

文章编号 1005-0388(2006)06-0879-06

基于一维 EBG 结构的圆波导高增益天线^{*}

李斌 党晓杰 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国防重点实验室, bli@mail.xidian.edu.cn, 陕西 西安 710071)

摘要 提出了一种基于一维电磁带隙(EBG)结构覆层来提高圆波导天线增益的新方法, 利用数值分析方法对 EBG 结构和基于 EBG 结构圆波导高增益天线的电磁特性进行了仿真研究, 并将它们与传统圆波导天线进行了比较。仿真和实验结果表明, 应用这种 EBG 覆层结构可以有效地实现辐射能量的聚集, 从而提高天线的增益, 降低了天线副瓣电平, 有效地改善了天线的辐射特性。

关键词 EBG 结构, 圆波导天线, 高增益

中图分类号 TN821 **文献标识码** A

High gain circular waveguide antenna using 1-D electromagnetic band-gap structure

LI Bin DANG Xiao-jie LIANG Chang-hong

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology,
Xidian Univ, bli@mail.xidian.edu.cn, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract A new method of improving the gain of circular waveguide antenna is presented. The electromagnetic characteristics of EBG and high-gain circular waveguide antenna with 1-D EBG structure are studied by using the numerical simulation method, which are also compared with those of the conventional antenna. The simulation and experimental results show that this method is effective and the EBG structure can realized congregating the radiation energy, so the gain of the antenna is increased, the side lobe level is decreased.

Key words EBG structure, circular waveguide antenna, high gain

1 引言

光子晶体, 又叫光子带隙(Photonic Band-Gap-PBG)^[1]材料, 最初光子带隙结构的研究是在光学领域, 但是这种结构可以通过尺寸缩放关系应用于很宽的频率范围内, 只要合理选择材料的种类。尺寸和周期性结构的点阵参数, 就可制作出带隙位于声波。微波。光波范围内的光子晶体。近几年来, 微波与毫米波领域的 PBG 结构被应用于提高各种天线^[2]微波滤波结构^[3~5]和谐振腔^[6]的性能。因

此, PBG 也称为电磁带隙(Electromagnetic Band-Gap—EBG)。

圆波导口径天线是一种在厘米波段常用的弱方向性天线, 这种天线既可以作为镜面天线或透镜天线的照射器, 也可以作为独立的辐射器, 在现代微波通信中有着广泛的应用。本文将一维 EBG 介质层结构覆层应用于圆波导口径天线, 能有效的有效地实现辐射能量的聚集, 从而提高天线的增益, 降低天线副瓣电平, 改善天线的辐射特性。

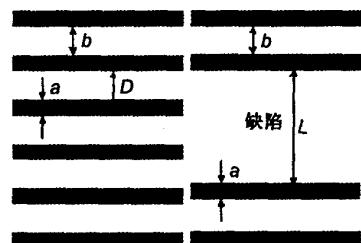
* 收稿日期: 2005-06-21.

基金项目: 国家 973 重大项目基金(No. 00300113)资助

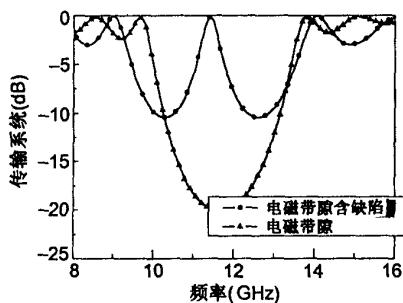
2 一维 EBG 介质层结构特性研究

2.1 一维 EBG 介质层结构传输特性

一维 EBG 介质层结构是在空气中周期地排布一些介电常数不同于空气的介质板单元形成的，该结构可以形成空间波阻抗不连续性，从而阻止某些特定频段的电磁波传输，也可认为这些频段的电磁波被反射了。其结构和传输系数如图 1 所示。



