

通信技术

高阻抗表面对宽带蝶形天线辐射性能的改善

孟宪锟^{1,2} 李超¹ 方广有¹

(中国科学院电子学研究所¹,北京 100190;中国科学院研究生院²,北京 100049)

摘要 研究利用高阻抗表面改善宽带蝶形天线的辐射性能。通过对高阻抗表面的单元结构进行等效电路分析和全波电磁仿真分析,定量表征高阻抗表面的同相反射频带与其单元结构参数的关系。在此基础上,将优化设计的高阻抗表面加载到宽带蝶形天线中,并对加载前后的天线性能进行仿真分析和比较。结果表明:加载高阻抗表面后,蝶形天线方向图后瓣得到明显抑制,13%的相对带宽内天线增益提高了2.7 dB。由于高阻抗表面的同相反射特性,加载时可紧贴于蝶形天线背面,整体结构简单紧凑。研究结果在探地雷达等宽带系统中具有很好的应用前景。

关键词 电磁带隙结构 高阻抗表面 探地雷达 蝶形天线

中图法分类号 TN82; **文献标志码** A

1987年,美国Bell实验室的E. Yablonovitch在讨论如何抑制自发辐射时提出了光子晶体这一概念^[1]。几乎同时,Princeton大学的S. John在研究无序电介质材料中的光子局域现象时也发现了这一现象^[2]。光子晶体最显著的特性就是,当光波在晶体中传播时,某些频率范围的波将不能通过,该频率范围被称作光子带隙(Photonic Band Gap, PBG)。在微波与毫米波频段内的光子晶体又称为电磁带隙(Electromagnetic Band Gap)结构。由于EBG结构能够在一定频带内抑制表面波^[3],可用来改善传统微波器件的性能。在微带电路里EBG结构可以用作带阻滤波器^[3, 4]、高Q值谐振器^[5, 6]等。EBG结构同样为天线领域带来了新的发展,用来改进宽带天线^[7]、拓宽天线频带^[8]、减小阵列天线的互耦^[9]。1999年,美国学者D. Sievenpiper最先提出高阻抗表面(High Impedance Surface, HIS)的概念^[10],他发现在一定的频带内,特定结构EBG的表面呈现高阻抗性能,可看作等效磁导体,它使反射波的电场与入射波同相位。

2010年4月13日收到

第一作者简介:孟宪锟(1985—),硕士研究生,研究方向:人工电磁材料理论与应用。E-mail: mengxiankun07@mails.gucas.ac.cn。

蝶形天线是脉冲型探地雷达中广泛采用的一种宽带天线,具有工作频带宽、易于加工等优点,但是其方向图后瓣过大。为解决这一问题,传统手段是在距离天线四分之一波长处放置金属接地板,但同时大大增大了结构的整体高度。将一种蘑菇型(Mushroom)高阻抗表面应用于蝶形天线,这种高阻抗表面具有可调节的参数多,便于加工制作等优点。结果表明,加载了高阻抗表面的蝶形天线增益明显提高,后向辐射大大削弱,同时降低了天线的整体高度。本文的研究结果表明,高阻抗表面可有效地改善蝶形天线的整体性能。

1 高阻抗表面分析与设计

1.1 高阻抗表面结构

D. Sievenpiper的Mushroom型高阻抗表面是将特定形状的单元结构周期性排列后形成的阵列结构,如图1所示。单元由四部分构成,最下层为金属接地板,中间分别是介质板和金属通孔,最上层是小金属贴片。

1.2 等效电路模型

由于高阻抗表面单元的金属贴片和导电通孔的尺寸远小于其工作波长,可以从集总参数电路角

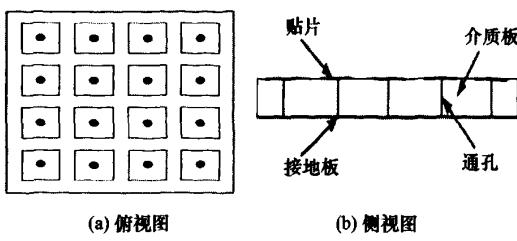


图1 高阻抗表面结构示意图

度分析其电磁特性。当电磁波在高阻抗表面上传播时,会在金属贴片表面产生感应电流,电流沿着金属贴片的表面经由金属通孔到接地板,因此可以等效为电感;另一方面,在金属贴片和接地板之间以及相邻的金属贴片之间会积累电荷,因此可以等效为电容。这样,可以用简单的并联 LC 等效电路来表示,它们的特性就如同 LC 谐振电路,如图 2 所示。

