

# ETC用5.835 GHz微带阵列天线的设计

邵一鹏, 白明, 马慧瑾, 苗俊刚

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:**设计了一种ETC用低旁瓣圆极化微带阵列天线,应用于电子收费(ETC)的路测单元(RSU)。为实现低旁瓣、圆极化的效果,对2个微带天线单元运用旋转与相位补偿的方法进行轴比改进,并以改进后的2单元作为辐射单元制作了一款基于道尔夫-切比雪夫幅度分布的微带天线阵列。经过仿真与实际测量,该天线具有很好的低旁瓣、圆极化的效果。该天线对于ETC系统以及其他类似的天线系统具有很好的理论与实际意义。

**关键词:**ETC; RSU; 圆极化; 低旁瓣; 微带阵列天线

中图分类号: TN919-34

文献标识码:A

文章编号:1004-373X(2012)04-0148-04

## 5.835 GHz microstrip array antenna used in ETC

SHAO Yi-peng, BAI Ming, MA Hui-jin, MIAO Jun-gang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A low-sidelobe circularly-polarized microstrip array antenna used in road side unit (RSU) for electronic toll collection (ETC) was designed. In order to achieve the effect of low-sidelobe circular polarization and low axial ratio, two microstrip antenna units were modified with the rotation and phase compensation methods to reduce axial ratio. The improved two units were taken as a radiative unit to make a microstrip antenna array, whose amplitude distribution is based on Dolph-Chebychev. The simulation and measured results indicate that the antenna has the effect of low-sidelobe and circular polarization. The antenna system has a good theoretical and practical significance for ETC and other similar antenna systems.

**Keywords:** ETC; RSU; circular polarization; low-sidelobe; microstrip array antenna

电子收费系统(Electronic Toll Collection, ETC)是国际上正在努力开发并推广普及的一种用于高速公路等处的收费系统,它最大特点是不停车收费。ETC系统主要由2部分组成,一是车载单元(OBU),二是路侧单元(RSU),RSU的主要部件是一个圆极化微带天线,工作时,RSU天线在水平面内扫描车道。根据实际应用的需求,若水平面内RSU天线旁瓣电平太高,会产生邻道干扰而发生重复收费的问题。为抑制此类情况的发生,有必要设计一款低旁瓣、圆极化微带阵列天线。

传统的圆极化天线主要采用单点馈电的方式,但是这种天线轴比带宽较小。本文先设计了一款单点馈电微带圆极化天线,通过对其轴比进行优化设计,以优化后的天线作为辐射单元组阵,对馈电网络进行设计,最终实现微带阵列天线的圆极化、低旁瓣效果。经过仿真与测试,天线完全满足需求,并且该形式天线可用于类似无线通信、雷达监测等领域。

## 1 圆极化天线单元设计与优化

### 1.1 天线单元的设计

天线单元的设计采用方形倒角圆极化天线单

元<sup>[1-2]</sup>,天线结构如图1所示。

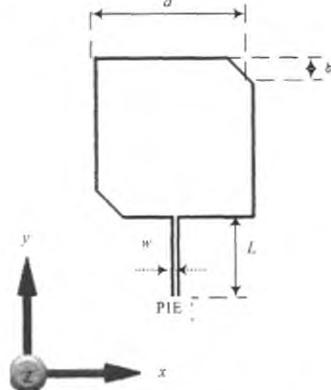


图1 单点馈电圆极化天线单元

该天线在面积为 $s$ 、介质板厚度为 $h$ 、介电常数为 $\epsilon_r$ 的侧馈方形微带天线基础上削去两个面积相等、和为 $\Delta s$ 的等边直角三角形,使之形成圆极化功能,并通过 $1/4$ 波长微带传输线与 $50\Omega$ 匹配。根据空腔模理论,采用单点侧馈方式的矩形贴片天线可产生极化正交、幅度相等的2个简并模( $TM_{01}, TM_{10}$ ),但2简并模不能形成 $90^\circ$ 的相位差。为实现简并模间 $90^\circ$ 相位差以辐射圆极化波,需要在方形微带天线上附加一简并模分离单元,使简并正交模的2个谐振频率产生分离,天线实际工作频率 $f$ 选在2谐振频率之间。

