

# 有源集成背馈式接收天线设计

苏东林 肖永轩 王桂珍 廖安谋

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了提高接收天线系统的增益以及灵敏度, 对于天线与射频前端组成的接收系统采用了一种有源集成接收天线的设计方案, 从而省略了传统设计中的有源电路与微带天线之间的匹配网络。依照此方案, 设计并实现了一个背馈结构的矩形微带天线与前级低噪声放大器电路的有源集成。矩形微带天线的馈电点与低噪声放大器的输入端通过金属探针相连, 当天线在 2.48 GHz 谐振时, 通过选择合适的馈电点位置, 天线产生放大器设计所需的输入阻抗。有源集成背馈式接收天线工作于 S 波段, 最终的测试结果显示了其优良的特性。

**关键词:** 有源网络; 阻抗匹配; 微带天线; 接收天线; 微波放大器

**中图分类号:** TN 827<sup>+</sup>.2; TN 454

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2005)11-1259-05

## Design of active integrated probe-fed receiving antenna

Su Donglin Xiao Yongxuan Wang Guizhen Liao Anmou

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the gain and sensitivity of the receiving antenna system, one scheme on how to design active integrated receiving antenna was adopted in the receiving antenna and radio frequency front end system, which can bypass the traditional impedance matching network between the active circuit and the microstrip antenna. Depending on this scheme, the design of active integration between the rectangle microstrip probe-fed antenna and the front end low noise amplifier was performed. The feed of the rectangle microstrip antenna was connected with the input port of the low noise amplifier by one metal probe. When the antenna is resonant at 2.48 GHz, by selecting the proper feed position, the antenna can produce the input impedance needed by the low noise amplifier design. The active integrated probe-fed receiving antenna operates on the S band. The final measurement results show good characteristic.

**Key words:** active networks; impedance matching; microstrip antennas; receiving antennas; microwave amplifiers

随着通信应用频率的日益提高, 有源集成天线的概念被引入到现代微波以及毫米波结构的设计当中, 并被广泛应用于军事和商业领域, 如相控阵、毫米波功率合成、无线传感器、个人移动通信等方面<sup>[1-3]</sup>。有源集成天线将射频前端的辐射单元(微带天线)和有源器件(放大器、振荡器等)集

成在一起, 天线和有源器件被看作一个整体, 或者可以将天线看作是电路的一部分来设计, 这有别于传统的无线电系统设计方法。在传统的方法中, 天线和有源电路是分别独立设计的, 之间再通过一个接口电路连接在一起, 通常是 50 Ω 的传输线或标准波导连接器件<sup>[4]</sup>。随着无线电应用频率的

收稿日期: 2004-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69971005); 航空基金资助项目(99F51096); 国防科技重点实验室基金资助项目(51437070101HK0101)

作者简介: 苏东林(1960-), 女, 北京人, 教授, sdl@buaa.edu.cn.

提高,传输线的插入损耗也迅速提高<sup>[5]</sup>.省略天线同有源电路间不必要的传输损耗,对于接收机射频前端性能的提高会起到较大的作用.本文采用背馈的方式使得矩形微带天线和电路分别位于不同的介质板,天线通过一根穿过介质板的金属探针直接与有源电路输入端相连,通过调节矩形微带天线探针馈电点位置,使得天线输出阻抗满足有源电路(低噪声放大器)实现规定增益和噪声等参数的输入阻抗要求,从而省略了中间的匹配电路.本文最终实现了一个工作在S波段,中间无匹配电路的背馈式低噪放有源集成接收天线,并测试了它的增益,电路输出端口的驻波比以及天线的方向图,并与相同结构的无源天线相比较,验证了这种技术的可行性和优越性.

## 1 低噪声放大器设计

对低噪声放大器采用单向化设计<sup>[6]</sup>,综合考虑稳定性、增益以及噪声等参数,确定放大器所需要的输入阻抗值.

本文采用微波混合集成电路来实现有源低噪声放大器电路的匹配设计,低噪声放大器电路的有源器件选取了型号为ATF34143的HEMT(High Electron Mobility Transistor,高电子活动度晶体管)<sup>[7]</sup>.晶体管的工作频带包含了所需频段,且带宽足够大,在增益、噪声系数,以及线性度上都有很好的性能.

