

文章编号:0253-2778(2005)02-0143-06

# 利用等效模型分析倒 F 天线<sup>\*</sup>

朱 旗,付 侃,李琰

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系,安徽合肥 230027)

**摘要:**在传统微带天线的传输线模型和腔模法模型的基础上,提出了分析倒 F 天线的传输线模型和腔模法模型,并利用这两种模型对倒 F 天线进行了理论分析. 将计算结果与 IE3D 的模拟结果进行了比较,从而证明了该文方法的有效性.

**关键词:**倒 F 天线;微带天线;传输线法;腔模法

中图分类号:TN820 文献标识码:A

## 0 引言

现代无线通信系统要求天线具有更小的尺寸来满足日益小型化的要求,减小尺寸和展宽带宽成为微带天线设计中的关键. 倒 F 天线通过对传统微带矩形天线一边接地的加载方式来达到减小天线尺寸的目的<sup>[1]</sup>. 通常倒 F 天线的长度只有四分之一波长,是相同频率下传统微带天线长度的一半.

虽然已有不少文献给出倒 F 天线的设计实例,但并不具备普遍的指导意义,况且目前对倒 F 天线的分析多采用 FDTD、MOM 等数值方法,需要大量繁琐的计算,费时费力,难以对倒 F 天线的设计提供指导. 而一些经验公式<sup>[1]</sup>预测的工作频率与实际相差很大,因而需要一种物理概念清晰,计算准确的物理模型来指导倒 F 天线的设计. 为此,本文提出了倒 F 天线的传输线模型和腔模法模型的理论分析方法,并结合实例对其谐振频率和辐射方向图进行了预测. 最后将此结果与 IE3D 的模拟结果相比较,具有很好的一致性. 本文方法物理概念清晰、计算量少,可以为倒 F 天线的设计提供一定帮助.

## 1 倒 F 天线的传输线模型分析

传统矩形微带天线的传输线模型将微带天线等效为一段微带传输线,天线的输入阻抗由此传输线的特性阻抗  $Z_0$ 、馈电点位置以及介质特性等决定. 而电场沿边缘的变化决定了贴片的四边是辐射边或非辐射边,辐射边等效为辐射导纳  $Y_s = G_s + jB_s$ , 电导  $G_s$  决定了辐射的能量,电纳  $B_s$  决定了边缘场储存的能量. 其等效电路如图 1(a)所示.

和传统微带天线结构不同,倒 F 天线是在传统微带天线一边缘接地的基础上得到的,因而,必须对传统微带天线的等效传输线模型进行修正. 由于倒 F 天线一边缘接地,类似传输线短接,因而可以通过将传统微带天线传输线模型一端短接获得倒 F 天线的传输线模

\* 收稿日期:2004-09-16

稿件数据

作者简介:朱旗,男,1968 年生,教授. E-mail:zhuqi@ustc.edu.cn

型. 图 1(b)给出了 TM01(TM10)模工作情况下倒 F 天线的等效传输线模型.

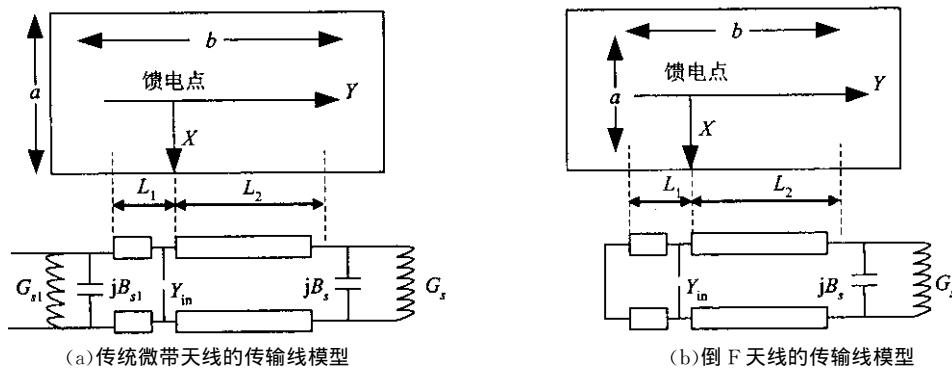


图 1 传统微带天线和倒 F 天线传输线模型的比较

Fig. 1 Comparison of transmission line model between convention MSA and PIFA

据此模型,由输入端看倒 F 天线主模工作情况下短路端一侧、辐射端一侧以及总的输入导纳分别为:

$$Y_1 = -jY_0 \cot \beta l_1, \quad Y_2 = Y_0 \frac{Y_s + jY_0 \tan \beta l_2}{Y_0 + jY_s \tan \beta l_2}, \quad Y_{in} = Y_1 + Y_2 \quad (1)$$

其中,  $Y_0 = 1/Z_0$  为微带线的特性导纳,  $Y_s = G_s + jB_s$  为辐射导纳<sup>[2]</sup>,  $\beta$  为传播常数.

