

· 天线与系统 ·

中国分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2013)06-0054-04

# 分形吸波体设计及其在微带天线中的应用

商 楷, 曹祥玉, 高 军, 杨欢欢, 郑秋容

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 基于 Hilbert 分形结构, 设计了一种小型化、超薄、高吸波率以及无表面损耗层的超材料吸波体, 该吸波体单元尺寸仅为  $0.071\lambda$ , 厚度约  $0.02\lambda$ , 吸波率达 99.3%。将该吸波体与普通微带天线共形设计, 制备了一种新型超材料天线。与初始天线相比, 新天线的单站和双站带内雷达散射截面都有明显减缩, 最大减缩达到 7.2 dB, 且天线辐射性能保持不变, 证实了该吸波体具有良好的吸波效果。仿真和实测结果吻合得很好, 表明该吸波体可以应用于微带天线的带内隐身。

**关键词:** 微带天线; 吸波体; 超材料; 分形; 雷达散射截面

## Fractal Absorbing Body Design and Its Application in Microstrip Antenna

SHANG Kai, CAO Xiangyu, GAO Jun, YANG Huanhuan, ZHENG Qiurong

(Information and Navigation Institute College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A metamaterial absorber based on hilbert fractal structure is designed with miniaturization, slim, high absorptivity and no surface ullage layer. Its unit size is only  $0.071\lambda$ , the thickness is about  $0.02\lambda$  and the absorber can exhibit absorption of 99.3%. It is conformed on microstrip antenna to preparation of a novel metamaterial antenna. Compared with the conventional microstrip antenna, the proposed antenna has a obvious monostatic and bistatic radar cross section reduction at the working frequency band. the greatest decrement can amounted to 7.2 dB, while the radiation performance is kept, which proves that the absorber had an excellent absorptivity. The simulation and measured resultes are in good agreement, indicating that the absorbing body can be applied to microstrip antennas to achieve in-band stealth.

**Key words:** microstrip antenna; absorber; metamaterial; fractal; radar cross section

## 0 引言

雷达吸波材料是有效吸收入射电磁波, 显著降低目标回波强度的一类功能材料, 可以大幅降低目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS), 从而提高其隐身性能。传统的雷达吸波材料存在厚、重、稳定性差等缺点, 其应用受到限制。因此, 寻求和设计出具有高吸波率、厚度薄、质量轻、稳定性好的吸波材料一直是材料学研究的重点。2002年, 文献[1]首次提出由超材料(Metamaterial, MTM)设计超薄吸波材料的思想, 并用含损耗的频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)加以实现, 但设计方法繁琐, 很难推广应用。随后, 文献[2]提出利用MTM的同向反射特性, 通过在材料表面加载集总电阻实现超波吸波结构, 但是由于加工工艺复杂, 不利于实际应用。2008年, 文献[3]基于MTM电磁耦合谐振特性, 首次提出由电谐振、损耗型介质和金属微带线构成的具有“完美”吸波特性

的吸波体, 与传统吸波材料相比, 它具有结构简单、超薄、超轻、无表面损耗层、吸波率高的特点。因此, 这种吸波材料一经提出就引起了科研人员广泛关注并展开研究。一些极化不敏感<sup>[4]</sup>、宽入射角<sup>[5]</sup>、多频带<sup>[6]</sup>、宽频带<sup>[7]</sup>的MTM吸波体不断被提出, 但是对其应用方面的研究仍相对较少。文献[8-9]将此类吸波体加载在波导缝隙天线上实现了带内RCS减缩, 但由于吸波体结构电尺寸较大, 限制了其加载数量。为了在有限的区域中加载更多的吸波体, 实现更好的RCS减缩效果, 对吸波体单元进行小型化设计是非常必要的。利用分形结构独特的空间填充特性, 可以实现天线的小型化设计<sup>[10-12]</sup>, 而将分形技术用于超材料吸波体的研究并不多见。

本文结合分形结构的特点, 设计了一种新颖的 Hilbert 吸波体, 实现了单元结构的小型化, 并将该吸波体与微带天线共形设计, 在保持天线辐射性能的同时, 有效地减缩了天线带内RCS。

