

文章编号 1005-0388(2009)05-0899-06

## 一种贴片阵列天线散射减缩的新技术

袁宏伟 龚书喜 张鹏飞 王文涛

(西安电子科技大学天线与微波技术重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘 要** 引入贴片天线单元渐变开槽的方式来设计低散射阵列天线。通过对不同的单元开不同尺寸的槽, 在等幅度馈电的情况下实现远区辐射场的低副瓣特性。对开槽贴片单元进行散射减缩预估, 然后将该方法应用于  $1 \times 9$  渐变开槽贴片阵列的设计中, 与传统阵列天线的单元形式完全一样, 采用不等幅馈电实现泰勒远区辐射场相比, 该方法不仅实现了远区辐射场的低副瓣, 而且实现了天线模式项散射场的低副瓣, 同时又兼顾了结构模式项散射场的散射减缩, 从而有效地实现了阵列天线的低散射特性。测量结果与原始阵列进行比较, 证明了该方法的有效性。

**关键词** 贴片天线; 开槽; 散射; 雷达散射截面

**中图分类号** TN821.8 **文献标志码** A

### New technology for radar cross section reduction of patch array antenna

YUAN Hong-wei GONG Shu-xi ZHANG Peng-fei WANG Wen-tao

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

**Abstract** Using gradual changed cutting slots on the different patch antenna elements is introduced to design low radar cross section array antenna, which can achieve low-sidelobe radiation patterns in the case of the average excitation. Compared with conventional patch antenna array which has the same patch element and uses the unaverage excitation to achieve low-sidelobe radiation patterns, the novel one not only can have low-sidelobe radiation patterns, but also achieve the low-sidelobe of the antenna mode scattering field and reduce the structural mode radar cross section of the array antenna. So the low radar cross section characteristic of the array antenna can be obtained. Radar cross section reduction of the patch elements is predicted firstly. Then a  $1 \times 9$  patch array antenna is designed using both this novel technology and the conventional one. The measure results indicate the novel design may obtain low radar cross section characteristic and keep the low-sidelobe radiation patterns.

**Key words** patch antenna; cutting slots; scattering; radar cross section

## 引 言

微带天线以重量轻、低轮廓、易于制造, 且容易

与飞行器表面共形等优点而被越来越广泛地应用。然而, 对微带天线电磁散射特性的分析和研究不如对其辐射特性的研究成熟。近年来国内外在此方面

收稿日期: 2009-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60801042)

联系人: 袁宏伟 E-mail: yuanhw@mail.xidian.edu.cn

进行了一定的研究工作,低 RCS 微带天线也越来越被人们所重视<sup>[1-6]</sup>。

单元的结构模式项散射是构成阵列结构项散射中叠加散射的主要原因,减小单元的 RCS 也成为阵列天线 RCS 控制的一个重点。随着隐身天线技术的发展,天线小型化成为天线 RCS 减缩的一个主要方向<sup>[3]</sup>。电阻性加载技术,容变二极管加载技术,改进天线基片和覆盖层技术等也能对 RCS 起到一定的减缩作用。以上方法只是针对结构模式项散射的研究,然而对于阵列天线而言,天线模式项散射场对 RCS 的贡献也是不可忽略的。由于阵列天线的复杂性和多样性,阵列天线的 RCS 减缩规律则有待进一步的探索<sup>[7,8]</sup>。

为了实际应用的需要,首先对贴片单元进行 RCS 减缩预估。在此基础上,从阵列的角度来探索微带阵列天线 RCS 减缩的新方法。通过引入贴片阵列天线单元渐变开槽的方式,在保证天线远区辐射场低副瓣的前提下,将结构模式项散射的 RCS 减缩和天线模式项散射的 RCS 减缩结合起来,从而有效地实现了阵列天线的 RCS 减缩。

## 1 基本理论

根据阵列天线理论,设泰勒线阵的单元总数为  $n$ ,单元之间的间距为  $d$ ,并以阵列的中心作为坐标原点。

由主瓣与副瓣电平之比  $R_0$  可以确定参数  $A$

$$A = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1}(10^{R_0/20}) \quad (1)$$

