

## 自适应重构天线设计与 MIMO 系统空域相关性分析

冷文 王安国

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

**摘要:** 紧凑空间移动终端中双圆极化可重构天线由于间距小, 天线间相关性强, 直接影响到系统的信道容量。该文从理论的角度研究可重构天线参数(旋转和轴比)、环境参数(信道交叉极化鉴别率和入射角)与相关性的关系, 该文还研究了如何通过上述参数的调整降低天线相关性, 最后根据理论分析和仿真结果提出自适应重构天线的设计方法, 为在 MIMO 系统小型移动终端极化可重构天线的设计提供理论参考。

**关键词:** 无线通信; 空域相关系数; 极化轴比; 极化旋转; 交叉极化鉴别率; 入射角; 自适应重构

中图分类号: TN92; TN821

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1173-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00783

## The Analysis of the Spatial Correlation in MIMO System and the Adaptive Reconfiguration Antenna Design

Leng Wen Wang An-guo

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The small spacing between the double circular polarized antennas installed in the small mobile terminal can lead to the strong spatial correlation, which will directly diminish the channel capacity. From the theoretical point, this paper studies the relationship between the spatial correlation and the parameters which include the reconfigurable antenna parameters (such as the polarization rotating direction, the polarization axial ratio) and environment parameters (such as the channel cross polarization discrimination, the arrival angle). This paper also studies how to decrease the spatial correlation by adjusting the above parameters. Based on the analysis and simulation results, the design method of adaptive reconfiguration antenna is presented. The design method proposed in the paper can be used as reference for the design of reconfigurable polarization antenna in the small MIMO mobile terminal.

**Key words:** Wireless communication; Spatial correlation coefficient; Polarization axial ratio; Polarization rotating direction; Cross polarization discrimination; Arrival angle; Adaptive reconfiguration

### 1 引言

随着无线通信技术的发展, 能够显著提高信道容量的 MIMO 技术日益受到人们的关注, 由于 MIMO 信道容量与天线阵元之间相关性紧密联系, 近年来许多文献都有这方面的研究论述<sup>[1,2]</sup>, 资料显示相关性依赖于极化、阵元方向图、天线间距和入射角谱分布等特性。

可重构技术主要体现在方向图、极化以及频率等方面特性参数的可重构, 以极化特性为例, 目前针对天线极化可重构的研究主要集中在通过包括 MEMS 技术在内的重构技术实现极化旋转的调整和频率的切换, 以实时适应不同应用和环境要求<sup>[3]</sup>。

本文的设计对象是在紧凑空间的移动终端内部安装两个圆极化可重构天线来应用 MIMO 技术提

高终端的信道容量, 研究重点是可重构天线极化参数(旋转和轴比)以及环境参数(信道对极化的扭曲程度和来波入射角)对于相关性的影响, 并依据理论分析和仿真结果提出圆极化天线轴比自适应重构的设计理念。

### 2 空域相关性的数学推导

参考文献[4]中关于来波信号角度的描述, MIMO 系统 2 接收阵元接收信号入射角如图 1 所示,  $\phi$  为方位角,  $\theta$  为俯仰角。两个可重构天线位于  $XOY$

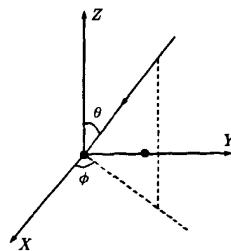


图 1 MIMO 系统 2 接收阵元入射角示意图

2009-05-22 收到, 2009-11-26 改回

国家 973 计划项目(2007CB310605)资助课题

通信作者: 冷文 lengwen@tju.edu.cn

平面内, 天线的极化方向分别为相互正交的  $X$  和  $Y$  方向。

由于多径传播, 在接收端的来波中既有  $X$  向极化也有  $Y$  向极化, 设每个可重构天线接收的信号表示为<sup>[5]</sup>

$$\bar{E} = C_x \hat{S}_x + C_y e^{j\beta} \hat{S}_y \quad (1)$$

其中  $C_x$  和  $C_y$  分别为  $X$  和  $Y$  极化方向上的接收场分量,  $\beta$  为两个正交极化波的相位差, 极化面在  $XOY$  平面内。  $\hat{S}_x$  和  $\hat{S}_y$  表示为  $X$  和  $Y$  极化方向上的单位矢量, 可以表示为<sup>[6,7]</sup>

