

# 单个互补金属开口谐振环双陷波超宽带天线

孙荣辉,高卫东,刘汉,李乐,沈旭  
(解放军电子工程学院,安徽合肥 230037)

**摘要:**针对超宽带系统易受窄带信号干扰的问题,提出基于互补金属开口谐振环实现的双陷波燕尾形平面超宽带天线。与以往的双陷波超宽带天线相比,该方法仅用单个互补金属开口谐振环同样实现了燕尾形超宽带天线的双陷波特性,简化了设计的复杂性,易于加工。对所设计的超宽带天线进行了制作和测量,实测结果与仿真结果吻合较好。

**关键词:**超宽带天线;双陷波特性;互补金属开口谐振环;燕尾形

**中图分类号:**TN823 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-1194(2011)05-0015-05

## Dual Band-notched Ultra-wideband Antenna with Single Complementary Split Ring Resonator

SUN Ronghui, GAO Weidong, LIU Han, LI Le, SHEN Xu  
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** A swallow-tailed planar ultra-wideband antenna with dual band-notched characteristics realized by complementary split-ring resonator(CSRR) was proposed for that UWB system was liable to be interfered with the narrow-band signals. Compared with the antenna reported, this method used only a single CSRR instead of two of which and realized the dual band-notched characteristics of the swallow-tailed UWB antenna, which simplified the complexity of the design and easy to be fabricated. The proposed antenna was fabricated and measured, and the measuring result was in good agreement with the simulation results.

**Key words:** ultra-wideband antenna; dual band-notched characteristics; complementary split ring resonator; swallow-tailed shape

## 0 引言

自从美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)于2002年将3.1~10.6 GHz频段划归为超宽带(Ultra-wideband, UWB)的民用频段后<sup>[1]</sup>,超宽带通信系统的设计和应用成为无线通信领域激烈竞争焦点。作为超宽带通信系统的重要组成部分,新型超宽带天线设计成为近年来研究的热点<sup>[2]</sup>。但考虑到超宽带通信系统的工作频段内还存在诸如IEEE802.11a无线局域网(WLAN, 5.15~5.35 GHz, 5.725~5.825 GHz)、IEEE802.16全球微波互联网络(WiMAX, 3.4~3.6 GHz)和C波段卫星通信系统(3.7~4.2 GHz)等其他通信系统,为了抑

制超宽带天线与窄带信号间潜在的干扰,一种简单而有效的方法就是使超宽带天线在潜在干扰频段内具有陷波功能。因此,具有陷波功能的超宽带天线已经成为近年来的一个热门研究课题<sup>[3-5]</sup>。

基于以上研究背景,可利用互补金属开口谐振环(Complementary split-ring resonator, CSRR)<sup>[6]</sup>的阻带特性在超宽带天线的潜在干扰频段内产生陷波。经研究发现已经有学者<sup>[7-8]</sup>在这方面做了一些工作,但是文献[7-8]中单个互补金属开口谐振环只能实现单陷波功能,要想增加陷波频段,只能通过增加互补金属开口谐振环个数的方法来实现,这就增加了设计的复杂度。本文提出了一种单个互补金属开口谐振环的双陷波超宽带天线,并通过实验证

\* 收稿日期:2011-06-10 修回日期:2011-08-02

作者简介:孙荣辉(1987—),男,河南新乡人,硕士研究生,研究方向:具有陷波特性的超宽带微带天线与滤波器的理论研究与设计。E-mail:tk-sunronghui@163.com。

明了该方法的正确性。

## 1 金属开口谐振环

金属开口谐振环(Split-ring resonator, SRR)<sup>[9]</sup>由英国科学家 Pendry 等人在研究左手材料的过程中首次提出,SRR 是由一对开口方向相反的同心金属环组成,CSRR 是其互补结构,由一对开口方向相反的介质缝隙组成,即通过在金属介质上刻蚀 SRR 得到,图 1 为 SRR 和 CSRR 的结构示意图。CSRR 具有很好的品质因数,单个 CSRR 即可在其谐振频率附近产生陡峭的阻带,具有结构简单、尺寸容易控制的优点。