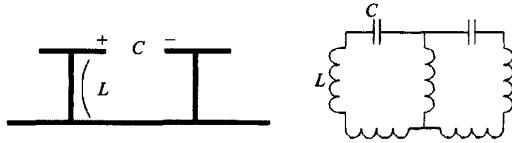


图2 高阻抗表面的集总参数模型

其中,单元电感 L 和单元电容 C 分别为

$$L = \mu_0 \mu_r h \quad (1)$$

$$C = \frac{w \epsilon_0 (1 + \epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{w + g}{g} \right) \quad (2)$$

μ_0 为真空中的磁导率, ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ_r 为介质基板的相对介电常数, w 为正方形金属贴片的边长, g 为相邻金属贴片之间的距离, r 为金属通孔的半径, h 为介质基板的厚度。

根据上面的等效电路模型,高阻抗结构的表面阻抗可近似表达为

$$Z_s = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (3)$$

其谐振频率(也就是高阻抗表面的阻带中心频率)和带宽分别为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\sqrt{L/C}}{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}} \quad (5)$$

在这个谐振频率处,理论上表面阻抗为无穷大,在谐振频率附近,整个结构呈现出高阻抗特性,这也正是“高阻抗表面”名称的由来。

1.3 反射相位特性

高阻抗表面除了具有电磁带隙特性外,还具有同相反射特性,可以等效为人工磁导体。假设高阻抗表面结构位于 xoy 平面,电磁波沿着 $-z$ 方向入射。空间中的场方程可以写为

$$\begin{cases} E(z) = E_i e^{j\kappa z} + E_r e^{-j\kappa z} \\ H(z) = H_i e^{j\kappa z} - H_r e^{-j\kappa z} \end{cases} \quad (6)$$

同时,根据高阻抗表面($z = 0$)处的边界条件

$$Z_s = \left. \frac{E(z)}{H(z)} \right|_{z=0} \quad (7)$$

自由空间中的波阻抗

$$\eta = \frac{E_i(z)}{H_i(z)} = \frac{E_r(z)}{H_r(z)} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (8)$$

从而得到高阻抗表面处的反射相位

$$\varphi = \text{Im} \left\{ \ln \left(\frac{E_r}{E_i} \right) \right\} = \text{Im} \left\{ \ln \left(\frac{Z_s - \eta}{Z_s + \eta} \right) \right\} \quad (9)$$

在高阻抗表面的分析与设计过程中,利用三维电磁场仿真软件充分比较了单元的各种结构参数对其性能的影响,为后面将高阻抗表面与蝶形天线结合提供了指导。在对反射相位特性的分析中,只需建立一个单元(如图 3(a)所示),并在其四周应用周期边界条件,以此来模拟由这些单元周期性排列所组成的阵列的情况。仿真得到的反射相位特性曲线如图 3(b)所示。

从上面的结果可以看出,在远离谐振频率处, $Z_s \leq \eta$, 反射相位近似为 $\pm 180^\circ$, 可以等效为理想电导体;在谐振频率附近, $Z_s \geq \eta$, 反射相位近似为 0° , 可以等效为理想磁导体。由于高阻抗表面的谐振特性,高阻抗表面只能在有限的带宽内实现近似同相反射。通常将反射相位 φ 满足 $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$ 所对应的频率范围定义为高阻抗表面的同相反射带宽。