$$\hat{S}_x = \cos\phi \sin\theta \quad (2a)$$

$$\hat{S}_y = \sin\phi \sin\theta \quad (2b)$$

结合式(1)和式(2), 可以得到两个可重构圆极化天线接收信号为

$$h_1 = \sum_{i=1}^N [C_{xi} \sin\theta_i \cos\phi_i + C_{yi} e^{j\beta_i} \sin\theta_i \sin\phi_i] \quad (3a)$$

$$h_2 = \sum_{i=1}^N [C_{xi} \sin\theta_i \cos\phi_i + C_{yi} e^{j\beta_2} \sin\theta_i \sin\phi_i] \cdot e^{jkd \sin\phi_i \sin\theta_i} \quad (3b)$$

式中  $N$  表示接收端附近分布的散射体个数,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别表示两个可重构天线的正交极化波相位差,  $k$  为波数,  $d$  表示两个可重构天线的间距。

空域相关系数定义为

$$\rho = \frac{\langle H_1, H_2^* \rangle}{\sqrt{\langle H_1, H_1^* \rangle} \sqrt{\langle H_2, H_2^* \rangle}} \quad (4)$$

其中  $\langle \cdot \rangle$  表示求期望值, 星号表示求共轭。其中的  $H_i = h_i \cdot p(\theta) \cdot p(\phi)$  ( $i = 1, 2$ ),  $p(\phi)$  和  $p(\theta)$  表示方位角和俯仰角的角度谱分布函数。

### 3 信道以及天线极化参数对于相关系数的影响

根据文献的介绍<sup>[8,9]</sup>, 通过开关技术可以实现圆极化旋向的可重构切换, 当两个可重构天线都选择相同旋向时, 即  $\beta_1$  和  $\beta_2$  都等于  $90^\circ$  或者  $-90^\circ$  时, 式(4)中的各项可以修改为

$$\langle H_1, H_2^* \rangle = \sum_{i=1}^N [C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 + C_{yi}^2 \hat{S}_y^2] \cdot e^{-jkd \sin\theta_i \sin\phi_i} \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_i) \quad (5a)$$

$$\langle H_1, H_1^* \rangle = \sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 + C_{yi}^2 \hat{S}_y^2) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_i) \quad (5b)$$

$$\langle H_2, H_2^* \rangle = \sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 + C_{yi}^2 \hat{S}_y^2) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_i) \quad (5c)$$

从式(5)可以看出, 根据相关系数定义, 在两个可重构天线旋向一致的情况下, 两天线空域相关系数主要与天线阵元间距和入射角( $e^{-jkd \sin\theta_i \sin\phi_i}$ )有

关。

当可重构天线旋向相反, 即  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别等于  $90^\circ$  或者  $-90^\circ$  时, 式(4)中各项可以修改为

$$\langle H_1, H_2^* \rangle = \left[ \sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 - C_{yi}^2 \hat{S}_y^2) \pm j \sum_{i=1}^N 2C_{xi} C_{yi} \hat{S}_x \hat{S}_y \right] \cdot e^{-jkd \sin\theta_i \sin\phi_i} \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_i) \quad (6a)$$

$$\langle H_1, H_1^* \rangle = \sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 + C_{yi}^2 \hat{S}_y^2) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_i) \quad (6b)$$

$$\langle H_2, H_2^* \rangle = \sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 + C_{yi}^2 \hat{S}_y^2) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_i) \quad (6c)$$

根据式(4)和式(6)得到相关系数采用实部和虚部分别描述的方式可以表示为

$$\rho = (\text{Re} \pm j \text{Im}) \cdot \text{EP} \quad (7)$$

式中 EP 表示包含阵元间距和密度分布函数的信息, 而实部 Re 和虚部 Im 分别表示为

$$\text{Re} = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 - C_{yi}^2 \hat{S}_y^2)}{\sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 + C_{yi}^2 \hat{S}_y^2)} \quad (8a)$$

$$\text{Im} = \frac{\sum_{i=1}^N 2C_{xi} C_{yi} \hat{S}_x \hat{S}_y}{\sum_{i=1}^N (C_{xi}^2 \hat{S}_x^2 + C_{yi}^2 \hat{S}_y^2)} \quad (8b)$$

根据入射天线信号以及天线本身结构特点的关系, 可以将式(1)再细分为如下形式:

$$\bar{E} = C_x \hat{S}_x + C_y e^{j\beta} \hat{S}_y = F_x E_x \hat{S}_x + F_y E_y e^{j\beta} \hat{S}_y \quad (9)$$

