

文章编号：1672-2892(2011)04-0444-05

基于 MEMS 开关的方向图可重构天线的设计

崔奉云，李林翠，张黎，杨春，张文涛*

(中国工程物理研究院 电子工程研究所，四川 绵阳 621900)

摘要：设计了一种波束可重构天线，以实现宽带、宽角方向图可重构设计。该天线由4组具有不同波束指向的天线子阵组成，通过6个RF-MEMS开关控制其波束指向；采用的宽带单元天线，在2.4 GHz~3.4 GHz频率范围内(相对带宽34.5%)，电压驻波比小于2。馈电网络的设计采用小型化宽带阻抗变换器，减小了馈电网络尺寸，并拓展了带宽。仿真结果表明，可重构天线实现了0°,25°,40°和50°的不同波束指向，除部分频点外，4种状态天线的驻波在2.5 GHz~3.25 GHz(相对带宽26%)带宽内驻波比均小于2。

关键词：RF-MEMS开关；可重构天线；微带缝隙天线；宽带阻抗变换

中图分类号：TN820.1⁺²

文献标识码：A

Design of pattern reconfigurable antenna based on MEMS switch

CUI Feng-yun, LI Lin-cui, ZHANG Li, YANG Chun, ZHANG Wen-tao*

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: This paper presents a broadband and wide-angle pattern reconfigurable antenna. The antenna is composed of four different linear arrays, in which the element is designed with different phase shift. The pattern of the whole antenna can be changed by the RF-MEMS switch, which is placed in the feed network. The feed network uses a novel compact broadband impedance transformer, and the microstrip slot antenna acts as an antenna element. The VSWR of the antenna element in a broadband from 2.4 GHz to 3.4 GHz is less than 2. The simulation result demonstrates that the reconfigurable antenna realizes different patterns(0°,25°,40°and 50°) in different RF-MEMS switching states, furthermore, the VSWR of the reconfigurable antenna under each of these four different states is less than 2 from 2.5 GHz to 3.25 GHz except for part frequency points.

Key words: RF-MEMS switch; reconfigurable antenna; microstrip slot antenna; broadband impedance transformation

在雷达、无线通信系统中，信息的出入依赖于天线。随着现代雷达和移动通信的发展，为实现通信、导航、制导等目的，大量天线安装在同一区域的情形越来越多，这对降低系统成本，减轻重量，减小雷达散射截面，实现良好的电磁兼容特性非常不利，可重构天线技术为解决上述难题提供了可靠途径^[1]。可重构天线相当于多个天线共用一个物理口径，特点是同一个天线或阵列通过动态改变其物理结构或尺寸，能够实现多天线的功能。

可重构天线包括频率可重构天线、方向图可重构天线、频率和方向图同时可重构天线以及极化可重构天线。目前国内外对可重构天线开展了大量研究工作^[1-3]，这些设计通过有限的天线单元实现天线的多功能应用，减少了复杂系统中天线的数量。可重构天线在软件无线电、无线电模式识别和多进多出系统中，可用作多功能无线终端的高性能相控阵；可编程控制的可重构天线单元可以提高系统的信噪比并降低误码率。本文设计了一种方向图可重构天线，能够在较宽的频带及角度范围内实现方向图可重构。

收稿日期：2010-08-31；修回日期：2010-12-28

基金项目：中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2008B0403041)

* 通信作者：张文涛 email:pzzwt@163.com

1 可重构天线原理及设计

1.1 设计原理

可重构天线通过控制阵列天线中各单元天线馈电网络的通断或切换安装在天线特定部位的开关, 实现天线波束的不同指向或多频共口径工作。本文设计的方向图可重构天线如图1所示, 同时制作4个具有不同波束指向的四元子阵, 通过控制6个RF-MEMS开关的通断, 实现天线的不同波束指向。当开关1和5接通, 2, 3, 4, 6均断开时, 第1个子阵对外辐射; 当开关2和5接通, 1, 3, 4, 6均断开时, 第2个子阵对外辐射; 当开关3和6接通, 1, 2, 4, 5均断开时, 第3个子阵对外辐射; 当开关4和6接通, 1, 2, 3, 5均断开时, 第4个子阵对外辐射。这种设计的天线尺寸较大, 但减少了MEMS开关的数量, 有利于降低天线成本。

