

· 天线系统 ·

中图分类号:TN82

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2013)11-0058-04

# 一种新型互补结构的宽带圆极化印刷天线

杨文君,楼建东,雷雪,陈国虎

(信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

**摘要:**设计了一种新型的宽带圆极化微带天线,天线由两个完全相同的矩形微带贴片组成,采用微带线馈电方式为天线的上层微带贴片进行不对称馈电,下层贴片作为天线的部分地。天线从整体上是一个互补结构,根据圆极化产生的原理,在与馈电微带线相垂直的地方,开一条缝隙,产生正交的表面电流,调节天线的主要参数,使产生等幅正交的空间电场分量,从而产生圆极化波。通过增加十字形调谐结构,调节天线高频段的阻抗带宽和轴比带宽。天线在中心频率 2.55 GHz 处阻抗带宽( $S_{11} < -10$  dB)为 151% (0.8 GHz ~ 4.5 GHz),天线的轴比带宽( $AR < 3$  dB)为 82.3% (1.5 GHz ~ 3.6 GHz)。

**关键词:**宽带;圆极化;微带天线;互补结构

## A New Type of Complementary Structure of Broadband Circularly Polarized Printed Antenna

YANG Wenjun, LOU Jiandong, LEI Xue, CHEN Guohu

(Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A new broadband circularly polarized microstrip antenna is designed in this paper, it is from the traditional printed monopole geometry. Microstrip patch antenna consists of two identical rectangular, microstrip line asymmetric feeding for the upper microstrip patch and the lower patch as the part ground of the antenna. Antenna from a whole is a complementary structure, adjusting the main parameters of the antenna according to the principle of circular polarization generated, to open a gap perpendicular with the microstrip feeding line, orthogonal surface currents generated, so that the generated cross amplitude space electric field, to produce circularly polarized wave. By increasing the '+' type tuning structures, to adjust the bandwidth of the antenna height impedance and axial ratio band. The measured results show a -10 dB return loss bandwidth of 800 MHz to 4.5 GHz and a 3 dB axial ratio bandwidth of 1.5 GHz to 3.6 GHz. For the designed center frequency of 2.55 GHz, these correspond to 151% and 82.3% respectively.

**Key words:** broadband; circularly polarized; microstrip antenna; complementary structure

### 0 引言

因为圆极化波具有抗雨雾干扰和多径反射能力,并且能消除由电离层法拉第旋转效应引起的极化畸变影响。所以在无线通信、卫星通信和射频识别领域中得到了广泛的应用。微带天线具有剖面薄,体积小,易共形,便于获得圆极化等优点,但是其固有频带窄,在许多应用中,人们希望天线能够工作在更宽的频段,以实现更多的功能,比如 GSM 手机、WLAN、GPS 等集成在一个用户载体上就是典型的例子。所以,宽频带圆极化是近年来天线领域研究的热点,当天线的工作频带较宽时,其应用的场合较广,避免了在不同的频段采用不同的天线,节省了成本和空间。

平面单极子和偶极子天线由于其剖面低,频带宽,易与微波电路集成等优点被广泛应用在现代通信中。其基本原理是,通过设计使得天线具有能够产生圆极

化波的微扰结构,调节天线的参数,使之具有宽带圆极化性能。文献[1]中,天线通过设计月牙形的微扰结构,产生正交的表面电流,使之产生圆极化波,天线中间的小月牙缝隙调节天线的带宽。天线的轴比带宽( $AR < 3$  dB)为 56% (4 GHz ~ 7.1 GHz)。文献[2]中,天线采用 Y 型结构,通过调节 Y 型结构的两个枝节,产生两个正交分离的简并模,两个模式幅度相等,相位差为  $90^\circ$ ,天线的轴比带宽( $AR < 3$  dB)为 4% (2.25 GHz ~ 2.35 GHz)。文献[3]用两个正交放置的倒 L 折叠振子产生圆极化波,天线阻抗带宽( $S_{11} < -10$  dB)为 10.4%,轴比带宽( $AR < 3$  dB)为 2.92%。

### 1 天线原理与设计

#### 1.1 天线的几何构造

本文采用单馈法来实现天线的圆极化,天线的结构如图 1 所示。天线的长为  $L$ ,宽为  $W$ ,上层辐射贴片和下层辐射贴片几何尺寸是一样的;辐射贴片的长为  $l_n$ ,宽为  $w_n$ ,十字形匹配结构的长为  $l_s$ ,宽为  $w_s$ ;两个辐