## 2 倒 F 天线的空腔模型分析

传统微带天线的腔模法,将微带贴片和地之间空间视为由上下电壁、四周磁壁的空腔,然后利用 Helmholtz 方程求解. 与传统微带天线不同,依据倒 F 天线结构,其腔体则可以看作为由周围三边磁壁、一边电壁,上下电壁围成的腔体. 因而,满足下列 Helmholtz 方程和边界条件的解的基函数如下:

$$\begin{cases} \nabla_i^2 \Psi + k^2 \Psi = 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_{y=0,b} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_{x=0} = 0 \\ \Psi \Big|_{x=a} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Psi_{m,n} = C_{m,n} \cos\left(\frac{2m+1}{2a}\pi x\right) \cos\left(\frac{n}{b}\pi y\right) \\ m = 0, 1, 2, \dots, \quad n = 0, 1, 2 \\ K_{m,n} = \sqrt{\left(\frac{2m+1}{2a}\pi\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\pi y\right)^2} \end{cases} \quad (2)$$

假设馈源的电流分布为:

$$J_Z = \begin{cases} \frac{I_0}{d_0}, & y_0 - \frac{d_0}{2} < y < y_0 + \frac{d_0}{2}, x = x_0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}, \quad (3)$$

$d_0$  为同轴线的直径,得到  $E_z$  表达式为

$$E_z = \sum_{m,n} B_{mn} \cos\left(\frac{2m+1}{2a}\pi x\right) \cos\left(\frac{n}{b}\pi y\right), \quad (4)$$

其中,  $B_{mn} = \frac{jk_0 \eta_0}{k^2 - k_{mn}^2} \frac{2I_0 \delta_{0n}}{ab} \cos\left(\frac{2m+1}{2a}\pi x_0\right) \cos\left(\frac{n}{b}\pi y_0\right) \left(j_0 \frac{n\pi d_0}{2b}\right)$ ,  $(x_0, y_0)$  为馈点.

最后,可得倒 F 天线的输入阻抗为

$$Z_{\text{in}} = \frac{V_{\text{in}}}{I_{\text{in}}} = \frac{-E_z(x_0, y_0)h}{\iint J_z ds} = -\sum_m \sum_n \frac{j k_0 \eta_0 h}{k^2 - k_{mn}^2} \frac{2 \delta_{0n}}{ab} \cos^2 \frac{(2m+1)}{2a} \pi x_0 \cos^2 \frac{n \pi y_0}{b} j_0 \left( \frac{n \pi d_0}{2b} \right),$$

$$m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

### 3 倒 F 天线的辐射特性分析

为了简单起见,本文主要研究倒 F 天线的主模辐射特性. 在利用腔模法求得内场后,运用等效原理便可得出远区场分布,从而得到辐射特性. 矩形贴片的上下表面的电流可以忽略;其三边为磁壁,切向磁场为零,因而其等效电流为零,但磁壁上有切向电场,故有等效磁流;接地边为电壁,切向电场为零,故等效磁流为零,但有切向磁场,所以有等效电流. 等效磁流和等效电流的分布如图 2 所示.

设磁壁上归一化的切向电场为  $E_z = z \cos \frac{\pi}{2a} x$ , 利用  $\mathbf{M}_s = -\hat{n} \times \mathbf{E}_z$ . 下面依次求出由等效磁流和电流激起的远区场.

