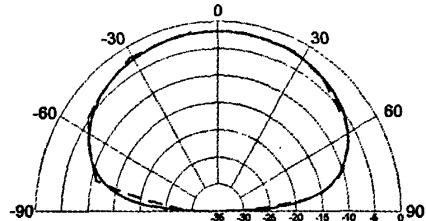
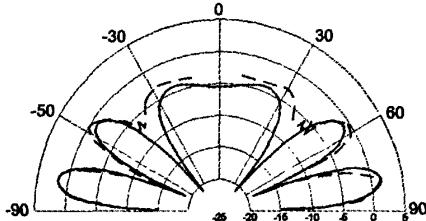


图4 天线增益仿真曲线(一般地面)

常困难,所以在制作实验天线( $3\sim30\text{ MHz}$ )的同时还制作了一副 $20:1$ 缩比模型天线( $60\sim600\text{ MHz}$ )。图5和图6分别是理想地面上实验天线垂直面和水平面方向图仿真结果与缩比模型天线垂直面和水平面方向图测量结果的对比,两者吻合较好,证明了仿真结果的正确性。



(a) 3 MHz 仿真结果与 60 MHz 模型测量结果

(b) 30 MHz 仿真与 600 MHz 模型测量  
——仿真结果 ———— 测量结果图5 行波形偶极天线垂直面归一化方向图( $\varphi=90^\circ$ )

由于增益具有变分稳定的特性,采用MoM计算增益比计算方向图和VSWR精度高,因此增益的仿真计算结果也是可信的。缩比模型天线的方向图是在标准测量场地上测量的,由于测试场俯仰测试臂的最大仰角被限位在 $80^\circ$ 左右,因此图5垂直面方向图没有画出顶部宽约 $20^\circ$ 范围的曲线。由于在天线主要辐射方向上( $\varphi=90^\circ$ ),垂直极化分量比水平极化分量小 $100\text{ dB}$ 以上,故垂直极化分量可忽略不计。

由图6可知,天线水平面方向图中近天线轴向的低辐射区域较小,有利于中近距离内对多个通信对象的通信。天线臂上合适的电阻加载使天线上电流的行波成分较大,最大辐射方向朝天线轴向偏移,较好地填充了天线近轴向的弱辐射区域,故天线在水平面辐射方向图的方向性变弱。频率越高,天线电流的行波成分越大,水平面方向图的方向性越弱。在短波低频段,偶极子天线主要用于高仰角的近距离通信,由于高仰角水平面的方向性较弱<sup>[11]</sup>,且架设高度越低,天线水平面方向图的全向性越好,因此在低频段可采用低架天线的方法来实现全向通信。

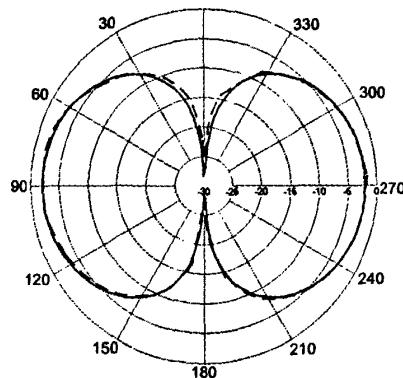
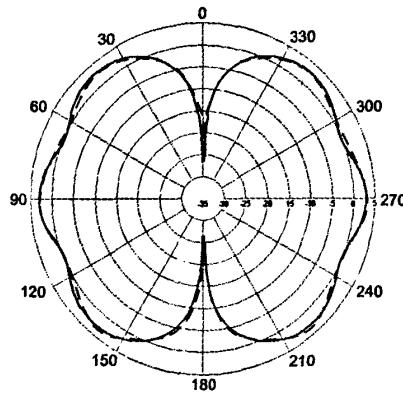
(a) 3 MHz 仿真结果与 60 MHz 模型测量结果( $\Delta=72^\circ$ )(b) 12 MHz 仿真结果与 240 MHz 模型测量  
结果( $\Delta=31^\circ$ ) (——仿真结果, ———— 测量结果)

图6 行波偶极天线水平面归一化方向图

## 5 结论

设计了一种新型结构的短波加载宽带偶极子天线,采用小张角三角形偶极子线天线形式,并通过集总电阻加载和设置三角形尾翼实现了宽频带工作,

用传输线变压器实现了平衡—非平衡变换和阻抗匹配。通过优化设计获得了优良的天线性能指标,数值仿真和实验测试表明,该天线在整个短波波段内驻波比小于2.2,在一般地面上平均增益大于4dBi。该天线占地面积小,架设方便,适用于2000km以内的短波战术通信。

### 参考文献

- [1] M Bahr, A Boag and R Mittra. Design of Ultra Broad-Band Loaded Monopole antennas[C]. Proc. IEEE AP-S Int. Symp., Seattle, WA, 1994, 1290-1293.
- [2] 高飞,陈益邻,刘其中. 加载天线分析[J]. 电子学报,1999, 27(12):124-125.
- [3] 王元坤,李玉权. 线天线的宽频带技术[M]. 陕西:西安电子科技大学出版社,1995, 57-63.
- [4] 柳超,刘其中,梁玉军等. 舰用短波宽带鞭状天线研究[J]. 电波科学学报,2006,21(6):955-958.  
Liu C, Liu Q Z, et al.. Design of broadband shipboard whip-type antenna at high frequency band[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 955-958.
- [5] 孙保华,周良明,肖辉. 天线匹配网络的设计与计算方法[J]. 西安电子科技大学学报,1999, 26(6):793-797.
- [6] R F Harrington. Field Computation by Moment Methods[M]. New York: Macmillan, 1968.
- [7] 谢处方,王石安,文希理. 加载与媒质中天线[M]. 成都:电子科技大学出版社,1990.
- [8] 张贵行等. 电力工程手册[M]. 北京:中国电力出版社,2002,549-580.
- [9] A Boag, 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.

(上接第936页)



聂在平 (1946—),男,四川人,教授,博士生导师,电子科技大学副校长,中国电子学会会士,IEEE高级会员。先后获国家科技进步二等奖一项,省、部级科技进步一、二、三等奖共五项,在国内外发表学术论文350余篇,主要研究方向包括:计算电磁学、电磁散射与逆散射、非均匀介质中的场与波、新一代移动通信中的多天线技术等。

- [10] 周斌,刘其中,郭景丽. 螺旋天线的快速分析及宽带化设计[J]. 电波科学学报,2005,20(5):647-650.  
Zhou B, Liu Q Z, Guo J L. Fast analysis and broadband design of the helical antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 647-650.
- [11] Thomas A Milligan. Modern Antenna Design [M]. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005: 223-248.



柳超 (1963—),男,湖南人,西安电子科技大学天线与电磁散射研究所博士生,海军工程大学电子工程学院教授,主要研究方向为天线数值计算、宽带天线和潜艇通信等。



张志刚 (1977—),男,湖北人,海军工程大学电子工程学院讲师,主要研究方向为天线数值计算、宽带天线和短波天线工程设计等。



刘其中 (1938—),男,重庆人,西安电子科技大学天线与电磁散射研究所教授、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与CAD,宽带小型化天线和智能天线、电磁散射以及电磁兼容等。



李爱勇 (1978—),男,四川人,成都电子科技大学电子工程学院电磁场与微波技术专业毕业,硕士学位,现就职于中国海洋油田服务股份有限公司技术中心机电设备研究所,工程师,从事电法感应测井和电磁波传播测井技术理论方法研究和仪器硬件研发。

## 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>