

文章编号 1005-0388(2010)02-0221-06

探地雷达超宽带背腔蝶形天线 设计与实现

郭 晨¹ 刘 策² 张安学¹

(1. 西安交通大学微波与光通信研究所, 陕西 西安 710049;

2. Subsurface Sensing Lab, University of Houston, Texas, United States)

摘要 设计实现了一种中心频率为 400 MHz 的吸波材料填充式背腔蝶形天线, 并将此天线应用于超宽带探地雷达系统, 组装完成了一套 400 MHz 无线控制探地雷达系统样机。背腔式设计的探地雷达收发天线可以克服传统蝶形天线在 H 面全向辐射所带来的缺点, 从而提高雷达系统的信噪比及收发天线之间的隔离度。对背腔蝶形天线的设计进行了规律性研究, 总结了吸波材料填充式背腔蝶形天线系统在工程化实现时的设计经验。实际路测数据验证了所设计背腔天线在此套探地雷达系统中性能表现稳定良好。

关键词 超宽带(UWB); 探地雷达(GPR); 背腔; 吸波材料; 蝶形天线

中图分类号 TN82

文献标志码 A

1. 引 言

探地雷达(GPR)技术是一种用于探测及识别地下目标物体的超宽带技术。近年来随着超宽带理论及技术的发展, 超宽带探地雷达技术的应用范围也越来越广^[1]。根据超宽带的定义, 理想情况下用于超宽带探地雷达系统的发射信号应为无限窄时域脉冲信号, 但实际的系统设计中, 多采用具有超宽带特性的高斯型脉冲信号作为激励源, 根据探测深度等不同应用要求, 目前的雷达工作频率范围从几十 MHz 到几 GHz 不等^[2]。为了整套雷达系统能够工作在超宽带频率范围内, 探地雷达系统中的收发天线必须具有较好的超宽带性能, 从而能够高效并无失真地发射及接收具有超宽带频谱的雷达脉冲信号。这要求雷达的收发天线在工作频带范围内具有高而平缓的增益曲线, 较强的主射方向性, 低旁瓣及较小的回波损耗等, 从而能够获得最大的动态范围, 最集中的辐射区域, 最低的收发天线直接耦合, 最少的拖尾以及保真度最高的接收波形^[3-4]。为了抑制信号拖尾并提高雷达的空间分辨率, 超宽带雷达天

线的设计非常关键。考虑到瞬时带宽、波形保真度、辐射效率及加工的难度等因素, 蝶形天线通常是用于超宽带探地雷达天线最合适的选择之一^[5]。蝶形天线基本分为不加载蝶形天线、末端集中加载蝶形天线以及分布加载式蝶形天线三种。分布加载式蝶形振子天线具有较小的天线尺寸及相对平滑的波形拖尾, 是探地雷达天线中的较好选择。但是不加屏蔽盒或接地板的分布加载式蝶形天线为双向辐射天线, 除了向地面辐射外还朝天空及周围辐射, 为了抑制天线系统中不必要的辐射场, 同时也为了减少周围环境及系统中各金属部件及电子元件对天线辐射性能的影响, 天线屏蔽盒(背腔)的设计很有必要^[6-7]。但是屏蔽盒本身就是强烈的反射源, 在加屏蔽盒的同时, 盒内需要吸收层覆盖, 吸收层要能有效吸收, 并且厚度适当, 而这并不是容易做到的, 这是蝶形振子天线在实际工程应用中的主要问题之一。设计实现了一套工作在中心频率 400 MHz 的吸波材料加载式背腔蝶形天线系统, 并对一些天线的设计和调试经验进行了总结, 为雷达天线系统的实际应用提供了参考。

收稿日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60501004)

联系人: 张安学 E-mail: anxuezhang@mail.xjtu.edu.cn

2. 天线设计

蝶形天线由无限长双锥天线演变而来。理论上无限长双锥天线具有无限的宽带及恒定的阻抗特性,但实际应用中天线的尺寸是有限的,从而限定了天线的低频性能。为了补偿天线的低频性能,增大张角(锥角)是一个较为有效的办法。在实际工程应用中,由于蝶形天线与双锥天线相比具有平面特性,加工更为简单,体积也较之减小很多,通常用蝶形天线作为超宽带探地雷达系统的收发天线的主要形式之一^[6]。由于蝶形天线的低频特性主要与天线长度有关,而带宽主要与天线张角有关,在保证这两个设计参数的前提下,为了减小蝶形天线的纵向尺寸,可将传统蝶形天线对称三角形金属板的两侧切割为平行线,如图 1 所示,仿真实验表明虽然会对天线低频

