

工程与应用

小型加载短路针微带天线的宽频带特性研究

禹化龙, 李小浩, 王先发

(中国电子科技集团公司第27研究所, 郑州 450015)

摘要: 提出了一种直径较大的加载短路针、低介电常数, 厚介质衬底、同轴探针馈电微带天线。对直径较大的同轴探针抵消因其长度引入的电感的原理进行分析; 从腔模理论出发, 结合叠加原理, 提出一种较为简单的分析直径较大同轴探针馈电的加载短路针天线输入阻抗的方法, 在宽频带内实现阻抗匹配, 达到展宽频带的目的; 并给出加载短路针圆形天线的实例, 用 HFSS 仿真的结果与实测结果进行比较, 证实了该方法的有效性。

关键词: 加载微带天线; 短路针; 输入阻抗; 大带宽; HFSS

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-5692(2008)01-97-04

Research on Broadband Characteristic of Loaded Shorting-pin Microstrip Antenna

YU Hua-long, LI Xiao-hao, WANG Xian-fa

(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: A microstrip antenna is proposed with thick, low permittivity substrate, loaded shorting-pin and larger diameter probe. The principle of larger diameter probe neutralizing inductance caused by longer probe is analyzed. A simple method of analyzing such antenna input impedance is presented through using cavity model and addition theorem. The method can get larger input impedance bandwidth. The experimented and simulated results with Ansoft HFSS are identical, which demonstrates the reliability and validity of the method.

Key words: loaded microstrip antenna; shorting-pin; input impedance; large bandwidth; HFSS

0 引言

近年来发展了许多展宽微带天线带宽的方法, 在同轴探针馈电微带天线中, 采用低介电常数厚基片的方法展宽天线带宽。随着基片厚度的增大, 同轴探针的长度增加易使天线的输入阻抗呈感性, 而使失配程度增大, 因此限制了天线带宽的展宽^[1]。本文中提出的微带天线, 采用直径较大的加载短路针, 低介电常数, 厚介质衬底。一方面, 直径较大的加载短路针可以抵消因同轴探针的长度引入的电感, 同时, 加载短路针可以以较小的天线尺寸实现较

低的谐振频率^[2]。另一方面, 采用低介电常数, 厚介质衬底, 降低了天线的 Q 值, 展宽了天线的带宽。目前, 国内外对加载短路针微带天线开展了一些研究^[3~5], 也仅限于某一些类型, 如直径较小的加载短路针, 而对于直径较大的加载短路针天线研究不多。本文首先对直径较大的加载短路针抵消因同轴探针的长度引入的电感的原理进行分析; 然后从腔模理论出发, 结合叠加原理, 提出一种较为简单的分析直径较大的加载短路针天线输入阻抗的方法, 在宽频带内实现阻抗匹配, 达到展宽频带的目的; 最后给出加载短路针圆形天线的实例, 并将本文方法得到的结果和有限元法软件 HFSS 仿真的结果及实测的结

果进行比较,证实了本文方法的有效性。

1 同轴馈电天线馈电端的输入阻抗

图1为同轴线至平行平板馈电体系示意图, d 是探针直径, h 是介质厚度。

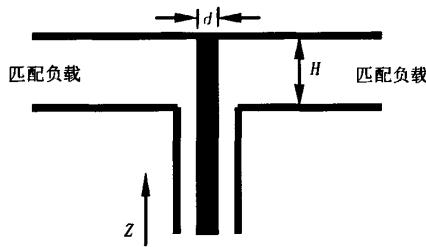


图1 同轴线至平行平板的馈电体系

当 $h \ll \lambda$ 时, 同轴线输入阻抗^[6]为

$$Z \approx \frac{\eta}{4} kh \left(1 - j \frac{2}{\pi} \log \gamma kd \right) \quad (1)$$

式中, $\gamma = 1.781$, $k = 2\pi/\lambda = \omega / \sqrt{\mu\epsilon}$, $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ 。

将式(1)写为 $Z = R + jX$ 形式, 则

$$X = -\frac{\eta}{4} kh \frac{2}{\pi} \log \gamma kd \quad (2)$$

当 $\gamma kd < 1$ 时, 同轴线输入阻抗呈电感性, 当 $\gamma kd > 1$ 时, 同轴线输入阻抗呈电容性。通常情况下, $d \rightarrow 0$, 呈电感性。若 d 取值较大时, 可以使同轴线输入阻抗电感性减小或呈电容性。由此可见, 适当增加同轴线内导体直径, 可以抵消因同轴探针的长度引入的电感, 有利于同轴线输入端阻抗匹配。

