

# 一种高隔离度的双极化微带天线阵的理论和实验 \*

高式昌 钟顺时

**【提要】** 本文提出利用双端口的串行角馈方形贴片实现双极化，并设计了一种共面的双极化馈线网络。综合运用多端口网络模型、腔模理论和分片法，给出了单端口、双端口天线单元和双极化天线阵列的理论分析。本方法计算简便，适合于工程应用。实际设计了一副6GHz频段的单层天线阵，实验测量的双端口隔离度达-41dB，其性能明显优于通常的单层双极化微带天线阵。该面阵结构简单、馈线网络较小，且易合并成更大规模的双极化天线阵。

**关键词:**微带天线阵，极化，阻抗，隔离度

## Theory and Experiments of a Dual-Polarized Microstrip Array Antenna with High Isolation

Gao Shichang,Zhong Shunshi  
(Dept.of Com.Eng.,Shanghai Univ.,Shanghai 201800)

**Abstract:** The serial corner feeding of a square patch with two ports is proposed to realized the dual-polarized microstrip antenna. A novel coplanar dual-polarized feedline network is designed for the array. A method of analysis is developed, which is based on the combination of multiport network model, cavity theory and segmentation technique. The one-port and two-port antenna elements and the dual-polarized array are studied in order. A single-layer microstrip array at 6GHz band is designed and manufactured. Its measured isolation reaches -41dB, which is much better than that of the single-layer dual-polarized arrays commonly used. The present array module is of simple structure, small feedline network and is easy to be further combined to form larger dual-polarized antenna arrays.

**Key words:** Microstrip antenna array, Polarization, Impedance, Isolation

### 一、引言

频谱资源日益紧张的现代卫星通信领域迫切需要天线具有双极化功能，因为双极化可使它的通信容量增加一倍。雷达系统和通信的其他领域中也常常需要双极化天线，例如城市内的陆地移动通信中可通过采用双极化天线实现极化分集接收，以减小多径传播现象对系统性能的影响。微带天线阵本身具有薄、轻和容易制作等优点，利用它实现双极化阵一直是人们非常关心的课题 [1~3]。通常认为对于微带线双馈的方形贴片天线，只有当两个馈电点分别位于两条垂直边的中点时，才能获得最大的双极化隔离

度，其值在-15dB到-20dB左右<sup>[4, 5]</sup>。目前国内较多的双极化微带天线阵亦是基于此原理实现的，但这些双极化阵列的隔离度一般都只有约-20~-25dB左右<sup>[1~5]</sup>。最近已有报导采用双层或更多层结构的天线阵，利用不同层的天线阵分别实现不同的极化，这种天线阵结构非常复杂，制作比较困难，造价也高<sup>[6]</sup>。本文从实用角度出发，研究了最简单的单层结构，提出采用双端口的串行角馈方形贴片来实现微带天线的双极化，并设计了一种新的共面的双极化馈线网络。下面首先基于多端口网络模型、腔模理论和分片法，给出单端口、双端口串行角馈天线单元和双极化天线阵列的理论分析。然后介绍一副6GHz频段2×2元的高隔离度的双极化微带天线阵的设计。

## 二、单端口和双端口串行角馈天线单元的理论分析

### 1. 单端口的串行角馈天线单元

单端口的串行角馈天线单元如图1(a)所示，其两条边长度均为 $a$ 。假设基片厚度 $d$ 远小于工作波长 $\lambda$ ，故对此天线的分析可采用平面微波电路的模型<sup>[3]</sup>。通常的腔模理论若只将馈点处的源简单地用一垂直的电流片代替，对这种天线的理论计算值与实验测量值的误差较大。本文充分考虑到这种串行角馈天线在馈线与贴片连接处的特点，利用分片法，将该天线分为三块：块1为一正方形，块2为等腰三角形，块3为微带传输线，如图1(b)所示。由多端口网络模型和分片法知<sup>[7, 8]</sup>，各块的边缘可看成由若干个具有一定宽度的端口组成，各相邻块之间通过公共边上的这些端口互连。