射贴片中间的缝隙宽度为  $g$ ;微带馈线中心与辐射贴片靠天线中心边的距离为  $d$ ;介质基板的厚度为  $H$ 。

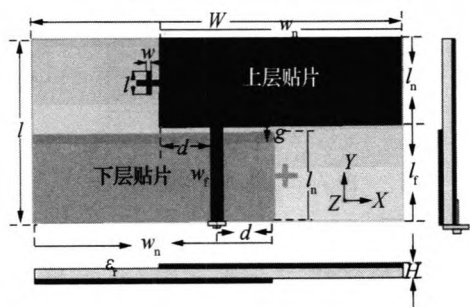


图1 天线结构图

正面和背面的辐射贴片和中间的耦合缝隙在  $Y$  方向构成了准偶极子天线。偶极子天线的长度是等效波长的一半。印刷偶极子天线的理论长度  $l$  可从式(1)求出<sup>[4]</sup>,可以得出当偶极子的长度  $L=72\text{ mm}$  时,天线的谐振频率为  $1.65\text{ GHz}$ 。

$$L \approx \frac{\lambda_{\text{eff}}}{2} = \frac{\lambda_r}{2 \varepsilon_{\text{eff}} f_r} = \frac{c}{2 \varepsilon_{\text{eff}} f_r} \quad (1)$$

其中

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2}$$

## 1.2 天线圆极化产生的原理

单馈法产生圆极化的原理如图2所示。

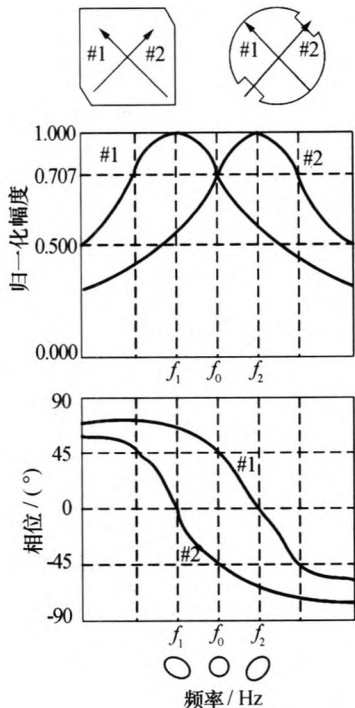


图2 单馈法产生正交模的原理图

单馈法是通过在微带贴片上切角,表面开槽,和在地板上开一定角度的耦合缝隙,产生两个正交极化的

简并模分别是模1(#1)和模2(#2)。这两个简并模幅度相等,空间相位相差  $90^\circ$ 。如式(2)定义,其中  $E$  是总的电场,  $E_{\text{Hor}}$  和  $E_{\text{Ver}}$  分别表示沿  $X$  方向和  $Y$  方向的水平和竖直电场矢量,  $\delta$  表示相位偏移。

$$E = E_{\text{Hor}} + e^{j\delta} E_{\text{Ver}} \quad (2)$$

本文设计的天线利用互补结构产生几何微扰,从而产生正交的表面电流,激发起正交的空间电场矢量。天线的结构设计使得上层贴片和下层贴片的表面电流是正交的,其中辐射贴片的宽度主要影响天线的水平电流产生水平电场矢量  $E_{\text{Hor}}$ ,准偶极子的长度主要影响天线的竖直电流产生竖直电场  $E_{\text{Ver}}$ 。上层贴片和下层贴片中间的缝隙宽度主要影响两个空间电场矢量的相移量  $\delta$ 。由于水平方向的电场矢量  $E_{\text{Hor}}$  要比竖直方向的电场矢量  $E_{\text{Ver}}$  提前  $1/4$  周期,所以,天线为左旋圆极化,辐射方向为  $+Z$  方向。

## 1.3 贴片表面电流分布仿真

图3a)是对矩形单极子天线在对称位置馈电时天线的表面电流分布,可以看到天线沿  $X$  的水平方向分布的表面电流相差  $180^\circ$ ,天线在水平方向的远区场相互抵消,辐射非常弱,而在竖直方向的辐射非常强。因此,天线工作在垂直极化。相比之下,如图3b)所示,采用不对称馈电的贴片的表面电流呈现出正交的状态,可以满足产生圆极化波的条件。