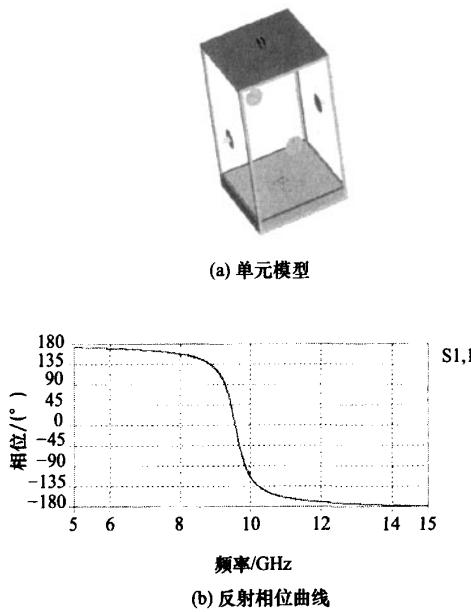


图 3 高阻抗表面单元的仿真结果

1.4 单元结构参数对同相反射带宽的影响

为实现高阻抗表面的快速设计,针对单元结构中的四个主要参数对高阻抗表面同相反射特性的影响进行仿真。

从仿真结果(如图 4 所示)可以看出,随着贴片宽度的增大,零度反射相位所对应的谐振频率下降。更进一步,在谐振频率处的曲线斜率变陡,意味着带宽变窄,这可用集总 LC 模型来解释:较宽的贴片产生的电容较大,因此谐振频率降低,带宽变窄。随着缝隙宽度的逐渐增大,谐振频率上升。可以看出,缝隙宽度的变化所带来的影响与贴片宽度相反。缝隙宽度 g 控制着贴片单元之间的耦合。根据集总参数模型,增大缝隙宽度会降低等效电容,因此使得谐振频率升高。随着介质板厚度的增加,谐振频率降低。根据等效电路模型,当介质板厚度增加时,等效的电感也随之增加,因此谐振频率降低。随着介电常数的增大,谐振频率降低,带宽也随之减小。因此,实际中可以采用高介电常数的基片来减小 EBG 结构单元的尺寸,但是相应的代价就是带宽的减小。

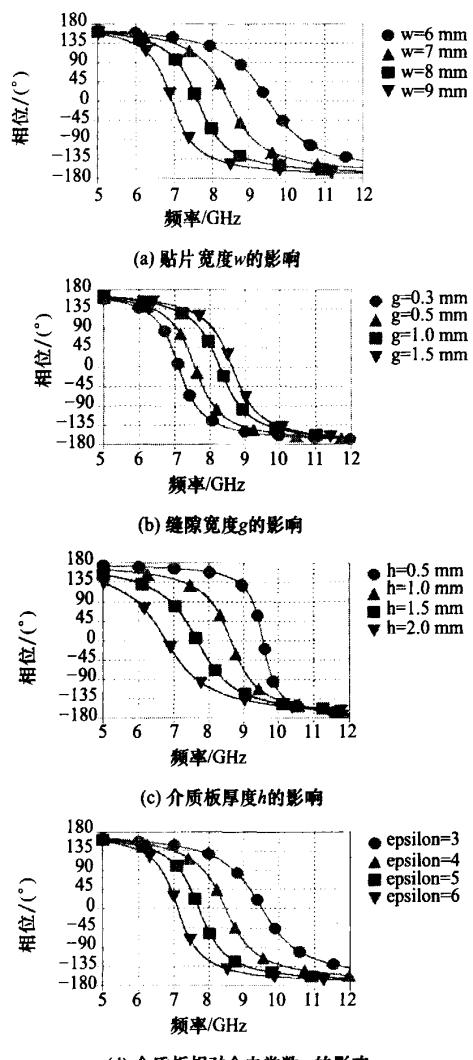


图 4 单元结构参数对反射相位特性影响

2 天线结构

蝶形偶极天线具有工作频带宽、制作简单等优点,广泛应用于脉冲式探地雷达领域。天线结构如图 5(a)所示,介质板采用相对介电常数 $\epsilon_r = 2.65$ 的材料,长度 $L = 60$ mm,宽度 $W = 30$ mm,高度 $H = 2$ mm,在表面上蚀刻蝶形天线。蝶形天线的单臂长度为 $l = 25$ mm,张角(flare angle)为 $\alpha = 60^\circ$ 。利用软件对图 5(a)所示天线进行仿真分析。图 5