## 1 吸波体设计与分析

### 1.1 吸波体设计

设计的吸波体由三层构成: 底层为金属底板, 中间为介电常数  $\epsilon_r=4.4$ , 损耗角正切  $\tan\delta=0.02$  的FR4介

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61271100); 陕西省自然科学基础研究重点项目(2010JZ010); 陕西省自然科学基础研究项目(2012JM8003); 空军工程大学教研新星资助课题

**通信作者:** 商楷 Email: xiangxuehai1989@163.com

**收稿日期:** 2013-02-19 **修订日期:** 2013-05-17

质材料,上层为 Hilbert 曲线构成的金属贴片。设计的吸波体单元结构如图 1 所示: $p=3.8\text{ mm}$ , $a=3.6\text{ mm}$ , $s$  为曲线宽度, $h$  为单元厚度。采用 HFSS12 软件进行仿真,设置主从边界和 Floquent 端口来模拟无限大周期结构,通过优化参数  $s$  和  $h$ ,选取一组参数作为基准: $s=0.16\text{ mm}$ , $h=1\text{ mm}$ ,仿真得到如图 2a)、2b) 吸波率随参数  $s$ , $h$  的变化曲线。

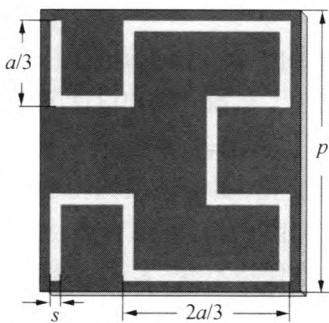


图 1 吸波体单元结构图

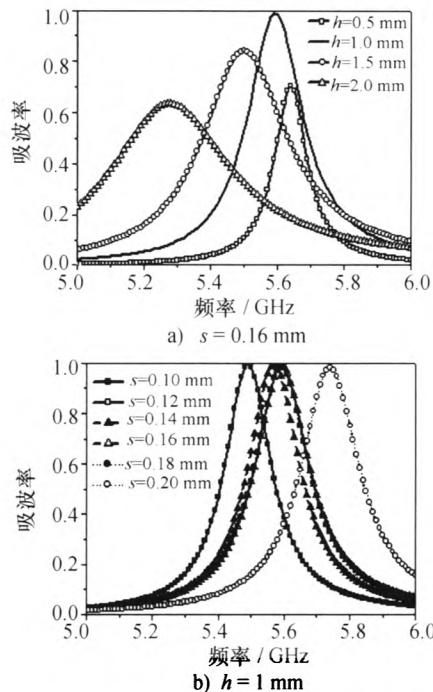
图 2 吸波率随参数  $s$ , $h$  的变化曲线

图 2a) 为吸波体厚度与吸波率的变化曲线,从图中可以看出,增加天线厚度,天线的吸波中心频率向低频移动,吸波峰值先增大后降低,说明厚度是一个重要的参数指标,需要优化。图 2b) 为吸波体贴片宽度与吸波率的变化曲线,从图中可以看出随着贴片宽度的增加,吸波体等效电感减小,吸波中心频率逐渐向高频移动,但吸波率峰值保持得较好。最后,结合吸波体在天线中的应用,选出较为理想结构参数, $s=0.16\text{ mm}$ , $h=1\text{ mm}$ 。

定义反射率  $R=|S_{11}|^2$ ,透射率  $T=|S_{21}|^2$ ,则吸波率  $A=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2=1-R-T$ 。仿真得到入射波随

入射角度变化对吸波率的影响,如图 3 所示。可以看出,当入射波垂直照射时,吸波率达到 50% 以上的带宽为 200 MHz,在 5.61 GHz 达到 99.3%。当入射角增大到 60° 时,吸波率曲线略向低频偏移,但吸波率峰值仍保持在 90% 以上。

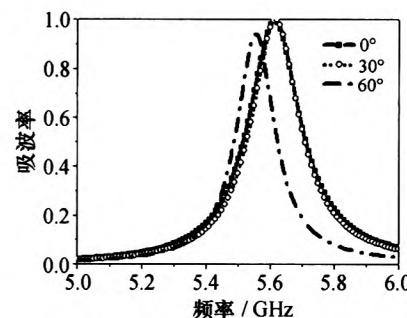


图 3 吸波率随入射角的变化

## 1.2 吸波机理分析

吸波体实现吸波必须具备两个条件:(1) 实现与空气阻抗匹配;(2) 具有损耗特性,当电磁波垂直入射到设计吸波体表面时,吸波体的阻抗可以等效为容性的贴片阵、损耗介质,与感性的金属底板并联。依据传输线模型,该吸波体等效电路如图 4 所示。

