

· 天线系统 ·

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2012)07-0055-04

## 左手微带天线设计及其 RCS 计算

韩 璐, 沈小青, 柏永斌, 霍 莹

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

**摘要:** 基于左手传输线结构, 设计了左手微带天线单元及其  $4 \times 4$  阵列, 并对单元天线和阵列天线的辐射特性和散射特性进行了数值仿真计算与实际测量。数值仿真与实测结果表明, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线在不影响辐射性能的情况下, 大幅度地降低了天线带外的雷达散射截面(RCS)。左手微带天线克服了现有微带天线 RCS 缩减技术中的不足和缺陷, 是在不损失天线辐射性能的前提下降低 RCS 的有效选择方案。

**关键词:** 微带天线; 左手微带天线; 辐射特性; 散射特性

### Design of Left-handed Microstrip Antenna and Calculate of Its RCS

HAN Lu, SHEN Xiao-qing, BAI Yong-bin, HUO Ying

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

**Abstract:** Firstly, a left-handed microstrip antenna (LH-MSA) and a  $4 \times 4$  LH-MSA array are designed based on left-handed transmission line structure. Then the radiation performance and scattering property of element antenna and array antenna are simulated and measured. Simulation and measurement results show that compared to rectangular microstrip antenna, LH-MSA drastically reduce the radar cross section (RCS) without affecting the radiation performance. LH-MSA overcome deficiencies and defects in the existing antenna RCS reduction technology. LH-MSA is an effective option for reducing RCS without losing the radiation performance.

**Key words:** microstrip antenna; left-handed microstrip antenna; radiation performance; radar cross section

## 0 引言

微带天线及其阵列具有低剖面、体积小、重量轻、易于同飞机、导弹等表面共形、且便于获得各种极化和双频段工作等优点, 因此, 在飞行器雷达天线中获得了广泛应用。对微带天线辐射问题已进行了大量的研究, 但关于微带天线散射问题的研究却不多。为了减小微带天线的雷达散射截面(RCS), 可采用多种方法<sup>[1-4]</sup>, 包括电阻集总加载和分布条带式加载, 利用变容二极管进行电抗性集总加载, 以及采用铁氧体等各向异性介质基板等措施, 但以上方法均导致天线不能有效的辐射电磁波, 天线无法正常工作。因此, 在考虑天线 RCS 缩减的同时, 必须考虑天线的辐射性能, 否则即使实现天线 RCS 大幅度缩减, 但是已不能作为天线使用, 也是不实际的。

本文利用左手传输线结构设计了左手微带天线, 并利用基于矩量法的电磁仿真软件 IE3D 计算了左手微带天线的频率特性、辐射特性以及散射特性。数值仿真结果表明, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线在不影响辐射性能的情况下, 大幅度地降低了天线的带

外 RCS。

## 1 左手微带天线设计

### 1.1 左手微带天线单元设计

左手微带天线由左手传输线构建, 结构如图 1a) 所示, 所选用的介质基板厚度为 1.524 mm, 相对介电常数为 2.94。天线长为 48 mm; 宽为 39.5 mm, 交指个数为 8; 指宽为 4.5 mm; 缝宽为 0.5 mm; 接地孔半径为 0.8 mm, 天线通过  $136 \Omega$  的  $\lambda/4$  微带线与  $50 \Omega$  输入端口进行阻抗匹配。图 1b) 给出了左手微带天线单元 S 参数的 IE3D 仿真结果, 从中可以看出天线工作在 1.6 GHz 处。图 1c) 给出了左手微带天线 E 面和 H 面的辐射方向图, 从中可以看出天线向法线方向辐射, 增益为 5.64 dBi。可以看出, 左手微带天线单元能有效辐射, 在此基础上, 考虑天线的 RCS 缩减才是有实际意义的。

### 1.2 左手微带天线结构参数计算

左手微带天线的相位传播常数  $\beta$  为<sup>[5]</sup>

$$\beta = s(\omega) \sqrt{\omega^2 L_R C_R + \frac{1}{\omega^2 L_L C_L} - \left( \frac{L_R}{L_L} + \frac{C_R}{C_L} \right)} \quad (1)$$

