

文章编号: 1005-6122(2005)05-0030-04

# 宽频带膜片激励波导窄边非倾斜缝隙阵天线\*

汪伟<sup>1,2</sup> 金剑<sup>2</sup> 钟顺时<sup>1</sup>

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 华东电子工程研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 文中提出一种新型宽频带低交叉极化的波导缝隙阵设计, 辐射单元是由波导内膜片激励的窄边非倾斜缝隙, 线阵划分成多个子阵, 并由功分器馈电。设计、加工了一个16单元X波段的均匀直线波导缝隙阵, 测试得到7.2%阻抗带宽( $VSWR \leq 1.5$ ), 天线辐射方向图最高副瓣电平低于-11.8 dB, 并且具有低于-39 dB的交叉极化特性。

**关键词:** 波导缝隙阵天线, 极化, 带宽

## A Broadband Untilted Edge-slotted Waveguide Antenna Array Excited by Shaped Slabs

WANG Wei<sup>1,2</sup>, JIN Jian<sup>2</sup>, ZHONG Shun-shi<sup>1</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A novel untitled edge-slotted waveguide antenna array with wide bandwidth and very low cross-polarization is presented, where the radiating element is composed of an untitled narrow-wall slot and a pair of shaped slabs flanked the slot in waveguide. The array is separated into several subarrays and fed by a power divider. A uniformly excited, equally spaced linear array with 16 proposed elements for X-band application is designed and measured. Experimental results show that the antenna has an excellent cross-polarization level of  $\leq -39$  dB, a sidelobe level of  $\leq -11.8$  dB and over 7.2% bandwidth for  $VSWR \leq 1.5$ .

**Key words:** Waveguide slot array antenna, Polarization, Bandwidth

## 引言

波导缝隙阵天线口径幅度分布容易控制, 口径利用率高, 易于实现低和极低副瓣等, 因此得到广泛应用。用作辐射单元的波导缝隙有多种形式, 其中应用最为广泛的是波导宽边纵向缝隙和窄边斜缝两种。人们已对这两种辐射元进行了大量分析和实验, 并对波导缝隙驻波阵和行波阵的设计做出研究<sup>[1-5]</sup>。对于波导窄边开斜缝天线阵, 由于缝隙倾斜引起较高的交叉极化电平, 通常要在阵面上采用缝隙倒置法等相应的抑制措施<sup>[3,5]</sup>。并且当天线扫描角较大时, 采用相邻波导缝隙倒置法其交叉极化瓣仍在实空间出现, 这就需要多种方法结合来克服

这一缺陷<sup>[6]</sup>。

Ajioka<sup>[7]</sup>首先提出了波导腔内成对倾斜金属导线激励的窄边非倾斜缝辐射单元形式。由于辐射电磁波的电场分量垂直于辐射细缝, 而此种辐射缝隙完全垂直于波导的轴线, 排除了单元在垂直于波导纵向的电场分量, 因此辐射电磁波只包含波导轴向分量, 从而得到优越的交叉极化特性。所以用非倾斜缝隙作为辐射单元组成的天线将得到非常高的交叉极化抑制性能。S. Hashemi-Yeganeh<sup>[8]</sup>等人在理论和实验上做了进一步工作; 文献[9]中提出另一种激励方法, 采用介质板上两个金属条来激励非倾斜缝。前一种方法中, 由于激励金属线在一定的角度下跨接于波导窄边和宽边之间, 加工较困难。后

\* 收稿日期: 2004-06-22; 定稿日期: 2004-10-19

一种方法则存在介质片与波导之间的安装和可靠性问题。

本文提出一种非倾斜缝的新型激励方式,将一对切角矩形金属膜片置于缝隙两边,膜片紧贴于波导的宽边和上部窄边上,这种结构有利于天线阵的制作和增加可靠性。设计加工了一个X波段的16元侧射均匀直线阵,为了有效展宽工作带宽,将天线阵划分成4个谐振子阵,并由一个波导功分器馈电。测试结果验证了设计的可行性。文中还对该天线与常规倾斜缝均匀直线天线阵进行了实验比较,验证了此种天线优越的交叉极化特性。

## 1 非倾斜缝辐射原理

对于矩形波导,坐标如图1所示,传输的 $TE_{10}$ 主模场分量为:

$$E_y = -j \frac{\omega \mu a}{\pi} H_{10} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1)$$

$$H_x = j \frac{\beta a}{\pi} H_{10} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2)$$

$$H_z = H_{10} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3)$$

$$E_x = E_z = H_y = 0 \quad (4)$$

管壁电流分布由波导管壁附近的磁场分布所确定,可以由下式求得:

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_t \quad (5)$$

其中 $\mathbf{n}$ 是波导内壁的单位法向矢量, $\mathbf{H}_t$ 是内壁附近的切向磁场,结合(3)式和(5)式,求得波导窄壁的电流:

$$\mathbf{J}_s|_{x=0,a} = -H_{10} e^{j(\omega t - \beta z)} \mathbf{y} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,对于波导内的主模 $TE_{10}$ 波,波导窄边的电流只有 $y$ 分量,当在窄边沿 $y$ 向开非倾斜细缝时,其切割的电流几乎忽略不计,在缝隙内不能激励起电磁场,因此对空间不能产生辐射。为了改变这一状况,此处采用一对切角矩形金属膜片置于缝隙两边(如图1所示),改变缝隙附近波导内的场分布,从而使波导窄壁上电流具有 $z$ 分量,这样非倾斜缝就可以有效切割电流,在缝隙内激励起电磁场,进而向空间产生辐射。

图1给出了膜片激励波导窄边非倾斜缝的结构,波导的宽为 $a$ ,高 $b$ ,辐射缝隙无倾角地开在波导窄边上,缝隙两边附加一对切角金属膜片。由于波导窄边尺寸较小,为了得到谐振长度,缝隙需要扩展到波导的宽边,切割到宽边的深度为 $h$ 。

万方数据

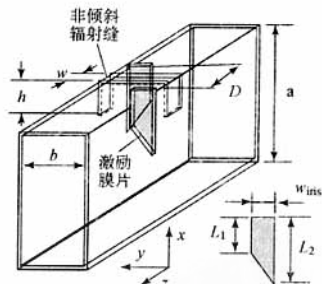


图1 波导窄边非倾斜缝结构图

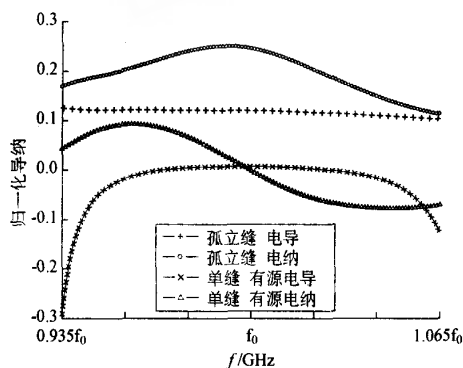


图2 辐射单元归一化导纳

## 2 天线的结构与与设计

利用上面介绍的非倾斜缝作为辐射单元,设计波导窄边开缝天线阵,选取线阵单元数为16,为了改善因单元数较多限制天线阵工作带宽的因素<sup>[10]</sup>,将天线阵分成4个子阵,并由一个波导功分器馈电。天线阵的设计是基于有限元方法的电磁场分析软件Ansoft HFSS来进行的。

### 2.1 辐射单元电导的计算

在天线设计过程中,首先需要分析计算单个辐射缝隙的几何尺寸与导纳之间的关系曲线,根据天线阵中各个缝隙导纳值的需要,选取合适的缝隙结构尺寸。波导缝隙的导纳值可以通过软件仿真的散射参数及传播常数计算值得到<sup>[11]</sup>。由于线阵中辐射单元之间存在相互耦合,其有源导纳值将偏离孤立缝隙导纳值,通过计算包括多个完全相同、等间距分布的辐射缝隙情况,以孤立缝隙导纳值作为初始值,用迭代方法求得考虑互耦情况下的有源导纳值。图2给出一组孤立缝隙和由四单元计算的单个缝隙归一化导纳计算曲线。其中波导尺寸为 $20 \times 5 \text{ mm}^2$ ,  $L1 = 0.16\lambda_0$ ,  $L2 = 0.32\lambda_0$ ,  $W_{iris} = 0.055\lambda_0$ ,  $h = 0.135\lambda_0$ ,  $D = W = 0.0527\lambda_0$ , 缝隙间距取为 $\lambda_g/2$ 。

计算结果显示,在谐振频率上孤立缝隙导纳值电导为 0.12,而有源导纳值则为 0.25,并且孤立缝隙导纳值在很宽的频带内变化缓慢,表现出与由四单元计算的考虑互耦的单个缝隙导纳值明显的差异,这是由于激励双膜片的引入,较大地改变了波导中的电磁场分布,辐射单元之间的耦合严重。