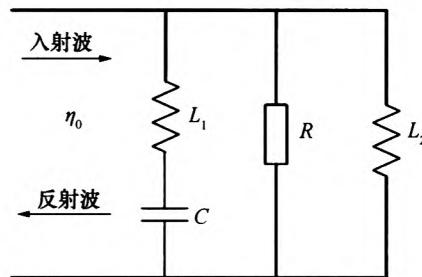


图 4 吸波体等效电路图

图中  $L_1$  和  $C$  分别为贴片的等效电感和单元之间的等效电容; $R$  为介质损耗和金属的欧姆损耗; $L_2$  为金属背衬介质层的等效电感,用  $Y_s$ 、 $Z_s$  表示表面阻抗和导纳为

$$Y_s = \frac{1}{j\omega L_1 + 1/j\omega C} + \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L_2} \quad (1)$$

式中: $\omega$  为入射波的角频率。

$$Z_s = \frac{1}{Y_s} = \frac{j\omega RL_2(1 - \omega^2 L_1 C)}{R(1 - \omega^2 L_1 C - \omega^2 L_2 C) + j\omega L_2(1 - \omega^2 L_1 C)} \quad (2)$$

当  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_2)C}}$  时,

$$1 - \omega^2 L_1 C - \omega^2 L_2 C = 0 \quad (3)$$

图 3 所示的电路发生谐振,此时

$$Z_s = R \quad (4)$$

设自由空间波阻抗为  $\eta_0$ , 对于垂直入射的平面波, 吸波体的表面反射系数为

$$R_1 = \frac{Z_s - \eta_0}{Z_s + \eta_0} \quad (5)$$

由式(3)、式(4)、式(5)可以看出, 通过适当地设计吸波体的结构模型, 使谐振时吸波体的损耗  $R$  与  $\eta_0$  相匹配, 即可实现入射波的零反射, 而吸波体底层连续的金属薄膜保证了零透射, 进入吸波体的电磁波在损耗电阻  $R$  的作用下将被完全吸收。

图 5 给出了吸波体在 5.61 GHz 表面电流分布。从图中可以看出, 采用 Hilbert 分形结构后, 增大了电流流动路径, 即相同单元尺寸下等效电感  $L_1$ 、电容  $C$  增大, 电感  $L_2$  不变, 根据谐振公式可知谐振频率下降, 对吸波体单元的小型化效果明显。

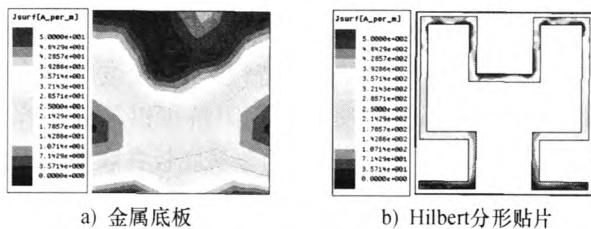


图 5 电流分布图

图 6 给出了吸波体相对阻抗随频率变化曲线。吸波体在 5.61 GHz 处阻抗实部近似为 1, 虚部近似为 0。这表明吸波体与自由空间实现了良好的匹配, 因此反射系数很小。

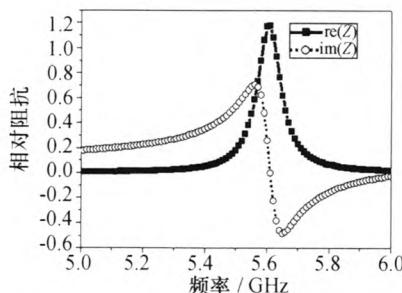


图 6 相对阻抗随频率的变化曲线

## 2 天线仿真与测试

### 2.1 天线设计

图 7 为吸波体结构与微带天线共形设计的实物图。贴片的尺寸为: 16.4 mm × 12.1 mm, 介质板为聚四氟乙烯, 介电常数为 4.4, 厚度为 1 mm, 天线尺寸为 38 mm × 38 mm, 天线工作在 5.61 GHz, 超材料吸波体的参数与上节中描述相同, 吸波体的吸波频带覆盖了天线的工作带宽。为了保证天线的辐射性能, 在辐射贴片与吸波体之间留出一定的空隙, 以减少吸波体与贴片之间的耦合。

