

研究与试制

一种频带展宽的小型化左手偶极子天线的设计

曹卫平, 郑斯萍, 李思敏, 高 喜

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 左手传输线加载偶极子(简称左手偶极子)可以有效实现天线的小型化,但是这种天线通常带宽窄、效率低。通过采用一种渐变的梯形网络结构代替传统的非渐变的结构形式来改善天线的阻抗特性,设计了四单元的左手偶极子天线,进而拓展了天线的带宽,天线总长度为 0.2λ 。仿真和实物测试结果显示:天线同时工作在-1阶和-3阶谐振模式, $|S_{11}| \leq -10$ dB的阻抗带宽达到6.5%,在工作频段内(571~610 MHz),天线的增益不小于-4.25 dBi,效率大于25%。

关键词: 偶极子天线; 左手传输线; 渐变结构

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1001-2028 (2012) 04-0033-04

Design of a miniaturized and bandwidth-extended dipole antenna with left-handed loading

CAO Weiping, ZHENG Siping, LI Simin, GAO Xi

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi Zhuangzu Zizhiqu, China)

Abstract: Dipole loaded with left-handed transmission lines (LH dipole) can effectively achieve the miniaturization of antennas. However, this type of antennas usually possess the narrow bandwidth and the low radiation efficiency. A four-cells LH dipole antenna with extended bandwidth was designed using a gradual changing ladder network structure to replace traditional non-gradual changing structure. The length of the antenna was 0.2λ . The simulating and measure results show that the antenna simultaneously works at both -1 order and -3 order resonant modes, and the impedance bandwidth for $|S_{11}| \leq -10$ dB achieves 6.5%. Besides, in the working frequency range of 571~610 MHz, the gain of the prepared antenna is greater than -4.25 dBi, and the efficiency is higher than 25%.

Key words: dipole antenna; left-handed transmission line; gradual changing structure

随着无线通信技术的发展,人们对通信系统提出了更高的要求,一方面希望设备体积小,另一方面还要保证系统容量大。天线是通信系统中的关键部件,这就要求天线在缩小尺寸的同时要进一步拓展带宽。然而根据电小天线的 Q 值理论^[1],天线的小型化往往是以牺牲其带宽、效率等电性能为代价的。因此,如何同时实现天线的小型化和宽带化成为了一个棘手的问题。

左手材料是一种新型人工复合材料^[2],其在一定频带内能同时实现负的等效介电常数和负的等效磁导率,这一奇异的电磁特性也可以通过周期性加载

传输线实现,这就是Caloz等^[3]提出的左手传输线理论。左手传输线理论的提出,为实现天线小型化提供了新的方法^[4-5]。文献[6]采用左手传输线加载偶极子的形式实现了天线尺寸缩短至 0.18λ ,但天线带宽仅1.7%,辐射效率也较低。文献[7]虽然提到采用分布式加载的方式可以获得较高的辐射效率,但是这也只限于很小的带宽内。

笔者提出一种渐变的梯形左手传输线结构代替原有的非渐变结构形式,设计了四单元的左手偶极子天线。与同类型天线相比,在保证天线方向图特性和辐射效率满足要求的同时,该天线获得了较宽

收稿日期: 2012-01-29 通讯作者: 曹卫平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61071018); 广西无线宽带通讯与信号处理重点实验室主任基金资助项目(No. 11110)

作者简介: 曹卫平(1971-),男,湖南南县人,教授,主要从事天线、微波电路、左手材料等研究, E-mail: weipinge@163.com;

郑斯萍(1987-),女,广西南宁人,研究生,研究方向为左手材料与天线, E-mail: zheng_siping@126.com。

网络出版时间: 2012-03-26 10:08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1241.TN.20120326.1008.004.html>

的工作带宽。

1 左手偶极子天线工作原理

左手偶极子天线由一段终端开路的左手传输线构成,如图1所示。等效的左手传输线是在一对平行双导线上加载 LC 元件而构成的一个周期性阶梯网络,每个周期单元包含两个串联电容和一个并联电感。天线的馈电端口与电容在阶梯网络的同一侧,两平行导线上的电流 I_1 和 I_2 反相不等幅,因此能够向空间辐射能量^[6]。