通信作者: 韩璐

Email: luhuan@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-03-16

修订日期: 2012-06-15

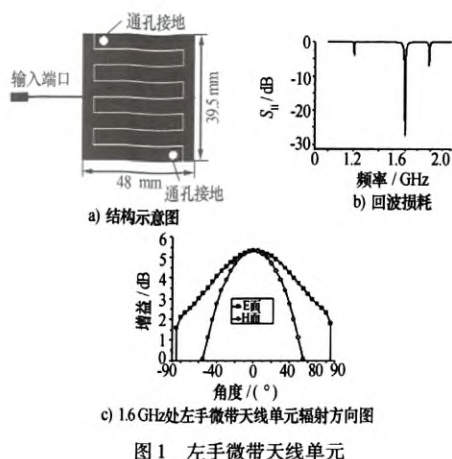


图1 左手微带天线单元

其中

$$s(\omega) = \begin{cases} -1, & \text{当 } \omega < \omega_1 = \min\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \\ +1, & \text{当 } \omega > \omega_2 = \max\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \end{cases}$$

通过仿真软件可以得到输入阻抗矩阵  $Z$  和输入导纳矩阵  $Y$ , 然后利用式(2), 可以得到左手微带天线的各个参数值:  $L_R = 7.841 \text{ nH}$ ;  $C_R = 1.557 \text{ pF}$ ;  $L_L = 1.936 \text{ nH}$ ;  $C_L = 0.787 \text{ pF}$ , 可以看出, 该结构是一种混合左右手传输线结构。根据左手微带天线的参数值, 可以计算出天线的各个谐振点。

$$\begin{aligned} L_R &= \frac{1}{2j\omega} \left( \omega \frac{\partial Z}{\partial \omega} + Z \right), \quad C_R = \frac{1}{2j\omega} \left( \omega \frac{\partial Y}{\partial \omega} + Y \right), \\ L_L &= \frac{2}{j\omega} \left( -\omega \frac{\partial Y}{\partial \omega} + Y \right)^{-1}, \quad C_L = \frac{2}{j\omega} \left( -\omega \frac{\partial Z}{\partial \omega} + Z \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

### 1.3 左手微带天线阵列设计

在各种实际应用中, 往往要求天线具有高增益、高功率、低旁瓣等特性, 由于天线阵可获得这些特性, 因此, 天线组阵技术在实际工作中获得广泛的应用。利用左手微带天线单元和  $4 \times 4$  等幅同相馈电网络, 设计制作了如图2a)所示的  $4 \times 4$  左手微带天线阵列, 图2b)给出了天线阵列回波损耗的实测结果, 工作频率为  $1.6 \text{ GHz}$ , 图2c)给出了  $f = 1.6 \text{ GHz}$  时  $4 \times 4$  天线阵列的辐射方向图, 可以看到天线阵列增益达到  $16.95 \text{ dBi}$ 。

由于左手微带天线尺寸较小, 只有同频传统矩形微带天线尺寸的  $49\%$ , 因此, 相比于传统矩形微带天线, 在相同面积下, 可以摆放更多的左手天线单元。图3给出了相同面积下, 均匀幅度馈电的  $8$  元矩形微带天线阵列和  $16$  元左手微带天线阵列的方向图比较, 从中可以看出,  $2$  种天线阵列的主副瓣电平相差不大,

但左手微带天线阵列的增益为  $16.95 \text{ dBi}$ , 矩形微带天线阵列的增益为  $15.29 \text{ dBi}$ , 左手微带天线阵列比矩形微带天线阵列增益高了  $1.66 \text{ dBi}$ 。

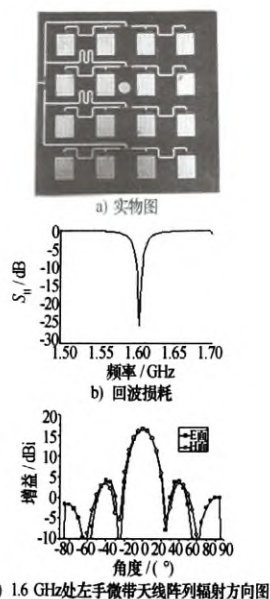
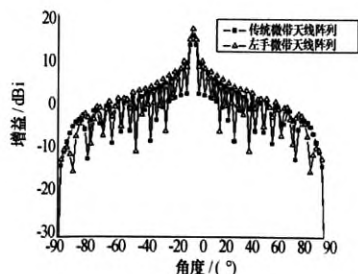
图2  $4 \times 4$  左手微带天线阵列