$\sigma$  称为展宽因子,由下式确定

$$\sigma = \frac{\pi}{u_*} = \frac{\pi}{\sqrt{A^2 + (\bar{n} - \frac{1}{2})^2}} \quad (2)$$

式中,  $\bar{n} \geq 2A^2 + 1/2$ 。

则泰勒阵列各单元的激励幅度为

$$f(p) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} S(m) \cos(mp) \quad (3)$$

式中,

$$S(m) = \frac{[(\bar{n}-1)]^2}{(\bar{n}-1+m)! (\bar{n}-1-m)!} \times \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} \left[ 1 - \frac{m^2}{\sigma^2 \left[ A^2 + (\bar{n} - \frac{1}{2})^2 \right]} \right] \quad (4)$$

$$p = \frac{2\pi}{L} \xi_i = (i - (n+1)/2) d \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$L = nd \quad (6)$$

设以式(3)产生的原始阵列各单元的泰勒电流

激励幅度为:  $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n$ 。并以泰勒电流激励幅度在空间产生的远区场作为参考场,设为  $E_{\text{total}}$ , 且有

$$E_{\text{total}} = E_1 + E_2 + \dots + E_i + \dots + E_n \quad (7)$$

式中,  $E_i$  为第  $i$  个单元端口在给定  $I_i$  幅度的电流激励和其余端口全部匹配的情况下,在空间产生的远区场。因此,严格满足场的叠加原理。其中,

$$E_i = I_i \exp(jkdi \sin \theta) \quad (8)$$

又设等幅度馈电的电流幅度为  $I$ , 产生的空间远区场为  $E'_{\text{total}}$ 。为了在等幅度馈电情况下实现泰勒远区场分布,即  $E'_{\text{total}} = E_{\text{total}}$ , 由此可使

$$E'_i = E_i \quad (9)$$

式中,  $E'_i$  为第  $i$  个改进的单元端口在给定  $I$  幅度的电流激励和其余端口全部匹配的情况下,在空间产生的远区场。这里,取  $I=1$  作为标准激励。这样通过不同单元的不同形变,在均匀馈电的情况下实现空间远区辐射场的泰勒分布。

## 2 微带天线单元的 RCS 减缩

图 1 给出了一般矩形贴片的示意图,其中贴片长边  $L$  沿着  $x$  轴而宽边  $W$  沿着  $y$  轴。按照空腔模理论,微带贴片与接地板之间的区域可以被看作上下表面为电壁,四壁为磁壁的谐振腔。微带天线的各个谐振模式的谐振频率由以下公式确定。

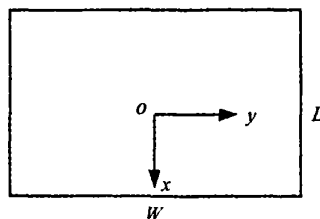


图1 矩形贴片天线示意图

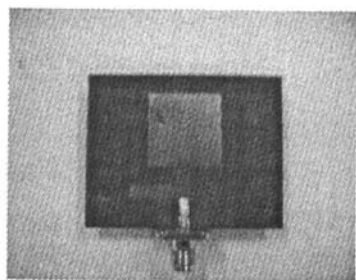
$$f_m(\text{GHz}) = \frac{0.15}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2} \quad (10)$$

式中,  $p, q$  分别表示沿着长边和宽边作半周期正弦变化的个数。微带贴片天线 RCS 减缩的目标是在尽量保证微带贴片天线辐射性能的情况下对其 RCS 峰值进行减缩。因此,可以采取控制贴片表面电流分布的方法。具体来说,就是要保证  $\text{TM}_{10}$  模工作时沿着长边的半波长电流分布,抑制甚至是消除其他谐振模式的电流分布。在贴片上开槽作为一种控制贴片表面电流进而影响谐振模式的方法,已经被广泛应用于获得想要的辐射特性。类似地,该