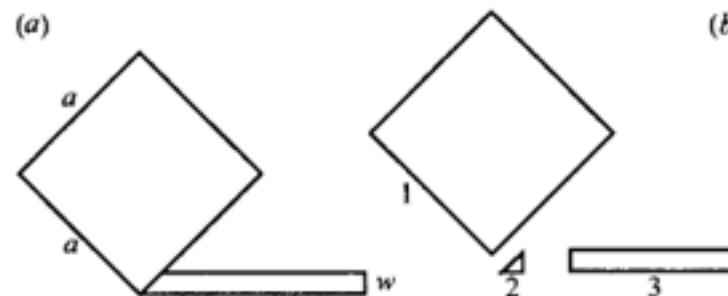


图1 单端口的串行角馈方形微带天线

利用微波平面电路的多端口网络模型可分别求出块1、2和3的格林函数，其具体形式见文献<sup>[7]</sup>。为考虑天线的辐射损耗、表面波损耗等效应，同时避免传统的多端口网络模型中确定边缘各端口电导的困难，这里采用了腔模理论中已被实验证明是较成功的方法，即用等效波数 $k_{eff}$ 代替 $k$ ；为避免多端口网络模型中确定边缘各端口电容的困难，计算中采用等效边长 $a_e$ 代替 $a$ ，二者具体形式见文献<sup>[3]</sup>。块1上的端口 $i$ 和端口 $j$ 之间的互阻抗为：

$$z_{ij} = \frac{1}{w_i w_j} \int_{w_i} \int_{w_j} G_1(s|s_0) ds ds_0 \quad (1)$$

$w_i$ 和 $w_j$ 分别为端口*i*和端口*j*的宽度， $ds$ 和 $ds_0$ 分别为沿端口*i*和*j*的积分.由式(1)可求出块1的阻抗矩阵，类似地，可求出块2和3的阻抗矩阵.先合并块1和块2.将各块的所有端口分为外部端口和与其它块相连处的连接端口，在相邻两块的相连处，将所有端口等分为两组，分别对应于两个分块的端口.利用连接处各端口的电压相等、电流异号的互连条件得出块1、2合并后的阻抗矩阵<sup>[8]</sup>.将其与块3进一步合并，便得到块1、2、3合并后的一维阻抗矩阵的元素 $Z_r$ .当微带馈线长 $l = g/4$ ，则单端口的串行角馈方形微带天线的输入阻抗为：

$$Z_{in} = Z_0^2 / Z_r(2)$$

其中 $Z_0$ 为微带线的特性阻抗.

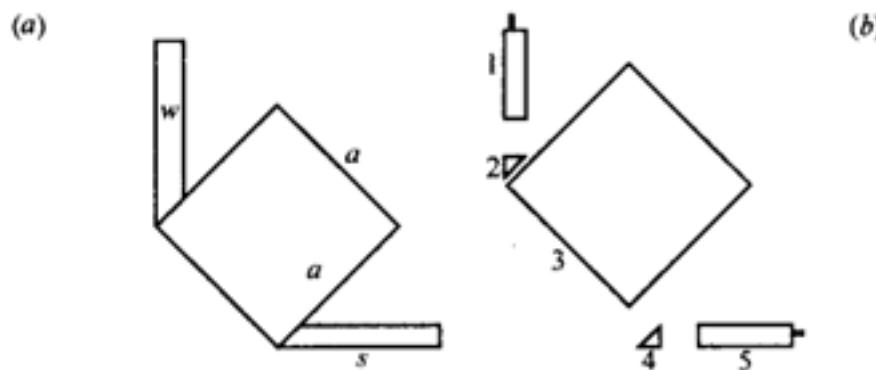


图2 双极化天线单元

## 2. 双端口的串行角馈天线单元

我们采用双端口的串行角馈方形贴片作为双极化天线阵列的单元，如图2(a)所示.设块1和块5的两个输出端口分别为端口e和f.根据分片法，将天线单元分解为5块，即块1、2、3、4和5，如图2(b)所示.类似于前面的分析，结合多端口网络模型和腔模理论，将每块均用各端口的阻抗矩阵描述.利用各块间端口处的电压相等、电流异号的互连条件依次将其两两合并，最后得出块1、2、3、4和5合并后的阻抗矩阵为：

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{ee} & Z_{ef} \\ Z_{fe} & Z_{ff} \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 三、双极化天线阵列的分析

本文提出的高隔离度的双极化微带天线阵列示于图3(a).为分析这样的阵列，利用多端口网络模型理论，首先将它分解为三块：块1，块2和块3，分别如图(b),(c),(d)所示.块1由所有离散的天线单元组成，块2和块3分别为两种极化的馈线网络.令块1的各端口分别为3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10，块2的各端口分别为11, 12, 13, 14，块3的各端口分别为15, 16, 17, 18.