— 56 —

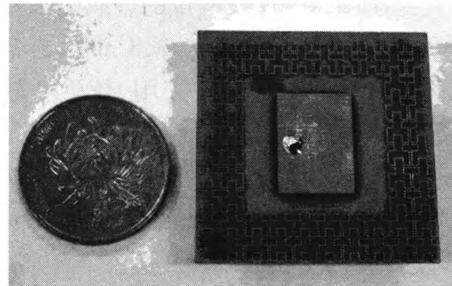


图 7 天线实物图

减缩天线带内 RCS 前提是保证天线的辐射性能不变。图 8 比较了初始天线和设计天线的仿真与实测的反射系数, 可以看出, 加载吸波体前后, 天线的反射系数几乎没有变化, 实测结果测得的反射系数变深。图 9 为天线方向图比较, 可以看到, 加载吸波体前后, 辐射方向图基本保持不变, 实测结果与仿真结果吻合得很好, 实测方向图后瓣出现很多毛刺主要是由测试环境引起的。

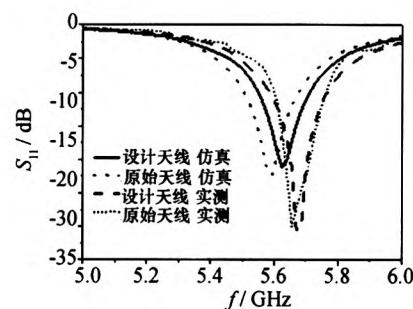


图 8 天线的反射系数

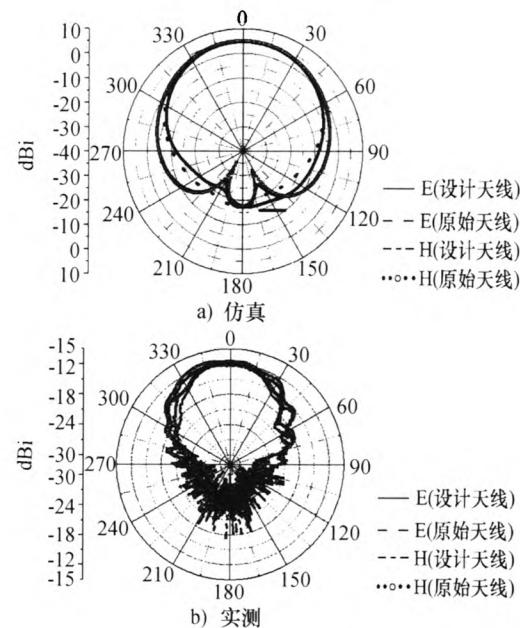


图 9 天线方向图

### 2.2 天线的散射性能

图 10 给出了电磁波垂直入射时, 天线法线方向的单站 RCS。从图中可以看出, 5 GHz ~ 6 GHz 频带范围内天线的 RCS 均有减缩, 在 5.66 GHz 最大达到了

6 dB 的减缩。图 11 给出了 5.61 GHz 的电磁波垂直入射设计天线上时从不同角度观察的双站 RCS, 从图中可以看出法线方向峰值减缩达到 5 dB, 最大减缩量达 7.2 dB, 在 -90° ~ 90°, 设计天线的 RCS 均低于初始天线, 这也表明了天线法向方向的电磁波能量并没有散射到其他方向, 而是被吸波体吸收了。