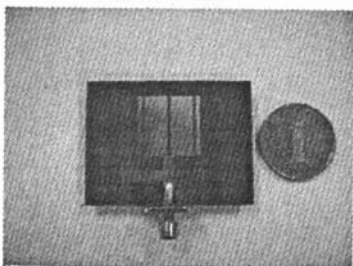
方法也可以用于 RCS 减缩。

一般地,开槽会影响到垂直于开槽方向的电流,即沿着  $x$  方向的开槽会影响到  $y$  方向的表面电流,而沿着  $y$  方向的开槽会影响到  $x$  方向的表面电流。对于贴片上只有  $y$  方向表面电流的模式,我们选取了沿着  $x$  方向长度等于贴片长度  $L$  的开槽,贴片将会被分成几条窄带。这样的开槽会彻底截断沿着  $y$  方向流动的电流路径。考虑到高次模表面电流路径的半波长周期性,贴片上需要多个这样的槽。因为只有半波长的电流分布被破坏,才能达到抑制谐振的目的。

图2为用上面的理论设计的贴片单元。中心频率为  $f=5.07$  GHz,矩形边长为 9 mm,介质板厚度为 1 mm,采用的介电常数  $\epsilon_r=2.65$ 。开槽单元三条开槽宽度均为 1.5 mm。



(a) 标准单元



(b) 开槽单元

图2 贴片标准单元和开槽单元实物图

图3为贴片标准单元和开槽单元的电压驻波比的实测比较图。从图中可以看出,两天线中心频率基本保持一致。

图4为贴片标准单元和开槽单元的单站 RCS 仿真比较图。用水平极化的平面波从  $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$  和  $\theta=60^\circ, \varphi=90^\circ$  进行照射。从图中可以看出,开槽后的单元单站 RCS 有一定的减缩。因此,可以利用该天线单元进行低散射阵列的设计。

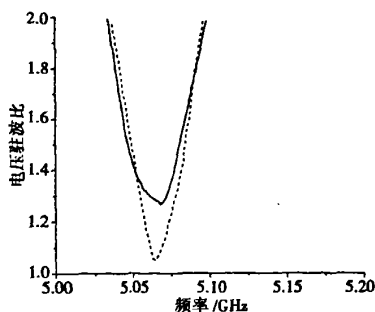
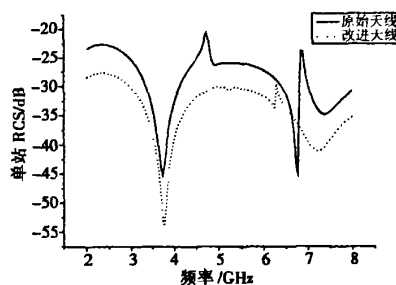
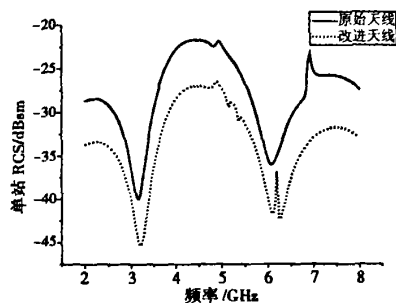


图3 贴片标准单元(实线)和开槽单元(虚线)的电压驻波比



(a)  $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$



(b)  $\theta=60^\circ, \varphi=90^\circ$

图4 贴片标准单元(实线)和开槽单元(虚线)的单站 RCS 比较图

### 3 阵列设计结果

在单元设计的基础上来设计一个  $1 \times 9$  的低 RCS 微带贴片阵列天线,中心频率为  $f=5.07$  GHz,天线单元之间的间距为  $0.6\lambda$ 。矩形边长为 9 mm,介质板厚度为 1 mm,采用的介电常数  $\epsilon_r=2.65$ 。开槽的宽度和位置直接影响到拟合泰勒空间场的质量。首先根据第二节的基本理论编程算出  $1 \times 9$  阵列的泰勒电流幅度分布,如表1所示,其中  $N$  是对阵列单元从左到右的编号。