天线单元边长  $a$  由式(1)得出:

$$a = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中:

$$\epsilon_r = \frac{1}{2} \left[ \epsilon_r + 1 + (\epsilon_r - 1)(1 + \frac{10h}{a})^{-1/2} \right]$$

切去三角形面积可由式2得出:

$$\left| \frac{\Delta s}{s} \right| = \frac{1}{2Q} \quad (2)$$

式中  $Q$  为微带天线品质因数

天线模型采用板材为双层覆铜、介电常数  $\epsilon_r = 2.65$  的聚四氟乙烯玻璃布,厚度为 0.8 mm,其中铜层厚度为 1 Oz(约 35  $\mu\text{m}$  厚)。经过仿真与优化设计,最终确定天线单元宽度为  $a = 15.2$  mm,切角为等边直角三角形,其边长为 2.49 mm,1/4 波长匹配线宽度为  $w = 0.6$  mm,长度为 9.2 mm。对单元天线用电磁计算软件 Empire 仿真,算出工作于 5.835 GHz 频率时,输入阻抗为  $54 \Omega$ ,单元天线远场仿真方向图、轴比仿真方向图分别如图 2、3 所示,其中曲线 1 代表  $xOz$  面方向图,曲线 2 代表  $yOz$  面方向图。

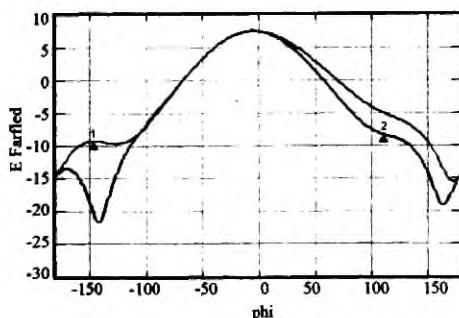


图 2 天线单元远场仿真方向图

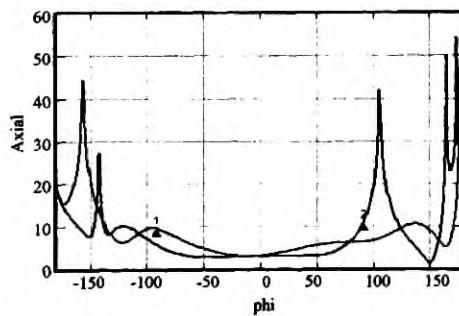


图 3 天线轴比仿真方向图

由仿真结果可见,天线增益为 7.46 dB,远场方向图  $yOz$  面 3 dB 波束宽度为  $74.5^\circ$ , $xOz$  面 3 dB 波束宽度为  $80^\circ$ 。天线极化方式为右旋圆极化,轴比为 3 dB。由仿真结果可见,天线轴比偏高,有待继续优化。

## 1.2 圆极化天线轴比优化设计

### 1.2.1 轴比优化方案

经过以上分析,设计的单点馈电圆极化天线单元满

足右旋圆极化的效果,但该天线轴比较高,有待对其进行优化设计。

解决单元天线轴比偏高问题的一个办法是通过对天线单元进行旋转并对馈电相位进行相应补偿<sup>[3]</sup>。该方法已经在国内外得到充分发展<sup>[4-5]</sup>,普遍采用 2 单元与 4 单元顺序旋转  $90^\circ$  并加  $90^\circ$  馈线做相位补偿。为了后续天线组阵需要,本文采用 2 单元旋转与相位补偿的方式实现。2 单元天线结构图和 1 分 2 功分器分别如图 4(a),图 4(b)所示。