1.2 天线单元的设计

天线单元采用微带缝隙天线^[4], 结构如图2所示, 介质基片为Rogers RT5880, 其厚度为0.5 mm, 相对介电常数为2.2。天线的辐射单元为介质基片背面蚀刻的缝隙结构, 缝隙形状采用H型结构, 可实现天线的小型化和宽带设计。通过特性阻抗为100 Ω的微带馈线对缝隙天线进行耦合馈电, 并合成到50 Ω的传输线以实现宽带匹配。天线具体尺寸如下: $W_1=18$ mm, $W_2=9$ mm, $L_1=54$ mm, $L_2=10$ mm, $S_1=11$ mm, $S_2=9$ mm。

天线单元的电压驻波比仿真结果如图3所

示。由图3可见, 在2.4 GHz~3.4 GHz频率范围内, 天线电压驻波比均小于2, 相对带宽达到34.5%。天线单元在2.8 GHz的辐射方向图仿真结果如图4所示, 天线单元具有较高的增益, 达到9.2 dB。

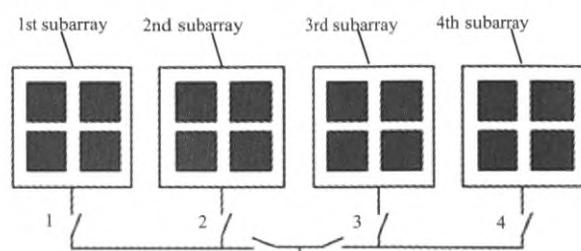


Fig.1 Schematic of pattern-reconfigurable antenna
图1 方向图可重构天线示意图

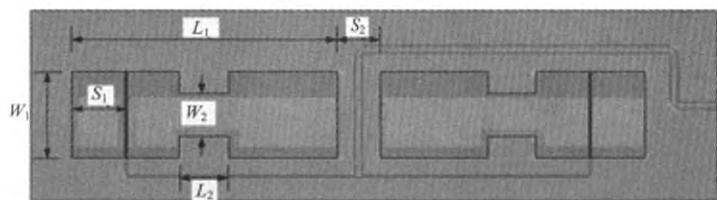


Fig.2 Schematic of element antenna
图2 单元天线结构示意图

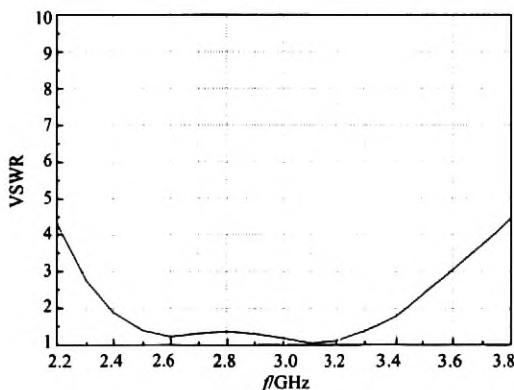


Fig.3 Simulation VSWR of antenna element
图3 单元天线电压驻波比仿真结果

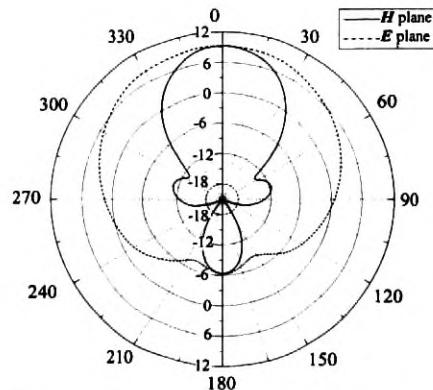


Fig.4 Simulation pattern of antenna element
图4 单元天线方向图仿真结果

1.3 馈电网络的设计

4个天线子阵形成不同波束, 需要使用功分器和移相器, 为实现馈电网络小型化设计, 功分器中采用了宽带阻抗匹配^[5], 它比1/4阻抗变换器具有更小的尺寸, 更宽的带宽。通过长度不同的微带线实现移相功能。各阻抗变换节传输线的长度由式(1)决定。

宽带阻抗匹配方法将传输线特性阻抗从 $Z_L=100\Omega$ 变换到 $Z_0=50\Omega$, 结构如图5所示。其中 Z_0 是输入端(接天线)特性阻抗, 为50 Ω, Z_L 是输出端特性阻抗, 为100 Ω。根据宽带阻抗变换器设计的功分器如图6所示。

$$\begin{cases} l_1 = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \sin(\beta_1)\right) \\ l_2 = \frac{1}{2}[180^\circ - \beta_1] \\ l_3 = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \sin(\beta_3)\right) \\ l_4 = \frac{1}{2}[180^\circ - \beta_3] \end{cases} \quad \begin{cases} \beta_1 = \arccos\left(-\frac{\rho_2}{2\rho_1}\right) \\ \beta_3 = \arccos\left(\frac{\rho_2^2 - 2\rho_1^2}{2\rho_1^2}\right) \\ \rho_1 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_0 - Z_L} \\ \rho_2 = \frac{1}{2} \rho_1 \end{cases} \quad (1)$$