首先确定晶体管的静态工作点,对管子的偏置电压进行扫描,最终选取的漏源偏置电压 $V_{ds}=3\text{V}$ ,电流 $I_{ds}=40\text{mA}$ .在确定偏置以后,需要分析晶体管的散射参数,确定稳定性,并折衷考虑增益和噪声系数,最后确定低噪声放大器所要求的源阻抗,也就是后边所要设计的天线输入阻抗.晶体管的对应静态工作点的散射参量模型由厂商提供<sup>[7]</sup>.

如图1所示,根据反射系数 $\Gamma_{out}$ 和 $\Gamma_s$ 的关系

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}}{1 - S_{11}\Gamma_s} \quad (1)$$

其中, $S_{11}, S_{12}, S_{21}$ 和 $S_{22}$ 分别为对应频点晶体管的散射参量,可以得到当 $|\Gamma_{out}| = 1$ 时 $\Gamma_s$ 的轨迹——源稳定圆.

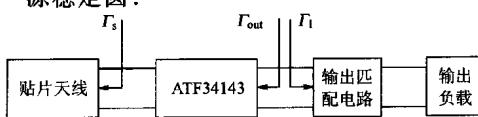


图1 有源集成天线示意图

$$\left. \begin{aligned} r_s &= \left| \frac{S_{12}S_{21}}{\left| S_{11} \right|^2 - |\Delta|^2} \right| \\ C_s &= \frac{(S_{11} - \Delta S_{22}^*)^*}{\left| S_{11} \right|^2 - |\Delta|^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $r_s$ 为圆半径; $C_s$ 为圆心; $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ .另外,放大器的增益 $G_a$ 以及输出端噪声系数 $F$ 和晶体管的散射参数及 $\Gamma_s$ 有如下的关系<sup>[6]</sup>,其中 $\Gamma_{opt}$ 代表最小噪声系数时的 $\Gamma_s$ .

$$G_a = \frac{\left| S_{21} \right|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)}{\left( 1 - \left| \frac{S_{22} - \Delta\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s} \right|^2 \right) |1 - S_{11}\Gamma_s|^2} \quad (3)$$

$$F = F_{min} + \frac{4r_s |\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2) |1 + \Gamma_{opt}|^2} \quad (4)$$

若晶体管散射参数已定,当 $G_a$ 和 $F$ 等于常数时, $\Gamma_s$ 的轨迹均为圆.图2给出了分析的数据曲线,工作频点为2.48GHz,在圆图左上角的粗线圆弧为部分源稳定圆,稳定圆内为稳定区,所以整个电路工作于绝对稳定区;Smith圆图内的虚线圆为等增益圆 $G_a = 12.9\text{ dB}$ ;实线圆为 $F = 0.3\text{ dB}$ 的等噪声系数圆.图上,工作点 $m_1$ 工作在绝对稳定区,优先考虑噪声系数,则取源阻抗为 $Z_s = 20.332 + j48.459\Omega$ ,此即为有源集成接收天线所要求的背馈微带天线的输入阻抗.

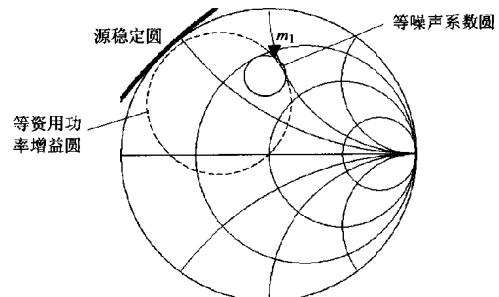


图2 晶体管源稳定圆、等增益圆、等噪声系数圆

由式(1)可以得到低噪声放大器的输出阻抗 $\Gamma_{out}$ ,输出端采用共轭匹配,使 $\Gamma_1 = \Gamma_{out}^*$ ,按照 $\Gamma_1$ 设计到 $50\Omega$ 的输出匹配电路.整体电路如图3所示.此时可见管子的输入端没有加任何匹配电路.有源电路部分采用的是相对介电常数9.6、厚度1mm的微波介质板材.

可以得到电路输入端需要的输入阻抗约为 $20 + 50j\Omega$ ,此时预计低噪声放大器电路的噪声系数为0.3dB,增益为12.9dB.