(a) 一维 EBG 介质层和含缺陷结构



(b) 一维 EBG 介质层和含缺陷结构的传输系数

图 1

由图 1 可知由两种不同介质构成的一维 EBG 结构，厚度分别为 a 和 b ，其中 a （介质板厚度）等于 $\lambda/4$ ， λ_g 为电磁波在介质材料中的波长，介质材料介电常数为 ϵ_r ， b （空气层的厚度）等于 $\lambda_0/4$ ， λ_0 为电磁波在空气中的波长，其周期为 $a+b=D$ 。

2.2 一维 EBG 介质层结构缺陷特性

EBG 结构的带隙特性最早被用在实现反射面天线上^[7]，但是在天线领域中，其传输模式更多的受到关注^[8]。当在 EBG 结构中引入一个缺陷时，在带隙范围内就会出现一个很窄的传输通带（即谐振峰）。从能量角度来说，因为 EBG 结构中有一个或多个缺陷，这就使得整体性能被破坏，造成电磁能量局限在缺陷附近，形成一个谐振效应。缺陷结构及传输特性如图 1 所示。

这种 EBG 的缺陷结构存在着物理的对称性，
万方数据

且根据电场分布，在 EBG 的缺陷结构中心处同样存在电场的对称性，再根据镜像原理可知，可以用金属接地板替代镜像面，以简化结构。同时也可在金属接地板处添加激励，形成一维 EBG 谐振天线。

3 EBG 圆波导口径天线的设计与仿真

根据 EBG 结构分析可知，其缺陷谐振的频带较窄，天线仅能在较窄的频段上良好工作，同时结合天线设计的一般过程，本文设计了工作频率为 $f=12$ GHz 圆波导口径天线，其结构如图 2 所示。得其口径 $D=0.8\lambda_0$ ，其中空气中波长 $\lambda_0=25$ mm，即 $D=20$ mm，同轴探针的长度为 $\lambda_0/4=6.25$ mm 波导波长 $L_g=37$ mm，进而可以确定同轴探针距离波导短路板为 $L_g/4=9.25$ mm。这里金属接地板的尺寸为 60 mm×60 mm。

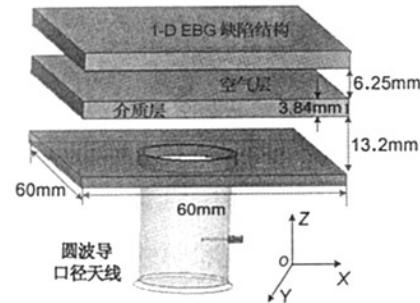


图 2 一维 EBG 结构圆波导口径天线示意图

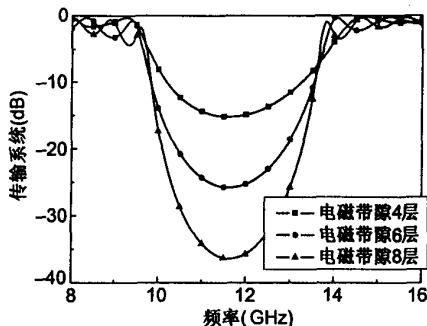
根据上节的分析，EBG 结构中缺陷空间的总长为 $L=26.47$ mm，因此 EBG 缺陷结构应放在接地板上方距离接地板 $L/2=13.2$ mm 处。EBG 缺陷结构中介质板的参数如下：介电常数 $\epsilon_r=2.65$ ，厚度 $h=\lambda_g/4=3.84$ mm，尺寸大小与原天线的接地板大小一致为 60 mm×60 mm。

根据这一方法，分别对 PEC 情况和加载 EBG 结构情况进行了数值仿真分析。

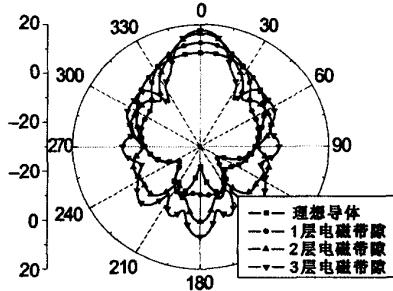
3.1 不同层数的情况

在相同介电常数的情况下，这里以介电常数为 2.65 的介质材料为例，不同单元的数目对 EBG 结构的带隙影响也是不同的。在 EBG 结构单元数目不断增加的情况下，带隙的深度不断加深，对带隙宽度基本没有影响，传输系数的比较如图 3(a) 所示，但其缺陷谐振峰将更加尖锐，从而造成电磁能量局限更加强烈。