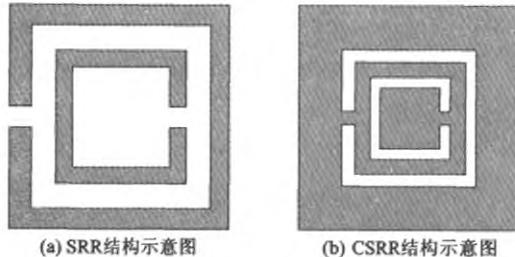


图 1 SRR 和 CSRR 的结构示意图

Fig. 1 Schematic representation of SRR and CSRR

文献[7]中,作者通过在天线的辐射贴片上刻蚀单个 CSRR 的方法,实现了在 WLAN 频段内的陷波功能,但该天线只具有单陷波功能;在文献[8]中,作者进一步研究了 CSRR 阻带特性,通过引入两个 CSRR 的方法,使得天线在 3.65 GHz 和 5.75 GHz 具有双陷波功能,但所需考虑的结构参数较多,增加了设计的复杂性,且两者本质上是一致的,即单个 CSRR 只能实现单陷波功能。本人通过研究和实验发现,单个 CSRR 也能实现双陷波功能,并设计了一种单个互补金属开口谐振环的双陷波超宽带天线。

## 2 单个互补金属开口谐振环双陷波超宽带天线

本文以一种燕尾形平面超宽带天线为载体,通过在其辐射贴片上加入单个 CSRR 结构,设计了一种单个互补金属开口谐振环的双陷波超宽带天线。所谓燕尾形<sup>[10-13]</sup>,顾名思义,实际上是在一个矩形上裁剪出一个半(椭)圆,然后将裁出的半(椭)圆移至

被裁矩形的下方,并与之合并而生成的一种新的形状。燕尾形的主要特点是:在与矩形面积相同的情况下具有(椭)圆形渐变性结构。采用渐变性结构使得天线可以从一个频率谐振模式平缓地过渡到另一个频率谐振模式,确保了天线在较宽的频带范围内获得良好的阻抗匹配特性<sup>[14]</sup>。本文将天线的辐射贴片设计为圆形渐变性结构,保证了它在较宽的频段范围内具有良好的阻抗匹配特性。仿真结果表明:此种采用圆形渐变性结构的燕尾形超宽带天线在 2~14 GHz 的频段范围内满足电压驻波比小于 2 的条件,符合美国联邦通信委员会对超宽带通信系统规定的标准<sup>[1]</sup>。

图 2 是本文所设计的单个互补金属开口谐振环双陷波超宽带天线的结构示意图,具体尺寸参数如表 1 所示。该天线制作在相对介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ 、厚度  $H = 1 \text{ mm}$ 、损耗正切  $\tan \delta = 0.02$  的聚四氟乙烯基板上,基板尺寸为  $40.9 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$ 。天线末端焊接 SMA 接头,并连接同轴电缆进行馈电。

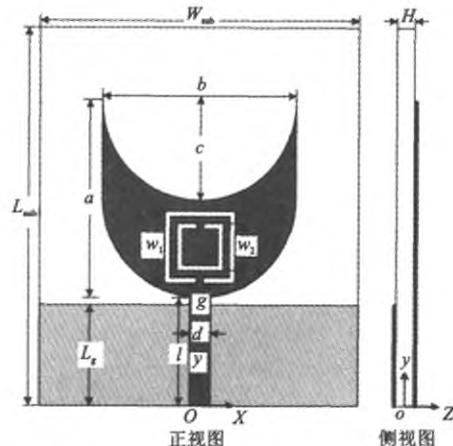


图 2 单个互补金属开口谐振环双陷波超宽带天线的结构示意图

Fig. 2 The schematic diagram of dual band-notched UWB antenna with one CSRR

表 1 天线结构中的尺寸参数

Tab. 1 The parameters size in the proposed

	antenna structure/mm							mm
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>g</i>	<i>L<sub>g</sub></i>	<i>l</i>	<i>W<sub>1</sub></i>	<i>W<sub>2</sub></i>
21	10.5	10.5	2.7	0.7	12.9	13.1	7.6	6

为了实现该燕尾形超宽带天线的双陷波特性,文献[6—7]的方法需在其辐射贴片上加入两个 CSRR 结构,本文设计的是一种单个互补金属开口谐振环双陷波超宽带天线。利用电磁仿真软件 HFSS

10.0 对天线进行仿真计算,得到陷波前后该天线的回波损耗对比如图 3 所示。通过对加入 CSRR 结构前后天线回波损耗的对比可以发现,CSRR 结构的引入使得该天线在 3.4 GHz 和 5.75 GHz 两个频段内具有明显的双陷波特性。