## 2.2 波导功分器设计

对于划分成四个子阵的天线阵,选择尺寸与辐射波导相同的半高波导 1:4 功分器对其激励。功分器采用简洁的两级波导 H-T 构成,两级波导 H-T 都由金属圆棒进行匹配,如图 3 所示,辐射缝隙开在图中最上面一根波导上侧窄边。其中,第一级 T 接头的输出端与两个第二级 T 接头的输入端通过一个  $90^\circ$  波导弯头连接。设计过程中,通过调节匹配棒距离波导窄边的相对位置、 $90^\circ$  波导弯头的切角和长度来优化这些单个波导接头,在此基础上组合成 1:4 波导功分器。图 4 中给出这种波导功分器输入端口电压驻波比计算值,在整个频带内小于 1.12,说明这种功分器匹配得非常好。

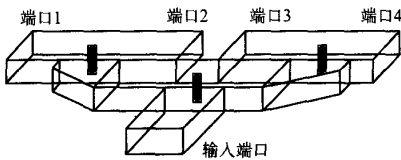


图 3 波导功分器示意图

## 2.3 天线阵设计

利用非倾斜缝作为天线阵的辐射单元,设计一个 X 波段 16 元等幅馈电均匀直线谐振阵。设计中采用的是半高波导作为辐射馈电波导,波导宽边和窄边尺寸分别取 20mm 和 5mm。 $f_0$  为设计中心频率。

在求得波导缝隙有源导纳的前提下设计天线子阵,对于该种辐射单元组成的均匀分布四单元子阵,辐射缝隙之间间距为  $\lambda_g/2$ ,终端距离最后一个缝隙  $\lambda_g/4$  处短路。根据匹配条件:  $\sum_{i=1}^M g_i = 1$ , 即,每个子阵的总输入导纳为 1,则单个辐射单元在谐振频率上的有源导纳值为 0.25。两个子阵由图 3 中的波导功分器第二级 T 接头等功率馈电,构成一个中馈的 8 元阵,满足天线阵中间馈电导纳和为 2 的原则<sup>[12]</sup>。通过调节辐射单元中激励膜片的宽度和缝隙切割深度,使谐振稍微偏离设计中心频率,对子阵进行匹配设计,以得到满意的带宽和带内电压驻波

比,图 5 给出了这种四元谐振子阵输入电压驻波比的一组计算曲线,其中  $L1 = 0.16\lambda_0$ ,  $L2 = 0.32\lambda_0$ ,  $W_{iris} = 0.0608\lambda_0$ ,  $h = 0.1651\lambda_0$ ,  $D = W = 0.064\lambda_0$ 。子阵输入端口电压驻波比小于 1.5 时,其阻抗带宽为 7.5%。

结合 2.2 节中设计的 1:4 波导功分器,将四个谐振子阵与功分器合成整个线阵,稍微调节膜片尺寸,使天线阵得到最佳匹配。

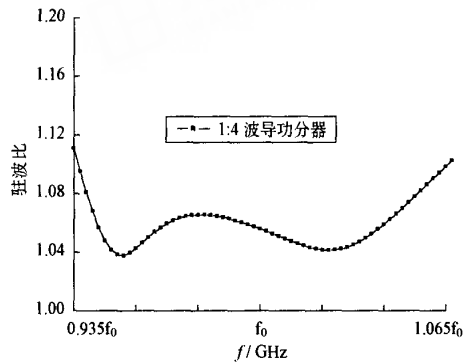


图 4 1:4 波导功分器输入端口驻波比

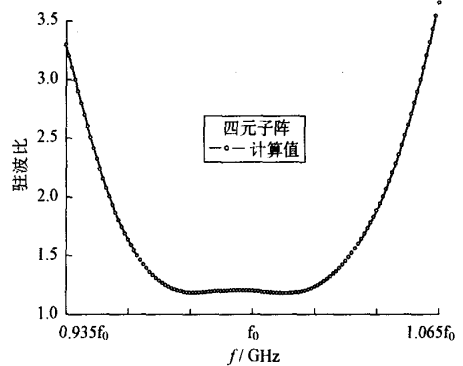


图 5 四元驻波阵端口输入驻波比

## 3 实验结果

为了验证设计思想,我们根据上述过程,设计加工了一例工作于 X 波段的 16 元波导侧射均匀直线阵,辐射单元等幅等间距分布。16 个单元分成四个谐振子阵,并由波导功分器馈电。先将 4 元子阵和 1:4 波导功分器按第 2 节中所述的设计方法进行单独设计,然后将两者结合,优化天线阵结构尺寸各个参数。一般情况下稍微改变膜片的宽度就可以实现天线阵的良好匹配。根据设计的结构,加工了一个 16 元波导天线阵,其照片如图 6 所示。其中  $a = 20\text{mm}$ ,  $b = 5\text{mm}$ ,  $L1 = 0.16\lambda_0$ ,  $L2 = 0.32\lambda_0$ ,  $W_{iris} =$