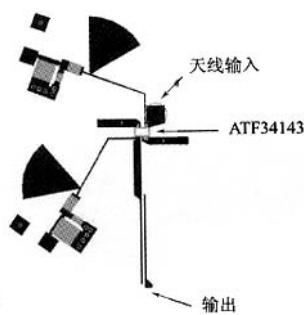
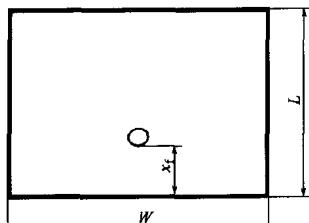


图3 由ATF34143组成的低噪声放大器电路

## 2 矩形微带天线阻抗分析

由低噪声放大器的设计要求,在矩形微带天线的工作频点2.48 GHz上,需要输出阻抗应在 $20 + 50j \Omega$ 附近,通过改变天线馈电点的方法可以得到预期的输入阻抗。

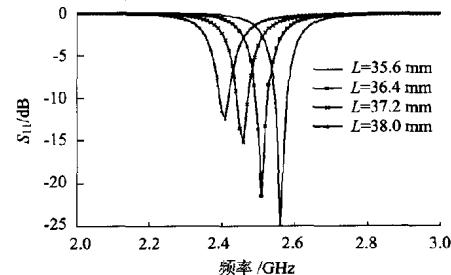
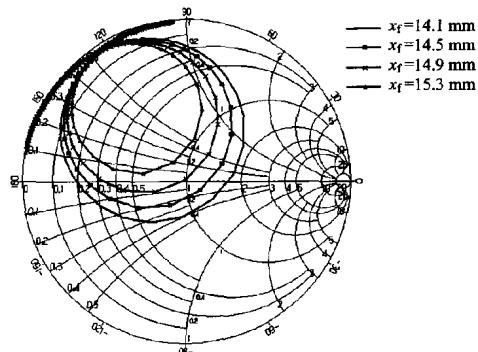
从微带天线特性可知,只要天线形状一定,天线的谐振频率也就随之确定,而天线的输入阻抗会因馈电点的不同而改变<sup>[8]</sup>。对于背馈式矩形微带天线,它的形式如图4所示。贴片位于厚度为1.5 mm相对介电常数为2.55的介质板上,  $x_f$  表示馈电点的位置。

图4 微带天线探针馈电方式<sup>[9]</sup>

由文献[9]可知天线馈电点位置对于天线谐振频率几乎无影响。天线的尺寸确定以后,改变天线的馈电点,天线的谐振频率只有稍微的改变,而天线的输入阻抗则随着馈电点的改变有明显的变化。因而可以通过改变天线馈电点的方法来得到预期的输入阻抗,而对于天线谐振频率所出现的偏差只需要小范围调整天线的尺寸便可以修正。首先考虑天线的频率谐振点,再考虑天线的输出阻抗,这里用矩量法<sup>[10]</sup>对天线进行分析计算。

图4中,  $L$  是天线垂直边长度,  $W$  是天线的另一边长度。可以通过有关天线计算公式<sup>[9]</sup>得到  $W = 38.9 \text{ mm}$ ,  $L = 37.9 \text{ mm}$ ,  $x_f = 14 \text{ mm}$  作为软件建立模型的初始参数。把  $L$  和  $x_f$  设为变量参数, 分别进行参数扫描, 先扫描  $L$ , 可以得到天线在

2.48 GHz 谐振时的天线垂直边长度, 见图5a;之后固定  $L$ , 扫描  $x_f$ , 可以得到天线输出阻抗满足要求的馈电点位置, 见图5b, 可最终得到最佳的结构尺寸。

a  $x_f = 14 \text{ mm}$ , 天线谐振频率随天线垂直边长度的变化b  $L = 36.18 \text{ mm}$ , 天线输出阻抗随探针位置  $x_f$  的变化  
图5 天线结构尺寸与谐振频率输出阻抗的关系

最终调整后得到天线的尺寸为  $W = 38.9 \text{ mm}$ ,  $L = 36.18 \text{ mm}$ ,  $x_f = 15.2 \text{ mm}$ 。在 2.48 GHz 得到此时谐振的输出阻抗为  $18.98 + 42.76j \Omega$ , 很接近前边低噪声放大器的设计要求。

## 3 整体有源集成天线的结构

整体有源集成天线的结构如图6所示。这是一个双介质层结构, 矩形微带天线在天线介质层的顶层, 低噪声放大器在电路介质层的底层。它们中间借助一个探针来相连。天线介质层和电路介质层具有不同的介电常数以及厚度。图7为实际