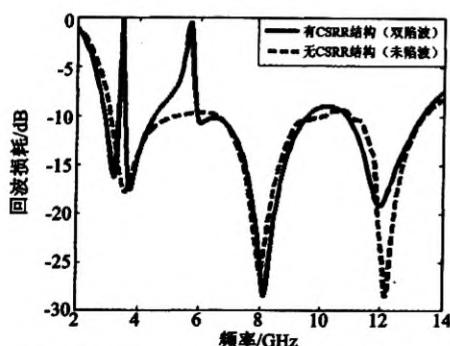


图 3 燕尾形超宽带天线陷波前后的回波损耗比较

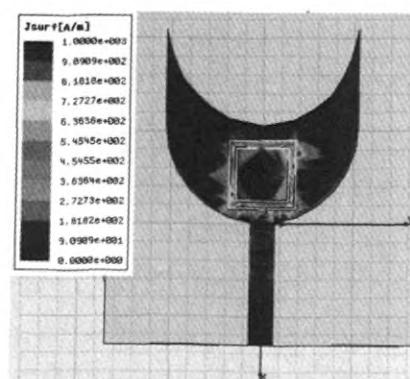
Fig. 3 Return loss comparison of the swallow-tailed shaped UWB antenna with and without CSRR

### 3 仿真分析和实验验证

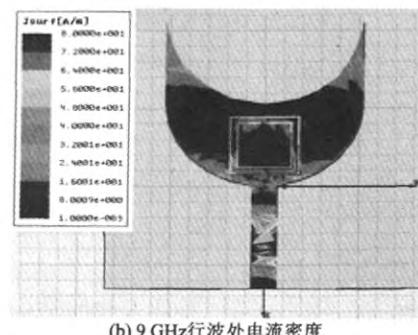
#### 3.1 天线陷波特性的原理分析

为了验证陷波特性的存在,采用电磁场仿真软件 HFSS 10.0 对天线表面电流密度进行计算,选取陷波频段和通带内的频率点,观察其电流密度变化。以 3.45 GHz(驻波)和 9 GHz(行波)为例,仿真结果如图 4 所示。

可以看出,在 3.4 GHz 频率处,天线的表面电流密度集中在 CSRR 开槽附近,并呈现驻波状态;在 9 GHz 频率处,天线表面电流密度分布在馈线和辐射贴片周围,呈现行波状态。驻波状态时 CSRR 附近电流方向相反,天线不能正常辐射。



(a) 3.45 GHz 驻波处电流密度



(b) 9 GHz 行波处电流密度

Fig. 4 Surface current density of the proposed antenna working in travelling and standing wave conditions

图 5 为端口位置不同频率点的阻抗曲线。从图中可以看出,天线在 3.4 GHz 左右,端口处的电阻值和电抗值都近似为零,可以认为天线回路中发生串联谐振,电路呈现短路状态;在 5.75 GHz 左右,天线端口处的电阻值和电抗值达到最大值,此时回路发生并联谐振,电路呈现开路状态。由此可以得到图 6 所示陷波频率处的等效电路<sup>[13]</sup>。

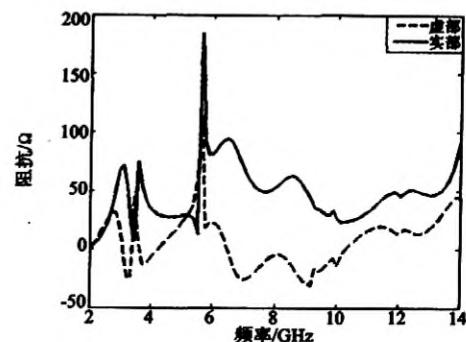


图 5 天线不同频率点的阻抗曲线

Fig. 5 Impedance bight of the proposed antenna in different frequencies

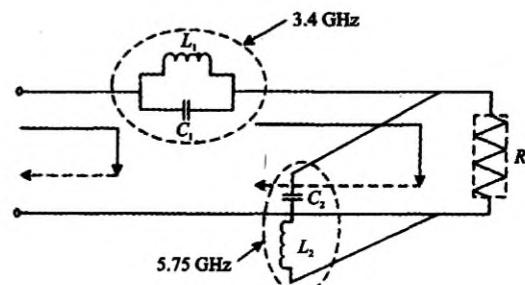


图 6 陷波特性的谐振电路分析

Fig. 6 Resonator circuit analysis of the band-notched characteristic

从图 6 的等效谐振电路中可以看出,当天线工作在陷波频段以外的通频带内时,能够向外辐射能量,可以正常工作。当天线工作在 3.4 GHz 时发生并联谐振,工作在 5.75 GHz 时发生串联谐振,电磁能量分别存储在两个枝节中,不能正常辐射,即具有陷波特性。

