

# 基于复合介质结构的圆波导高增益阵列天线研究

李斌 吴边 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文提出了一种基于复合介质结构覆层来提高圆波导天线阵列增益的新方法, 利用数值分析方法对异向介电结构和基于异向介电结构圆波导高增益天线阵列的电磁特性进行了数值仿真研究, 并将它们与传统圆波导天线阵列进行了比较。结果表明, 应用这种复合介电层结构可以有效地实现辐射能量的聚集, 从而提高了天线阵列的增益, 降低了天线阵列副瓣电平, 有效地改善了天线阵列的辐射特性。

**关键词:** 圆波导天线阵列; 复合介电结构; 高增益

中图分类号: TN821

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0994-04

## A Study on High Gain Circular Waveguide Array Antenna Using Metamaterial Structure

Li Bin Wu Bian Liang Chang-hong

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

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

**Key words:** Circular waveguide antenna arrays; Metamaterial structure; High-gain

### 1 引言

1968年, Veselago<sup>[1]</sup>提出异向介电的概念, 他从Maxwell方程出发, 分析了电磁波在介电常数 $\epsilon$ 与磁导率 $\mu$ 同时为负数时介电材料中的传播状况, 其折射率将变为负值, 并且将表现出不寻常的电磁特性, 如逆多普勒效应(reversed Doppler effect)、逆斯涅尔折射(reversed Snell refraction)、逆契伦可夫辐射(reversed Cerenkov radiation)、平板聚焦和透镜汇聚等奇异现象等。近年来, 这类异向介电结构一直成为国际物理界和电磁学界的研究热点, 其名称也有很多, 英文名有“左手材料”(Left-Handed Material, LHM)<sup>[2,3]</sup>、“负折射率媒质”(Negative-Index Media, NIM)<sup>[4]</sup>、“后向波物质”(Backward Wave Media, BWM)<sup>[5]</sup>、“双负媒质”(Double-Negative Media, DNM)<sup>[6,7]</sup>等等。由于其制造方法主要是由金属材料合成故又泛称为复合介电(metamaterial)<sup>[8]</sup>。复合介电结构已被应用于天线领域, 利用其小折射律的特性可有效地提高天线的方向性<sup>[9]</sup>, 但其在阵列中的应用还未见报道, 从而将复合介电结构应用于天线阵列中的研究是十分必要的。

本文在文献[3]的研究结果基础上, 以圆波导口径天线阵

列作为例子, 根据圆波导天线阵列的工作频率, 通过合理选择结构尺寸, 设计出一种应用于圆波导口径天线阵列的复合介电层, 利用基于有限元方法的电磁场仿真软件Ansoft公司的HFSS对其电磁特性进行了仿真, 通过仿真结果可以看出, 天线的工作频段趋近复合结构的等效等离子体频率时, 电磁波经过复合介电结构的折射律趋近于零, 从而有效增强其方向性, 提高天线的增益, 改善天线阵列的辐射特性。

### 2 复合介电层的特性

本文所研究的复合介电层, 主要是采用在铜片上制作空气网格而制作的复合介电层。周期性金属网格状单元和空气形成金属-介电的复合介电层, 其结构如图1所示。当金属网格的单元长度小于微波波长时, 这种结构可以等效地认为是金属细线构成的阵列, 根据文献[6]的结论, 这一结

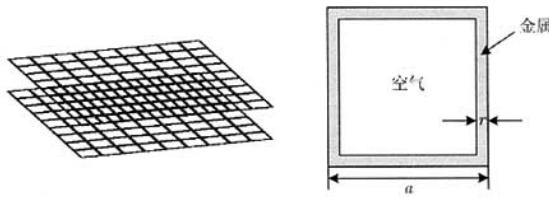


图1 复合介电层结构

构可以严格的等效成具有低等离子体频率的均匀材料, 这就意味着该结构中电磁波传播模式的色散关系类似于固体中的等离子体电子气。由于电子气的等离子谐振, 这种金属阵列结构对电磁波的辐射有着特征响应。理想情况, 能将这一结构的有效介电常数描述成频率  $\omega$  函数形式

$$\epsilon_{\text{eff}}(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2 \quad (1)$$