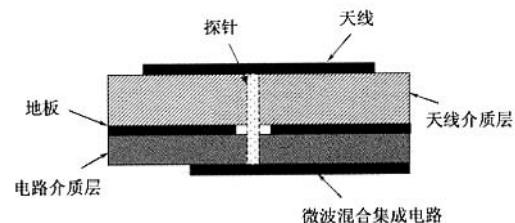


图6 有源集成天线的侧视图

制作的有源集成天线实物。

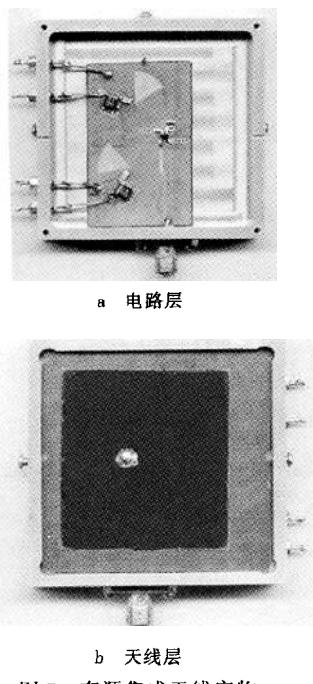


图 7 有源集成天线实物

## 4 测量结果

### 4.1 有源集成天线的低噪声放大器的增益

由图 8 所示搭制有源集成天线的测量系统, 可以得到其中的低噪声放大器的增益<sup>[11]</sup>。

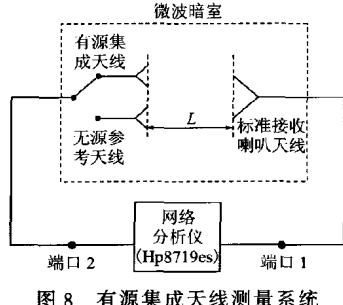


图 8 有源集成天线测量系统

另外, 需要额外单独加工一个同有源集成天线大小结构尺寸相同, 但匹配到标准  $50\Omega$  的矩形微带天线作为参考天线<sup>[11]</sup>。矢量网络分析仪 (HP8719es, Agilent 公司) 测试的传输系数曲线如图 9 所示。

$$G_T = S_{21(a)} - S_{21(p)} + 10 \log(1 - |\Gamma_p|^2) \quad (5)$$

其中,  $G_T$ 、 $S_{21(a)}$ 、 $S_{21(p)}$  的单位均为 dB。脚标 a 代表有源天线; p 代表无源参考天线;  $\Gamma_p$  代表无源参考天线的端口反射系数, 近似等于  $S_{11}$  ( $S_{11} = 0.1617$ , HP8719es 测得)。根据公式<sup>[11]</sup>, 可以推出,

有源集成天线中的单级低噪声放大器在 2.48 GHz 增益为 13.87 dB。

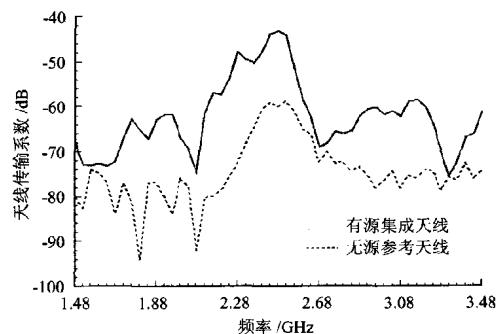


图 9 测量的传输系数

### 4.2 有源集成天线和参考天线的带宽比较

无源参考天线端口处的驻波比曲线如图 10 所示, 若以驻波比 2.5 以下作为天线的带宽标准, 则可得天线的中心谐振工作点为 2.48 GHz, 相对带宽为 1.85%; 与此相比, 有源集成天线的端口处的驻波比曲线如图 11 所示, 在驻波比 2.5 以下的天线频带范围为 2.36~2.89 GHz。