图3 左手微带天线阵列与矩形微带天线阵列辐射方向图比较

## 2 左手微带天线的 RCS 参数分析

### 2.1 RCS 定义

天线工作时候的散射通常包括结构项散射和模式项散射 2 部分: 结构项散射是天线端接匹配负载时的散射场; 模式项散射是由于负载与天线不匹配而反射的功率由天线再次辐射得到的散射场。

使用散射矩阵可以得到微带天线馈电端口接任意负载时的散射场<sup>[6]</sup>为

$$E^s(Z_1) = E^{sm}(Z_c) + \frac{\Gamma}{1 - \Gamma\Gamma_s} E^{sm} \quad (3)$$

其中

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c}$$

$$\Gamma_a = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c}$$

式中:  $\Gamma$  是向负载看去的反射系数;  $\Gamma_a$  是向天线看去的反射系数;  $Z_c$  是馈线的特性阻抗;  $E^*(Z_i)$  是天线接负载  $Z_i$  时的总散射场;  $E^m(Z_c)$  是结构项散射场;  $E^{nm}$  是单个波束照射下的散射场;  $\frac{\Gamma}{1-\Gamma\Gamma_a}E^{nm}$  是模式项散射场。由式(1)可知, 如果微带天线的馈电端口接匹配负载, 天线的模式项散射将接近为零, 天线的散射场仅包含结构项散射场。因此在实际工程中, 通过调节负载, 可以使天线仅含有结构项散射场。

## 2.2 左手微带天线 RCS 计算分析

本文只对天线的结构项散射场进行分析计算。由于左手微带天线尺寸很小, 很难对其 RCS 进行常规的测量, 如果采用缩比模型测量将增加制作成本, 所以本文利用基于矩量法的 IE3D 电磁仿真软件对天线的 RCS 进行分析计算。

在分析计算时, 平面波采用角极化, 电场的幅值取  $E_0 = 1 \text{ V/m}$ 。为了观察不同方向平面波入射时 RCS 的缩减效果, 选取了 4 个典型角度入射, 入射角分别为  $(\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ)$ ,  $(\theta = 0^\circ, \varphi = 90^\circ)$ ,  $(\theta = 60^\circ, \varphi = 45^\circ)$  和  $(\theta = 60^\circ, \varphi = 90^\circ)$ 。

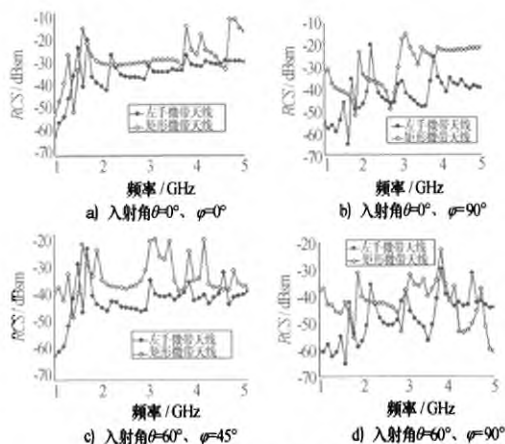


图4 左手微带天线和矩形微带天线的 RCS 对比

图4给出了不同入射角度时, 左手微带天线和矩形微带天线的 RCS 对比。图4a) 是入射角为  $\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$  时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 10 dBsm, 其中在 4.84 GHz 时, RCS 最大缩减量为 21 dBsm; 图4b) 是入射角为  $\theta = 0^\circ, \varphi = 90^\circ$  时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 20 dBsm, 其中在 3.6 GHz 时, RCS 最大缩减量为 32 dBsm; 图4c) 是入射角为  $\theta = 60^\circ, \varphi =$

