

文章编号: 1673-5196(2011)05-0092-04

# 多层电路结构微带天线的波概念迭代法分析

姬五胜<sup>1,2</sup>, 杨帆<sup>2</sup>, 罗全珍<sup>2</sup>, 张玉<sup>2</sup>, 张妍<sup>1</sup>

(1. 兰州城市学院 电子信息科学与技术研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 利用波概念迭代法结合传输线理论分析一种三层电路结构的超宽带微带贴片天线, 通过与典型电磁场数值算法的计算复杂度对比, 验证波概念迭代法在分析多层电路时计算效率高、计算速度快的优点; 利用其计算该天线的回波损耗、方向图和增益等参数, 通过与 HFSS 仿真结果对比, 证明该方法在分析多层电路的正确性和有效性。

**关键词:** 波概念迭代法; 传输线理论; 多层电路结构; 超宽带微带贴片天线

**中图分类号:** TN82 **文献标识码:** A

## Analysis of multilayer microstrip antenna by wave concept iterative procedure

Ji Wu-sheng<sup>1, 2</sup>, Yang Fan<sup>2</sup>, Luo Quan-zhen<sup>2</sup>, Zhang Yu<sup>2</sup>, Zhang Yan<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronic Information Science and Technology, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Computer and Communication, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** By using wave concept iterative procedure (WCIP) combined with transmission lines theory analysis a three-layer ultra-wideband patch antenna was analyzed. By comparing its complexity of numeric calculation with that of classic EM field numerical algorithm, it was verified that the WCIP calculation exhibited high efficiency and speed of computation for the analysis of the multilayer circuit. Meantime, the circuit characteristic parameters of the antenna such as return-wave loss, radiation pattern and gain were calculated by using this method. It was proved by comparison with the HFSS simulation data that this method was valid in analysis of multilayer circuit.

**Key words:** wave concept iterative procedure; transmission line theory; multilayer circuit; architecture ultra-wideband microstrip patch antenna

目前常用的电磁场数值分析方法, 例如时域有限差分法、矩量法和有限元法等, 都存在着建模复杂, 对内存要求高, 计算量大等缺点, 并不适合分析微波多层电路, 例如超宽带微带天线<sup>[1-2]</sup>这样的复杂结构。因此, 寻找一种原理简洁、计算复杂度低的电磁场数值分析方法来分析微波多层电路结构就显得尤为重要。

波概念迭代法以波的形式来表述不连续电路表面的边界条件, 能够适应各种复杂的电路结构<sup>[3]</sup>; 同时, 它运用迭代方法进行运算, 避免了大矩阵的求逆运算和格林函数的选取, 相对于其他电磁场数值算法, 具有较高的计算效率<sup>[4-5]</sup>。作为一种有效的电磁场分析方法, 波概念迭代法已经广泛地应用在分析

单层平面电路中<sup>[6-9]</sup>, 而如何把这一方法运用到多层结构电路的研究中将具有更为重要的意义。

在本文中, 波概念迭代法将结合传输线理论<sup>[10]</sup>来分析基于三层电路结构的超宽带微带天线。其中, 传输线理论主要是分析多层结构中层与层之间波的关系, 简化多层电路的分析过程。通过对比计算复杂度, 表明了该方法相对于经典的数值分析方法在分析多层电路结构时具有较高的计算效率; 同时, 该方法能方便地计算出天线的回波损耗、方向图和增益等参数, 数值结果说明了这一方法分析微波多层电路的高效性和正确性。

## 1 波概念迭代法的基本原理

波概念迭代法首先通过波与电路表面切向场之间的关系, 以波的形式来表述电路上、下表面的边界条件, 而后分别在空域和谱域来建立入射波和散射

收稿日期: 2010-12-07

基金项目: 甘肃省高校研究生导师科研计划项目(0811-05)

作者简介: 姬五胜(1968-), 男, 甘肃秦安人, 博士, 教授。

波的关系(如图1所示). 波概念的定义为

$$\begin{aligned} A_i &= (1/(2\sqrt{Z_{0i}}))(E_i + Z_{0i}J_i) \\ B_i &= (1/(2\sqrt{Z_{0i}}))(E_i - Z_{0i}J_i) \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $A_i$  是电路交界面的入射波,  $B_i$  是散射波,  $Z_{0i}$  是介质  $i$  ( $i=1,2$ ) 的特征阻抗,  $Z_{0i} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0\epsilon_i}$ .