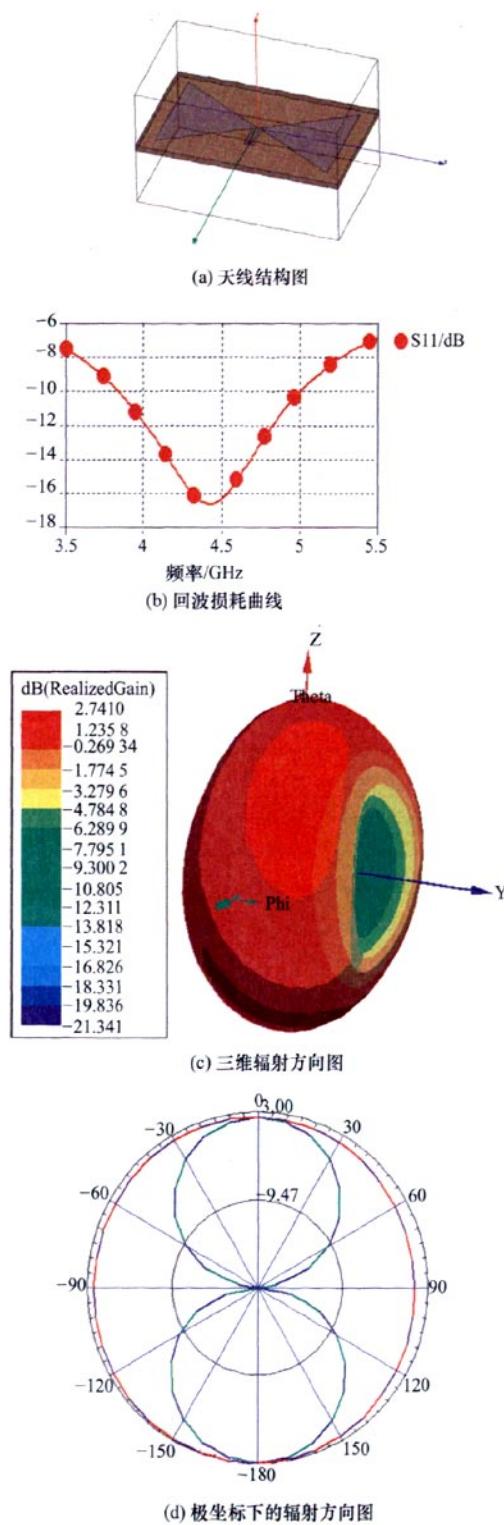


图 5 蝶形天线的仿真结果

(b) 中给出了天线的回波损耗曲线,谐振频率为 4.43 GHz,在回波损耗 $S_{11} < -10$ dB 的条件下得到 26% 的相对带宽 (3.85 – 5.00) GHz。图 4 给出了蝶形天线的仿真结果。

3 高阻抗表面对天线性能的改进

根据镜像原理,对于平行放置于理想电壁上的电流源,其镜像电流源与原电流源方向相反。对于背腔天线,常用金属屏蔽罩作为其背腔,屏蔽其后向辐射,为了不降低天线的前向辐射性能,通常金属屏蔽罩与天线主体之间保持 $\lambda/4$ 的距离。而对于平行放置于理想磁壁之上的电流源,由于其镜像电流源与原电流源方向相同,即使将天线放置于靠近磁壁的位置时,也不会产生抵消的效果,因此可以利用高阻抗表面的这一特性来代替传统背腔天线的金属屏蔽罩,从而实现降低背腔天线剖面的目的。

Mushroom 型高阻抗表面的单元结构简单,根据前面的等效电路模型,可以通过调整其基本结构参数来改变高阻抗表面的同相反射频带,使之能够覆盖前面所讲蝶形天线的工作频段。最终得到优化后的单元结构参数:贴片宽度 $w = 4.4$ mm, 缝隙宽度 $g = 0.3$ mm, 介质板高度 $h = 2.9$ mm, 介质板相对介电常数 $\epsilon_r = 6.0$, 金属通孔半径 $r = 0.3$ mm。仿真得到其同相反射频段为: (3.89 – 5.01) GHz。

为了验证高阻抗表面对降低天线剖面的有效性,将优化后的高阻抗表面与最初的蝶形天线结合,重新进行仿真,仿真结果如图 6 所示。从结果中可以清晰地看到,加载高阻抗表面的蝶形天线后向辐射被大大削弱,天线的增益由原来的 2.74 dB 提高到 5.51 dB。尽管由于高阻抗表面的引入使得天线的带宽受到一定的影响,这一缺陷可以通过在天线的馈电处加入宽带馈电网络等手段进行弥补。