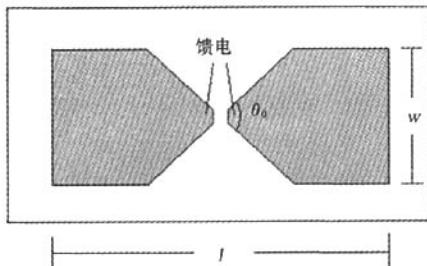


图 1 蝶形天线结构

性能有一定影响但在实际工程应用中可以被接受。此设计中蝶形天线的外形结构如图 1 所示,蝶形天线特性阻抗由如下公式算出^[7]

$$Z_e = 120 \ln \cot \frac{\theta_0}{4} \quad (1)$$

式中: θ_0 表示蝶形天线每边的张角,一般张角越大,带宽越大,与此同时天线所占空间也会越大。综合尺寸与带宽等因素,通常选取蝶形天线张角为 60° 。天线的长度决定了天线的低频特性,蝶形天线的板长由式(2)决定^[8]

$$l = \frac{1}{2} \lambda_0 \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

式中: λ_0 是与天线最低工作频率所对应的空气中的波长,所设计的探地雷达系统中心工作频率为 400 MHz,最低工作频率约为 100 MHz。 ϵ_{eff} 为等效介电常数,可由蝶形天线基底板的介电常数 ϵ_r 、基底板厚度 d ,以及蝶形天线金属臂的宽度 w 之间的关系式(3)得到^[8]。

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{d}{w} \right)^{-0.555} \quad (3)$$

2.1 屏蔽盒(背腔)设计

蝶形天线在 H 面的方向图为全向辐射,为了抑制天线背面不必要的对空辐射场,以及屏蔽周围环境和金属器件给天线系统带来的干扰,设计中使用了一个中间隔离的金属屏蔽盒来形成天线系统的背腔,如图 2 所示,背腔中间所加的金属隔离板可以最大程度上减小收发天线之间的直达波耦合。

从频域角度看,某一固定尺寸的天线背腔可看作一窄带系统,它会将天线辐射信号频谱中某一些频率的信号分量反射回来,从而在腔内形成多次反射,从而干扰雷达信号的时域波形。合理有效的背腔设计可以在屏蔽外界噪声、抑制天线背向对空辐射的同时,起到加强天线对地面辐射场的作用。背腔的高度设计是一个较为关键的因素,考虑到腔体的窄带特性,需要将天线背腔设计工作于探地雷达系统的中心工作频率上。如图 2 所示。

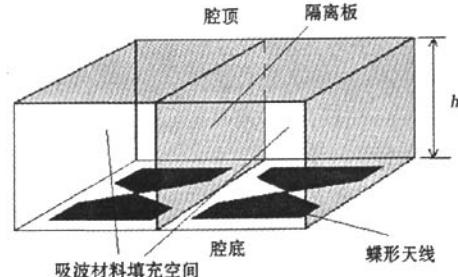


图 2 背腔式蝶形天线结构(吸波材料填充)

用于收发的两个蝶形天线可被看作一个二元天线阵,对地面的辐射总场为^[7]

$$E = E_1 (1 - e^{j2\pi k}) \quad (3)$$

式中: E_1 为单个蝶形天线的辐射场强度; 波数 $k = 2\pi/\lambda'$, λ' 是天线中心频率对应的波长在吸波材料介质中传播时的等效波长; h 为背腔高度。显然,当 $E = 2E_1$ 时天线对地面的辐射能量达到最大,此时背腔高度 $h = \lambda'/4$ 。

完整的背腔尺寸设计可通过仿真实验来完成。由于天线腔体的侧面屏蔽板与天线辐射 E 面场的方向呈垂直关系,仿真结果表明侧面屏蔽板到天线的垂直距离对天线辐射性能影响较小,考虑到减小体积的因素,在保证金属板不致影响天线辐射信号的前提下选择较短的侧面间距^[8]。

2.2 吸波材料填充

天线与屏蔽腔之间形成的多次反射信号须由吸波材料来吸收抑制,否则将会破坏雷达信号的有效性^[3]。填充吸波材料的本质思想与分布式加载原理基本相同,通过吸波材料的分布式电阻特性及分层过渡式电导率渐变,来吸收减少不需要的反射信号。本设计中将一种厚度为120 mm的商用6层吸波材料紧密填塞于屏蔽盒内,吸波材料表面与天线及屏蔽盒金属板均紧密接触,在有效吸收腔内辐射场的同时,还可以吸收屏蔽盒金属板上由于反射场所产生的电流,从而有效抑制二次反射。在260 MHz至640 MHz工作频率范围内,采用这种吸波材料填充方式的实际效果可以将反射信号抑制约30 dB。图3为利用Microwave Studio仿真软件建立的蝶形天线系统模型,图4比较了此天线系统模型填充与不填充吸波材料时的接收信号波形,可以看出,吸波材料对于多次反射及拖尾的抑制效果良好。