的各端口分别为15, 16, 17, 18.

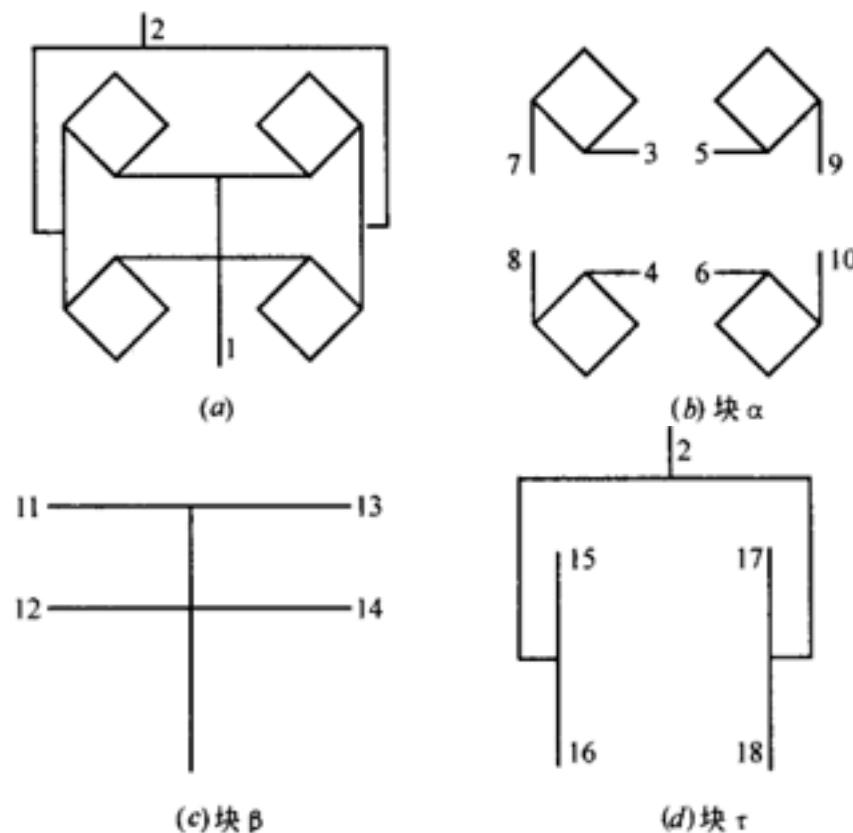


图3 双极化的微带天线阵原理和分析示意图

块  $\alpha$  的阻抗矩阵可由前面理论求出, 各端口的电压矩阵和电流矩阵关系为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_{7-10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1}^{\alpha+\beta} & Z_{1,7-10}^{\alpha+\beta} \\ Z_{7-10,1}^{\alpha+\beta} & Z_{7-10,7-10}^{\alpha+\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{7-10} \end{bmatrix} \quad (4)$$

同理由分片法得到块  $\beta$  和块  $\tau$  的阻抗矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_{11-14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{1,p3} \\ Z_{p3,1} & Z_{p3,p3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{11-14} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_{15-18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{22} & Z_{2,p4} \\ Z_{p4,2} & Z_{p4,p4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_{15-18} \end{bmatrix} \quad (5)$$

先合并块  $\beta$  和块  $\tau$ , 推导得合并后的阻抗矩阵为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_{7-10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1}^{a+\beta} & Z_{1,7-10}^{a+\beta} \\ Z_{7-10,1}^{a+\beta} & Z_{7-10,7-10}^{a+\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{7-10} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 [Z_{1,1}^{a+\beta}] &= [Z_{1,1}] - [Z_{1,p3}][Z_{p1,p1} + Z_{p3,p3}]^{-1}[Z_{p3,1}] \\
 [Z_{1,7-10}^{a+\beta}] &= [Z_{1,p3}][Z_{p1,p1} + Z_{p3,p3}]^{-1}[Z_{p1,p2}] \\
 [Z_{7-10,1}^{a+\beta}] &= [Z_{p2,p1}][Z_{p1,p1} + Z_{p3,p3}]^{-1}[Z_{p3,1}] \\
 [Z_{7-10,7-10}^{a+\beta}] &= [Z_{p2,p2}] - [Z_{p2,p1}][Z_{p1,p1} + Z_{p3,p3}]^{-1}[Z_{p1,p2}]
 \end{aligned} \quad (6)$$