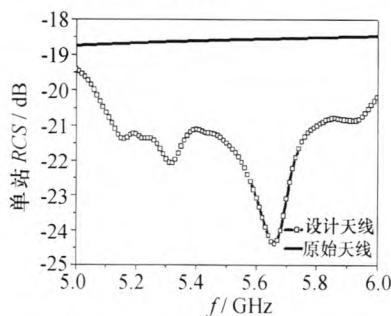


图 10 单站 RCS 随频率的变化曲线

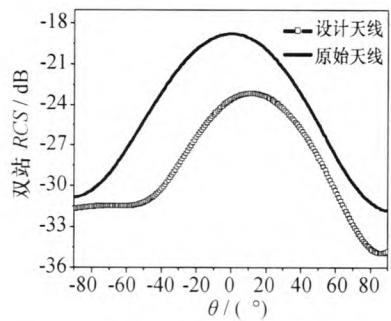


图 11 双站 RCS 随角度的变化曲线

### 3 结束语

本文基于分形结构的特点设计了一种新颖的分形超材料吸波体, 实现了结构单元的小型化和高吸波率。吸波体结构单元的小型化可以在有限的空间上加载尽可能多的吸波体单元。将该吸波体与微带天线共形设计, 在保持天线辐射性能不变的情况下, 实现了天线带内 RCS 的减缩, 这对研究微带天线带内 RCS 减缩具有一定的参考价值。但同时也看到, 本文设计的吸波体带宽还较窄, 未来的研究将集中于增加其吸波带宽, 以实现对宽带天线的带内 RCS 减缩。

### 参 考 文 献

- [1] Engheta N. An idea for thin subwavelength cavity resonators using metamaterials with negative permittivity and permeability [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2002, 1(1): 10–13.
- [2] Li Y Q, Zhang H, Fu Y Q, et al. RCS reduction of ridged waveguide slot antenna array using EBG radar absorbing material [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7): 473–476.
- [3] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. A perfect metamaterial absorber [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 1–4.
- [4] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. Physical Review B, 2009, 79(12): 6.
- [5] Luukkonen O, Costa F, Monorchio A, et al. A thin electromagnetic absorber for wide incidence angles and both polarizations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 57(10): 3119–3125.
- [6] He X J, Wang Y, Wang J, et al. Dual-band terahertz metamatte material absorber with polarization insensitivity and wide incident angle [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2011, 115: 381–397.
- [7] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, et al. Design of a thin wide-band absorber based on metamaterials and resistance frequency selective surface [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 134102–1–10.
- [8] 刘涛, 曹祥玉, 高军, 等. 基于超材料的吸波体设计及其波导缝隙天线应用 [J]. 物理学报, 2012, 61(18): 184101–1–8.  
Liu Tao, Cao Xiangyu, Gao Jun, et al. Design of metamaterial absorber and its applications for waveguide slot antenna [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18): 184101–1–8.
- [9] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 一种吸波体材料及其在缝隙天线中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2790–2794.  
Yang Huanhuan, Cao Xiangyu, Gao Jun, et al. An ultra-thin metamaterial absorber and its application in reducing RCS of slot antenna [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(11): 2790–2794.
- [10] 韩国栋, 顾长青. 加载十字分形缝隙的小型化微带天线 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 247–251.  
Han Guodong, Gu Changqing. Quasi-sierpinski carpet microstrip antenna with cross fractal slots [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 247–251.
- [11] 王琪, 何庆强. 分形倒 L 天线的研究 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 385–388.  
Wang Qi, He Qinqiang. Fractal analysis of the inverted L antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 385–388.
- [12] 刘英, 龚书喜, 郭晖, 等. 用于天线 RCS 减缩的分形微带贴片天线 [J]. 电子学报, 2004, 32(9): 150–151.  
Liu Ying, Gong Shuxi, Guo Hui, et al. Fractal microstrip patch antenna for antenna RCS reduction [J]. Acta Electronic Sinica, 2004, 32(9): 150–151.

商 楷 男, 1989 年生, 硕士研究生。研究方向为微带天线、人工电磁材料等。

曹祥玉 女, 1964 年生, 教授、博士生导师。研究方向为天线与电磁兼容, 电磁超材料, 计算电磁学等。

高 军 男, 1962 年生, 教授、硕士生导师。研究方向为天线与电磁兼容, 电磁超材料等。

杨欢欢 男, 1989 年生, 硕士研究生。研究方向为天线设计、人工电磁材料、电磁散射理论等。

郑秋容 男, 1973 年生, 副教授、硕士生导师。研究方向为波导缝隙天线, 光子晶体, 电磁场数值计算等。

## 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>