式中  $\omega_p$  为等离子体频率,  $\omega$  为微波频率。可以由上式可知, 当电磁波的频率接近该结构的等离子频率时 ( $\omega \geq \omega_p$ ), 该结构的有效介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$  的取值将逐渐小于1, 并最终可能接近于0。这种复合介质结构等离子体频率  $\omega_p$ , 根据凝固物理, 由金属线阵等效的等离子体频率的定义可以表达为

$$\omega_p^2 = n_{\text{eff}} e^2 / (\epsilon_0 m_{\text{eff}}) \quad (2)$$

其中  $n_{\text{eff}}$  为有效电子的密度,  $m_{\text{eff}}$  为电子的有效质量,  $e$  为电子的电荷量。因为复合介质结构中, 金属结构仅在空间中部分分布, 从而其电子密度被减小。根据结构可以得到电子的有效密度为

$$n_{\text{eff}} = n \pi r^2 / a^3 \quad (3)$$

这里  $n$  为金属线上的电子密度,  $r$  为金属线的半径, 在本文所研究的结构中,  $r$  为金属条带宽度的一半,  $a$  为由金属细条形成的方形栅格的单元长度。同时, 当有电流流过金属细条时, 产生强磁场, 由于磁场的作用使电子的有效质量被增强, 根据磁感应的公式, 可以得到电子的有效质量的表达式。

$$m_{\text{eff}} = \left( \mu_0 e^2 \pi r^2 / (2\pi) \right) \ln(a/r) \quad (4)$$

从而将式(3), 式(4)代入式(2), 得到这一复合介质结构的等效等离子频率  $\omega_p$  的表达式

$$\begin{aligned} \omega_p^2 &= \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} = \frac{(n \pi r^2 / a^3) e^2}{\epsilon_0 [u_0 e^2 \pi r^2 n / (2\pi)]} = \frac{2\pi}{\epsilon_0 \mu_0 a^2 \ln(a/r)} \\ &= \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $c_0$  为自由空间中的光速。在式(5)中适用金属细线阵列的情况, 对于本文所用的这一结构, 其金属厚度方向比较薄, 可以近似等效成细线结构, 但在面上其金属部分的尺寸比较大, 应用式(5)计算会有一定的偏差, 为了能更加准确地结算等效等离子体频率, 针对这种复合结构特点, 对式(5)进行修正, 假设栅格单元长度为  $a$ , 金属框的宽度为  $r$ , 两层间距为  $H$ , 金属的厚度为  $t$ , 从而可得到

$$\omega_p^2 = \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} = \frac{\pi c_0^2}{K a H \ln(aH/rt)} \quad (6)$$

其中  $K$  为修正系数,  $K = 3 \sim 5$ , 这里取3。根据这一公式可以比较方便地设计出一定等离子频率的复合介质结构。再根据斯奈尔折射定律(Snell Law), 电磁波从空气射入媒质的折射率可写成  $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ , 再根据式(1)可知, 当电磁波的频率十分接近于等离子频率时, 这一结构的有效介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$  将小于1, 并趋近于0, 可以比较清晰地得出此时的电磁波在复合介质材料, 其折射率也趋近为0, 从而可以认为电磁波在不同入射角入射到复合介质材料上, 都能以趋近于法线的方向射出, 将原本发散的电磁波整理成趋近于覆层面法线的方向的近似平行波, 起到能量汇聚的功能, 如图2所示。在天线近区场时, 并不能完全用反射和折射进行概括, 同时可以认为电磁波的频率与结构的等效等离子体频率相近时, 产生强烈的谐振, 电磁场在结构上发生强烈的场耦合, 此时复合结构可以耦合成为一个阵列辐射源, 产生近似平行波的辐射。图3给出了电磁波在趋近于等离子体频率时, 自上而下经过复合介质覆层结构空间时的电场分布图。

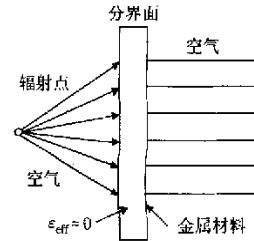


图2 电磁波经过复合介质结构( $\epsilon_{\text{eff}} \approx 0$ )产生能量汇聚

通过HFSS仿真可知在相同源情况下, 经过复合介质覆层结构空间的电场有明显的增强, 电磁波在特定频率经过复合介质覆层结构空间后, 较自由空间能量发生了汇聚现象。

利用复合介质结构层这一特性, 将其覆盖于天线阵列上方, 可以有效的使电磁波汇聚, 从而提高阵列天线的方向性和增益, 使其在同等增益下减少天线单元的个数, 这对阵列天线小型化有着十分重要的意义。