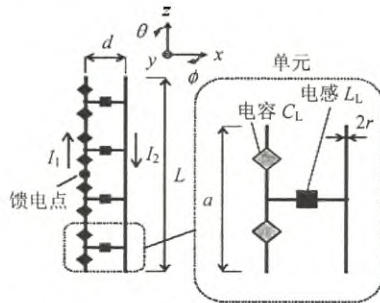


图1 左手偶极子天线结构示意图

Fig.1 Structure sketch of the left-handed dipole antenna

由于传输线本身存在寄生效应,该结构呈现复合左/右手(CRLH)传输线的特性。图2给出了周期单元的无耗等效电路模型, a 是周期单元的物理长度, $\Delta\theta$ 是周期单元的电长度。加载的电容 C_L 和电感 L_L 构成左手传输线部分,导线本身寄生的串联电感 L_R 和并联电容 C_R 则为右手传输线部分。

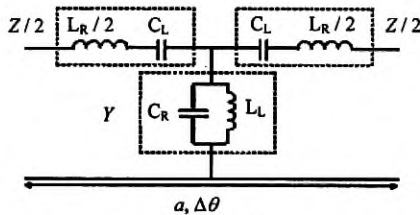


图2 周期单元的无耗等效电路模型

Fig.2 The equivalent circuit model of the lossless unit cell

根据 Bloch-Floquet 定理,周期单元的色散关系可表示为^[8]:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{a} \cos^{-1} \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) \\ = \frac{1}{a} \cos^{-1} \left\{ 1 - \left[\omega^2 L_R C_R + \frac{2}{\omega^2 L_L C_L} - \left(\frac{L_R}{L_L} + \frac{2C_R}{C_L} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: β 表示相位常数; ω 为角频率; Z 和 Y 分别为单元模型的阻抗和导纳。相应的色散曲线如图3所示,CRLH 传输线在低频端呈现左手传输线特性,在高频端则呈现右手传输特性。

左手偶极子天线的谐振频率与其电长度满足关系式:

$$\beta(\omega)L = n\pi \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

式中: L 是天线的总长度; n 表示谐振模式。图3直观地描述了各阶谐振频率与相位常数的关系。

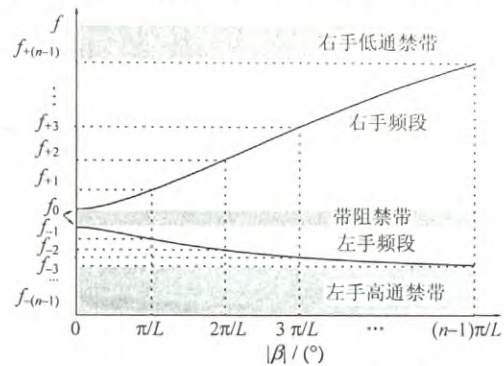


图3 复合左/右手传输线的色散曲线

Fig.3 Dispersion curves of the CRLH TL

传统偶极子天线只能工作在正数阶模式,模式越高,谐振频率也越高;而左手偶极子天线则可以工作在负数阶模式,并且模式 $|n|$ 越高,谐振频率越低,在不改变天线长度的前提下降低了工作频率。另外,天线的谐振频率主要由 C_L 和 L_L 的值决定,因此,左手偶极子能够有效实现天线小型化。

2 左手偶极子天线的宽带化设计与分析

在振子天线的宽带化设计中,经常使天线的两臂间距与振子直径之比为常数,以保证天线沿线各点的特性阻抗不变,从而当天线无限长时,其输入阻抗等于特性阻抗,天线为宽带行波天线^[9]。结构渐变的双锥天线和三角形偶极天线正是基于这个原理而设计的。当天线的锥角(或张角)足够大时,天线具有良好的宽频带特性;当角度较小时,天线不具备宽带特性,但其阻抗特性可以在一定程度上得到改善。笔者基于这一原理提出了一种渐变的梯形左手传输线结构,设计了四单元渐变式的左手偶极子天线,结构如图4所示。

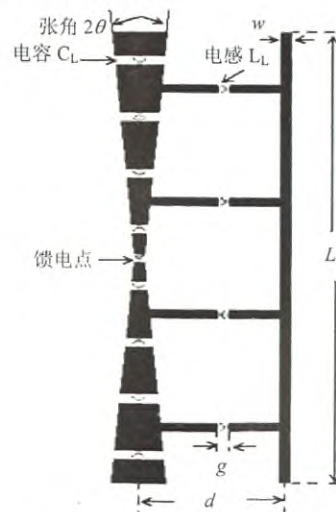


图4 渐变式左手偶极子天线结构

Fig.4 Configuration of the gradual changing LH dipole antenna

天线印制在 RF4 介质板上（相对介电常数：4.4；厚度：1 mm；损耗角正切：0.02）。阶梯网络结构参数如下：天线总长 $L=104$ mm，周期单元长度 $a=26$ mm，导线间距 $d=28$ mm，集总元件的封装长度 $g=2$ mm，导线 2 及加载电感的连接线宽度 $w=2$ mm，加载电容的导线 1 从馈电点到终端逐渐变宽，张角为 2θ 。