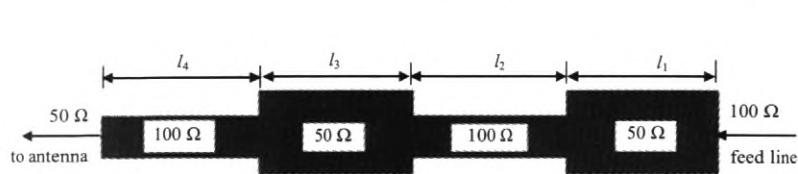


Fig.5 Transmission line transformer
图 5 宽带阻抗变换器

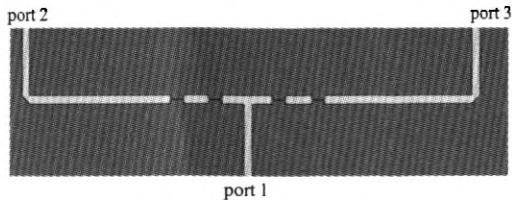


Fig.6 Power divider with transformer
图 6 功分器结构示意图

利用仿真软件HFSS对功分器尺寸进行优化后，得到功分器电性能的仿真结果如图7所示。在2.4 GHz~3.4 GHz频率范围内，各端口的回波损耗均小于-14 dB，插入损耗均小于0.2 dB，见图8。

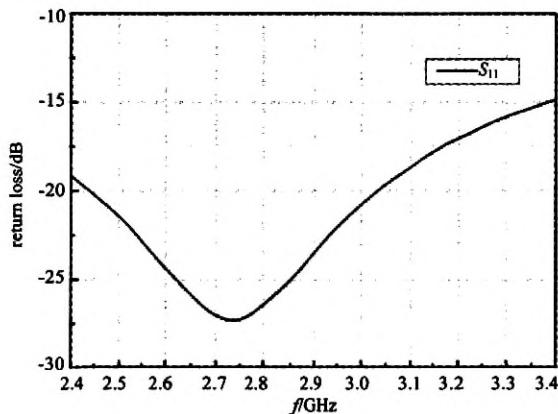


Fig.7 Simulation return loss of power divider
图 7 功分器回波损耗

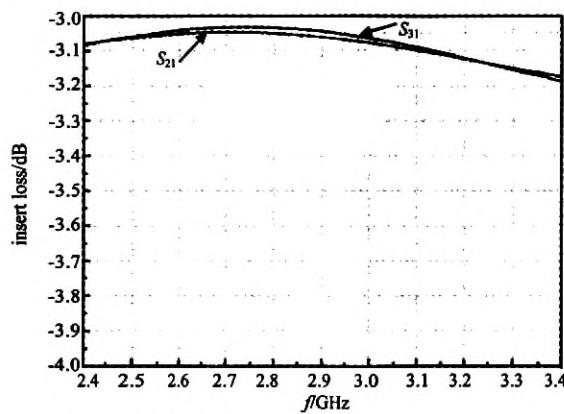


Fig.8 Simulation insert loss of power divider
图 8 功分器插入损耗

1.4 MEMS 开关的安装

选用的MEMS开关为DC接触式CPW MEMS串联开关^[6]。开关隔离度由UP态电容 C_u 决定，如式(2)所示。对于 $C_u=2 \text{ fF}$ 的情况，隔离度如图9所示。可见，在天线的工作频段内，开关具有很好的隔离效果。Down态的插损由开关的接触电阻 R_s 和电感 L 决定，当 $\omega L \ll R_s$ 时，插入损耗可以表示为式(3)。

$$S_{21} = \frac{2j\omega C_u Z_0}{1 + 2j\omega C_u Z_0} \quad (2)$$

$$S_{21} = 1 - \frac{R_s}{2Z_0} \quad (3)$$

对于 $R_s=1 \Omega \sim 2 \Omega$ ，插损为-0.1 dB~-0.2 dB。由于这种RF-MEMS开关在天线的工作频段内具有优良的射频性能，因此在仿真中导通RF-MEMS开关可用矩形金属贴片代替，断开的RF MEMS开关则去掉该金属贴片，金属贴片的宽度取0.2 mm。考虑到实际制作的需要，RF-MEMS开关示意图及安装位置如图10所示。RF-MEMS开关安装在图中圆圈的位置。开关的CPW地连接到两端的贴片上，贴片通过金属化过孔与背面的接地板相连，射频线通过金丝搭接在微带线上。