2 腔模法^[1]简介

图2所示为加载短路针圆形天线示意图。

2.1 加载短路针天线的腔模展开

圆形微带天线的辐射单元可看作是一个四周为磁壁、上下为电壁的谐振空腔。若微带天线介质衬底厚度远小于工作波长, 电磁场沿厚度方向近似不变, 则电场只有 z 向分量, 磁场只有横向分量, 也即腔内为 TM_z 模。该腔体内的电磁场可由 Helmholtz 方程表示为

$$E_z = \sum_{m,n} B_{m,n} J_n(k_{mn}\rho) \cos(n\varphi) \quad (3)$$

式中, $B_{m,n}$ 是模展开系数; $J_n(k_{mn}\rho)$ 一阶贝塞尔函数;

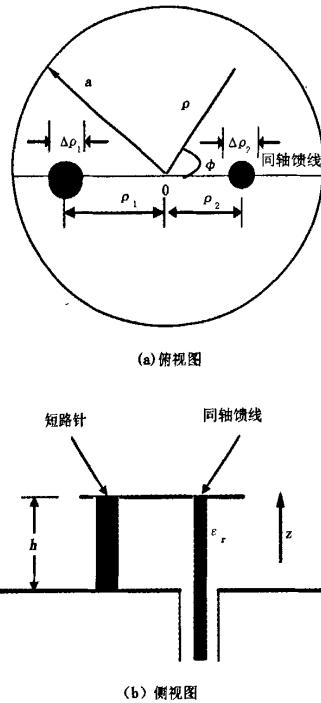


图2 加载短路针圆形天线示意图

ρ 和 φ 如图2(a)所示; (ρ_1, φ_1) 和 (ρ_2, φ_2) 分别是短路针和同轴馈线的中心位置; $\Delta\rho_1$ 和 $\Delta\rho_2$ 分别是短路针和同轴馈线的直径。

工作于 TM_{11} 模的圆形微带天线, 内场可简化为

$$E_z = B_{11} J_1(k_{11}\rho) \cos \varphi \quad (4)$$

微带天线的输入阻抗可表示为

$$Z_{in} = \sum_{m,n} \frac{j\omega\mu}{k^2 - k_{mn}^2} \frac{\langle J_z \psi_{mn}^* \rangle}{\langle \psi_{m,n} \psi_{mn}^* \rangle} \int_s J_z ds \quad (5)$$

其中 J_z 是馈电探针上 z 向电流密度, $\psi_{m,n}$ 圆形贴片天线的本征函数, $\langle \psi_{m,n} \psi_{mn}^* \rangle = \int_s \psi_{m,n} \psi_{mn}^* ds$ 。

2.2 加载短路针圆形天线的腔模展开

考虑如图2所示同轴馈电微带天线, 由于采用的馈线和短路针直径较大, 不能简单将馈线和短路针等效为均匀分布的电流片, 由于圆形天线的对称性, 利用等效方法, 将直径较大的馈线和短路针进行简化, 在 xoy 截面上分别为 $\frac{\phi_1 \pm \Delta\phi_1}{2}$ 和 $\frac{\phi_2 \pm \Delta\phi_2}{2}$, 如图3所示。

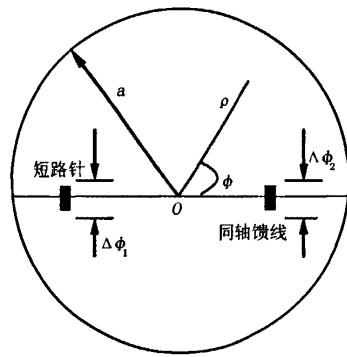


图3 直径较大的馈线和短路针的圆形天线的电流简化模型

其上电流密度分别为

$$J_{1,2} = \begin{cases} 2\left(|\phi| + \sqrt{\frac{\Delta\phi_{1,2}^2}{4 - \phi^2}}\right)J_0 & -\frac{\Delta\phi_{1,2}}{2} < \phi < \frac{\Delta\phi_{1,2}}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $J_0 \approx \cos k(h-z)$, $0 \leq z \leq h$ 。