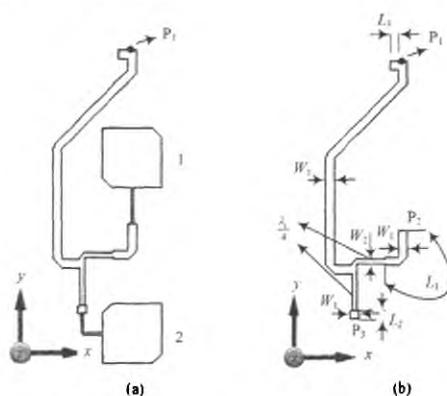


图 4 经过旋转与相位补偿的 2 单元天线

如图 4(a)所示,天线单元 1 相对天线单元 2 逆时针旋转  $90^\circ$ , $P_1$  为激励源。 $P_1$  分配给单元 1、2 的电流应达到幅度大小相等,相位单元 2 相对于单元 1 延迟  $90^\circ$ 。为实现所需电流分布,依据 T型功分器原理<sup>[6]</sup>,设计了 1 分 2 的功分器,如图 4(b)所示。电流由端口  $P_1$  经过宽度为  $W_1$  的传输线分给 2 段宽度均为  $W_2$ 、长度相同的  $1/4$  波长匹配线,并各自经过一段宽度为  $W_1$  的相移线,分别到达端口  $P_2$  和  $P_3$ 。其中  $W_1 = 2.24$  mm, $W_2 = 1.26$  mm; $P_2$ 、 $P_3$  端口处传输线宽度为  $W_1$ ,其特性阻抗等于方形倒角圆极化天线单元输入阻抗,这保证了输出端口处无反射;相移线  $L_1 - L_2 = 8.8$  mm  $\approx \lambda_g/4$ , $\lambda_g$  为传输线上一个波长长度;相移线通过串接宽度  $W_2$  的匹配段实现与宽度为  $W_1$  的传输线匹配,避免了反射。对加上天线单元的 1 分 2 功分器输入阻抗进行仿真,得到  $P_1$  端口输入阻抗为  $(61 + j16)\Omega$ ,可见通过功分器连接的 2 单元天线输入阻抗并不是一个实数,这不利于后期天线单元的组阵。

通过在 Smith 圆图上的分析发现,在  $P_1$  端口可并联一段长度  $L_3 = 0.031\lambda_g$ 、宽度为  $W_1$  的开路传输线,输入阻抗变换为  $65 \Omega$  的实数。对图 4(b)所示 1 分 2 功分器网络传输参量进行仿真,得到端口  $P_2$  与  $P_3$  相对于  $P_1$  的传输系数  $S_{21}$  与  $S_{31}$ ,在 5.835 GHz 频点, $S_{21}$  幅值 0.69,相位  $120^\circ$ , $S_{31}$  幅值 0.71,相位  $212^\circ$ 。即端口  $P_2$  与端口  $P_3$  电流幅值比近似为 1 : 1,端口  $P_2$  电流相位滞

后于端口  $P_1 \pi/2$ 。因此,1/2的功分器的设计与仿真结果达到了要求。

### 1.2.2 2单元天线仿真与分析

对图4(a)所示2单元天线运用Empire仿真软件进行仿真,并与1单元进行对比,作出轴比随频率变化图和5.835 GHz频点天线xOz面轴比随角度变化对比图如图5(a)、(b)所示。

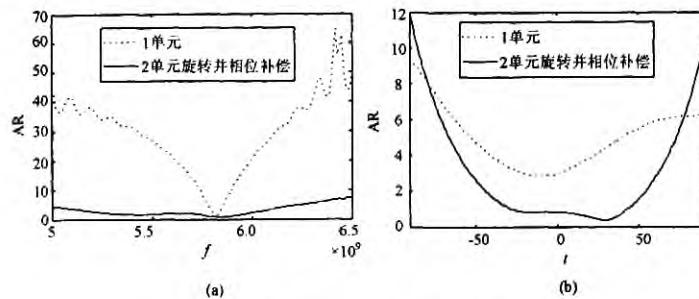


图5 2单元轴比仿真图

由图5(a)仿真结果可见,经过旋转与相位补偿后,2单元圆极化天线轴比在工作频率范围内降低,在5.84 GHz频点处轴比最小,最小值为0.61 dB,在5.84 GHz频点处轴比为0.65 dB,且3 dB轴比带宽达到906 MHz。由图5(b)仿真结果可见,经过旋转与相位补偿后,2单元圆极化天线轴比在xOz面扫描范围内较低,在0°轴比达到了0.62 dB,轴比低于3 dB的角度范围接近120°,低轴比角度范围较宽。通过该方法可以使2单元圆极化阵列的轴比在较高的频带范围与较大的角度范围内保持很低的效果。通过对仿真结果的分析,2单元圆极化天线低轴比频率范围得到了扩展,在5.835 GHz频点处xOz平面内低轴比的扫描角度范围较大,适合作为辐射单元组阵以实现ETC收费的用途,并选择xOz面作为RSU天线水平面。