其中  $E_x$  和  $E_y$  为入射波在  $X$  和  $Y$  两个正交极化方向所形成的信号分量, 是由入射波以及信道特性所决定的, 根据交叉极化鉴别率 XPD 的描述, 可以定义  $\text{XPD} = \sum_{i=0}^N E_{xi}^2 / \sum_{i=0}^N E_{yi}^2$ , 反映的是当前信道的去极化效应对入射波极化特性的影响程度<sup>[7]</sup>。  $F_x$  和  $F_y$  为天线本身的结构特点所决定, 与本文研究重点相关,  $F_x$  和  $F_y$  可以描述为接收天线在  $X$  和  $Y$  两个极化方向上对于来波信号的接收能力, 当  $F_x$  或  $F_y$  为 0, 则接收天线为线极化, 当  $F_x$  与  $F_y$  相等, 则接收天线可能是标准圆极化或者是  $\pm 45^\circ$  极化面的线极化<sup>[5]</sup>。

结合文献[10]对于轴比定义的描述:

$$\tan 2\tau = \frac{2\rho \cos \delta}{1 - \rho^2} \quad (10a)$$

$$r = \sqrt{\frac{1 + \rho^2 \tan^2 \tau + 2\rho \cos \delta \tan \tau}{\rho^2 + \tan^2 \tau - 2\rho \cos \delta \tan \tau}} \quad (10b)$$

其中  $r$  为轴比,  $\rho$  为两个线极化信号幅度之比,  $\tau$  为极化倾角,  $\delta$  为相位差。根据圆极化定义, 两个正交线极化的相位差为  $90^\circ$ , 因此式(10a)中的极化倾

角 $\tau$ 为0,在这种情况下轴比 $r$ 就等于两个线极化信号幅度之比,所以可以将式(9)中的 $F_x$ 或 $F_y$ 之比定义为在圆极化前提下的接收天线轴比。根据上述推导结果,式(8)可以修改为与接收天线轴比和信道对极化影响程度系数的关系表达式为

$$Re = \frac{\sum_{i=1}^N (r^2 \chi \hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2)}{\sum_{i=1}^N (r^2 \chi \hat{S}_x^2 + \hat{S}_y^2)} \quad (11a)$$

$$Im = \frac{\sum_{i=1}^N 2r \sqrt{\chi} \hat{S}_x \hat{S}_y}{\sum_{i=1}^N (r^2 \chi \hat{S}_x^2 + \hat{S}_y^2)} \quad (11b)$$

其中 $r$ 为接收圆极化天线的轴比, $\chi$ 为信道交叉极化鉴别率XPD。从式(11)可以看出在两个圆极化天线旋向正交时,其相关系数不仅与天线阵元间距和入射角有关,同时也受到了极化轴比和信道去极化效应的影响。

图2为 $Re$ 和 $Im$ 与轴比和信道交叉极化鉴别率的关系变换趋势图,从图中可以看出实部 $Re$ 与轴比和信道XPD的关系是单调一致。从数值上比较,虚部 $Im$ 对于相关系数的影响非常小。