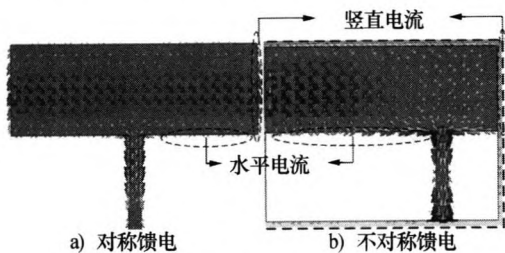


图3 单极子天线表面电流分布仿真图

如上所述,天线在  $+Z$  方向上工作在左旋圆极化,天线表面电流分布如图4所示,是天线工作在  $2.0\text{ GHz}$  时,表面电流分布从  $0^\circ$  变化到  $270^\circ$  时的分布状态。当天线工作在  $0^\circ$  相位时,水平方向电流反向,相互抵消,天线的主要电流方向在  $+Y$  方向;改变到  $90^\circ$  时,竖直方向电流反向,相互抵消,主要的表面电流在  $+X$  方向;改变到  $180^\circ$  时,水平方向电流反向,相互抵消,主要的表面电流在  $-Y$  方向分布;改变到  $270^\circ$  时,竖直方向电流反向,相互抵消,主要的表面电流在  $-X$  方向分布。因此,天线在  $+Z$  方向工作在左旋圆极化,当调换上下贴片和馈电微带线的位置,可以使天线工作在右旋圆极化。

## 2 天线参数仿真和优化分析

采用仿真软件 CST 2010 对天线的主要参数进行仿真优化,用来分析它们对天线阻抗带宽和轴比带宽

的影响,通过式(1)得到天线的长度 $l$ ,对天线参数 $W$ 进行仿真,得到阻抗带宽和轴比带宽随参数 $W$ 变化的曲线,如图5所示。随着天线宽度 $W$ 的增加,天线的轴比带宽和阻抗带宽变大,当 $W=2l$ 时,天线阻抗带宽和轴比带宽取得最优化值,随后逐渐变小。

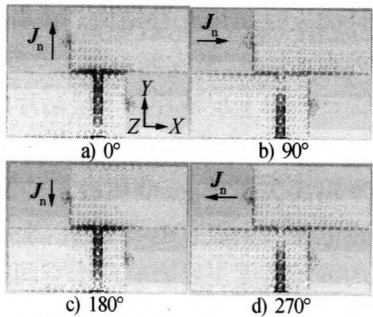


图4 天线表面电流分布仿真图

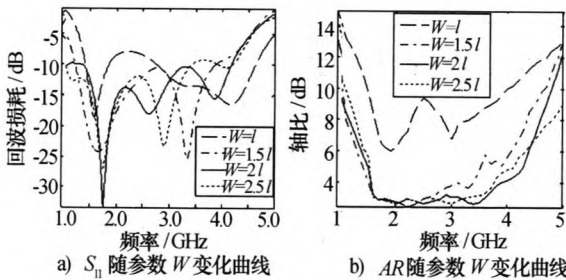


图5 天线 $S_{11}$ 和AR随参数 $W$ 变化曲线

天线参数 $g$ 变化时阻抗带宽和轴比带宽的变化曲线如图6所示, $g$ 是上层辐射贴片和下层辐射贴片之间的缝隙,它对天线表面的水平电流的形成产生主要的影响。对 $g$ 从1 mm~4 mm取四个样点仿真,随着 $g$ 的变化,天线阻抗带宽和轴比带宽变大,在2 mm处取得最优化值,随后变小。

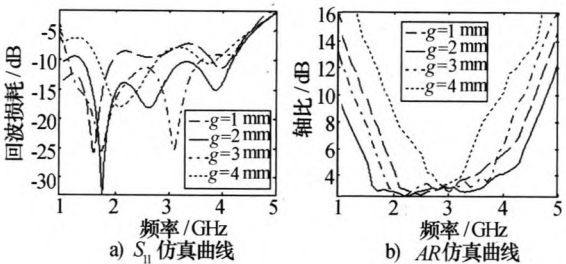


图6 天线 $S_{11}$ 和AR随参数 $g$ 变化曲线

参数 $d$ 变化时, $S_{11}$ 的仿真曲线如图7所示,随着 $d$ 的增大,阻抗带宽逐渐变宽,在 $d$ 为23 mm时,取得最优值,随后变小。当 $d$ 为23 mm时, $w_n-d=W/2$ ,这时,天线水平方向( $E_{Hor}$ )谐振模式的谐振波长为 $W/2$ 。天线竖直方向( $E_{Ver}$ )的谐振模式由竖直方向的边和微带馈线产生,此时,竖直边的谐振波长同样等于 $W/2$ 。因此,水平的谐振模式( $E_{Hor}$ )与竖直的谐振模式( $E_{Ver}$ )正好幅度相等,相位差为 $90^\circ$ ,构成了产生圆极化波的要素。