$0.0512\lambda_0, h=0.1651\lambda_0, D=W=0.064\lambda_0$ 。图 7 中给出了天线阵的输入端口电压驻波比仿真和实验结果,在电压驻波比小于 1.5 的前提下,阻抗带宽仿真值为 6.1%,测试带宽达到 7.2%,优于计算值,两者吻合较好。

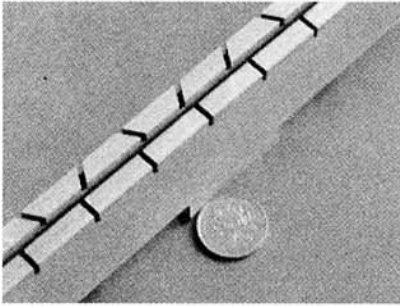


图 6 两种实验天线

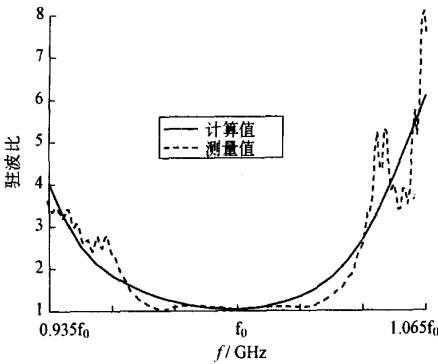
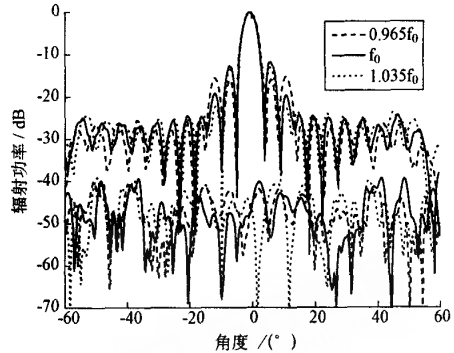


图 7 非倾斜缝天线阵输入驻波

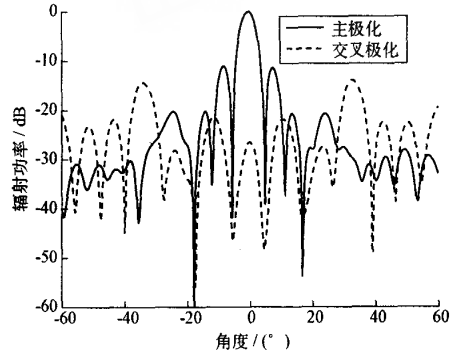
为了说明这种天线优越的交叉极化特性,我们还设计加工了一个 16 元常规倾斜缝隙侧射均匀线阵,馈电网络结构与非倾斜缝天线阵相同,只是辐射缝隙换为通常的倾斜缝隙,缝隙倾角  $15^\circ$ ,缝宽与非倾斜缝相同,试验天线也在图 6 中示出。

天线辐射方向图及交叉极化在室内近场试验室测得。图 8(a) 是非倾斜缝天线在  $0.965f_0, f_0, 1.035f_0$  三个频率上的辐射方向图和交叉极化测量值,结果显示天线在三个频率上的辐射方向图副瓣电平分别为  $-15.2\text{dB}, -11.8\text{dB}, -13.0\text{dB}$ ,交叉极化电平分别达到  $-39.7\text{dB}, -39.2\text{dB}, -39.0\text{dB}$ 。图 8(b) 是常规倾斜缝天线阵  $f_0$  的辐射方向图及交叉极化测量值,在  $\pm 34^\circ$  附近天线交叉极化电平高达  $-14\text{dB}$ ,其它范围也只能达到  $-21\text{dB}$ 。两种天线阵测试交叉极化电平相比,非倾斜缝天线的交叉极化性能得到本质的提高。