在仿真设计中，MEMS开关的安装方式及其影响牵涉到很多因素，为简化仿真计算的需要，进行了简化处理，即只仿真和开关的通断性能密切相关的导带和接地片，未对整体封装进行仿真。添加MEMS开关的实际影响将根据样机实测结果另文进行深入分析，在此不再赘述。

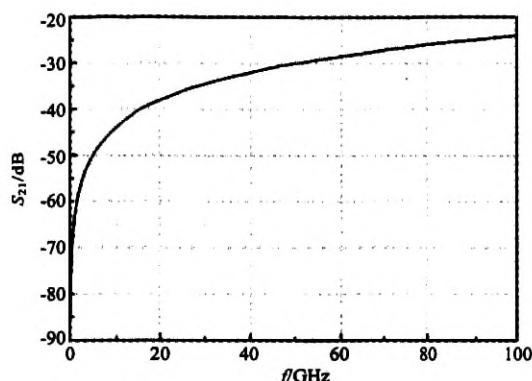


Fig.9 Isolation of RF-MEMS switch
图 9 MEMS 串联开关隔离度

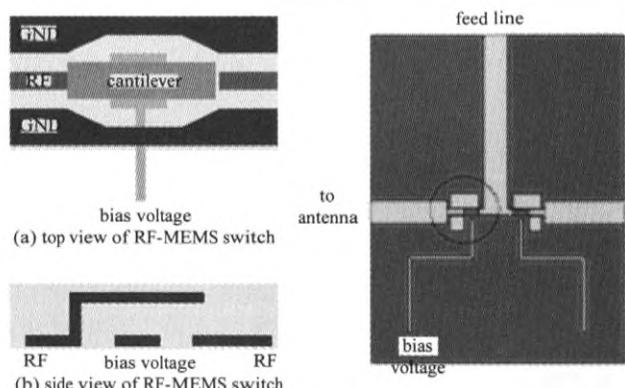


Fig.10 Schematic of RF-MEMS switch and connecting point on substrate
图 10 MEMS 开关以及安装位置

1.5 可重构天线

把各个部件进行组合后得到完整的可重构天线，其结构如图11所示。

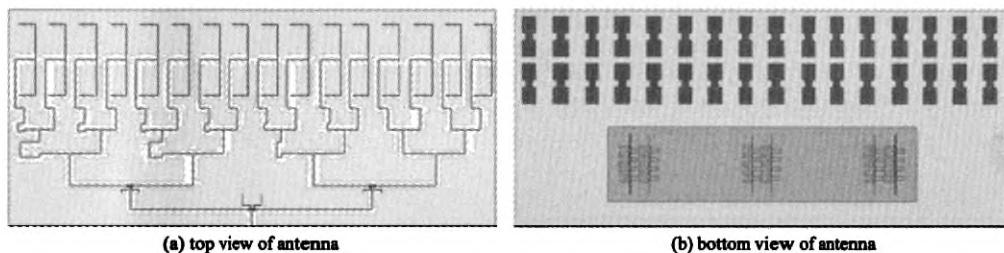


Fig.11 Schematic of pattern-reconfigurable antenna
图 11 方向图可重构天线示意图

天线的正面是馈电网络，包括微带馈线、功分器、移相器和MEMS开关。背面是天线辐射单元。每4个天线为1组，共有4组。辐射单元下面是EBG(Electromagnetic-Bandgap)结构组成的滤波器。EBG接地板与天线阵接地板直接对接，直流供电线通过金属化过孔与正面的MEMS开关相连。通过切换RF-MEMS开关的通断，形成不同的波束指向。

2 仿真结果

使用仿真软件HFSS建立天线阵仿真模型。天线阵共有4种状态。第1种状态开关5和开关1闭合，其余断开，第1个子阵辐射，子阵每个单元相位相同，波束指向0°；第2种状态开关5和开关2闭合，其余断开，第2个子阵辐射，子阵中每个单元相位差30°，波束指向25°；第3种状态开关6和开关3闭合，其余断开，第3个子阵辐射，子阵中每个单元相位差60°，波束指向40°；第4种状态开关6和开关4闭合，其余断开，此时第4个子阵辐射，子阵中每个单元相位差90°，波束指向50°。