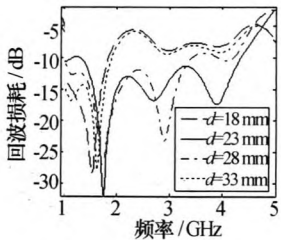


图7  $S_{11}$ 随 $d$ 变化曲线

如图8所示,天线的十字形调谐结构显著地增加了高频段的阻抗带宽,十字形结构作为容性部分来调谐天线竖直边的感性部分,通过仿真取得最优的 $w_s$ 和 $l_s$ ,使得天线高频段的阻抗匹配频带从3.3 GHz提高到了4.5 GHz。最后天线的优化参数见表1。

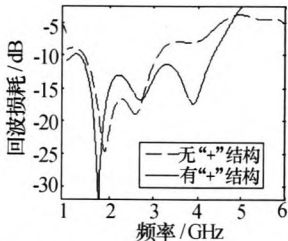


图8 有无十字形结构 $S_{11}$ 变化曲线

表1 天线的优化参数										mm
$W$	$l$	$w_n$	$l_n$	$w_s$	$l_s$	$l_f$	$d$	$g$	$H$	
148.0	72.0	97.0	35.0	4.0	9.6	37.0	23.0	2.0	1.6	

3 天线的测试与分析

根据天线的仿真模型,制作了天线测试样机,如图9所示。天线的基板采用厚度为1.6 mm,介电常数 $\epsilon_r$ 为2.2的RT Duroid的介质基板。利用Agilent 8510B矢量网络分析仪对天线 $S_{11}$ 进行实物测试,与仿真值对比,如图10所示,仿真值与测试值吻合良好,但是在高频部分有些偏移。这是由于天线在加工的时候存在误差,天线的阻抗带宽为3.7 GHz(0.8 GHz~4.5 GHz)。

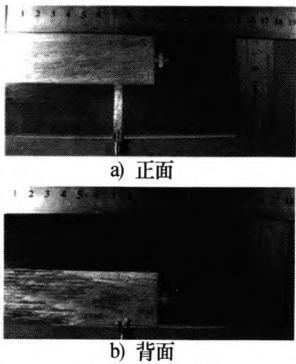


图9 天线实物图

在室外开阔场地用标准增益喇叭作为参考量,对天线增益和轴比进行测量,对辅助天线标记 $XOZ$ 面和 $YOZ$ 面,先在 $XOZ$ 面测试一组数据 $G_a$ ,接着把待测天线正交放置,在 $YOZ$ 面测试一组数据 $G_b$ 。由于 $G_a$ 表



示长轴部分增益,  $G_b$  表示短轴部分增益, 由轴比的定义得, 天线的轴比可通过  $G_a$  和  $G_b$  相除取对数得到。其计算方法如式(3)所示。天线轴比的测试曲线与仿真曲线如图 11 所示。天线轴比的实测值与仿真值一致性良好, 实测值相比于仿真值有  $\pm 1$  dB 的波动, 天线的轴比带宽为 2.1 GHz (1.5 GHz ~ 3.6 GHz)。

$$AR = 20\lg(G_a/G_b) \quad (3)$$

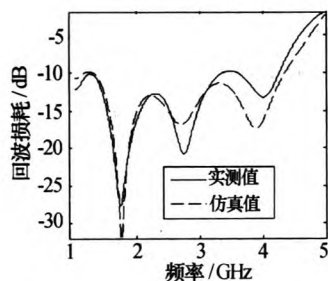


图 10 天线  $S_{11}$  仿真值与实测值对比图

在测试圆极化天线的增益时, 考虑到参考天线和待测天线极化方式不同。所以, 先在天线的水平极化位置测试一组局部增益值  $G_a$ , 然后在天线垂直极化位置测试一组局部增益值  $G_b$ 。  $G_a$  和  $G_b$  分别表示长轴部分增益和短轴部分增益, 两个局部增益相加起来便是总的增益, 如式(4)所示。还有一种方法, 由于圆极化天线  $G_a$  和  $G_b$  大小基本相等, 所以, 圆极化天线的最后总增益大致等于长轴增益加上 3 dB 即可。

$$G = 10\lg(G_a + G_b) \quad (4)$$

得到天线的增益值, 与仿真值对比, 如图 11 所示, 仿真值与实测值基本吻合, 增益从 3 dB 变化到 5 dB。天线轴比的实测值与仿真值基本一致, 天线的轴比带宽为 2.1 GHz (1.5 GHz ~ 3.6 GHz)。