### 3.2 实验验证

基于图 2 所示燕尾形超宽带天线的结构示意图以及表 1 中该天线结构中的具体尺寸参数,本文对所设计的引入 CSRR 结构后的双陷波超宽带天线进行了实际加工制作,天线整体尺寸为 40.9 mm × 34 mm × 1 mm,介质基板选用聚四氟乙烯材料,介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ 、损耗正切  $\tan \delta = 0.02$ ,图 7 所示为加工的实物照片。利用 Agilent N5230A 矢量网络分析仪对天线的电压驻波比进行了测量,实测结果与仿真结果的对比如图 8 所示。

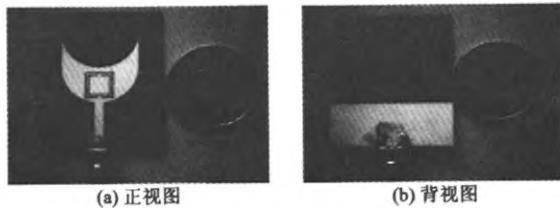


图 7 单个互补金属开口谐振环双陷波超宽带天线的实物照片

Fig. 7 The photograph of fabricated dual band-notched UWB antenna with one CSRR

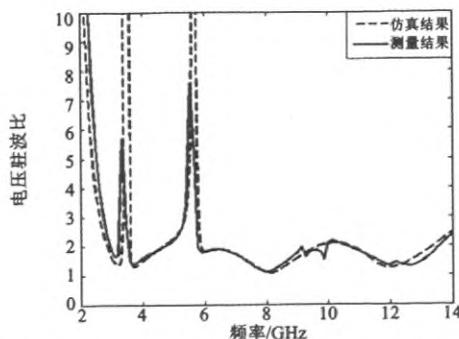


图 8 天线的电压驻波比的仿真结果与实测结果对比

Fig. 8 Comparison of simulated and measured VSWR of the proposed antenna

图 8 表明,天线在 3.4 GHz 和 5.75 GHz 处形成两个陷波频段,频段范围包含了 3.3~3.6 GHz 和 5.15~5.8 GHz,能够有效抑制 WiMAX 和 WLAN 系统的干扰,达到了设计要求。仿真结果和测试结果基本吻合,只是在高频段存在偏差,作者分

析两者存在的误差主要是由 SMA 同轴接头的焊接和天线尺寸的加工误差等因素造成的。

超宽带天线的工作频带很宽,其各项性能指标是与频率有关的函数,在整个频段内无法保持恒定。所以,只采用阻抗带宽来描述超宽带天线的特性是不够的,还必须考察天线是否具有稳定的方向图。选取 3 个频率点对天线远场进行仿真,得到归一化方向图,如图 9 所示。在 3 GHz、7 GHz 和 9 GHz 处对天线远场进行计算,从图 9 中可以看出,天线 E 面 ( $y-z$ ) 方向图与偶极子天线类似,H 面 ( $x-z$ ) 方向图近似为等幅全向。虽然主瓣略有偏差,但远场方向图基本一致,满足超宽带天线整体带宽内辐射一致性的要求。

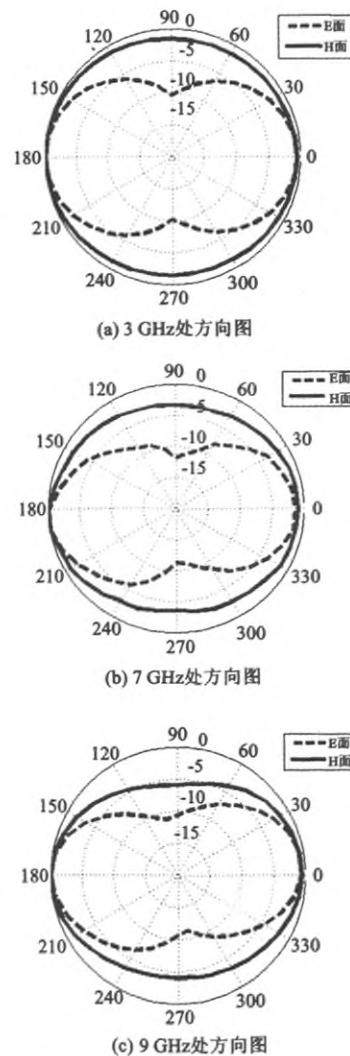


图 9 天线的 E 面和 H 面归一化辐射方向图

Fig. 9 Radiation patterns of the proposed antenna on E-plane and H-plane at 3, 7 and 9 GHz