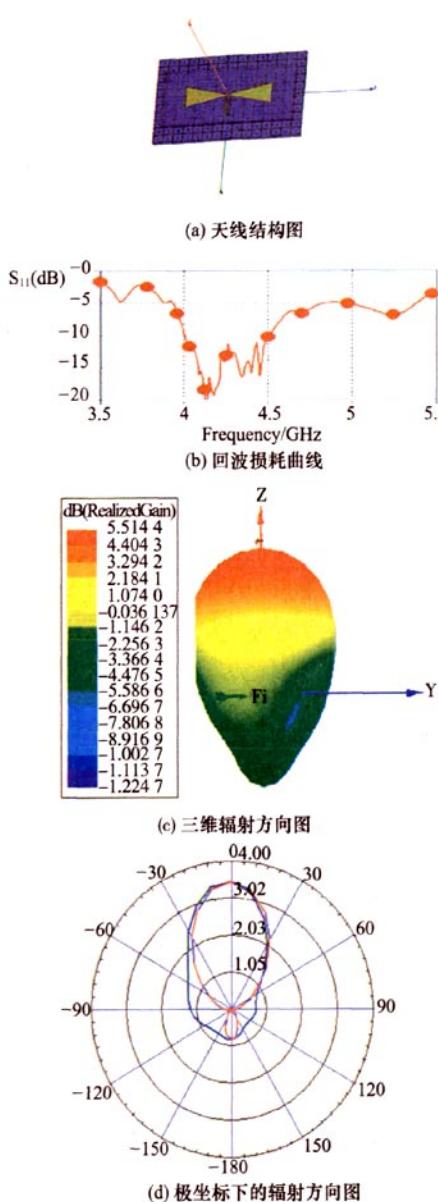


图 6 置于高阻抗表面上的蝶形天线的仿真结果

4 结 论

EBG 结构中的高阻抗表面具有频率带隙特性, 并能在特定频段上表现出同相反射特性, 可以作为天线的衬底材料, 取代传统背腔天线的金属屏蔽罩, 降低天线剖面。在分析高阻抗表面等效电路模

型的基础上, 利用结构参数与等效电路模型的关系对单元结构进行优化, 使之能够与一种探地雷达中常用的蝶形天线相结合。理论分析和仿真结果表明: 引入高阻抗表面后, 蝶形天线的方向图后瓣得到抑制, 天线的增益得到明显提升, 从而实现改善天线辐射性能, 降低天线剖面的目的。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical Review Letters*, 1987;58(20):2059—2062
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, 1987;58(20):2486—2489
- 3 Radisic V, Qian Y. Novel 2—D photonic bandgap structure for microstrip lines. *IEEE Microwave Guided Wave Letters*, 1998;8(2):69—71
- 4 Mbairi F D, Hesselbom H. Microwave bandstop filters using novel artificial periodic substrate electromagnetic band gap structures. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2009;32(2):273—282
- 5 Hsu Hsuan-ju, Hill M J. A duriod-based planar EBG cavity resonator filter with improved quality factor. *IEEE Antennas and Propagation Letters*, 2002;1(2):67—70
- 6 Yun Tae-Yeoul, Chang K. Uniplanar one-dimensional photonic bandgap structures and resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001;49(3):549—553
- 7 Masri T, Rahim M K A, et al. Electromagnetic band gap structure for planar ultra wide band antenna. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2010;24(2—3):229—239
- 8 Elsheikh D N, Elsadek H A, et al. Enhancement of microstrip monopole antenna bandwidth by using EBG structures. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009;8:959—962
- 9 Farahani H S. Mutual coupling reduction in patch antenna arrays using a UC—EBG superstrate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010;9:57—59
- 10 Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R F J, et al. High impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999;47(11):2059—2074

(下转第 5081 页)

Implementation of Flight Data Quick Decoding System

GONG Shu-li, HUANG Sheng-guo

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China)

[Abstract] The decoding analysis of the flight data is an important technical means of monitoring the airplane's condition, diagnosing the failure, analysis the flight quality, and so on. The principle of QAR recording flight data is introduced firstly, then the traditional decoding algorithm and software's defects are analyzed. In view of the parameters type in ARINC717 agreement, a quick decoding algorithm based on dynamic list is proposed. And the software of quick decoding system based on the technology of real-time database is implemented. The new method significantly improved the efficiency of the decoding of flight data, scalability, and it can meet the requirements of real-time fast decoding for flight data's new application.

[Key words] flight data fast decoding algorithm dynamic list decoding software

(上接第 5066 页)

Radiation Pattern Improvement of Wideband Bowtie Antenna Using High Impedance Surface

MENG Xian-kun^{1,2}, LI Chao¹, FANG Guang-you¹

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science¹, Beijing 100190, P. R. China;

Graduate University of Chinese Academy of Sciences², Beijing 100049, P. R. China)

[Abstract] The aim of this paper is to investigate how the performance of a broadband bowtie antenna could be improved by a high impedance surface (HIS). Both the equivalent circuit analysis and the full-wave simulation are performed to quantitatively describe the relationship between the in-phase reflection band and the parameters of HIS structure. Then, a broadband bowtie antenna loaded with an optimized HIS was designed and its performance was simulated and compared with the original antenna without HIS. It's found that, by appropriately loading the HIS, the back lobes of the antenna were obviously reduced, with its gain increased about 2.7 dB over 13% relative bandwidth. By the advantage of the in-phase reflection property, a HIS can be placed exactly at the backside of a bowtie antenna, making the whole structure very simple and compact. The method has potential applications in lots of broadband systems, such as the ground penetrating radars (GPR).

[Key words] electromagnetic band gap high impedance surface ground penetrating radar (GPR) bowtie antenna

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>