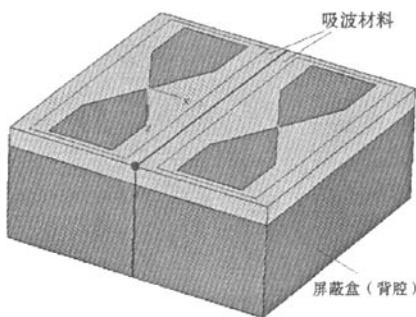


图3 背腔蝶形天线系统仿真模型

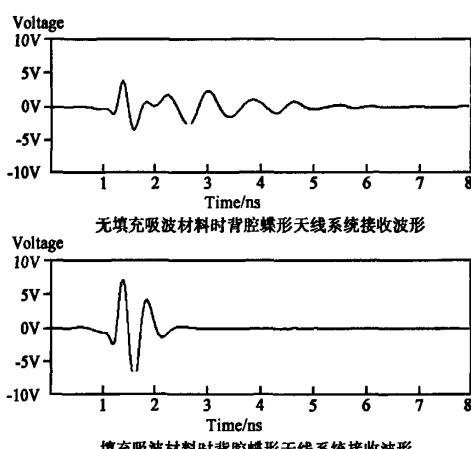


图4 吸波材料对天线辐射信号的影响

图5为此吸波填充式背腔蝶形天线系统在空气中辐射的场分布仿真图,按电场强度的分布分别用数字1、2、3将其分为三部分,区域1为背腔天线系统的背向(对空)辐射区域,颜色最深表示电场强度最弱;区域3为天线系统正向(对地)辐射区域,颜色最浅表示电场强度最强。此强度分布图表明,通过背腔设计及吸波材料的填充,天线系统背面对空的辐射场被明显抑制,为了定量分析,仿真过程中在天线系统的正向和背向距离15 cm处分别设置了探针,接收到的信号波形对比如图6所示,背向接收信号幅度低于正向信号幅度的5%。吸波材料填充过程中应注意将吸波材料塞实于屏蔽盒中,保证与盒壁及天线介质板的接触良好,但应避免过度挤压使得材料的密度不均匀;同时应注意吸波材料的接触方向,商用吸波材料一般分为数层,每层介质导电性呈递增或递减趋势,应用电阻率最低的层面接触天线。