45°时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 10 dBsm, 其中在 1 GHz 时, RCS 最大缩减量为 21 dBsm; 图4d) 是入射角为  $\theta = 60^\circ, \varphi = 90^\circ$  时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 15 dBsm, 其中在 2 GHz 时, RCS 最大缩减量为 33 dBsm。

## 2.3 左手微带天线阵列 RCS 实测结果

对左手微带天线阵列 RCS 实际测量时, 同样采用平面波  $\theta$  角极化, 电场的幅值取  $E_0 = 1 \text{ V/m}$ , 选取 4 个典型角度入射, 入射角分别为  $(\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ)$ ,  $(\theta = 0^\circ, \varphi = 90^\circ)$ ,  $(\theta = 60^\circ, \varphi = 45^\circ)$  和  $(\theta = 60^\circ, \varphi = 90^\circ)$ 。

图5给出了不同入射角度时, 左手微带天线阵列和矩形微带天线阵列的 RCS 对比。图5a) 是入射角为  $\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$  时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 18 dBsm, 其中在 4.84 GHz 时, RCS 最大缩减量为 29 dBsm; 图5b) 是入射角为  $\theta = 0^\circ, \varphi = 90^\circ$  时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 27 dBsm, 其中在 3.6 GHz 时, RCS 最大缩减量为 39 dBsm; 图5c) 是入射角为  $\theta = 60^\circ, \varphi = 90^\circ$  时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 17 dBsm, 其中在 1 GHz 时, RCS 最大缩减量为 28 dBsm; 图5d) 是入射角为  $\theta = 60^\circ, \varphi = 90^\circ$  时的 RCS, 由图可知, 除了天线的谐振点, 相比于矩形微带天线, 左手微带天线的 RCS 均缩减量约为 23 dBsm, 其中在 2 GHz 时, RCS 最大缩减量为 41 dBsm。

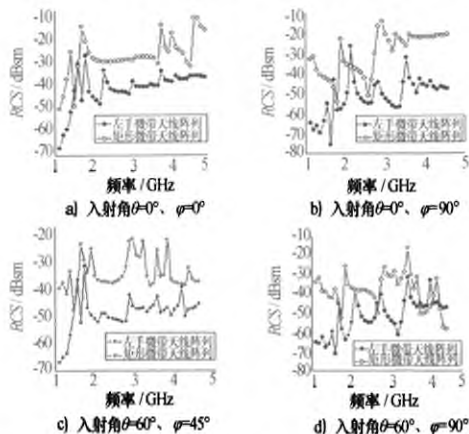


图5 左手微带天线阵列和矩形微带天线阵列的 RCS 对比

由此可以看出, 左手微带天线相比于矩形微带天线具有更好的带外 RCS 抑制, 这是因为左手微带天线特有的缝隙结构以及加载了接地短路针, 使其在 RCS 缩减方面有好的表现。

### 3 结束语

在一些飞行器通信系统中,往往需要低 RCS 天线。本文基于左手传输线结构,设计了左手微带天线单元及  $4 \times 4$  阵列,利用电磁仿真软件 IE3D 对左手微带天线单元的辐射特性和散射特性进行了计算,并对  $4 \times 4$  左手微带天线阵列进行了实际测量。数值仿真与实测结果表明,相比于矩形微带天线,左手微带天线在不影响辐射性能的情况下,大幅度地降低了天线的带外 RCS。左手微带天线克服了现有微带天线 RCS 缩减技术中的不足和缺陷,天线制作成本也较低,为低 RCS 天线设计提供了新的设计思路,具有重要的参考价值。