表 1 1×9 阵列电流幅度分布表

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	0.3	0.5	0.7	0.9	1	0.9	0.7	0.5	0.3

由表 1 可知,由于馈电的对称性,这里我们只需要对编号为 1~4 的单元进行调节即可,5 单元不需要开槽,其他单元的尺寸则以单元 5 成中心对称。实际操作过程中,我们选取原始天线在泰勒馈电激励下  $r=150\lambda$  的球面上产生的场为参考场。开槽后天线产生的场在  $r=150\lambda$  的球面上对参考场进行逼近。由于开槽后贴片天线的电流分布的不一致性,对整个空间的场进行逼近难度很大,我们采取对主瓣方向和第一副瓣方向的场值进行逼近即可。

表 2 列出了实现均匀馈电情况下空间泰勒场分布的各单元开槽尺寸。其中,每个单元的槽从左到右进行编号,其中开槽 1 和开槽 3 分离开的贴片宽度均为 1 mm,开槽 2 位于贴片中央。为了达到馈电端口的匹配,还需要对匹配枝节的长度和位置以及贴片的长度和宽度进行微调。

表 2 各单元开槽尺寸

单元编号	1	2	3	4
开槽 1 宽度	3mm	2mm	1mm	0.5mm
开槽 2 宽度	2mm	1mm	0.5mm	0.2mm
开槽 3 宽度	3mm	2mm	1mm	0.5mm

图 5 为均匀馈电下改进型天线,泰勒馈电下原始天线和均匀馈电下原始天线增益方图的比较。从图中可以看出,均匀馈电下改进型天线有一定的低副瓣特性,相比均匀馈电下原始天线的副瓣低了 5 dB 左右,但是还未能达到泰勒馈电下原始天线的副瓣水平。主要原因在于在实际的操作中,采取对主瓣方向和第一副瓣方向的场值进行逼近,而没有对整个空间的场进行逼近。均匀馈电下改进型天线的增益为 14.4 dB,均匀馈电下原始天线的增益为 15 dB,增益减小了 0.6 dB,增益的减小在允许的范围之内。

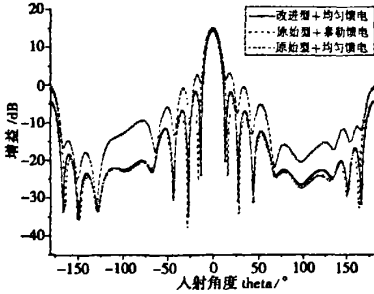
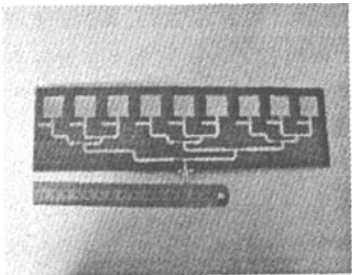
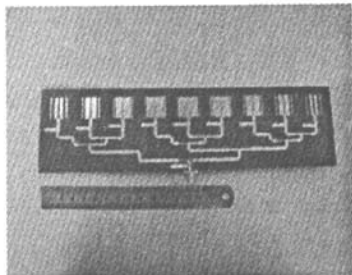


图 5 原始天线增益方向图的比较

图 6 为原始天线和改进的低 RCS 天线的实物照片,从图中可以看出,由于单元结构的变化,造成了改进天线的匹配不良,在总端口处采用匹配枝节进行调节,达到了良好的驻波要求。图 7 为测量的原始天线和改进的低 RCS 天线的驻波比较图。从中可以看出,改进后的天线带宽有所展宽,驻波也得到了了一定程度的改善。