再与块 合并，最后导出整个双极化天线阵的双端口阻抗矩阵为：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{\text{array}} & Z_{12}^{\text{array}} \\ Z_{21}^{\text{array}} & Z_{22}^{\text{array}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 [Z_{1,1}^{\text{array}}] &= [Z_{1,1}^{a+\beta}] - [Z_{1,7-10}^{a+\beta}][Z_{7-10,7-10}^{a+\beta} + Z_{p4,p4}]^{-1}[Z_{7-10,1}^{a+\beta}] \\
 [Z_{12}^{\text{array}}] &= [Z_{1,7-10}^{a+\beta}][Z_{7-10,7-10}^{a+\beta} + Z_{p4,p4}]^{-1}[Z_{p4,2}] \\
 [Z_{21}^{\text{array}}] &= [Z_{2,p4}][Z_{7-10,7-10}^{a+\beta} + Z_{p4,p4}]^{-1}[Z_{7-10,1}^{a+\beta}] \\
 [Z_{22}^{\text{array}}] &= [Z_{22}] - [Z_{2,p4}][Z_{7-10,7-10}^{a+\beta} + Z_{p4,p4}]^{-1}[Z_{p4,2}]
 \end{aligned} \quad (7)$$

利用与散射参数矩阵的转换关系，得到隔离度 $S_{21}$ 的闭合表达式为：

$$S_{21} = \frac{2Z_{21}^{\text{array}}Z_0}{(Z_{11}^{\text{array}} + Z_0)(Z_{22}^{\text{array}} + Z_0) - Z_{21}^{\text{array}}Z_{12}^{\text{array}}} \quad (8)$$

#### 四、实验结果

我们首先制作了多个单端口和双端口的串行角馈天线单元，并进行了S参数的测量，测量结果验证了本文理论计算的正确性，限于篇幅这里不一一给出。实际制作的双极化微带天线阵见图4。该天线阵工作于6GHz频段，设计参数为： $a=15.0\text{mm}$ ， $d=0.8\text{mm}$ ， $w=0.4\text{mm}$ ， $\rho=2.8$ 。在HP-8510B网络分析仪上对其进行了测量，图5(a)为两个极化端口的驻波比测量结果。可见实验结果与理论设计较符合，基本上可以满足工程设计要求。图5(b)为双极化端口的隔离度测量结果，其值达-41.4dB。在谐振频率上隔离度的理论计算值为-45dB。产生偏差的主要原因是实际天线阵的加工误差和 $\rho$ 值的误差、微带和同轴接头间的不连续性等以及计算中理论模型的近似性。

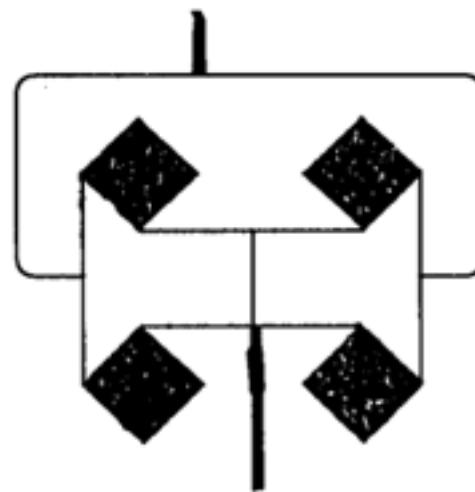
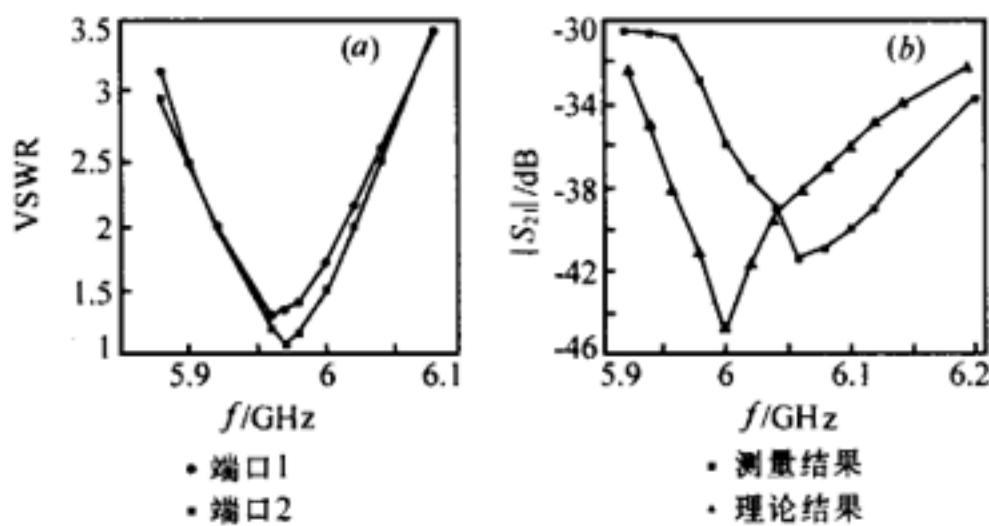