(I)  $Y = 0$  处: 磁流  $\mathbf{M}_{s1} = \hat{x} \cos \frac{\pi}{2a} x$

$$\mathbf{F}_1 = \frac{1}{4\pi} \int_v \mathbf{M}_{s1} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dv = \hat{x} \frac{1}{4\pi} \int_0^a \int_{-h}^h \cos \frac{\pi}{2a} x \frac{e^{-jk_0 (R - x \sin \theta \cos \varphi - z \cos \theta)}}{r} dz dx =$$

$$\hat{x} \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} \frac{\sin(k_z h)}{k_z} \frac{-\pi e^{jk_x a} + 2jk_x a}{a(k_x^2 - k_1^2)} = \hat{x} F_{1x} \quad (6)$$

其中,  $k_x = k_0 \sin \theta \cos \varphi$ ,  $k_y = k_0 \sin \theta \sin \varphi$ ,  $k_z = k_0 \cos \theta$ ,  $k_1 = \frac{\pi}{2a}$ .

(II)  $Y = b$  处:  $\mathbf{M}_{s2} = -\hat{x} \cos \frac{\pi}{2a} x$

$$\mathbf{F}_2 = \frac{1}{4\pi} \int_v \mathbf{M}_{s2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dv = -\hat{x} \frac{1}{4\pi} \int_0^a \int_{-h}^h \cos \frac{\pi}{2a} x \frac{e^{-jk_0 (R - x \sin \theta \cos \varphi - z \cos \theta - b \sin \theta \sin \varphi)}}{r} dz dx. \quad (7)$$

(III)  $X = 0$  处:  $\mathbf{M}_{s3} = \hat{y}$

$$\mathbf{F}_3 = \frac{1}{4\pi} \int_v \mathbf{M}_{s3} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dv = -\hat{y} \frac{1}{4\pi} \int_0^b \int_{-h}^h \cos \frac{\pi}{2a} x \frac{e^{-jk_0 (R - y \sin \theta \sin \varphi - z \cos \theta)}}{r} dz dy \quad (8)$$

由于远区场可以视为沿  $\hat{R}$  向传播的横向电磁波,因而有,

$$\mathbf{E} = -\nabla \times \mathbf{F} = jk_0 (\hat{\varphi} F_\theta - \hat{\theta} F_\varphi). \quad (9)$$

(IV) 再考虑接地边的等效电流源激励起的远区场. 在  $x = a$  的接地边有  $x$  和  $y$  向的磁场,由于  $x$  向的磁场与法向矢量方向相同,所以只有  $Y$  向磁场有作用. 归一化后的  $Y$  向磁场及其等效电流为:

$$\text{万方数据} \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\pi}{2a} \sin \frac{\pi x}{2a} \Rightarrow H_y \Big|_{x=a} = \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\pi}{2a} \Rightarrow \mathbf{J}_s = \hat{n} \times \hat{y} H_y = \hat{z} H_y, \quad (10)$$

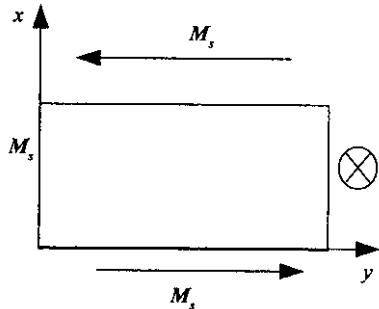


图 2 倒 F 天线等效磁流和等效电流分布

Fig. 2 Equivalent magnetic and electric current distributions of PIFA

磁矢量位为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_4 &= \frac{1}{4\pi} \int_v \mathbf{J}_S \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dv = \\
 &\approx \frac{H_y}{4\pi} \int_0^b \int_{-h}^h \frac{e^{-jk_0 (R - y \sin \theta \sin \varphi - z \cos \theta \sin \theta \sin \varphi)}}{r} dz dy = \\
 &\approx \frac{H_y e^{-jk_0 R}}{\pi R} e^{j(\frac{k_y b}{2} + k_x a)} \frac{\sin(k_z h)}{k_z} \frac{\sin\left(\frac{k_y b}{2}\right)}{k_y} = \hat{z} A_z.
 \end{aligned} \tag{11}$$

得到远区电场的表达:

$$\mathbf{E} = -\eta_0 \hat{r} \times \mathbf{H} = -\eta_0 (\hat{\varphi} H_\theta - \hat{\theta} H_\varphi) = \hat{\theta} \eta_0 H_\varphi \tag{12}$$