### 3 复合介质覆层结构圆波导天线阵列单元的设计

作为阵列天线研究的基础, 对天线的单元情况进行详细

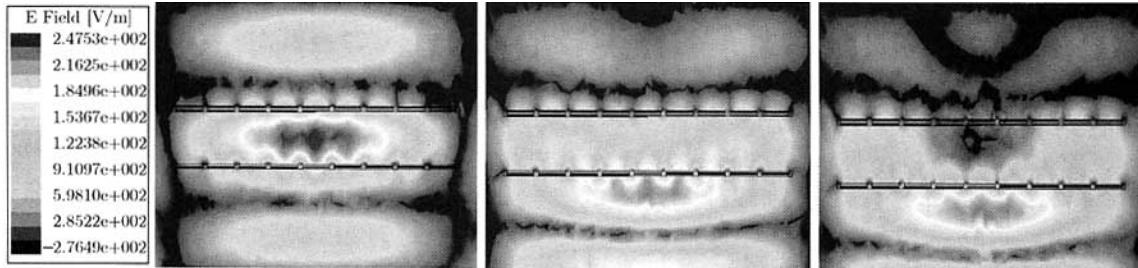


图3 电磁波通过复合介质覆层结构空间时的场分布图

的分析是十分必要的。根据天线设计的一般过程,本文设计了工作频率为  $f = 12 \text{ GHz}$  圆波导口径天线单元,其结构如图4(a)所示。其口径  $D = 0.8\lambda_0$ , 其中空气中波长  $\lambda_0 = 25 \text{ mm}$ , 即  $D = 20 \text{ mm}$ , 同轴探针的长度为  $\lambda_0/4 = 6.25 \text{ mm}$ , 波导波长  $L_g = 37 \text{ mm}$ , 进而可以确定同轴探针距离波导短路板为  $L_g/4 = 9.25 \text{ mm}$ , 这里金属接地板的尺寸为  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。

在复合介质结构圆波导天线的设计中, 覆层的层数选择非常重要。实际工程的应用要求, 覆层结构的尺寸也有一定的限制, 一般覆层不可太大。对于有限尺寸的复合介质覆层, 覆层层数的合理选择是一个对天线性能影响很大的关键因素。对于选定的复合介质结构覆层, 合理地安排覆层之间的距离以及覆层与天线口径面的距离是非常重要的。根据以上因素, 结合天线的工作频率, 本文选用的复合介质结构如图1所示, 其基本结构是二维平面内的正方形单元, 单元大小为  $7.6 \text{ mm} \times 7.6 \text{ mm}$ , 中间的正方形空气孔大小为  $6.5 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$ , 环状结构的材料采用无限薄的铜层结构。应用在圆波导口径天线单元的复合介质覆层结构如图4所示。在这里选择复合介质结构覆层为两层, 每一层均由  $9 \times 9$  个单元组成, 其大小为  $68.4 \text{ mm} \times 68.4 \text{ mm}$ 。经过优化, 复合介质覆层距离圆波导天线口径面距离为  $9.5 \text{ mm}$ , 两层覆层结构的间距也为  $9.5 \text{ mm}$ 。

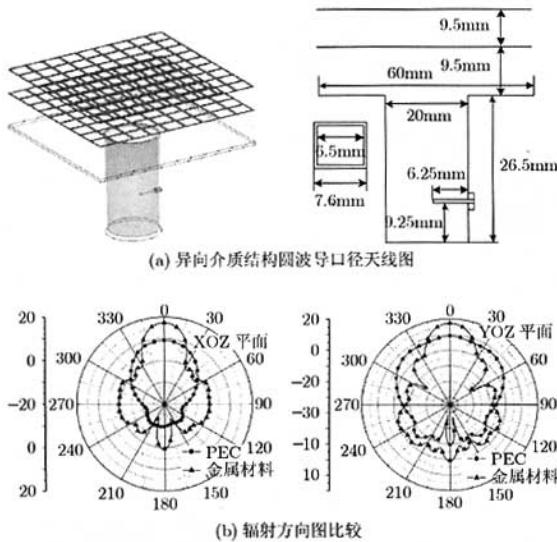


图4

根据这一方法, 分别对传统情况和加载复合介质覆层结构情况进行了 Ansoft HFSS 仿真分析。仿真数据结果, 如图4(b)所示, 从数值仿真结果可以看出, 复合介质结构加载的天线单元的增益相对于传统结构有着显著的增加, 天线的增益从原有的  $9.053 \text{ dB}$  增加到  $17.34 \text{ dB}$ 。理论上, 口径天线的最大方向性系数为  $D_{\max} = 4\pi A/\lambda_0^2$ ,  $G = kD$ ,  $k$  为效率因子, 假设  $k = 1$ , 从而可近似认为  $G_{\max} = 10 \log(4\pi A/\lambda_0^2) \text{ (dB)}$ 。