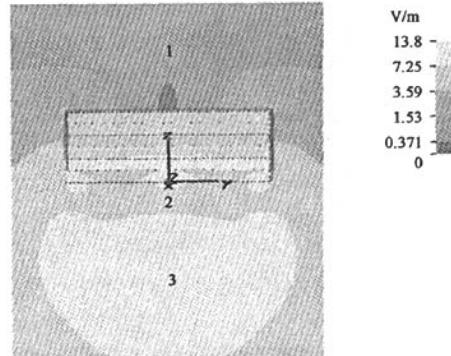


图5 背腔蝶形天线系统辐射场分布

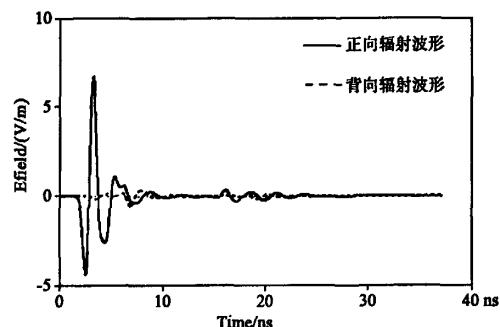


图6 背腔蝶形天线系统正向与背向辐射波形比较

2.3 宽带阻抗匹配传输线

阻抗匹配问题是超宽带技术发展中的难点之一,也是超宽带天线设计中非常关键的问题之一。通常在超宽带天线设计中很难做到整个天线频带范围内的匹配良好,因为天线的尺寸决定了天线工作的中心频率,而由阻抗公式算出的天线特性阻抗又与天线中心频率有关。为了实现宽带的阻抗匹配,通常需要引入阻抗匹配器。天线设计中易出现阻抗失配的部位主要有以下两处:一是馈电部件与天线馈点的连接处,如同轴线或 SMA 接头与天线的连接处,二是天线口径与空气或其它媒质的分界面。在探地雷达系统对地表进行探测时,地面等媒质相当于一种负载,地面与天线口径处的失配影响相对较小。这里介绍的阻抗匹配设计主要针对发射机和天线馈电端之间的失配问题。在蝶形天线天线馈点处,由公式(1)可以计算出当张角 $\theta_0=60^\circ$ 时,天线在空气中的特性阻抗约为 158 欧姆,但通常同轴线及 SMA 接头的特性阻抗均为 50 欧姆,信号源发射机的特性阻值更是远小于 50 欧姆,很明显,这两部分难以直接达到阻抗匹配。为了解决这个问题,本设计中提出了利用宽带阻抗匹配传输线的办法来解决发射机与天线馈点间的失配问题。如图 7 所示,宽带阻抗匹配传输线由几段不同间距的平行传输线组成。每段传输线的长度与间距由仿真软件优化得到,优化目标是每段匹配线之间及匹配线与天线和发射机之间反射最小。同时平行传输线还能起到巴伦的作用,将 SMA 接头的不平衡输出转换为蝶形天线的平衡输入。实测时通过微调各段平行传输线的长度及间距,可以实现对天线带宽及各频段性能的优化。

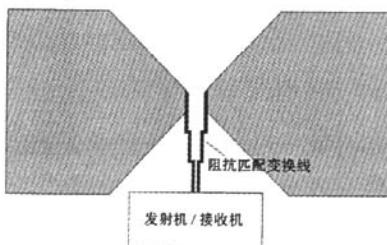


图 7 宽带阻抗匹配传输线

3. 天线性能

3.1 系统组装

实际制作的 400 MHz 蝶形天线尺寸 $l=260$ mm, $w=70$ mm, $\theta_0=60^\circ$; FR4 基板 $\epsilon_r=4.6$, 厚度 $d=1.67$ cm; 所用吸波材料为美国 CUMING 公司生产的 320-1 型微波宽带吸收材料; 屏蔽盒外形三维尺寸约为 280 mm \times 280 mm \times 100 mm。如图 8 中所示。利用此背腔蝶形天线作为收发天线,成功制造了一套工作于 400 MHz 的无线传输超宽带探地雷达系统样机,如图 9 所示。

发射机输入信号源为差值脉冲信号,3 dB 脉宽约为 1.5 ns。此套探地雷达系统由锂电池供电,所采集数据均通过以太网无线传输。

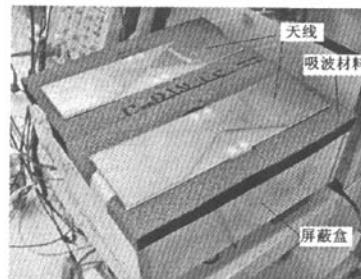


图 8 吸波材料填充式背腔蝶形天线系统



图 9 400 MHz 雷达样机

3.2 仿真分析及路测数据

系统组装完成后对其进行了路测,图 10 是当此系统置于泥土地面上所测得的数据,可以看出接收信号的拖尾被有效抑制,波形平滑。图 11 为此雷达系统经过地下 1.2 m 处埋有直径约 16 cm 混凝土排水管时的路测数据。

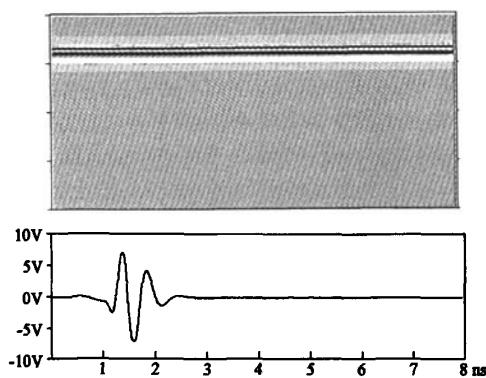


图 10 400 MHz 雷达系统置于土质地面所测数据

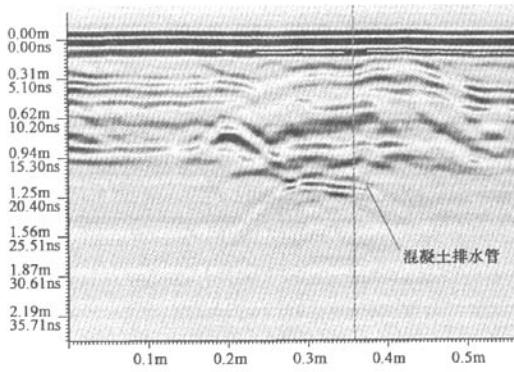


图 11 埋有混凝土排水管的路面实测数据

4. 结论

本文介绍了一种应用于超宽带探地雷达系统的吸波材料加载式背腔蝶形天线的工程化设计方法,并实际完成了天线系统及雷达样机的制作安装及测量。此套雷达系统工作于 400 MHz 中心频率。仿真及路测数据表明,这种吸波材料填充式背腔设计可改善蝶形天线宽带性能,在该天线设计中,背腔的高度设计、吸波材料的填充方式以及阻抗匹配传输线的利用尤为关键。组装完成后的雷达系统性能稳定,效果良好。