对偶极子天线而言，奇数模为谐振模式，偶数模则为反谐振模式，因此四单元的左手偶极子天线仅存在 $n=-1$ 和 $n=-3$ 两个负数阶模式。两个模式的工作频率以及模式之间的频率间距主要由 C_L 和 L_L 的值决定，通过调节 C_L 和 L_L 的值，缩小两个模式之间的频率间距，从而两个谐振点耦合成一个通带，天线可获得一个较宽的工作频带。但由于天线的输入阻抗受天线结构和 C_L 、 L_L 值的影响，单独调节 C_L 和 L_L 的值难以满足宽带匹配条件。

本设计中导线 1 采用渐变线的形式，通过调节渐变线的张角 2θ ，改善天线的阻抗特性以满足匹配条件。图 5 显示了加载元件的值为 $C_L=0.94$ pF 和 $L_L=10$ nH，渐变线的张角 2θ 变化时，天线的输入阻抗随频率变化的情况。从图 5 中可以看到，在 550~650 MHz，当 $2\theta=0^\circ$ （即导线 1 没有渐变）时，天线输入阻抗的实部和虚部变化较为陡峭。随着 2θ 逐渐增大，天线输入阻抗实部随频率变化的曲线逐渐变得平坦，并且其值在 50 Ω 附近，输入阻抗的虚部随着频率变化的曲线也逐渐变得平坦，当 2θ 变化较小时，电抗值在 0 Ω 附近；但随着 2θ 继续增大，天线容抗值将变大。

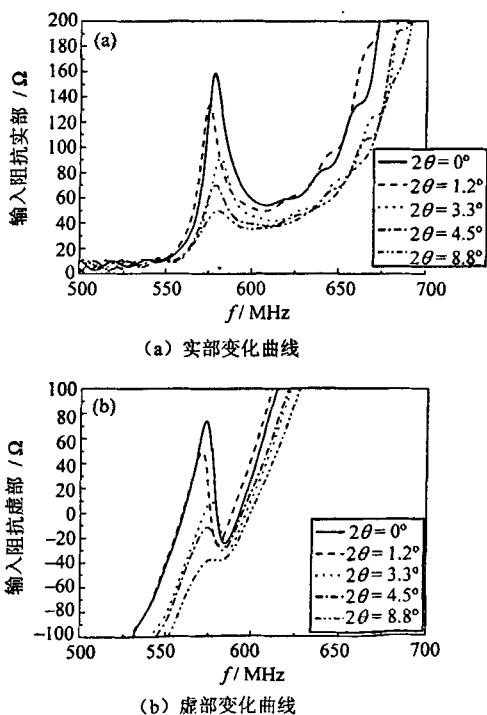


图5 天线输入阻抗随张角的变化曲线

Fig.5 Input impedance change curves of the antenna with the opening angle

3 仿真与测试结果

利用电磁仿真软件 CST 进行分析，在天线的方向图特性、辐射效率和增益满足一定要求的前提下，优化获得较宽的带宽，优化后取渐变线的张角 $2\theta=3.36^\circ$ 。仿真和测试的反射系数曲线如图 6 所示，天线同时工作在 $n=-1$ 和 $n=-3$ 两个模式，中心频率为 590 MHz，满足 $|S_{11}| \leq -10$ dB 的阻抗带宽达到 6.5%。

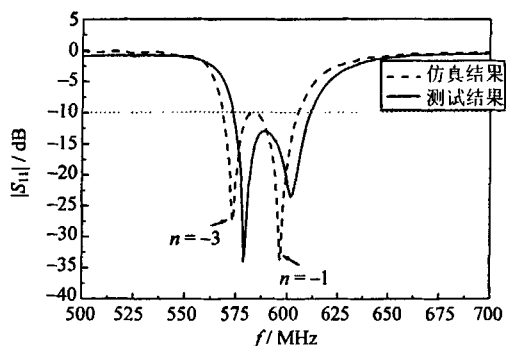


图6 反射系数的仿真与测试结果

Fig.6 The simulated and measured results of the reflection coefficient

天线具有良好的垂直极化特性，图 7 给出了 $f_{n=-1}=596$ MHz 和 $f_{n=-3}=573$ MHz 时天线二维方向图的仿真结果。天线的方向性系数为 1.8 dBi，实测增益和效率随着频率变化情况如图 8 所示。由图 8 可见，天线在工作频段（571~610 MHz）内增益大于 -4.25 dBi，效率 25% 以上。天线在高频点处增益和效率相对较高，在低频点处则略低。这一点与传统的偶极子天线相似，该天线沿线的和电流（ I_1 和 I_2 的矢量和）呈驻波分布，在 $n=-1$ 模式，沿线分布的和电流相位一致，辐射效率较高，而在 $n=-3$ 模式，沿线分布的和电流存在反相电流，一定程度上降低了天线的辐射效率，导致天线的增益较低。