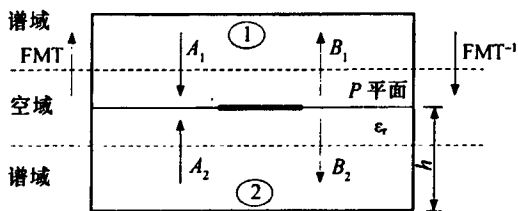


图1 波概念迭代法的定义

Fig. 1 Definition of wave concept iterative procedure

在空域中,不连续电路表面被划分为若干网格,这些网格根据所表示的金属区域(M),介质区域(D)和源区域(S)的不同将电路表面划分为3个子区域. 电路不连续面被看成一个二端口网络,空域中的入射波和散射波的关系可通过这一网络的散射矩阵来建立:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}' & S_{12}' \\ S_{21}' & S_{22}' \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S_{11}' = -H_M + \frac{1-N^2}{1+N^2}H_D + \frac{-1+n_1-n_2}{1+n_1+n_2}H_S$$

$$S_{12}' = \frac{2N}{1+N^2}H_D + \frac{2m}{1+n_1+n_2}H_S$$

$$S_{21}' = \frac{2N}{1+N^2}H_D + \frac{2m}{1+n_1+n_2}H_S$$

$$S_{22}' = -H_M + \frac{N^2-1}{1+N^2}H_D + \frac{-1-n_1+n_2}{1+n_1+n_2}H_S$$

其中:

$$N = \sqrt{Z_{01}/Z_{02}} \quad n_1 = Z_0/Z_{01}$$

$$n_2 = Z_0/Z_{02} \quad m = Z_0/\sqrt{Z_{01}Z_{02}}$$

$$H_i = \begin{cases} 1, & \text{在 } i \text{ 区域内} \\ 0, & \text{在其他区域} \end{cases} \quad (i = \text{金属, 介质, 源})$$

因此,入射波和散射波之间的关系为

$$B = SA \quad (3)$$

在谱域中,散射波会被金属盒上下表面反射,变为电路表面的入射波. 金属壁的谱域反射系数为

$$\Gamma_i^a = \frac{1 - Z_{0i}Y_{m,i}^a \coth(\Upsilon_{m,i}h_i)}{1 + Z_{0i}Y_{m,i}^a \coth(\Upsilon_{m,i}h_i)} \quad (4)$$

因此,谱域中散射波与入射波之间的关系为

$$A_i^a = \Gamma_i^a B_i^a \quad (5)$$

为了降低计算的复杂度,实现波在空域和谱域间的转化,引入一种结合傅里叶变换和模式变换的快速傅里叶模式变换对(FMT&IFMT). 散射波从

空域到谱域的变换可表述为

$$\begin{bmatrix} B_{mn}^{TE} \\ B_{mn}^{TM} \end{bmatrix} = K_{mn} \begin{bmatrix} -n/b & m/a \\ m/a & n/b \end{bmatrix} \text{FFT} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

经过金属壁反射得到的入射波从谱域到空域的变换可表述为

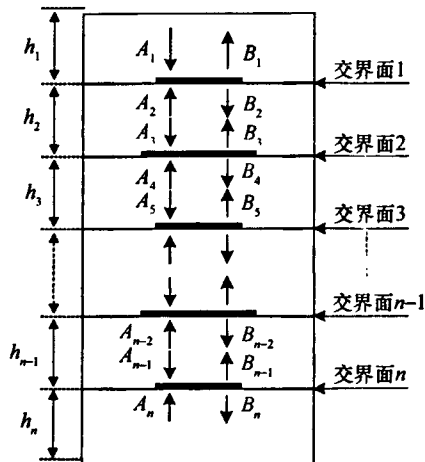
$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \text{IFFT} \left\{ \left[ K_{mn} \begin{bmatrix} -n/b & m/a \\ m/a & n/b \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} A_{mn}^{TE} \\ A_{mn}^{TM} \end{bmatrix} \right\} \quad (7)$$

$$K_{mn} = \sqrt{\frac{ab}{2\sigma_{mn}}} \frac{1}{\sqrt{[m/a]^2 + [n/b]^2}}$$

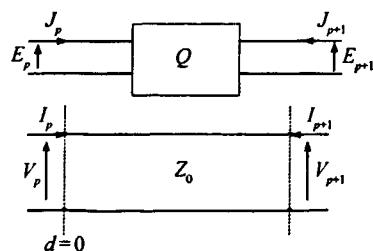
$$\sigma_{mn} = \begin{cases} 2 & \text{if } mn \neq 0 \\ 1 & \text{if } mn = 0 \end{cases}$$