(a)原始天线



(b)改进天线

图 6 阵列天线的实物照片

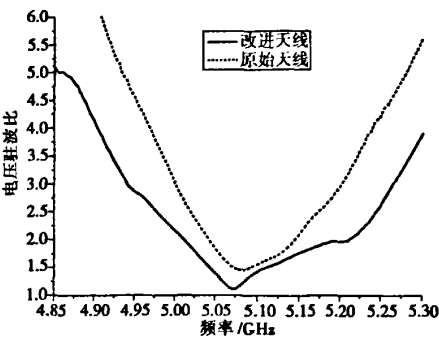


图 7 电压驻波比的比较

在满足辐射的前提下,来研究一下改进型低 RCS 天线的散射特性,用水平极化平面波从  $\theta=60^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$  和  $\theta=60^\circ$ 、 $\varphi=90^\circ$  三个典型入射角对天线进行照射,天线接匹配负载,测量其单站 RCS 随频率的响应,如图 8 所示。

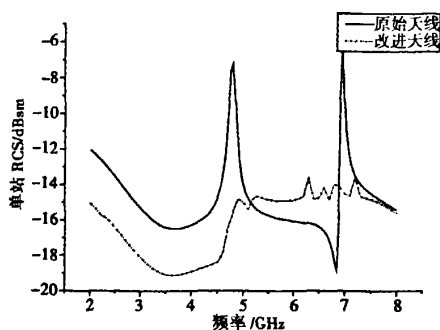
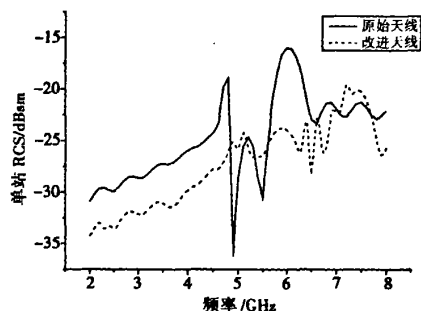
(a)  $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$ (b)  $\theta=60^\circ, \varphi=90^\circ$ 

图8 单站 RCS 比较图

从图8可以看出,改进天线阵列的单站 RCS 得到了大幅度的降低,在大部分频率范围内能够得到 5~15 dBsm 的减缩,特别是在  $\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$  照射情况下,在频率为 5 GHz 和 7 GHz 附近的谐振峰值完全被抑制。在  $\theta=60^\circ, \varphi=90^\circ$  照射情况下,在频率为 4.5 GHz 和 6 GHz 附近的谐振峰值也完全被抑制。因此,该天线有良好的低散射特性。

## 4 结论

本文引入贴片天线阵列单元渐变开槽的方式来设计低 RCS 天线阵列的新方法。通过渐变开槽,在等幅度馈电的情况下实现空间电磁场的泰勒分布。该方法不仅实现了辐射场的低副瓣特性,而且实现了天线模式项散射场的低副瓣,同时又兼顾了结构模式项散射场的 RCS 减缩,从而有效地实现了阵列天线的低散射特性。通过该方法首先对开槽贴片单元进行 RCS 减缩预估,然后设计一个  $1 \times 9$  的低 RCS 微带贴片阵列天线,实验表明了该天线的低副瓣特性,同时在大部分频率范围内单站 RCS 能够得到 5~15 dBsm 的减缩。因此,该方法对阵列天线的散射减缩有很好的参考价值。