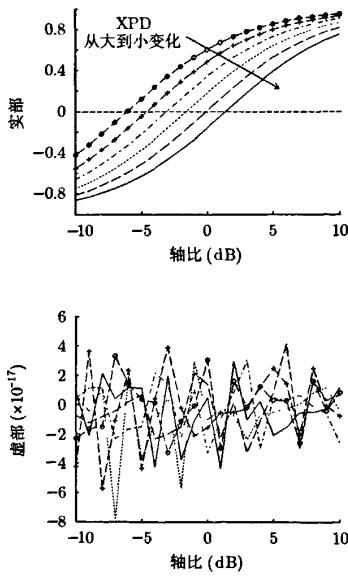


图2 相关系数实部和虚部与轴比和XPD的关系曲线

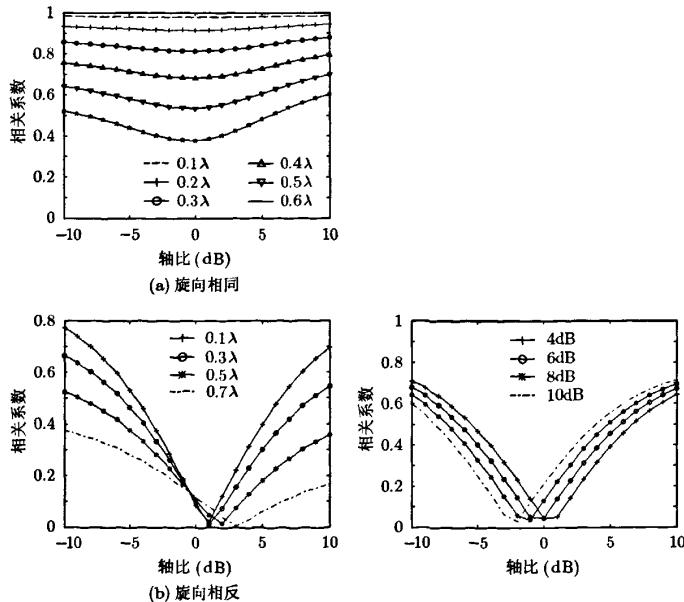


图3 旋向不同的天线空域相关系数与轴比/间距的关系曲线( $\theta_0=0^\circ$ ,  $\Delta\theta=30^\circ$ ,  $\phi_0=0^\circ$ ,  $\Delta\phi=150^\circ$ , XPD=3dB, 图例说明为天线阵元间距)

#### 4 相关系数的仿真和最小相关系数轴比参数AR0的提出

以下仿真入射角角度谱均采用均匀分布,下标0表示角度平均值,Δ表示角度扩展。

图3是旋向一致和相反条件下空域相关系数的仿真分析结果比较。从结果中可以看出,在天线接近标准圆极化的条件下,在旋向相反时两天线间相关系数比旋向相同时要大幅降低,这是由于旋向相反表明两天线各自只能最大限度地接收左旋圆极化信号或右旋圆极化信号,两天线接收信号相似性相应地降低造成的。与此同时相关性还受到轴比的影响,从图中可以发现存在一个轴比AR0,在轴比大于或者小于AR0的情况下相关系数都增大。本文称AR0为最小相关系数轴比参数。

图4是信道XPD与相关系数关系的仿真结果,分析图中的曲线说明随着信道对于入射波极化扭曲程度的变化,AR0也随之变化。从无线信道理论分析,随着XPD的增大,入射信号的能量在一个极化方向上集中得也越多,如果此时接收天线极化轴比的长轴对应于入射信号能量集中的极化方向(如图4中的轴比为正的情况),会进一步增加了接收信号的相似性,导致相关系数的提高;相反,如果轴比的长轴对应的是入射信号能量集中的极化方向的正交方向(如图4中轴比为负的情况),造成接收信号的

图4 天线空域相关系数与轴比/XPD的关系曲线( $\theta_0=0^\circ$ ,  $\Delta\theta=30^\circ$ ,  $\phi_0=0^\circ$ ,  $\Delta\phi=150^\circ$ , 间距=0.4λ, 图例说明为信道XPD)

相似性差, 导致相关系数的降低。

结合上述阵元间距和XPD的分析结果以及轴比对于天线特性影响的理论描述<sup>[5]</sup>, 在固定信道XPD或阵元间距的条件下, 改变轴比可以改变接收信号的幅度和相位, 对于两个旋向相反而轴比变化一致的圆极化天线, 同时并近似等量但旋向相反地调整接收信号的幅度和相位, 会影响到两个天线接收信号的相关性。从数学推导的角度分析, 影响相关性最大的实部(见式(11a))中轴比如果用分贝来表示是从负值到正值变化, 而式(11a)中的轴比以平方的形式出现, 则在图2描述实部的图中与实部值为0的虚线相交的点就是AR0, 从图2可以看出对于某条固定XPD的曲线, 从正负两个方向远离虚线对应着相关系数的增大。

根据图3和图4的相关系数变化趋势, 在环境条件相对稳定和天线结构已固定的情况下, 适当调整AR0可以弥补由环境和结构带来的对于相关性的影响, 实现信道容量的提高。

## 5 入射角对于相关性影响的仿真

在上一节中提出了AR0的概念, 并结合阵元间距以及信道XPD的变换仿真分析了对于双天线间相关性的影响。由于AR0代表相关系数最小, 直接影响到信道容量的提升, 有必要了解影响AR0的其