参考文献

- [1] DANIELS D J. Surface-penetrating Radar[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [2] TURK A S. Ultra-wideband and TEM horn design for ground penetrating impulse radar systems[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 41 (5): 333-336.
- [3] POZAR D M. *Microwave Engineering*[M]. 2nd edition. New York: Wiley, 1998.
- [4] TURK A S, SEN B. Ultra-wide-band antenna designs for GPR impulse radar systems[C]//2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2003, 2.
- [5] DANIELS D J, GUNTON D J, SCOTT H F. Introduction to subsurface radar[J]. *IEE Proceedings F, Radar and Signal Processing*, 1988, 135(4): 278-320.
- [6] 粟毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] 周游, 潘锦, 聂在平. 时域背腔式领结天线的工程化设计[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(1): 1-3.
- [8] ZHOU You, PAN Jin, NIE Zaiping. Engineering Design of the Transient Back-Cavity Bowtie Antenna [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2005, 34(1): 1-3.
- [9] CHANG D C, LEE J H, LEE S H. The study of wideband bowtie antenna for ITDAMS[C]. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings*, 2004, 54-57.
- [10] 刘立业, 粟毅, 毛钧杰. 具有屏蔽腔和吸波材料的探地雷达天线的 FDTD 分析[J]. 电波科学学报, 2006, 21(3): 422-427.
- [11] LIU Liye, SU Yi, MAO Junjie. FDTD analysis of ground penetrating radar antennas with shields and absorbers[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(3): 422-427.

作者简介

郭晨 (1984—), 女, 江苏人, 2004 年毕业于西安交通大学信息工程专业, 现为西安交通大学电磁场与微波技术专业博士生, 2007 至 2009 年联合培养于美国休斯顿大学浅层探测实验室, 研究方向为超宽带天线及探地雷达技术等。

刘策 (Liu Richard C)(1958—), 男, 新疆人, 美国休斯顿大学终身教授, 休斯顿大学测井实验室和浅层探测实验室主任, 美国道路交通检测领域的知名专家, 美国辐射源应用和置换国家学术委员会会员, 德克萨斯州运输部技术助理, 并担任电子电气工程师协会(IEEE), 环境与地球物理工程协会(EEGS), 核心分析家协会(SCA)以及专业测井分析家协会(SPWLA)资深高级会员, 主要研究领域为石油测井和道路结构及路面智能检测。

张安学 (1972—),男,河南人,副教授。1999年3月在西安交通大学获电磁场与微波技术专业硕士学位;2003年获西安交通大学电磁场与微波技术专业博士学位;2003年至今在西安交通大学信息与通信工程系微波所工作;2004年—2007年在西安交通大学信息与通信系统学科进行博士后研究;2008

~2009年应邀到Auburn大学作Visiting Scientist,主持和参与项目研究十余项,发表论文四十多篇。研究方向涉及探地雷达、超宽带天线及其阵列设计、雷达目标特性与识别、微波器件设计、超材料及其应用等。

Design and implement of an UWB bow-tie antenna with back-cavity for ground penetrating radar

GUO Chen¹ LIU Richard C² ZHANG An-xue¹

(1. Institute of Microwave Communication, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an Shaanxi 710049, China; 2. Subsurface Sensing Lab,
University of Houston, Texas, United States)

Abstract A shielded antenna system applying to ground-coupled GPR system working at 400 MHz center frequency is investigated theoretically and experimentally in this paper. The T/R antennas are bow-tie antenna designed with back-cavity which is employed to overcome those drawbacks caused by omni-directional radiation pattern of bow-tie antenna in H-plane, thus increase the SNR and improve the isolation between T and R antennas as well. The designed antenna is applied to a prototype GPR system. Tested data show the shield antenna works satisfactorily in the GPR system. A practical design guidance of a wide band shielded GPR antenna is being discussed as well.

Key words ultra-wideband (UWB); ground-penetrating radar (GPR); back-cavity; absorber; bow-tie

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>