万方数据



(a) 非倾斜缝天线



(b) 倾斜缝天线

图 8 天线 E 面辐射方向图和交叉极化测量值

## 4 结论

给出了一种新型波导窄边缝隙阵天线设计,辐射单元由波导窄边上的非倾斜缝隙和波导内激励膜片组成,由于辐射缝垂直于波导轴线,在辐射单元上就排除了另一辐射电场分量,因此这种天线具有优越的交叉极化抑制性能。天线阵为了得到较大的工作带宽,将线阵划分成 4 个谐振子阵,由波导功分器馈电。实验测得天线具有 7.2% 的阻抗带宽,交叉极化优于  $-39\text{dB}$ ,与常规倾斜缝隙天线阵相比,其交叉极化性能得到了极大提高。

## 参 考 文 献

- [1] Elliott R S. Antenna Theory and Design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1981
- [2] Elliott R S, Kurty L A. The design of small slot arrays. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1978, 26 (3): 214 ~ 219
- [3] 钟顺时,费桐秋,孙玉林. 波导窄边缝隙阵天线的设计. 西北电讯工程学院学报, 1976, 4(1): 165 ~ 184
- [4] 汪 伟,傅德民,陈胜兵,等. 波导行波阵单元电导的计算. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(2): 234 ~ 237

(下转第 45 页)

- [3] Parazzoli C G, Greigor R B, Li K, et al. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law. *Phys Rev Lett*, 2003, 90 (10): 107401-1
- [4] Seddon N, Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect. *Science*, 2003, 302:1537 ~ 1540
- [5] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 3966 ~ 3969
- [6] Shen J T, Platzman P M. Near field imaging with negative dielectric constant lenses. *Appl Phys Lett*, 2002, 80:3286 ~ 3288
- [7] Fang N, Zhang X. Imaging properties of a metamaterial superlens. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 161 ~ 263
- [8] Parazzoli C G, Greigor R B, Nielsen J A, et al. Performance of a negative index of refraction lens. *Appl Phys Lett*, 2004, 84 (17):3232 ~ 3234
- [9] Pendry J B, Smith D R. Reversing light with negative refraction. *Physics Today*. 2004, 57(6):37 ~ 47
- [10] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47: 2075 ~ 2084
- [11] Markos P, Soukoulis C M. Numerical studies of left-handed materials and arrays of split ring resonators. *Phys Rev E*, 2002, 65: 036622
- [12] Gay-Balmaz P, Martin Olivier J F. Electromagnetic resonances in individual and coupled split-ring resonators. *J Appl Phys*, 2002, 92 (5): 2929 ~ 2936

**赵乾** 男, 29岁, 西北工业大学博士研究生。主要从事复杂流体光学行为和新型电磁材料“左手材料”的研究。

E-mail: ermrlab@nwpu.edu.cn

**赵晓鹏** 男, 47岁, 西北工业大学教授、博士生导师、国家杰出青年科学基金获得者, 西北工业大学智能材料与结构中心主任。长期从事智能材料与结构研究, 2001年开始左手材料研究。发表科研论文200余篇, 其中SCI检索92篇, EI检索85篇, 引用400多次, 申请和授权中国发明专利60余项。

E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

(上接第33页)

- [5] 杜耀惟. 层间缝隙倾角交替放置以抑制波导窄边阵交叉极化的初步探讨. *天线技术*, 1987
- [6] 林昌禄, 聂在平, 等. *天线工程手册*. 电子工业出版社, 2002
- [7] Johnson R C, Jasik H. *Antenna Engineering Handbook*. 2nd ed New York: McGraw-Hill, 1984
- [8] Shahrokh Hashemi-Yeganeh, Elliott R. S. Analysis of untilted edge slot excited by tilted wires. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1990, 38(11): 1737 ~ 1745
- [9] Hirokawa J, Kildal P-S. Excitation of an untilted narrow-wall slot in a rectangular waveguide by using etched strips on a dielectric plate. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1997, 45(6): 1032 ~ 1037
- [10] Hamadallah M. Frequency limitations on broad-band performance of shunt slot arrays. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(7): 817 ~ 826
- [11] Brown K W. Design of waveguide slotted arrays using commercially available finite element analysis software. *IEEE AP-S Digest*, 1996: 1000 ~ 1003
- [12] 金林, 何国瑜. 平板裂缝天线阻抗匹配设计的研究. *微波学报*, 2000, 16(4): 373 ~ 377

**汪伟** 男, 1969年生, 安徽人, 华东电子工程研究所工程师, 2005年在上海大学通信与信息工程学院获工学博士学位, 主要从事微波系统与天线研究。

**金剑** 男, 1981年生, 江苏人, 华东电子工程研究所工程师, 主要从事天线研究。

**钟顺时** 男, 1939年生, 浙江人, 上海大学教授, 博士生导师, 研究方向为: 天线、微波和电磁理论。

## 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>