图4 双极化微带天线阵的实物图

图5 理论与实验测量结果(a)极化端口1、2的驻波比测量结果  
(b)双极化端口的隔离度测量结果

## 五、结束语

本文给出了一种高隔离度的双极化微带天线阵列的理论分析与设计实例.提出采用双端口的串行角馈方形贴片来实现微带天线的双极化，并设计出一种新的双极化馈线网络.综合多端口网络模型、腔模理论和分片法，给出了单端口、双端口串行角馈天线单元和双极化天线阵列的理论分析.本方法克服了传统的多端口网络模型和腔模理论的缺陷，且计算简便，适合于工程应用.实际制做了一副6GHz频段的四元天线阵，测试结果表明其双极化的隔离度达-41dB，比通常所能达到的-20dB隔离度有较大提高.该阵列的馈线网络较小，采用了最简单的单层共面结构，以此四元阵为模块，很容易形成 $4 \times 4$ 的16元阵或更大规模的高隔离度的双极化微带天线阵.如与有源微波电路相结合，则可进一步实现整个天线阵列的极化捷变.这些工作都正在进行之中，将另文报导.

\*国家自然科学基金和电子部14所天线与微波技术国防科技重点实验室资助课题  
作者简介：

高式昌 1972年生，分别于1993年和1995年获得理学学士和工学硕士学位.1993年至1996年在中国电波传播研究所通信系统工程研究室从事移动通信电波传播和通信系统设计等研究工作，现为上海大学通信工程系博士生，曾获上海市创造发明奖、震旦奖和SBT奖学金.研究方向为有源微带天线阵列和电磁场数值计算方法.

钟顺时 上海大学通信与信息学院教授，博士生导师，中国电子学会会士，IEEE高级会员.1960年西安军事电信工程学院毕业，1980～1982年美国华盛顿大学和伊利诺伊大学访问学者.长期从事电磁场与微波技术专业的教学与科研.曾获国家和省部级科技进步奖7项，省部级优秀教材奖2项，专利2项，著译4部，论文100余篇.

作者单位：(上海大学通信工程系，上海 201800)

## 参 考 文 献

- 1 J.R James,P.S Hall,C Wood.Microstrip antenna theory and design.Peter Peregrinus,1981:166 ~ 167
- 2 L.J du Tolt and J.H.Closte.Dual polarized linear microstrip patch array.IEEE AP-S Int.Sym.Dig.,June 1987:810 ~ 813
- 3 钟顺时.微带天线理论与应用.西安电子科技大学出版社，1991
- 4 刘俊.极化捷变有源微带天线研究.硕士论文，上海大学通信工程系，1998
- 5 P.M.Haskins,J.S.Dahere.Four-element varactor diode loaded polarization-agile microstrip antenna array.Electron.Lett.,July 1997,33(14):1186 ~ 1187
- 6 Y.Murakami,et al.Slot-coupled self-duplexing array antenna for mobile satellite communications.IEE Proc.Part H, April 1996,143(2):119 ~ 123
- 7 K.C.Gupta,R.Gerg and R.Chadha.Computer-aided design of microwave circuits.Artech House,1981
- 8 K.C.Gupta.Multiport network modeling approach for computer-aided design of microstrip patches and arrays.IEEE AP-S Int.Sym.Dig.,June 1987:786 ~ 789

1998年2月收到,1998年8月修改定稿.

## 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>