## 参考文献

- [1] NEWMAN R H. Scattering from a microstrip patch [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1987, 35(3): 245-251.
- [2] HE W, JIN R, GENG J. Low radar cross-section and high performances of microstrip antenna using fractal uniplanar compact electromagnetic bandgap ground [J]. IET Microw. Antennas Propag, 2007, 1(5): 986-991.
- [3] 韩国栋, 顾长青. 加载十字形缝隙的小型化微带天线[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 96-102.  
HAN Guo-dong, GU Chang-qing. Quasi-sierpinski carpet microstrip antenna with cross fractal slots[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 96-102. (in Chinese)
- [4] 张明旭, 龚书喜, 刘英. 利用接地板开槽减缩微带贴片天线的 RCS[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 118-121.  
Zhang Ming-xu, Gong Shu-xi, Liu Ying. Reducing the RCS of microstrip patch antenna by cutting slots on the groundplane[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(2): 118-121. (in Chinese)
- [5] HE Xiu-lian, GONG Shu-xi, JI Yi-cai, et al. Meshed microstrip patch antennas with low RCS[J]. Microwave opt technology lett, 2005, 46(2): 117-120.
- [6] VOLAKU L S, ALEXANIAN A, LIN J M. Broad-band RCS reduction of rectangular patch by using distributed loading[J]. Electron Lett., 1992, 28(25): 2322-2323.
- [7] HE Wei, JIN Rong-hong, GENG Jun-ping, et al.  $2 \times 2$  array with UC-EBG ground for low RCS and high gain[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(6): 1418-1422.
- [8] KING A S. Scattering from a finite array of microstrip patches[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1992, 40(7): 770-774.



袁宏伟 (1982—), 男, 重庆人, 西安电子科技大学博士生。主要研究方向为宽带天线设计, 电磁散射与隐身技术。

(下转第 938 页)

空间高分辨距离像雷达目标识别算法。该算法的优势主要有两点:其一,利用定理1的结论,将各散布矩阵投影于 $S_i$ 的非零空间,有利于降低算法的计算复杂度,而不损失有用辨别信息。其二,将类内散布矩阵零空间与非零空间中所包含的有用辨别信息充分利用起来,有效地改善了目标的识别性能。基于ISAR雷达实测飞机数据,与经典的PCA、LDA及GDA算法进行了对比分类试验,结果表明了所提方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 周代英. 雷达目标一维距离像识别中的最优子空间法[J]. 电波科学学报, 2004, 19(6): 748-751.  
ZHOU Daiying. Recognition of radar target based on optimal subspace using range profile[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6): 748-751. (in Chinese)
- [2] 王晓丹, 王积勤. 基于小波分解及KCN的雷达目标特征提取[J]. 电波科学学报, 2003, 18(2): 32-37.  
WANG Xiaodan, WANG Jiqin. Radar target feature extraction using wavelet transform and KCN[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(2): 32-37. (in Chinese)
- [3] CARRIÈRE R, MOSES R L. High resolution radar target modeling using a modified Prony estimator[J]. IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 1992, 40(1): 13-18.
- [4] LI J, STOICA P. Efficient mixed-spectrum estimation with application to feature extraction[J]. IEEE Trans. On Signal Processing, 1996, 42(2): 281-295.
- [5] ZHANG X D, SHI Y, BAO Z. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition[J]. IEEE Trans. On Signal Processing, 2001, 49(9): 1875-1885.
- [6] FUKUNAGA K. Introduction to statistical pattern classification[M]. San Diego, California: Academic Press, 1990.
- [7] BELHUMEUR P N, HESPAH J P, KRIEGMAN D J. Eigenfaces vs. Fisherfaces: recognition using class specific linear projection[J]. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7): 711-720.
- [8] YU J, YANG J. A direct LDA algorithm for high-dimensional data with application to face recognition[J]. Pattern Recognition, 2001, 34(10): 2067-2070.
- [9] KREYSZIG E. Introductory functional analysis with application[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [10] BAUDAT G, ANOUAR F. Generalized discriminant analysis using a kernel approach[J]. Neural Computation, 2000, 12(10): 2385-2404.

刘华林 (1977—), 男, 湖南

人, 2008年获电子科技大学信息与通信工程专业博士学位, 现为零八一电子集团有限公司总体室工程师。主要研究方向为雷达系统, 雷达信号处理与自动目标识别, 已发表论文多篇。



龚书喜 (1957—), 男, 河北

人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师。西安电子科技大学天线与电磁散射研究所所长。研究方向: 电磁理论、电磁辐射、电磁散射与隐身技术等。



张鹏飞 (1979—), 男, 山西

人, 西安电子科技大学讲师。主要研究方向为电磁散射计算与隐身技术。



(上接第903页)

## 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](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>