### 参考文献

- [1] Jackson D R. The RCS of a rectangular microstrip patch in a substrate-superstrate geometry [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(1): 2-8.
- [2] Pozar D. Radiation and scattering from a microstrip patch on a uniaxial substrate [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(6): 613-621.
- [3] Volakis J L, Alexanian A, Lin J M. Broadband RCS reduction of rectangular patch by using distributed loading [J]. Electronics Letters, 1992, 28(25): 2322-2323.
- [4] 杨 易, 龚书喜, 贺秀莲. 缝眼加载方法减缩微带天线 RCS [J]. 火控雷达技术, 2006, 35(1): 1-3, 14.  
Yang Yi, Gong Shuxi, He Xiulian. Reducing RCS of microstrip antenna based on the method of embedding slot [J]. Fire Control Radar Technology, 2006, 35(1): 1-3, 14.
- [5] Lai A, Itoh T, Caloz C. Composite right/left-handed transmission line metamaterials [J]. IEEE Microwave Magazine, 2004, 5(3): 34-50.
- [6] Liu Y, Fu D M, Gong S X. A novel model for analyzing the radar cross section of microstrip antenna [J]. Journal of Electromagnetic Waves Application, 2003, 17(9): 1301-1310.
- [7] Jackson D R. The RCS of a rectangular microstrip patch in a substrate-superstrate geometry [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(1): 2-8.
- [8] Pozar D. Radiation and scattering from a microstrip patch on a uniaxial substrate [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(6): 613-621.
- [9] Volakis J L, Alexanian A, Lin J M. Broadband RCS reduction of rectangular patch by using distributed loading [J]. Electronics Letters, 1992, 28(25): 2322-2323.
- [10] 杨 易, 龚书喜, 贺秀莲. 缝眼加载方法减缩微带天线 RCS [J]. 火控雷达技术, 2006, 35(1): 1-3, 14.
- [11] Lai A, Itoh T, Caloz C. Composite right/left-handed transmission line metamaterials [J]. IEEE Microwave Magazine, 2004, 5(3): 34-50.
- [12] Liu Y, Fu D M, Gong S X. A novel model for analyzing the radar cross section of microstrip antenna [J]. Journal of Electromagnetic Waves Application, 2003, 17(9): 1301-1310.
- [13] 韩 璐 女, 1984 年生, 工程师。研究方向为微波元器件设计及无线电计量。
- [14] 沈小菁 男, 1971 年生, 高级工程师。研究方向为无线电计量。
- [15] 柏永斌 男, 1974 年生, 工程师。研究方向为无线电计量。
- [16] 霍 莹 女, 1979 年生, 工程师。研究方向为无线电计量。
- [17] Bergman N, Doucet A, Gordon N. Optimal estimation and cramer-rao bounds for partial non-gaussian state space models [J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 2001, 53(1): 97-112.
- [18] 文如泉, 张龙滨, 曹 洁. 粒子优化组合的粒子滤波跟踪算法研究 [J]. 现代雷达, 2011, 33(4): 49-52.  
Wen Ruquan, Zhang Longbin, Cao Jie. A study on particle filtering tracking algorithm of particle optimal combination [J]. Modern Radar, 2011, 33(4): 49-52.
- [19] 郭剑辉, 张荣涛, 王 凯. 直角坐标系下的雷达跟踪滤波算法分析 [J]. 现代雷达, 2010, 32(10): 33-36.  
Guo Jianhui, Zhang Rongtao, Wang Kai. Analysis of radar tracking algorithms in Cartesian coordinate system [J]. Modern Radar, 2010, 32(10): 33-36.
- [20] 孔云波 男, 1987 年生, 博士生。研究方向为多传感器数据融合, 目标跟踪等。
- [21] 冯新喜 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师。研究方向为多传感器数据融合, 目标跟踪等。

(上接第 50 页)

Xiang Li, Liu Ming, Su Baoku. Application of Gaussian mixture particle filter in initial alignment for strap down inertial navigation system on stationary base [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(2): 61-64.

- [6] 康 健, 司锡才. 被动定位跟踪中的非线性滤波技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(2): 160-162.  
Kang Jian, Si Xicai. Nonlinear filtering techniques for passive locating and tracking [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(2): 160-162.
- [7] Bilik I, Tabrikian J. MMSE-based filtering in presence of non-Gaussian system and measurement noise [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(3): 1153-1169.
- [8] Perakopf F, Bouchaffra D. Genetic-based em algorithm for learning gaussian mixture models [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1344-1348.
- [9] Figueiredo M A T, Jain A K. Unsupervised learning of finite mixture models [J]. IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(3): 1-16.

## 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>