## 2 对多层电路的分析

为了扩大 WCIP 的应用范围,利用其对多层结构的微波电路进行分析,微波多层电路结构如图2所示. 在多层电路中,WCIP 的分析重点是如何建立层与层之间谱域波的关系. 而传输线理论很适合用来表述谱域中两种波的关系.



(a) 微波多层电路结构



(b) 等效传输线模型

图2 微波多层电路结构及其等效传输线模型

Fig. 2 Microwave multilayer circuit architecture and its equivalent transmission line model

在多层结构的层与层之间( $2 \leq p < n-1$ ), 谱域波( $A_p^{TE, TM}, B_p^{TE, TM}$ )与( $A_{p+1}^{TE, TM}, B_{p+1}^{TE, TM}$ )之间的关系, 可用传输线模型来建立.

根据传输线理论,传输线上任意一点的电压、电流由如下公式得到:

$$V(x) = V_{in}e^{-\gamma d} + V_{re}e^{\gamma d} \quad (8)$$

$$I(x) = I_{in}e^{-\gamma d} + I_{re}e^{\gamma d} \quad (9)$$

式中:  $\gamma$  为传输常数,  $d$  为线长。

利用传输线的终端条件和始端条件,可以建立如下关系:

$$\begin{bmatrix} V_p \\ I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch } \gamma d & Z_0 \text{sh } \gamma d \\ \frac{\text{sh } \gamma d}{Z_0} & \text{ch } \gamma d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{p+1} \\ I_{p+1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可得到传输散射矩阵  $T$ :

$$T = \begin{bmatrix} \text{ch } \gamma d - T_1 \text{sh } \gamma d & T_2 \text{sh } \gamma d \\ -T_2 \text{sh } \gamma d & \text{ch } \gamma d + T_1 \text{sh } \gamma d \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中: } T_1 = \frac{Z_p Z_{p+1} + Z_0^2}{2Z_0 \sqrt{Z_p Z_{p+1}}}, T_2 = \frac{Z_p Z_{p+1} - Z_0^2}{2Z_0 \sqrt{Z_p Z_{p+1}}}.$$

谱域波( $A_p^{\text{TE, TM}}, B_p^{\text{TE, TM}}$ )和( $A_{p+1}^{\text{TE, TM}}, B_{p+1}^{\text{TE, TM}}$ )的关系可由传输散射矩阵来建立:

$$\begin{bmatrix} b_p \\ a_p \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a_{p+1} \\ b_{p+1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

波概念迭代法对多层电路分析流程图如图 3 所示。

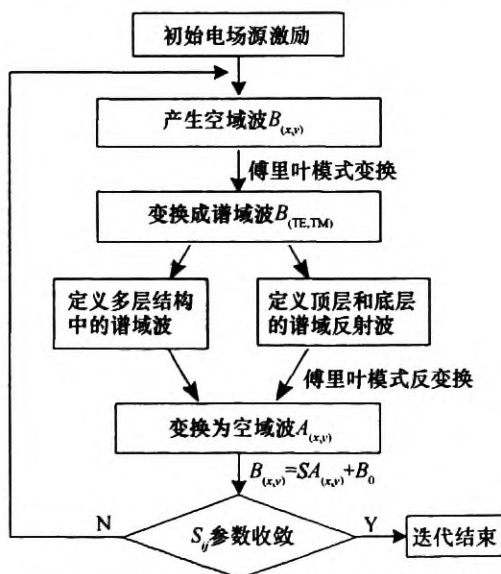


图 3 微波多层电路波概念迭代法分析流程

Fig. 3 Analysis flow of wave concept iterative procedure for microwave multilayer circuit