## 2 天线阵的设计与仿真

### 2.1 馈电网络的设计

微带天线为了实现高增益、波束控制的特性,需要将多个辐射单元进行组阵并对馈电网络进行相应设计。

在阵因子个数有限,天线馈电电流采用相位相同、幅度均匀分布的阵列形式情况下,其阵因子方向图的第一副瓣电平在-15~-13 dB之间,为降低天线阵列的旁瓣电平,可对天线阵各单元馈电电流幅度采用道尔夫-切比雪夫(Dolph-Tchebyscheff)分布方式<sup>[7]</sup>。该方案对于指定的旁瓣电平,其第一零点波束宽度最窄;相反,对于指定的第一零点波束宽度,其旁瓣电平最低。为了控制天线尺寸,本微带天线阵列采用水平方向6元阵的形式。设理论要求28 dB的旁瓣抑制比,计算出水平方向馈电电流幅值比为1:2.14:3.05:3.05:

2.14:1。运用功分器设计原理,设计出一款按照电流幅度比值1:2.14:3.05:3.05:2.14:1,相位相同的1分6的馈电网络。

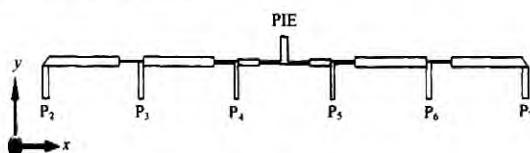


图6 1分6馈电网络

1分6馈电网络如图6所示,电流激励由 $P_{1E}$ 端口进入,经过T型功分器分别向两边均匀馈电,再各自经过1分3的串馈方式分配给各天线单元。其中,各天线单元相距 $\lambda_g$ ,即保证了各天线单元馈电相位相同;同时,通过1/4波长传输线阻抗变换的方法控制各单元间电流幅度的比值。对图6传输网络散射参量进行仿真,得到馈电网络传输系数的仿真结果,对仿真结果进行分析,选择端口 $P_2$ 的输出电流作为参考,发现在5.835 GHz频点,端口 $P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$ 的输出电流幅度比值近似为1:2.12:3.06:3.06:2.12:1,电流相位分别为 $0^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 8^\circ, 9^\circ, -1^\circ$ 。可见各天线单元电流幅度比值满足理论设计为28 dB的道尔夫-切比雪夫电流分布,电流相位近似相等,满足设计需要。

### 2.2 仿真与测试结果

根据前面的分析,通过1分2的功分器对2单元圆极化天线组合可以有效优化天线的轴比,提高3 dB轴比带宽,降低水平面角度范围内轴比;通过1分6功分器可以将馈电端口电流按照道尔夫-切比雪夫电流分布进行分配,且各输出端口电流相位在中心频点处近似相等。因此,将1分6微带馈电网络与2单元天线阵列组装成微带阵列天线,并进行加工,加工工艺采用电化学腐蚀技术,加工精度为±0.02 mm。天线实物图如图7所示。将微带阵列天线在暗室紧缩场条件下进行测试。以微带阵列天线作为接收天线,安置于转台上;以紧缩场馈源作为发射天线,通过步进电机控制转台旋转,通过矢量网络分析仪来进行测试。测试了5.835 GHz频点水平面远场方向图、水平面轴比方向图、轴比随频率变化图,测试结果如图8所示。

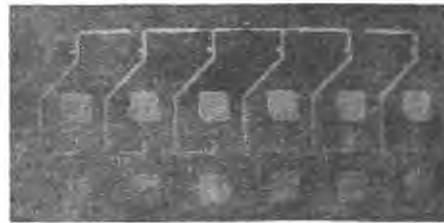


图7 天线实物图

由测试结果知,微带阵列天线增益为15.5 dB,工作

于5.835 GHz频点时,水平面天线3 dB波束宽度为16.5°,旁瓣抑制比为25.3 dB;天线极化方式为右旋圆极化,轴比最小时工作于5.83 GHz,此时轴比为0.626 6 dB;在5.835 GHz频点轴比为0.65 dB,轴比小于3 dB的轴比带宽为240 MHz(5.79~6.03 GHz),水平面天线轴比低于3 dB波束宽度为41°(-18.5°~23.5°)。由测试结果可见,天线的轴比较低,低轴比带宽较宽,水平面低轴比角度范围较大,水平面远场方向图旁瓣电平低,天线增益高,各项性能参数满足设计需求。