万方数据

这里  $A = 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ,  $\lambda = c_0/f_0 = 25 \text{ mm}$ , 所以可得天线的理论增益的极限值  $G_{\max} \text{ (dB)} = 18.6 \text{ dB}$ 。具有复合介质覆层结构的圆波导口径天线的增益, 已经非常接近于具有相同尺寸和工作频率的天线的理论极限, 可见这一方法是十分有效的。

同时作为系统的研究工作, 为阵列设计提供良好的基础, 进一步仿真计算分析了复合介质覆层结构层间间距和单元效应的影响。图5(a)给出了圆波导口径天线增益随覆层之间距离的变化曲线, 图5(b)给出覆层天线在不同频率时的增益曲线。注意到这些曲线比较符合理论设想的结果, 只有天线工作在复合介质结构所具有等离子体频率范围时, 天线可以获得比较理想的增益。

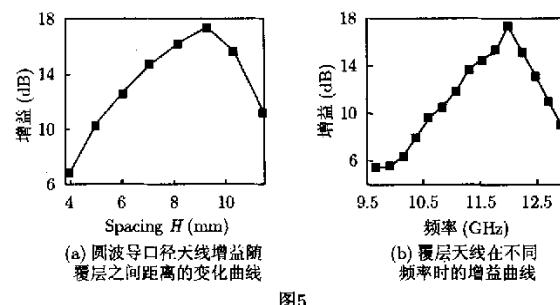


图5

#### 4 复合介质覆层结构圆波导天线阵列的设计与仿真

由圆波导口径天线单元组成的阵列天线, 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, 本文提出将天线单元组阵和复合介质结构覆盖技术相结合, 以进一步提高天线阵列的增益, 达到更高的增益要求。

##### 4.1 二元天线阵列研究

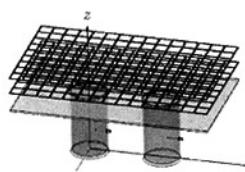
在二元天线阵列中, 波导口径天线单元的尺寸与上一节相同, 阵列中两单元的中心间距  $L = 42 \text{ mm}$ , 加载两层复合介质覆层结构, 每层由  $9 \times 15$  个单元组成, 其大小为  $68.4 \text{ mm} \times 114 \text{ mm}$ , 距离圆波导天线口径面距离仍为  $9.5 \text{ mm}$ , 两层覆层结构的间距也仍为  $9.5 \text{ mm}$ 。其结构如图6(a)所示, 仿真结果如图6(b)所示。

##### 4.2 四元天线阵列研究

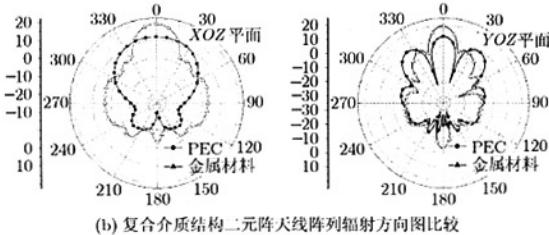
这里主要分析了  $1 \times 4$  形式和  $2 \times 2$  形式的两种典型四元圆波导口径天线阵列加载复合介质覆层结构情况, 并对比了其辐射方向图。

在  $1 \times 4$  四元天线阵列中, 圆波导口径天线单元的尺寸不变, 各单元的中心间距仍为  $L = 42 \text{ mm}$ 。同样加载两层, 每层由  $9 \times 25$  个单元组成, 其大小为  $68.4 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 复合介