将不同层数的 EBG 缺陷结构应用于圆波导口径天线, 其方向图如图 3(b) 所示。



(a) 不同层数的 EBG 结构的传输系数



(b) 不同层数时覆盖 EBG 结构的辐射方向图比较

图 3

从图 3 的仿真结果可以看出在, 随着一维 EBG 结构的单元数目的不断增加其带隙深度也不同程度的增加, 从而可以推断存在缺陷时, 谐振通带越窄且边沿下降斜率越大, 这对圆波导口径天线的辐射波在垂直于 EBG 结构介质板方向的谐振更加明显, 使得天线的前向增益由原来没有 EBG 结构时的 8.44 dB 分别提高到 12.52 dB, 16.34 dB, 17.6 dB, 有效的改善了圆波导口径天线的辐射特性。

理论上, 口径天线的最大方向性系数为 $D_{\max} = 4\pi A/\lambda_0^2$, A 为口径面积, 此模型中 $A = 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 、 $\lambda_0 = c_0/f_0 = 25 \text{ mm}$, 所以可得 $D_{\max} = 18.6 \text{ dB}$, 再根据增益 $G_{\max} = \eta D_{\max}$ 可知, 在极限 $\eta = 1$ 条件下, 最大增益 $G_{\max} = 18.6 \text{ dB}$ 。可以看出在介电常数为 2.65 的 EBG 材料覆盖三层时天线的增益为 17.6 dB, 从而可知具有 EBG 结构覆盖的圆波导口径天线的增益, 已经非常接近具有相同尺寸和工作频率的天线的理论极限。

3.2 不同介电常数的情况

前面论述了在 EBG 结构单元数目不同的情况下, EBG 结构对天线辐射性能的影响。这里, 进一步对不同介电常数的情况进行分析。一维 EBG 结构中介质板的介电常数不同, EBG 结构就会呈现不同的带隙特性。因此, 将此不同结构应用于天线中时, 才会产生不同的效果。这里以天线工作频率在 12 GHz, EBG 缺陷结构以 1 层的介质板为例, 给出不同介电常数对应的传输系数曲线, 如图 4 所示。

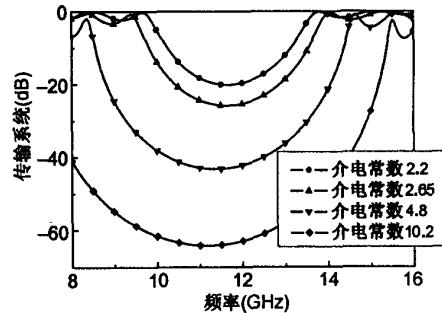


图 4 不同介电常数相同层数的 EBG 结构传输系数

根据仿真结果, 可以看出对于比较大的介电常数的介质层单元构成的 EBG 结构, 其带隙深度和宽度都有不同程度的增加, 这主要是因为各种材料之间的差异增大, 造成电磁场相互耦合增强, 放大了频率带隙特性。也可以认为电磁波在空气中和介质层中的波阻抗在介质层介电常数较大时差异较大, 电磁波在 EBG 结构中的相互反射和干涉的作用更加明显, 假设介质层中的波阻抗与空气层的波阻抗之比为 K , K 值越大, 则带隙宽度越大, 深度越深。

由于不同介电常数所组成的 EBG 结构对带隙有不同的影响, 进而影响到缺陷的能量谐振状态, 使得电磁能量局限有所不同, 所以加载不同的 EBG 缺陷结构对圆波导天线增益也存在着不同的影响, 其数值仿真结果如图 5 所示。