经过  $i$  步迭代后,即能根据 WCIP 的定义式(1)得到  $E_i$  和  $J_i$  的递归值:

$$E_i = \sqrt{Z_{0i}} (A_i + B_i) \quad (13)$$

$$J_i = (1/\sqrt{Z_{0i}}) (A_i - B_i)$$

根据式(13)可确定导纳参数:

$$Y_{ij} = \frac{J_i}{E_j} \Big|_{E_k=0, k \neq j} \quad (14)$$

进而求得电路的各种参数。

### 3 模型分析

利用波概念迭代法分析如图 4 所示的三层超宽带微带贴片天线。天线采用同轴线底馈方式,为了增加带宽,天线激励层添加了 2 个寄生贴片,并且采用三层电路结构,其具体结构参数为:  $a=50 \text{ mm}$ ,  $b=20 \text{ mm}$ ,  $h_1=4 \text{ mm}$ ,  $h_2=5 \text{ mm}$ ,  $h_3=1.2 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r=2.2$ 。

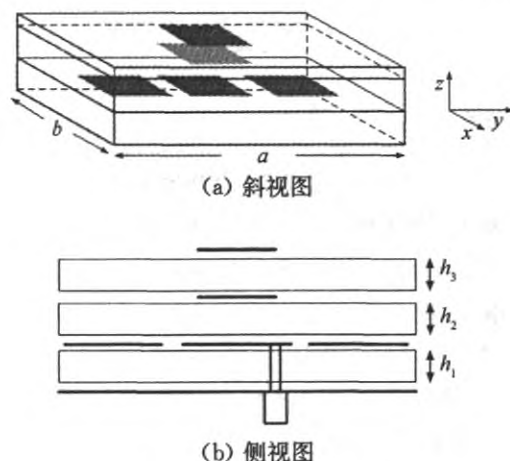


图 4 三层微带天线

Fig. 4 Three-layer microstrip antenna

利用波概念迭代法对这一电路模型进行仿真,首先将三层电路表面分别分成  $50 \times 20$  的网格;而后对电路参数的收敛性进行估算,对  $3.5 \text{ GHz}$  时天线  $S_{11}$  的收敛情况如图 5 所示。从图 5 可以看出,  $S_{11}$  的值经过 100 次迭代后即能收敛,得到较好的递归值。

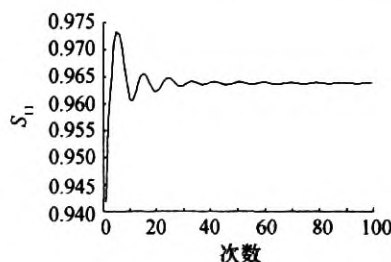


图 5  $3.5 \text{ GHz}$  时天线  $S_{11}$  的收敛情况

Fig. 5  $S_{11}$  convergence of antenna with  $3.5 \text{ GHz}$

根据该电路金属区域所占比例为 27%,网格数为 3 000,迭代次数 100,对比波概念迭代法与矩量法的计算复杂度,结果如图 6 所示。可以看出,波概念迭代法相对于矩量法在分析该电路时具有较高的计算效率。此外,在主频为  $1.73 \text{ GHz}$ 、内存为  $1 \text{ GHz}$  的计算条件下,采用基于波概念迭代法,利用 Matlab 编程对该电路的仿真时间为  $117 \text{ s}$ ,采用基于有限元法的 HFSS 软件对该电路的仿真时间为  $245 \text{ s}$ 。因此,相对于有限元法,波概念迭代法也具有更高的计算速度。

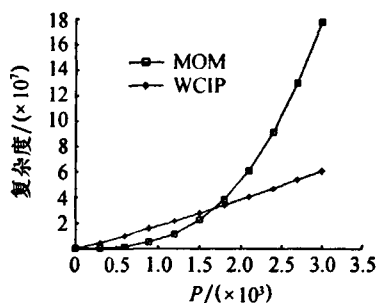


图6 矩量法与波概念迭代法的计算复杂度比较

Fig. 6 Computational complexity comparison between MOM and WCIP

当计算程序计算收敛后,首先得到电路馈电层的横向电场和电流密度分布,进而可得到天线的回波损耗、增益和方向图(见图7~9)。结果显示,三层微带天线在4.0~6.8 GHz频段上的回波损耗小于-10 dB,其频带宽度为2.8 GHz,即带宽为65%,