利用腔模法,该天线的腔内部的场满足

$$\nabla^2 E_z + k^2 E_z = j\omega\mu(J_1 + J_2) \quad (7)$$

由叠加原理将(7)分成两个方程:

$$\nabla^2 E_{z1} + k^2 E_{z1} = j\omega\mu J_1 \quad (8)$$

$$\nabla^2 E_{z2} + k^2 E_{z2} = j\omega\mu J_2 \quad (9)$$

得到同轴馈线和短路针单独存在时的电场分量

$$E_{z1} = \sum_{m,n}^\infty A_{mn,1} \psi_{mn} \quad (10)$$

$$E_{z2} = \sum_{m,n}^\infty A_{mn,2} \psi_{mn} \quad (11)$$

$$A_{mn,1} = \frac{j\omega\mu J_1}{k^2 - k_{mn}^2} \psi_{mn,1} G_{mn,1} \quad (12)$$

$$A_{mn,2} = \frac{j\omega\mu J_2}{k^2 - k_{mn}^2} \psi_{mn,2} G_{mn,2} \quad (13)$$

式中, $\psi_{mn,i} = \psi_{mn}(\rho_i, \varphi_i)$, $G_{mn,i} = G_{mn}(\Delta\rho_i, \Delta\varphi_i) = \frac{J_1(k_{11}\rho_i)J_i}{\pi a^2 J_1(k_{11}a)}$, $i = 1, 2$ 。

同轴馈线和短路针同时存在时的总场为

$$E_{z_{total}} = \sum_{m,n}^\infty \frac{j\omega\mu J_1}{k^2 - k_{mn}^2} \left(\psi_{mn,1} G_{mn,1} + \frac{I_2}{I_1} \psi_{mn,2} G_{mn,2} \right) \psi_{mn} \quad (14)$$

I_1 和 I_2 分别为同轴线与短路针上的电流。根据短路针上的边界条件

$$E_{z_{total}} = 0 \quad (15)$$

得到电流比

$$\frac{I_2}{I_1} = - \frac{\sum_{m,n} \psi_{mn,1} \psi_{mn,2} G_{mn,1} G_{mn,2}}{\sum_{m,n} \frac{\psi_{mn,2}^2 G_{mn,2}^2}{(k^2 - k_{mn}^2)}} \quad (16)$$

2.3 加载短路针圆形天线馈电端口的输入阻抗

将短路针和同轴线间耦合看作为线辐射源间耦合,根据线源阵列输入阻抗定义,可以得到加载短路针后的微带天线阻抗计算公式为^[7]

$$Z_{in} = Z_{11} + \frac{I_2}{I_1} Z_{12} \quad (17)$$

$$\begin{cases} Z_{11,22} = -j\omega\mu h \sum_{m,n} \frac{\psi_{mn,12}^2 G_{mn,12}^2}{(k^2 - k_{mn}^2)} \\ Z_{12,21} = -j\omega\mu h \sum_{m,n} \frac{\psi_{mn,1} \psi_{mn,2} G_{mn,1} G_{mn,2}}{(k^2 - k_{mn}^2)} \end{cases} \quad (18)$$

由边界条件(15),式(17)可进一步写成

$$Z_{in} = Z_{11} - \frac{Z_{21}}{Z_{22}} Z_{12} \quad (19)$$

考虑损耗, $k^2 = k_0^2 \epsilon_r (1 - \delta_{eff})$, 记

$$\frac{1}{k_0 \sqrt{\epsilon_r} (1 - \delta_{eff}) - k_{mn}^2} = \alpha_{mn} + j\beta_{mn} \quad (20)$$

$$\text{其中 } \alpha_{mn} = \frac{k^2 - k_{mn}^2}{(k^2 - k_{mn}^2) + (k^2 \delta_{eff})^2},$$

$$\beta_{mn} = \frac{k^2 \delta_{eff}}{(k^2 - k_{mn}^2) + (k^2 \delta_{eff})^2}.$$

将式(19)写为电阻和电抗形式

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (21)$$

将 Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} , Z_{22} 也写为电阻和电抗形式

$$Z_{pq} = R_{pq} + jX_{pq} \quad p, q = 1, 2 \quad (22)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} R_{pq} = \omega\mu h \sum_{m=0}^\infty \sum_{n=0}^\infty \beta_{mn} \psi_{mn,p} \psi_{mn,q} G_{mn,p} G_{mn,q} \\ X_{pq} = \omega\mu h \sum_{m=0}^\infty \sum_{n=0}^\infty \alpha_{mn} \psi_{mn,p} \psi_{mn,q} G_{mn,p} G_{mn,q} \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{in} = \frac{1}{|Z_{22}|^2} \{ R_{22} [(R_{11} R_{22} - X_{11} X_{22}) - (R_{12}^2 - X_{12}^2)] + \\ \quad X_{22} [(R_{11} X_{22} + X_{11} R_{22}) - 2X_{12} R_{12}] \} \\ X_{in} = \frac{1}{|Z_{22}|^2} \{ R_{22} [(R_{11} R_{22} + X_{11} R_{22}) - 2X_{12} R_{12}] + \\ \quad X_{22} [(R_{11} R_{22} - X_{11} X_{22}) - (R_{12}^2 - X_{12}^2)] \} \end{cases}$$