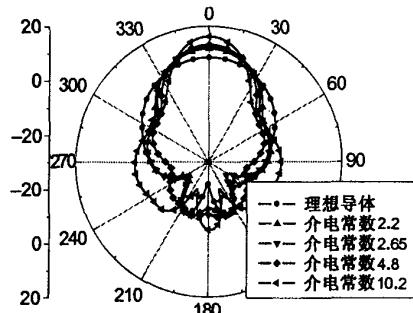


图 5 不同介电常数时覆盖 EBG 结构的辐射方向图

从图 5 的仿真结果可以看出, 圆波导口径天线的辐射波在垂直于 EBG 结构介质板方向上的谐振效应更加明显, 使得天线的前向增益由原来没有 EBG 结构时的 8.44 dB 分别提高到 11.64 dB, 12.52 dB, 13.21 dB, 16.18 dB, 也有效的改善了圆波导口径天线的前向增益。

根据前面口径天线的极限增益计算, 在应用介电常数为 10.2 的介质材料时仅覆盖一层, 也可以非常接近具有相同尺寸和工作频率的天线的理论极限值。因此, 从仿真结果可以看出选用高介电常数的材料进行覆盖对圆波导口径天线增益的提高, 将更加有意义。

4 EBG 圆波导口径天线阵列的设计与仿真

由圆波导口径天线组成的阵列天线, 在通信和雷达领域也有着广泛的应用。传统中为了实现天线的高增益, 一般采用组阵的形式, 这里可以将组阵和光子晶体覆盖技术相结合, 那将进一步提高天线阵列的增益, 进一步对圆波导口径天线阵列的情况进行研究是十分必要的。为了仿真简单, 这里仅以介电常数为 2.65 覆盖一层介质板的情况为例。

4.1 二元天线阵列研究

在二元天线阵列中, 波导口径天线单元的尺寸同上一节相同, 两单元的中心间距 $L=42$ mm, 其介质板的厚度仍为 $h=3.84$ mm, 仅仅是介质尺寸大小与天线相一致。其结构如图 6(a)所示, 仿真结果如图 6(b)所示。

其结构及方向图如下图所示。

4.2 四元天线阵列研究

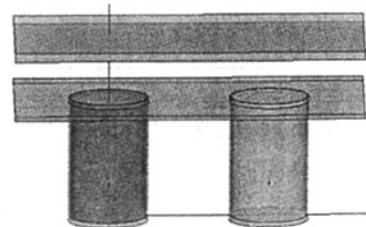
这里主要分析了 1×4 形式和 2×2 形式的两种四元圆波导口径天线阵列, 加载一维 EBG 介质层结构情况, 对比其辐射方向图。

在 1×4 四元天线阵列中, 波导口径天线单元的尺寸不变, 单元的中心间距 $L=42$ mm。其结构如图 7(a)所示。仿真结果如图 7(b)所示。

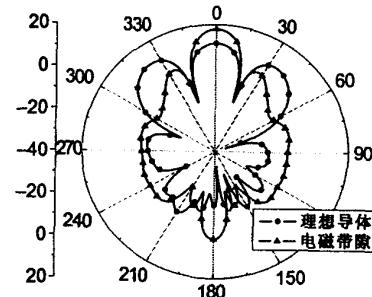
在 2×2 四元天线阵列中, 波导口径天线单元的尺寸不变, 各单元的中心仍为间距 $L=42$ mm。其结构如图 8(a)所示。仿真结果如图 8(b)所示。

从给出二元阵列和四元阵列的仿真辐射方向图对比结果可以看出, 利用一维 EBG 介质层结构加载可以有效提高天线阵列的增益, 这种新型 EBG 结构天线的增益比 PEC 情况下提高了约 7dB 左右, 而且降低了天线阵列的副瓣电平, 从而改善天线阵