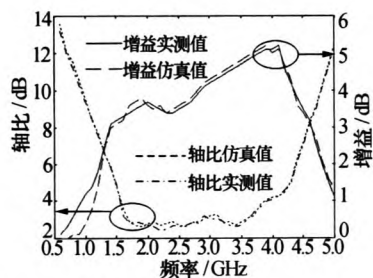


图 11 天线轴比和增益仿真与实测对比曲线

如图 12 所示, 天线在 1.6 GHz、2.5 GHz 和 3.4 GHz 三个采样点在  $XOZ$  平面 ( $\varphi=0^\circ$ ) 和  $YOZ$  平面 ( $\varphi=90^\circ$ ) 的极化方向图, 仿真值与测试值吻合良好。天线在  $YOZ$  平面有好的方向性, 而在  $XOZ$  平面, 由于矩形贴片的  $X$  方向产生圆极化波的水平分量 ( $E_{hor}$ )。天线的宽  $W$  相比于天线的长  $l$  要明显的偏大。所以, 产生了较大的交叉极化, 引发了天线在  $XOZ$  平面方向图在高频段的畸变。从天线性能上说, 这是天线无法兼顾圆极化带宽和方向图所带来的结果。

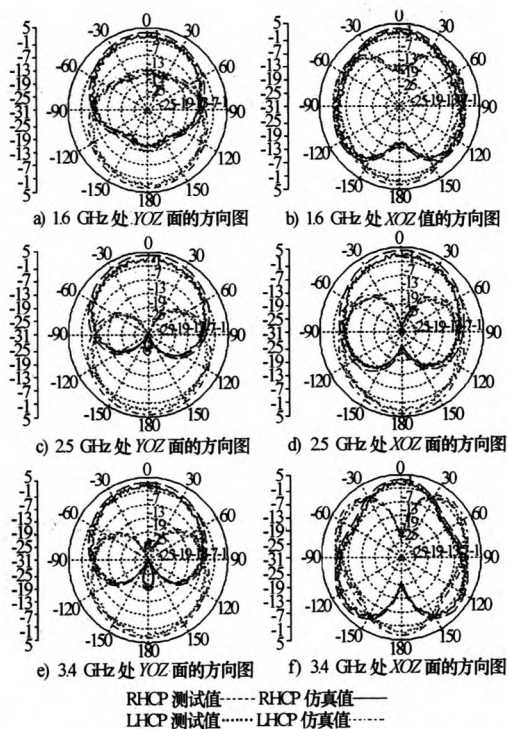


图 12 天线在频率采样点  $XOZ$  面和  $YOZ$  面的极化方向图

#### 4 结束语

本文从传统的印刷单极子天线出发, 采用微带线在不对称的位置为矩形贴片馈电, 利用几何微扰法产生圆极化波。天线的上下两层贴片构成一个准互补结构, 以提高天线的轴比带宽和阻抗带宽, 采用十字形调谐结构以扩宽天线高频端的带宽, 天线阻抗带宽 ( $S_{11} < -10$  dB) 为 151% (0.8 GHz ~ 4.5 GHz), 天线的轴比带宽 ( $AR < 3$  dB) 为 82.3% (1.5 GHz ~ 3.6 GHz)。天线易于加工制作, 可用于车载雷达传感装置和无线射频识别天线。天线辐射波瓣在水平面为全向, 不适合组成平面阵列。

#### 参考文献

- [1] Foudazi A, Hassani H R, Frotnpour A. A novel broadband circularly polarized printed monopole antenna [C]// 2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference. Loughborough: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [2] Akbar Ghobadi, Mojtaba Dehmollaian. A printed circularly polarized Y-shaped monopole antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 53(2): 22-25.
- [3] Xi Y, Ying Z Y, Wei H, et al. Low-profile, small circularly polarized inverted-L antenna with double-folded arms [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 51(9): 767-770.
- [4] 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.

杨文君 男, 1988 年生, 硕士。研究方向为宽带圆极化天线设计。

## 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,一直致力和专注于微波、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>