至此已经导出加载短路针圆形天线的输入阻抗表达式,各个参数的计算需要考虑到天线的介质

损耗、导体损耗及辐射损耗等参数。同轴内导体和短路针之间耦合后的微带天线等效电路,如图4所示。

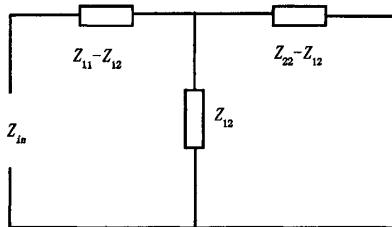


图4 加载短路针圆形天线的等效电路

其输入阻抗可表示如下

$$Z_m = Z_{11} - Z_{12} + \frac{Z_{12}(Z_{22} - Z_{12})}{Z_{12} + (Z_{22} - Z_{12})} \quad (23)$$

通过以上分析,明确了影响加载短路针圆形天线馈电端口的输入阻抗的因素。实现馈电端口的输入阻抗的宽频带匹配,也就达到展宽频带的目的。

3 实验研究

考虑一个同轴探针馈电、加载短路针圆形微带天线,辐射体半径 $a = 14.5$ mm,介质衬底采用空气,厚度 $h = 11$ mm,同轴探针和加载短路针直径 $r = 2.5$ mm。图5给出了用Ansoft HFSS软件仿真和实测的曲线图,从图中可以看出,在 $1.9 \sim 2.53$ GHz,两者结果十分接近。在驻波不大于2时,相对带宽达25%。图6和图7分别是该天线在2.15 GHz时的E面、H面仿真和实测方向图,从图中可见,一致性很好。

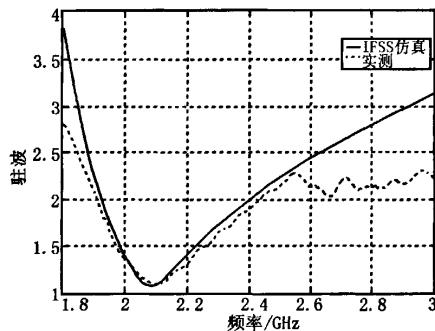


图5 用HFSS软件仿真和实测的比较曲线图

根据文献[1],用传统的微带天线设计方法,工作频率在2.15 GHz,辐射体半径需要40 mm以上,

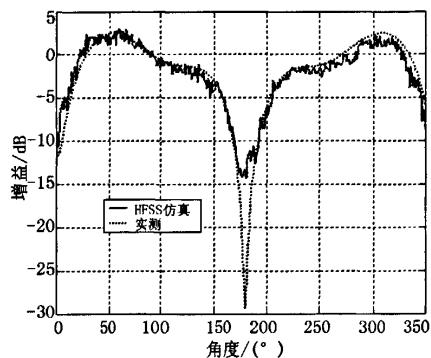


图6 在2.15 GHz时的E面仿真和实测方向图

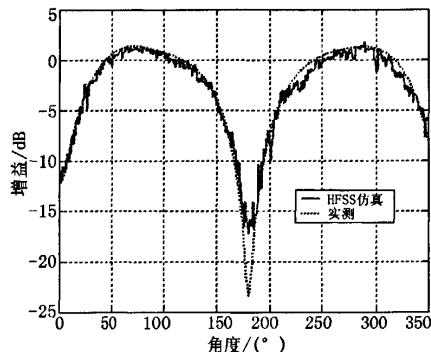


图7 在2.15 GHz时的H面仿真和实测方向图

且带宽不超过4%,而采用加载短路针后,天线辐射体面积仅是传统的15%。可见,这种同轴探针馈电、加载短路针圆形微带天线具有大带宽,尺寸小的特点,适合于对天线尺寸要求较小、带宽要求较宽的场合使用。