列的辐射性能。这对于高增益、低副瓣新型天线的研究有着重要的意义。

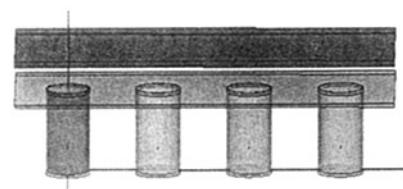


(a) EBG 二元阵天线结构

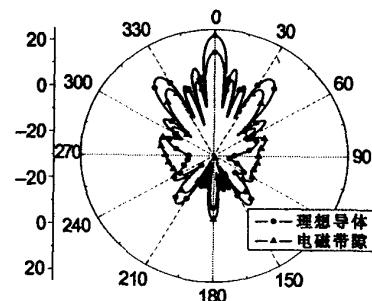


(b) EBG 二元阵天线辐射方向图比较

图 6



(a) EBG 四元(1×4)阵天线结构



(b) EBG 四元(1×4)阵天线辐射方向图比较

图 7

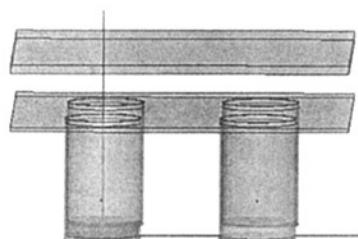
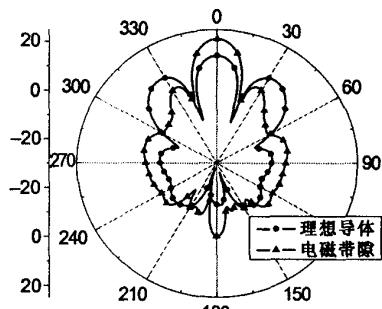
(a) EBG 四元(2×2)阵天线结构(b) EBG 四元(2×2)阵天线辐射方向图比较

图 8

5 实测数据

根据仿真结果, 加工了实际的圆波导口径天线并对其进行了测量, 以验证仿真结论。图 9 为 EBG 结构加载的圆波导口径天线的实物照片, 用远场测量的方法对其辐射方向图进行了实际的测量, 测试频率为 12 GHz。

波导天线的实际测试结果如图 10 所示, 在图 10(a)中可以看出使用介电常数为 2.65 的 EBG 结构进行覆盖使原天线的增益由 -21.9 dB 增加到 -17.6 dB , 使用介电常数为 9.6 的 EBG 结构进行覆盖使原天线的增益由 -21.9 dB 增加到 -15.5 dB 。这与仿真

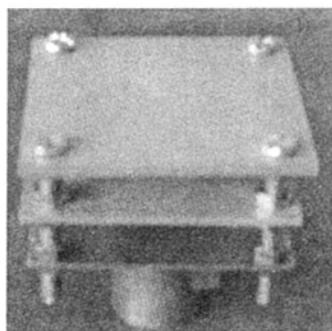
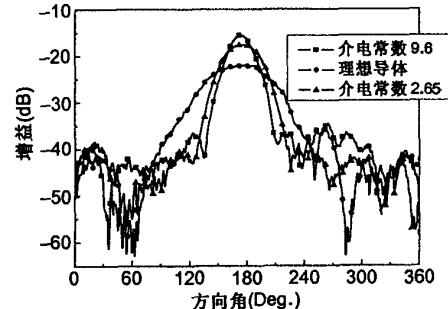


图 9 EBG 结构单圆波导口径天线实物

数值结果吻合良好。

图 10(b), (c) 分别给出了应用两种不同介电常数的 EBG 结构在覆盖不同层数时的方向图测量结果, 可以看出加载 EBG 结构对圆波导口径天线的方向图有明显的改善, 在图 10(c) 中应用介电常数为 9.6 的 EBG 结构进行覆盖时一层与两层的差距不是十分明显, 主要是因为在应用高介电常数材料覆盖时一层已经使天线的增益非常接近具有相同尺寸和工作频率的天线的理论极限值。因此在覆盖两层时没有显著的增加, 不管如何设计在无源的条件