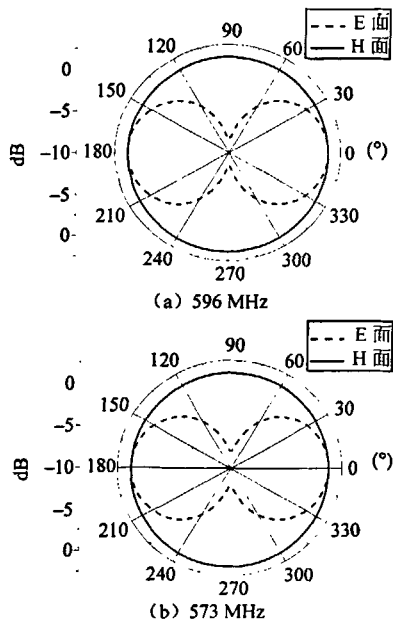


图7 天线二维方向图仿真结果

Fig.7 Simulating results of two-dimensional radiation patterns of the antenna

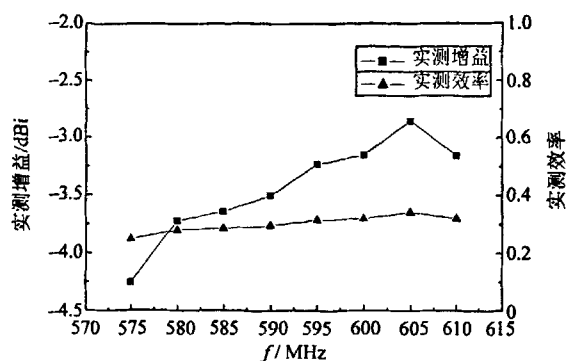


图8 天线的实测增益和效率

Fig.8 The measure gain and efficiency of the antenna

4 结论

设计了一种基于渐变式梯形左手传输线结构的偶极子天线，天线同时工作在两个负数阶谐振模式。渐变式的结构有效地改善了天线的阻抗特性，与同类型天线相比，该天线在实现小型化的同时具有较宽的工作带宽。由于采用集总参数加载的方式，天线的效率较低，可通过采用分布式加载的方式提高

天线的辐射效率。

参考文献：

- [1] CHU L J. Physical limitations on omni-directional antennas [J]. J Appl Phys, 1948, 19: 1163-1175.
- [2] VESELAGO G V. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Phys Uspekhi-Ussr, 1968, 10: 509-514.
- [3] CALOZ C, ITOH T. Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications [M]. Hoboken, USA: Wiley, 2006.
- [4] LIU L, CALOZ C, ITOH T. Dominant mode leaky-wave antenna with backfire- to- endfire scanning capability [J]. Electron Lett, 2002, 38(23): 1414-1416.
- [5] IIZUKA H, HALL P S. A left-handed dipole concept [J]. Proc Int Workshop Antenna Tech, 2006(30): 396-399.
- [6] IIZUKA H, HALL P S, BORJA A L. Dipole antenna with left-handed loading [J]. IEEE Antenna Wireless Propagate Lett, 2006, 5(6): 483-485.
- [7] LIU Q, HALL P S, BORJA A L. Efficiency of electrically small dipole antennas loaded with left-handed transmission lines [J]. IEEE Trans Antenna Propagate Lett, 2009, 57(10): 3009-3017.
- [8] CALOZ C, SANADA A, ITOH T. A novel composite right-/left handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2004, 52(3): 980-992.
- [9] 王元坤, 李玉权. 线天线的宽频带技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.