4 结语

本文对直径较大的同轴探针抵消因其长度引入的电感的原理进行分析,从腔模理论出发,结合叠加原理,提出一种较为简单的分析直径较大同轴探针馈电的加载短路针天线输入阻抗的方法,在宽频带内实现阻抗匹配,达到展宽频带的目的;并给出加载短路针圆形天线的实例,用HFSS仿真的结果与实测结果进行比较,证实了该方法的有效性。这种直径较大的加载短路针,低介电常数,厚介质衬底,同轴探针馈电天线不仅具有大的带宽,而且辐射体与传统的相比,面积减小85%,适合于对安装空间有严格要求的使用场合。

(下转第104页)

条件,以获得最好的抛光镜面。利用上述工艺对晶向 $<100>$, $\Phi 100\text{ mm}$ 的锗片进行抛光,如果采用粘蜡工艺,抛光片的厚度可达到 $175 \pm 15\text{ }\mu\text{m}$,总厚度变化 $\leqslant 5\text{ }\mu\text{m}$,Warp $\leqslant 40\text{ }\mu\text{m}$,且抛光片表面光洁、无划痕、无雾。将上述抛光片采用适当的清洗方法就可达到开盒即用。

参考文献:

- [1] 王吉坤,何蔼平.现代锗冶金[M].北京:冶金工业出版社,2005.
- [2] 张厥宗.硅单晶抛光片的加工技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [3] 雷红.化学机械抛光技术的研究进展[J].上海大学学报,2003,9(6):494-500.
- [4] 谭刚.硅衬底的化学机械抛光工艺研究[J].仪器仪表学报,2005,26(8增刊):103-105.
- [5] 刘玉岭.超大规模集成电路衬底材料性能及加工测试技术工程[M].北京:冶金工业出版社,2002.
- [6] 吴绪礼.锗及其冶金[M].北京:冶金工业出版社,1987.

(上接第100页)

参考文献:

- [1] RAMESH GARG, BHARTIA P, BAHL I, et al. Microstrip Antenna Design Handbook [M]. London: Artech House Inc., 2001.
- [2] SANAD M. Effect of the Shorting Posts on Short Circuit Microstrip Antennas[C]// Proc IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Symp. Seattle, WA, 1994, 6: 794-797.
- [3] WATERHOUSE R B, TARGONSKI S D, KOKOTOFF D M. Imp Roving the Mechanical to Tolerances and Radiation Performance of Shorted Patches[C]// Proc. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Symp. Montreal Canada, 1997: 1 852-1 855.
- [4] 汪霆雷,朱旗,王少永.加载短路钉微带天线的理论分析[J].微波学报,2006,22(3):36-39.
- [5] 刘丹,史小卫,尹应增.一种新型的小型化微带天线的分析与设计[J].火控雷达技术,2003,32(5):34-37.
- [6] HARRINGTON R F. Introduction to Sinusoidal Electric and Magnetic Fields[M]. London: Cambridge University Press, 1950.
- [7] 毛乃宏,俱新德.天线测量手册[M].北京:国防工业出版社,1987.

作者简介



刘春香(1960-),女,天津人,高级工程师,1982年毕业于天津大学电子工程系,获工学学士学位,长期从事半导体材料加工和测试分析研究工作;

杨洪星(1974-),男,天津人,高级工程师,1997年毕业于电子科技大学微电子技术专业,获工学学士学位,主要从事半导体材料的晶体加工研究工作;

吕菲(1968-),女,天津人,高级工程师,1990年7月毕业于天津师范大学化学专业,获理学学士学位,主要从事半导体材料晶体加工研究工作;

赵权(1967-),男,河北昌黎人,高级工程师,1990年7月毕业于沈阳工业大学半导体物理与器件专业,获工学士学位,主要从事半导体材料晶体加工研究工作。

作者简介



禹化龙(1972-),河南新安人,工程师,工学硕士,2006年4月毕业于南京邮电大学电磁场与微波技术专业,主要从事无线通信与射频技术工作;



李小浩(1967-),河南上蔡人,研究员,1988年获成都电讯工程学院电磁场与微波技术专业工学学士学位,1999年获西安电子科技大学天线与微波技术专业工学硕士学位,获国防科学技术三等奖2项,从事天线、微波与数字波束形成技术工作;



王先发(1968-),湖北洪湖人,高级工程师,1990年毕业于华中理工大学电磁场与微波技术专业,获工学学士学位,主要从事微波技术和测控总体技术研究。

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)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)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)，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>