(a) 覆盖不同介电常数的 EBG 结构对比

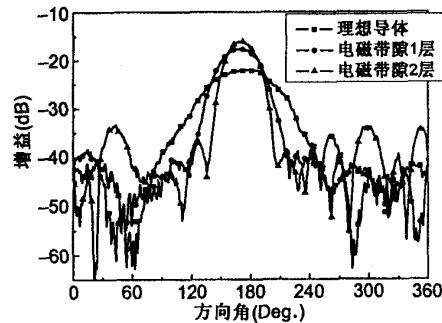
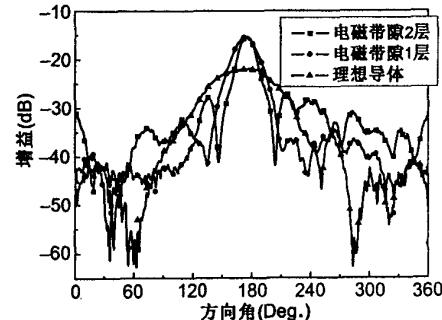
(b) 介电常数为 2.65 的 EBG 结构
不同层数对比(c) 介电常数为 9.6 的 EBG
结构不同层数对比

图 10 圆波导口径天线实测数据

下, 天线不可能完全等于或超过理论极限值, 这与理论分析是一致的。

6 结论

提出了一种采用加载一维 EBG 结构实现高增益圆波导口径天线的新途径, 利用数值仿真方法对一维 EBG 材料的结构特性进行了研究, 详细分析了一维 EBG 结构加载对圆波导口径天线及阵列辐射特性的影响, 仿真结果与实测结果吻合良好, 有力的证明了合理设计加载一维 EBG 材料可以有效提高圆波导天线及其阵列的增益, 改善其辐射特性。

参考文献

- [1] E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20):2059~2062.
- [2] G H Huff, J T Bernhard. Improvements in the performance of microstrip antennas on finite ground planes through ground plane edge serration[J]. IEEE Transactions on microwave and wireless components lett. 2002, 12 (8):308~310.
- [3] K Taesun, S Chulhun. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide Stop-band[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Lett. 2000, 10 (1): 13~15.
- [4] 张友俊, 姬波, 王向前. 光子晶体及其应用[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 320~322.
- [5] 施晓琼, 章文勋, 郑龙根. 二维介质 PBG 结构的工程设计[J]. 电波科学学报, 2002, 17(5): 467~472.
X Q Shi, W X Zhang, L G Zheng. Engineering design of 2-D PBG structure[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(5):467~472.

(上接第 862 页)



田雨波 (1971—), 男(满族), 辽宁人, 2004 年 6 月于南京大学电子科学与工程系毕业, 并获得博士学位, 现为江苏科技大学副教授。研究方向为计算智能应用于电子学和电磁学问题。

- [6] 包秀龙, 章文勋, 李乐伟. 非 Yee 网格的 FDTD 法分析复杂媒质 PBG 结构的带阻特性[J]. 电波科学学报, 2003, 18(4): 353~358.

X L Bao, W X Zhang, L W Li. Analysis on the dispersion characteristics of complex medium PBG structure by using non-Yee grid FDTD method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(4):353~358.

- [7] Marc Thevenot, Cyril Cheype, Alain Reineix, et al.. Directive photonic-bandgap antennas[J]. IEEE Transactions on microwave and techniques 1999, 47(11): 2115~2122.
- [8] C Serier, C Cheype, R Chantalat, et al.. 1-D Photonic bandgap resonator antenna[J]. Microwave and optical technology letters 2001, 29(5): 312~315.



李斌 (1978—), 男, 陕西人, 现为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 主要从事新型电磁材料的特性分析和微波多路耦合器设计工作。



党晓杰 (1981—), 男, 内蒙古人, 现为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 主要从事群理论, EBG 结构理论和微波器件设计等方面工作。



梁昌洪 (1943—), 男, 上海人, 教授, 博士导师, 曾任西安电子科技大学校长, 中国电子学会会士, IEEE Senior member。研究方向包括计算微波, 微波网络理论, 电磁散射与逆散射, 电磁兼容等方面。



钱鉴 (1942—), 男, 江苏人, 南京大学电子科学与工程系教授, 博士生导师, IEEE 会员, CIE 江苏天线与微波专业委员会委员。长期从事微波理论与技术、天线技术及计算电磁学与优化算法的教学和科研工作。目前研究方向为遗传算法用于 RCS 减缩, 微波近场成像的生物医学应用等。

生佳根 (1962—), 男, 江苏人, 江苏科技大学电信学院副教授。

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>