最后, 将以上四部分得到的电场矢量相加就得到了远区电场的表达:

$$\left. \begin{aligned}
 E_\theta &= \frac{1}{2} \times \text{常数 } A \times \left[ -\frac{\pi}{2a} e^{jk_x a} \sin \theta + jk_0 \left( 2a k_y \sin \varphi \frac{j\pi e^{jk_x a} + 2k_x a}{4k_x^2 a^2 - \pi^2} - 4 \cos \varphi \right) \right], \\
 E_\varphi &= jk_0 \times \text{常数 } A \times \cos \theta \left( 2 \sin \varphi + a k_y \cos \varphi \frac{j\pi e^{jk_x a} + 2k_x a}{4k_x^2 a^2 - \pi^2} \right), \\
 \text{常数 } A &= \frac{e^{-j(\frac{k_0 R - k_y b}{2})}}{\pi R} b h \text{Sa}(k_z h) \text{Sa}\left(\frac{k_y b}{2}\right).
 \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

## 4 结果与分析

以下给出了利用本文所提出的传输线模型和空腔模型计算给定尺寸倒 F 天线的谐振频率和辐射方向图, 天线尺寸  $a=15.3$  mm,  $b=9.25$  mm,  $L1=1.95$  mm,  $L2=4.125$  mm,  $h=1$  mm,  $\epsilon_r=4.4$ . 将其与专业模拟软件 IE3D 的模拟结果进行比较.

### 4.1 计算结果

图 3 给出了利用专业软件 IE3D 计算结果. 其中,  $f=2.4$  GHz 对应于  $\text{TM}_{00}$ ,  $f=7.5$  GHz 对应于  $\text{TM}_{10}$  模. 图 4 为利用本文提出的倒 F 天线传输线模型和空腔模型的计算结果. 通过对比可见: 无论是传输线模型还是空腔模型, 两者对主模  $\text{TM}_{00}$  模谐振频率的预测是较为准确的, 但是传输线模型不能预测高次模的谐振频率. 为解决这个问题, 需要对此模型进行改进, 一种可行的方法是将纵向两边的辐射计入接地边与另一辐射边的互耦中, 这部分工作有待今后进行. 而空腔模型不仅对于主模适用, 对于高次模也适用.

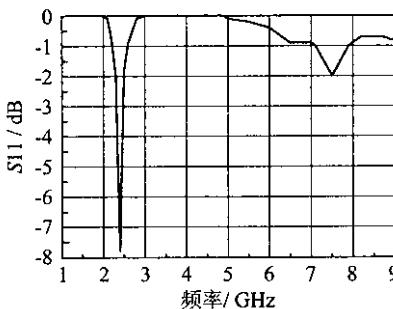


图 3 IE3D 中 S11 模拟结果

Fig. 3 Simulation result of S11 in IE3D

### 4.2 结果分析

从以上结果, 可以看出本文所提出的传输线模型只能简单预测主模谐振频率, 对高次模却无能为力. 导致其局限性的因素主要有两个:

(I) 传输线模型自身的误差: 由于传输线模型仅分析主模, 忽略了微带线结构中广泛存在的高次模.

(II) 倒 F 天线的自身辐射机制也导致了本文传输线模型的误差: 矩形微带天线的四个

边缘,纵向两边缘的场呈驻波分布,半波长内等效磁流恰好抵消,所以只有横向的两边缘构成有效辐射<sup>[1]</sup>。在传输线模型里将辐射边的辐射效果等效为辐射阻抗。而对倒F天线,由于其长度小于半波长,纵向分布场并不能完全抵消。同时,接地边是以等效电流辐射,因而利用传输线等效时存在一定误差。

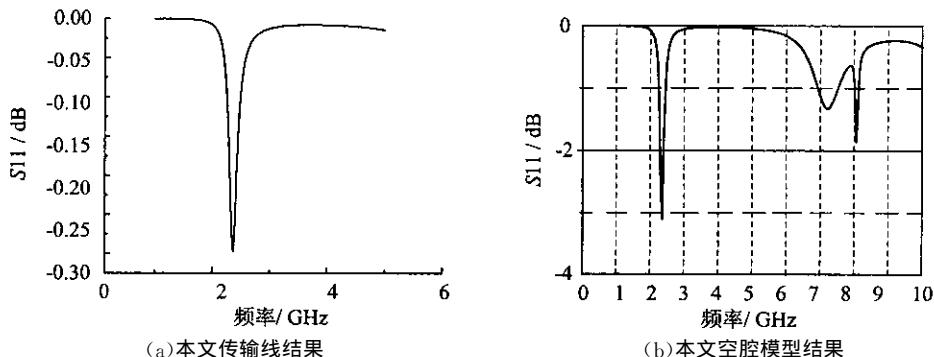


图4 传输线法计算的结果及空腔模型结果比较

Fig. 4 Comparison of S11 results between transmission line model and cavity model