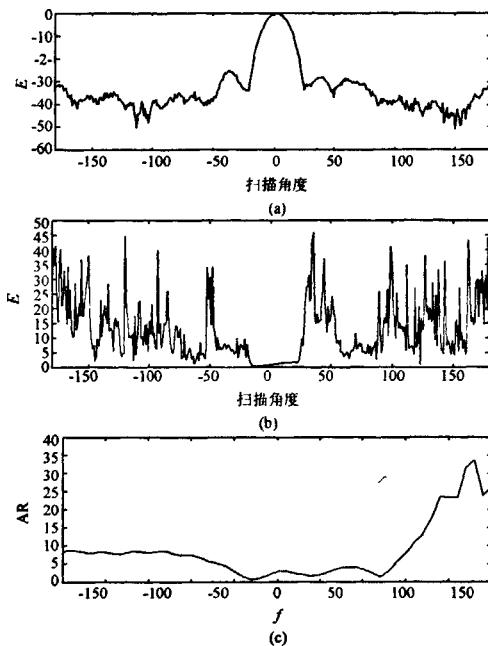


图8 实际天线测试结果

**作者简介:** 邵一鹏 男,1987年出生,江苏人,硕士。研究方向为电磁场与微波技术。

(上接第151页)

- [2] XING Xin-peng, LI Dong-mei, WANG Zhi-hua, et al. An overview of the research on CMOS bandgap reference sources [J]. Microelectronics, 2008, 38 (1): 57-63.
- [3] BANBA H, SHIGA H, MMEZAWA A, et al. A CMOS bandgap reference circuit with sub-1-V operation [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuit, 1999, 34 (5): 670-674.
- [4] ANNEMA A J. Low-power bandgap reference featuring DTMOSTs [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 1999, 34(7):949-955.
- [5] LEUNG N K, MOK P K T. A sub-1 V 15 ppm CMOS bandgap voltage reference without requiring low threshold voltage device [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2002, 37 (4): 526-530.

### 3 结语

本文介绍了一种ETC用5.835 GHz的微带阵列天线的设计方法。从测试结果来看,设计的微带阵列天线的低轴比带宽较宽,在中心频率5.835 GHz,天线增益高,远场方向图旁瓣电平低,水平面低轴比角度范围较大,解决了传统ETC天线远场方向图旁瓣电平较高、圆极化性能一般、馈电网络复杂的问题,对类似圆极化、低旁瓣微带天线系统的开发与应用具有重要的参考意义。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 张钧. 微带天线理论与工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [3] JAMES R, JAMES J R. Handbook of microstrip antennas [M]. UK: IET, 1989.
- [4] WU Jeun-Wen, LU Jui-han. 2×2 Circularly polarized patch antenna arrays with broadband operation [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 5 (39): 360-363.
- [5] SOLIMAN E A, BREBELS S, BEYNE E. Sequential rotation arrays of circularly polarized aperture antennas in the MCM-D technology [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 6 (44): 581-585.
- [6] POZAR D M. 微波工程[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [7] KRAUS J D, MARTHEFKA R J. 天线[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2007.

2002, 37 (10): 1339-1343.

- [6] BONI A. OP-amps and startup circuits for CMOS bandgap reference with near 1 V supply [J]. IEEE Journal of Solid State Circuit, 2002, 37 (10): 1339-1343.
- [7] 毕查德·拉扎维. 模拟CMOS集成电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [8] 何乐平, 王忆. 模拟集成电路设计与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] 王峰, 吴卫平. 一种CMOS带隙基准电压源设计[J]. 现代电子技术, 2008, 31(4): 4-8.
- [10] 胡养聪, 周伟, 周长胜. 一种无运放电流模式带隙基准设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(4): 19-22, 34.

**作者简介:** 李凯 男,1986年出生,山东人,硕士研究生。主要从事模拟集成电路设计与研究。

蒋亚东 男,1964年出生,长江学者,博士生导师。主要研究方向有机电子材料及器件、敏感材料及传感器、光电材料及器件等。

## 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>