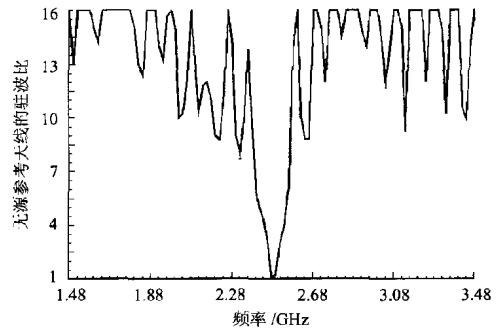


图 10 无源参考天线端口处的驻波比曲线

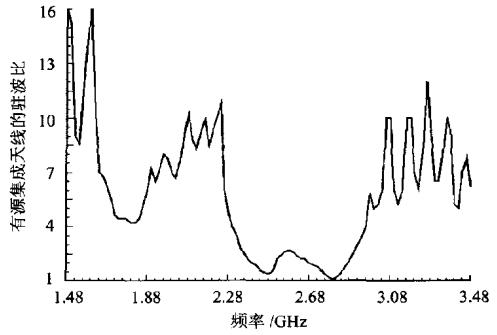


图 11 有源集成天线端口处的驻波比曲线

### 4.3 有源集成天线和参考天线方向图比较

如图 12, 可知有源集成天线的归一化方向图同无源参考天线的对应归一化方向图比较没有多大差别。这意味着背馈式矩形贴片有源集成天线

的辐射特性并没有改变。

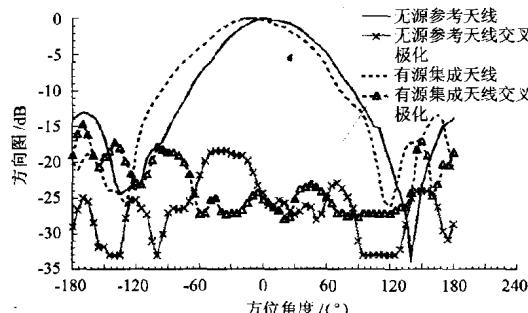


图 12 主极化和交叉极化归一化方向图

## 5 结束语

本文提出了一种有源集成接收天线的设计方案:调节天线的输出阻抗,满足有源电路的设计要求,完全省略了天线与电路之间的匹配电路.通过设计,整个系统工作在 2.48 GHz,并得到了一个较好的测量结果:单级低噪声放大器的电路增益为 13.87 dB;在有源集成天线的驻波比带宽上,与相同结构的传统无源天线相比,有一个显著的提高,这主要是由于天线增加了有源器件后,有源器件的输出阻抗在很宽的频带内变化较小;此外,在工作频点 2.48 GHz,有源集成天线的归一化方向图与结构相同的无源参考天线相比,差别不大.这种有源集成天线显示了在无线局域网、蓝牙以及微波传输系统上优良的应用前景.

## 参考文献 (References)

[1] Ding Zhengping, Chang Kai. An integrated doppler-radar transceiver

- front end using two FET active antennas[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1998, 46(7):1001~1003
- [2] Navarro J A, Fan Lu, Chang Kai. Active inverted stripline circular patch antennas for spatial power combining[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1993, 41(10):1856~1863
- [3] Deal W R, Radisic Vesna, Qian Yongxi, et al. Integrated-antenna push-pull power amplifiers[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1999, 47(8): 1418~1425
- [4] Qian Yongxi, Itoh Tatsuo. Progress in active integrated antennas and their application[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1998, 46(11): 1891~1900
- [5] Qian Yongxi, Itoh Tatsuo. Active integrated antennas using planar quasi-yagi radiators[A]. In: 2000 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Tech Proceeding[C]. Beijing: IEEE, 2000.1~4
- [6] 陈天麒. 微波低噪声晶体管放大器[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1983. 184
- Chen Tianqi. Microwave low noise transistor amplifier[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 1983. 184 (in Chinese)
- [7] Agilent Technologies, Inc. Low noise pseudomorphic HEMT in a surface mount plastic package technical data: atf34143[DB/OL]. <http://www.semiconductor.agilent.com>, 2001-10-26/2002-5-10
- [8] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990. 39~51
- Zhong Shunshi. Microstrip antenna's theory and application[M]. Xi'an: Xi Dian University Press, 1990. 39~51 (in Chinese)
- [9] Grag R, Bhartia P, Bahl I, et al. Microstrip antenna design handbook[M]. Boston: Artech House Press, 2001. 265~269
- [10] Ansoft Corporation. Maxwell online help[EB/CD]. Ansoft Ensemble 8 Installation CD, 2001/2002
- [11] An Hongming, Nauwelaers B K J C, Antonine R, et al. A novel measurement technique for amplifier-type active antennas[A]. In: IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest vol.3[C]. San Diego: IEEE, 1994. 1473~1476

## 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>