超宽带天线加入 CSRR 结构陷波前后的增益曲线如图 10 所示。可以看出,工作频段内的增益比陷波频段的增益高 4 dB 以上,天线在整个工作频段内具有较好的增益特性。在陷波频段处增益显著下降,天线几乎不工作,表明天线具有明显的陷波特性,达到了在中心频率 3.4 GHz 和 5.75 GHz 两个频段干扰抑制的效果。

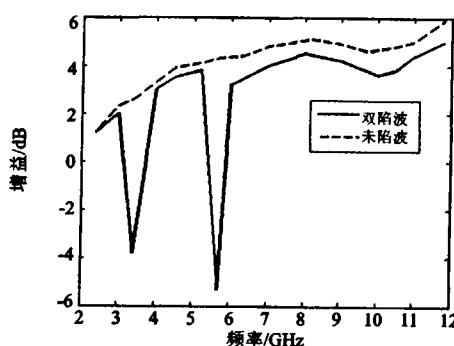


图 10 天线加入 CSRR 结构陷波前后的增益比较曲线

Fig. 10 Gain bight of the proposed antenna with and without CSRR

## 4 结论

本文提出了一种单个互补金属开口谐振环的双陷波超宽带天线。通过在天线的燕尾形辐射贴片上加入单个 CSRR 结构, 分别在 3.3~3.6 GHz 和 5.15~5.8 GHz 两个频段处产生陷波。实验结果表明, 通过在天线的辐射贴片上刻蚀单个 CSRR 结构即可实现其双陷波功能。与相关文献相比, 该方法更加简单易行。该天线体积小、重量轻、易于加工, 在超宽带通信系统中具有很强的实用价值。

## 参 考 文 献:

- [1] Federal Communications Commissions. First Report and Order in the matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-wideband Transmission Systems[R]. USA: FCC, 2002.
- [2] 徐海洋, 张厚, 王剑. 一种平面开槽超宽带天线的设计与研究[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(4): 40-43.  
XU Haiyang, ZHANG Hou, WANG Jian. Design and analysis of a ultra-wideband planar notched antenna[J]. Journal of Detection & Control, 2008, 30(4): 40-43.
- [3] Tao J, Cheng C H, Zhu H B. Compact dual-band slot antenna for WLAN applications[J]. Microwave and Optical Technology Letter, 2007, 49(5): 1 203-1 204.
- [4] Lee H J, Jang Y H, Choi J H. Design of an UWB antenna with band-rejection characteristic[C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium. Czech Republic: 2007: 155-157.
- [5] 刘起坤, 邢锋, 张广求. 一种新型双陷波超宽带天线设计 [J]. 微波学报, 2011, 27(1): 40-43.  
LIU Qikun, XING Feng, ZHANG Guangqiu. Design of novel planar ultra-wideband antenna with dual band-notched characteristics[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(1): 40-43.
- [6] Falcone F, Lopetegi T, Baena J D, et al. Effective negative- $\epsilon$  stop-band microstrip lines based on complementary split-ring resonators[J]. IEEE Microwave Wireless Component Lett, 2004, 14(6): 280-282.
- [7] Kim J, Cho C S, and Lee J W. 5.2 GHz notched ultra-wideband antenna using slot-type SRR[J]. Electron Lett, 2006, 42 (6): 315-316.
- [8] Ding J, Lin Z, and Ying Z. A compact ultra-wideband slot antenna with multiple notch frequency bands[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49 (12): 3 056-3 060.
- [9] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1999, 47(11): 2 075-2 084.
- [10] Zhou Hajjin, Liu Qizhong, Li Jianfeng, et al. A swallow-tailed wideband planar monopole antenna with semi-elliptical base[J]. Journals of Electromagnetic Waves and Application, 2007, 21(9), 1 257-1 264.
- [11] Zhou Hajjin, Liu Qizhong, Sun Baohua, et al. A band-notched swallow-tailed planar monopole antenna for UWB application[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(3): 793-795.
- [12] Zhou Hajjin, Liu Qizhong, Yin Yingzeng, et al. Study of the band-notch function for swallow-tailed planar monopole antennas[J]. Progress In Electromagnetic Research, 2007, 77(1): 55-65.
- [13] 周海进, 孙保华, 李建峰, 等. 具有双陷波特性的超宽带天线设计与研究[J]. 微波学报, 2009, 25(3): 13-17.  
ZHOU Hajjin, SUN Baohua, LI Jianfeng. Design and analysis of a planar ultra-wideband antenna with dual band-notched characteristics[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(3): 13-17.
- [14] Chu Qingxin, Yang Yingying. A compact ultra-wideband antenna with 3.4/5.5 GHz dual band-notched characteristics[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2008, 56(12): 3 637-3 644.

## 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](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>