(编辑: 陈渝生)

新书信息

《有机介质电容器选集》内容简介

该选集包含专题论文篇、已获得的专利和未申请的专利资料篇、重要试验篇和“有机介质电容器设计资料”篇等四部分，共计专题论文136篇，共523页。

其中论文篇包含《聚苯硫醚塑料薄膜及其电容器》、《MKV 换流用功率电子电容器》、《聚丙烯及电容器用聚丙烯薄膜》、《冲击大电流技术中高压脉冲电容器的设计技术》等。其中《低电感筒要设计》、《电容器所能承受的脉冲电压斜率 dv/dt 》是作者经过二十多年独立研究，根据冲击大电流技术中的有关参数计算公式，从理论上推导出有机介质金属化、箔式螺旋卷绕形电容器的 dv/dt 与电容器芯子（元件）的电极、介质、结构参数和性能参数直接的关系（其他电容器也同理），弥补了电容器理论上在电容器所能承受的脉冲电压斜率 dv/dt 的空缺。《高压变频交流复合介质集合式电容器》、《干式高压金属化薄膜电容器》、《航空中频电源金属化聚丙烯交流滤波电容器》、《高比能高压金属化脉冲电容器》、《解析气体放电的巴申曲线》、《空调用电容器加速耐久性试验方案的选择和确定》、《电容器交流声产生的机理及其影响因素分析》、《电容器的200倍峰值额定电流放电和短路放电的充放电电路分析、交流充放电耐久性试验的电路分析和试验》等，对金属化电容器的设计、工艺、质量有所启发和帮助，论文专题题目40篇。

“高频电容器技术”直接水冷油浸或间接水冷干式结构是近年来又一个热门难点，然而本书中有多篇题目与此有关。例如：RWF-S、RFM-S型电热电容器；CCH2聚丙烯介质电容器；高频谐振电容器设计理论与技术基础；部分国内外脉冲电容器 dv/dt ，ESR，ESL，Ip，Irms参数；电容器的损耗角正切与电容量、测试频率、等效串联电阻的关系与计算；电容器的无功功率；高频电容器的一些重要性能参数与关系；简要介绍了该类电容器的设计技术要点以及有关高频谐振、脉冲、吸收保护、滤波、电热电容器的动态与信息。

专利篇中有“金属化聚丙烯逆变换向电容器”和“低噪声系列金属化聚丙烯交流电容器”专利；“高压变频交流纸膜复合介质电容器”和“无电晕高压变频交流功率电子电容器”专利申请资料等专题论文4篇。

试验篇中有关于BCMJ类、CBB类电容器的200倍峰值额定电流的充放电电路试验、短路放电试验的电路试验、交流充放电耐久性试验的电路试验、微波炉用电容器结构和工艺试验、交流噪声的工艺试验、新旧结构的工艺、性能、试验对比系列试验、电容器试样PDIV、PDEV测试、中频交流滤波电容器测试试验、交流电动机用电容器的性能评价表，专题题目14篇。

“设计资料”篇中，包括有机电容器（电力或电子电容器、箔式或金属化电容器、有感或无感电容器和云母纸电容器）设计与计算公式；介质、电极材料技术数据资料；电极与介质、设计与工艺技术资料；电容器应用、检测的技术；电容器动态与应用(RLCDT组件)；《技术词典》与《名词术语》摘编等六个部分，专题题目78篇。

著者系原715厂高级工程师李家寿，长期从事有机介质电容器的设计、工艺和应用研究，在长期技术实践中积累了丰富的经验。特以《选集》形式提供了对产品的设计、工艺、使用所遇到的难点、热点问题的分析和处理方法，阐述了著者的论述和观点；也包括著者学习中收集整理国内外电容器重要的技术数据和值得学习、掌握的文献资料，以及所经历过的重要的试验范例，可供同行参阅，初学者或学习班可作为学习教材。

《有机介质电容器选集》定购单（定购时电传给联系单位）

定购单位名称：		地址：		联系人及电话：	
定购单位邮编：		地址：		联系人及电话：	
定购数量：	(本)	定价【注】：¥	元/本 (含运费)	共计金额(大写)：	仟 佰 拾元整
联系单位：电子元件与材料杂志社		邮编：610051	地址：四川省成都市一环路东二段8号宏明商厦702室		
联系单位开户行：中国工商银行成都市沙河支行营业室		账号：4402 2110 0900 6993 354			
联系人：朱蓓		电话：(028) 8439 9669	传真：(028) 6613 0269	E-mail: zhubei5148@163.net	

注：该《选集》专业性强，技术含量较高。是有机介质电容器设计、工艺制造内部技术资料，是一本结合产品实际和应用的综合性技术工具书。因业内的从业单位和个人不多，印数很少，成本高。余量不多，欲购从速。该书单位定购：代售单价：（开普通发票）单价：1本：450元/本；2本：400元/本；≥3本：350元/本；（书款划拨到指定账户后，请发传真及电话联系，我们将及时发货。）

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),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>