另外,由计算结果也可以看出倒F天线的尺寸比普通微带天线的缩小了一半以上,确实达到了小型化的效果。例如,谐振频率为2.4 GHz的传统结构微带天线的典型尺寸为:30.075 mm×14.9 mm,而倒F天线的尺寸为15.3 mm×9.25 mm,是普通矩形微带天线的31.58%。

## 5 辐射特性计算结果

由于篇幅关系,这里只给出 $\varphi = \pi/2$ 时的倒F天线的辐射方向图,图5(a)、(b)分别为IE3D和本文公式(13)的计算结果。通过对比可见本文方法的计算结果与模拟结果是基本吻合的,从而验证了本文方法的有效性。

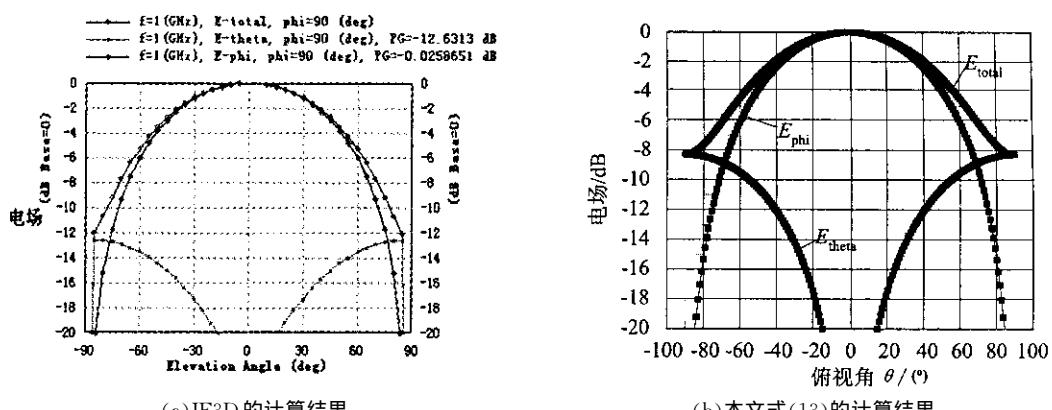


图5 倒F天线辐射方向图( $\varphi = \pi/2$ )

Fig. 5 Radiation pattern of PIFA ( $\varphi = \pi/2$ )

## 参 考 文 献

- [1] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, *et al.* Microstrip Antenna Design Handbook [M]. Norwood, MA: Artech House, 2001, 10:01-04.
- [2] 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, 1991, 11-38.
- [3] WONG Kin-Lu. Compact and Broadband Microstrip Antennas [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [4] Yongjin Kim, Sangseol Lee. Design and fabrication of a planar inverted-F antenna for the wireless lan in the 5-GHz Band [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 34(6).

## The Analysis of Planar Inverted-F Antennas With Equivalent Models

ZHU Qi, FU Kan, LI Yan

*(Department of EEIS, USTC, Hefei 230027, China)*

**Abstract:** Based on the traditional microstrip antennas' transmission line model and cavity model, the transmission line model and cavity model for Planar Inverted-F antennas are presented here. According to the theoretical analysis of PIFA, resonating frequency and radiation pattern are calculated. Finally, the computational results are compared with the simulations in IE3D and satisfactory results are derived. Accordingly, the methods in the paper are confirmed, providing a basis for future designs.

**Key words:** inverted F antenna; microstrip antenna; transmission line model; cavity model

### 写好摘要(1)

国家标准 GB6447-86 对摘要的定义为:“以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记叙文献重要内容的短文。”摘要是科技论文的重要组成部分,读者通过阅读摘要,就能对全文有大致地了解。其内容应包括:

- (1) 目的:目的和任务,所涉及的主题范围.
- (2) 方法:所用的理论、条件、材料、方法(手段)、设备、程序等.
- (3) 结果:实验和观察的结果、数据,得到的效果、性能等.
- (4) 结论:结果的分析、研究、比较、应用等.

## 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>