质覆层距离天线口径面同上, 其结构如图7(a)所示。仿真结果如图7(b)所示。



(a) 复合介质二元阵列天线结构图



(b) 复合介质结构二元阵列天线阵列辐射方向图比较

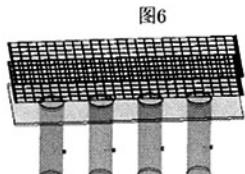


图6

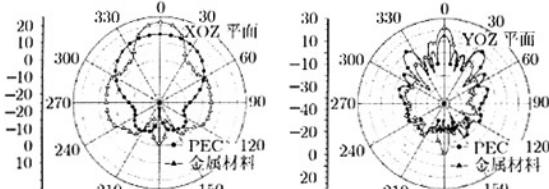
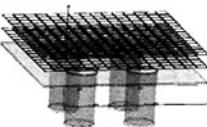
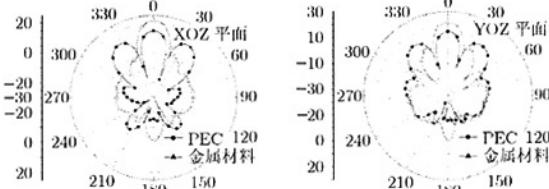
(a) 复合介质四元( $1 \times 4$ )阵列天线结构图(b) 复合介质结构四元( $1 \times 4$ )阵列天线阵列辐射方向图比较

图7

(a) 复合介质四元( $2 \times 2$ )阵列天线结构图

(b) 复合介质结构二元阵列天线阵列辐射方向图比较

图8

在 $2 \times 2$ 四元方形天线阵列中, 波导口径天线单元的尺寸不变, 各单元的中心间距仍为 $L = 42\text{ mm}$ 。复合介质层加载两层, 每层由 $15 \times 15$ 个单元组成, 其大小为 $114\text{mm} \times 114\text{mm}$ , 其结构如图8(a)所示。仿真结果如图8(b)所示。

从二元阵列和四元阵列的典型情况的辐射方向图数值万方数据

仿真结果中可以看出, 在二元阵列天线中, 天线的前向增益由原来的 $11.92\text{dB}$ 增加到 $19.15\text{dB}$ ; 在四元阵列中天线的增益分别由原来的 $14.76\text{dB}$  和 $14.65\text{dB}$ 增加到 $21.85\text{dB}$  和 $21.67\text{dB}$ 。因此利用复合介质覆层结构加载可以有效地提高天线阵列的前向增益, 这种新型基于复合介质结构天线的增益比传统的圆波导口径天线提高 $7\text{dB}$ 以上, 而且还可以看出特别是在四元阵列中加载复合介质结构覆层大大地降低了天线阵列的副瓣电平, 从而有效地改善天线阵列的辐射性能。这对于实际工程中, 少单元数、高增益、低副瓣新型天线的研究有着重要的实际指导意义。

## 5 结束语

本文提出了一种采用复合介质结构覆层实现高增益圆波导口径天线阵列的方法, 利用数值仿真方法对复合介质材料的结构特性进行了研究, 详细分析了复合介质结构对圆波导口径天线及阵列辐射特性的影响, 仿真数值结果有力地证明了加载复合介质覆层结构可以有效地提高圆波导天线及其阵列的增益, 改善其辐射特性, 且这一结论可以被推广到其他多种天线结构, 对于实际工程实践有着重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Soviet Physics USPEKI*, 1968, 10(4): 509–514.
- Smith D R, Padilla W J, and Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184–4187.
- Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, and Vincent P. A metamaterial for directive emission. *Physical Review Letters*, 2002, 89(21): 1–4.
- Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*, 2000, 85(21): 3966–3969.
- Lindell L V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, and Lvov S B. Media with negative parameters, capable of supporting backward waves. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2001, 31(2): 129–133.
- Ziolkowski R W and Heyman E. Wave propagation in media having negative permittivity and permeability. *Phys. Rev. E*, 2001, 64(5): 1–15.
- 冉立新, 陈红胜, 皇甫江涛, 章献民, 陈抗生, 孔金瓯. 异向介质研究进展. *微波学报*, 2004, 20(3): 89–95.  
Ran Li-xin, Chen Hong-sheng, Huangpu Jiang-tao, Zhang Xian-min, Chen Kang-sheng, and Kong Jin-ou. Research progress for left-handed material. *Journal of Microwaves*, 2004, 20(3): 89–95.

李 斌: 男, 1978年生, 博士生, 目前从事光子晶体、新型多路耦合器等方面的研究。

吴 边: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为超宽带微波器件、新型多路耦合器等。

梁昌洪: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE Senior member, 主要研究方向为计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等。

## 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>