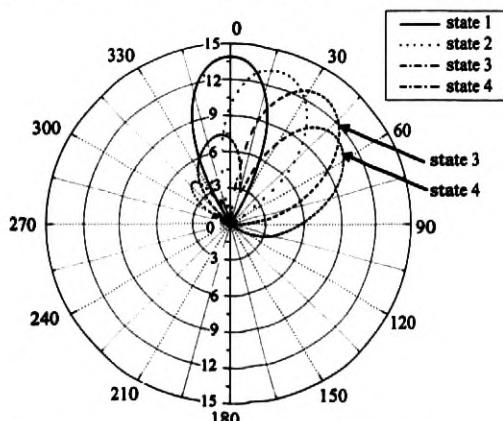


Fig.12 Simulation pattern of four different states
图 12 四种状态方向图的仿真结果

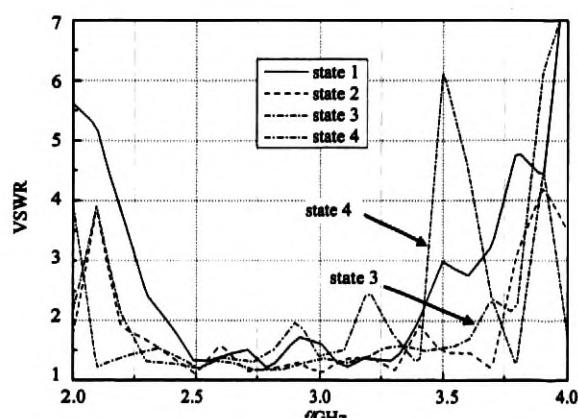


Fig.13 Simulation VSWR of four different states
图 13 四种状态驻波的仿真结果

仿真时，通过金属贴片的连接和断开模拟开关的闭合和断开。4种状态天线方向图的仿真结果如图12所示，驻波比仿真结果如图13所示，可见，本文设计的天线实现了方向图可重构和驻波的宽带匹配。

3 结论

本文通过天线单元、宽带功分网络和RF-MEMS开关的简化模拟仿真，设计了一种低剖面方向图可重构天线。仿真结果表明，天线实现了 $0^\circ, 25^\circ, 40^\circ$ 和 50° 的不同波束指向，除状态4情况下由于单元之间互耦的影响，天线驻波在部分频点大于2外，其他状态天线在 $2.5\text{ GHz} \sim 3.25\text{ GHz}$ 带宽内驻波均小于2。后续工作中，将根据天线样机的测试结果及RF-MEMS的封装和安装方式，对可重构天线的性能影响进行深入的分析。

参考文献：

- [1] Volakis John L. Antenna engineering handbook[M]. 4th ed. New York:McGraw Hill Professional, 2007.
- [2] 丁霄, 姜兴, 李思敏, 等. 馈电结构可变化的频率可重构天线[J]. 应用科学学报, 2007, 25(5):469–474.
- [3] Li Yang, Fan Mingyan, Chen Fanglu, et al. A Novel Compact Electromagnetic-bandgap(EBG) structure and its application for microwave circuits[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2005, 53(1):183–190.
- [4] Liu Yijun, Shen Zhongxiang. A compact dual and wideband cavity-backed slot subarray[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2007, 6(11):80–82.
- [5] Berenguer Jordi, Montoro Gabriel, Bertran Eduard. An 8-output broadband power divider for GSM-DCS applications[C]// IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2006. Malaga:[s.n.], 2006:199–201.
- [6] Rebeiz Gabriel M. RF MEMS theory design and technology[M]. USA:John Wiley and Sons, 2003.

作者简介：



崔奉云(1976-)，男，江西宁都人，工程师，2003年毕业于中国工程物理研究院北京研究生部通讯与信息系统专业，现从事飞行器天线的研究工作。

杨春(1973-)，男，陕西宝鸡人，博士，副研究员，现从事微波电磁场方面的科研工作。

李林翠(1974-)，女，湖北随州人，高级工程师，1998年毕业于哈尔滨工程大学通信工程专业，现从事微波天线设计工作。

张黎(1974-)，男，陕西三原人，高级工程师，1997年毕业于西安交通大学机械工程专业，现从事工艺结构设计工作。

张文涛(1984-)，男，山西平遥人，在读硕士研究生，研究方向为天线设计.email:pzzwt@163.com.

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>