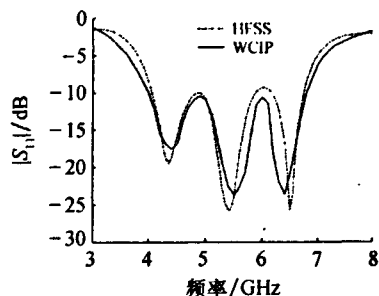


图7 天线的回波损耗

Fig. 7 Return-wave loss of antenna

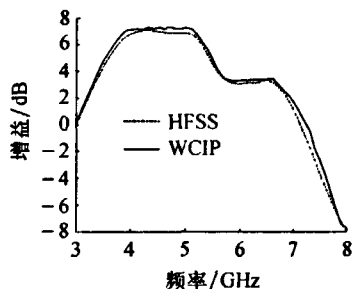


图8 天线的增益图

Fig. 8 Gain plot of antenna

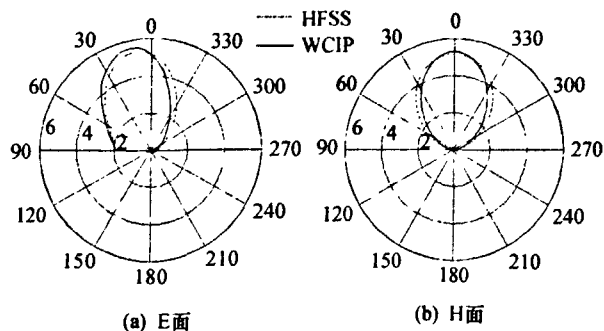


图9 天线方向性的方向图

Fig. 9 Radiation pattern of antenna directivity

在4.3 GHz时,该天线的增益为7.1 dB,符合无线通信系统的超宽带应用要求。同时,与HFSS仿真的结果对比可以看出,两种算法具有良好的一致性。

## 4 结语

本文扩大了WCIP方法的运用范围——利用其分析基于微波多层电路结构的超宽带微带贴片天线。在分析过程中,传输线理论被考虑进来用以建立层与层之间谱域波的关系。通过波概念迭代法与传统数值方法计算复杂度和计算时间的对比,表明波概念迭代法在分析多层电路时,具有较高的计算效率;同时,利用波概念迭代法还能方便地得到超宽带多层天线的回波损耗、方向图、增益等参数,其数值结果与HFSS仿真结果对比具有良好的一致性,表明了波概念迭代法分析微波多层电路的正确性。

## 参考文献:

- [1] GHASSEMI ZN, NESHATI M H, RASHED-MOHASSEL J. Investigation of multilayer probe-fed microstrip antenna for ultra wideband operation [C]//APMC 2007. Bangkok: [s. n.], 2007: 1-4.
- [2] 童芸,张杰,关仲辉.超宽带多层微带贴片天线设计[J].微波学报,2008,24(增刊),109-112.
- [3] HAMDANI, AGUILI A, BOUALLEGUE A, et al. A new technique for the analysis of discontinuities in microwave planar circuits [J]. Electromagnetics Research, 1999, 13(1): 137-151.
- [4] 侯铮铮,谢拥军.波概念迭代法分析共面波导左手传输线[C]//第六届全国毫米波毫米波学术会议.哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006: 29-36.
- [5] MAMI A, ZAIRI H, GHARSALLAH A. Analysis of microwave components and circuits using the iterative method [J]. RF and Microwave CAE, 2004, 14: 404-414.
- [6] MOHAMED G, AMJED H, HASSEN Z, et al. Formulation and validation of iterative method in time domain [C]//ICT-TA'06. Kandahar: [s. n.], 2006: 2135-2139.
- [7] RAVEU N, PIGAGLIO O, PRIGENT G, et al. Improvement in the wave concept iterative procedure through spectral connection [C]//37th European Microwave Conference. Munich: [s. n.], 2007: 28-31.
- [8] TITAOUINE M, RAVEU N, NETO A G, et al. Electromagnetic modeling of quasi-square open metallic ring frequency selective surface using wave concept iterative procedure [J]. ETRI Journal, 2009, 31: 77-79.
- [9] JI Wu-sheng, LUO Quan-zhen, YANG Fan. Analysis of H-shaped patch antenna by wave concept iterative procedure (WCIP) [C]//ICMMT 2010. Chengdu: [s. n.], 2010: 2135-2139.
- [10] 廖承恩.微波技术基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,1994: 205-211.

## 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>