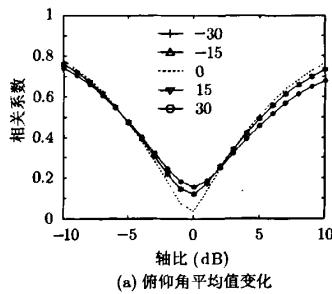
他因素, 本节仿真信号入射角在影响相关性过程中与AR0的关系。

图5结果说明在阵元间距以及信道XPD一定的条件下, AR0受入射俯仰角平均值影响不大, 当来波信号沿图1所示Z轴入射时, 在俯仰角为0的最大辐射方向上相关性最小, 随着入射俯仰角偏差的增大相关性也增大, 这个现象与方向图最大辐射方向对准信源时能够大幅度提高信道容量的理论是一致的。在沿X轴入射时的方位角平均值对于相关性的影响也有与俯仰角平均值相似的现象。

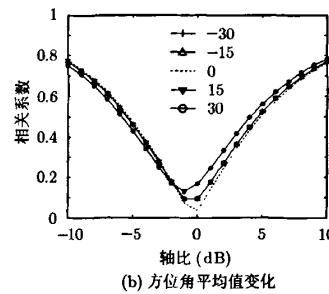
图6为AR0与俯仰角和方位扩展的关系曲线。在固定间距情况下, 俯仰角扩展对于AR0的影响不大。随着方位角扩展的增大AR0也在增大, 但增大的趋势在减小。

## 6 结论

从旋向的角度分析, 相比于旋向相同的设置, 本文从理论和仿真两方面证明了旋向的正交设置在极化特性接近标准圆极化情况下可以大幅度地降低天线间空域相关性。从极化轴比的角度推导出两个圆极化可重构天线相关系数最小时的轴比不一定是标准圆极化的0 dB, 存在一个可能非0 dB的轴比AR0, 并从天线外部环境特性的角度研究了影响AR0的可能因素, 包括信道交叉极化鉴别率, 入射

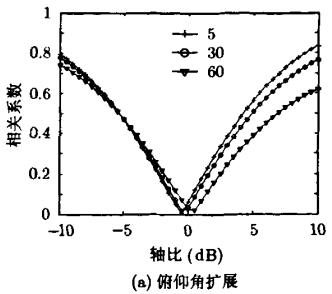


(a) 俯仰角平均值变化

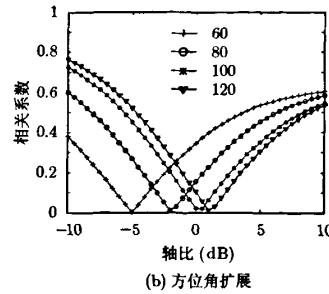


(b) 方位角平均值变化

图5 天线空域相关系数与轴比/入射角平均值的关系曲线( $\theta_0=0^\circ$ ,  $\Delta\theta=30^\circ$ ,  $\phi_0=0^\circ$ ,  $\Delta\phi=150^\circ$ , 间距=0.2  $\lambda$ , XPD=4dB, 图例说明为入射角平均值)



(a) 俯仰角扩展



(b) 方位角扩展

图6 天线空域相关系数与轴比/入射角扩展的关系曲线( $\theta_0=0^\circ$ ,  $\Delta\theta=30^\circ$ ,  $\phi_0=0^\circ$ ,  $\Delta\phi=150^\circ$ , 间距=0.2  $\lambda$ , XPD=4dB, 图例说明为入射角扩展)

角平均值和入射角扩展。根据式(10)的推导以及圆极化可重构天线的设计过程描述<sup>[8,9]</sup>,可以在保证正交线极化相位差90°的前提下,通过微波开关技术分别修正两个正交线极化幅度来实现轴比的调整,再配合方向图的重构调整,以上述仿真结果为依据,在移动终端可以实现针对空域相关性的自适应调整,在不同环境中始终保持较低的空域相关性和较高的信道容量。

## 参 考 文 献

- [1] Dao ManhTuan, Nguyen Viet-Anh, and Seong-Ook Park. Derivation and analysis of spatial correlation for 2×2 MIMO system[J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 409–413.
- [2] Lin Dai, Sana Sfar, and Khaled Ben Letaief. Optimal antenna selection based on capacity maximization for MIMO systems in correlated channel[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(3): 563–573.
- [3] 童超, 李平安. 天线分集的MIMO系统的容量分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(12): 7–10.
- Tong Chao and Li Ping-an. Capacity analysis of MIMO antenna diversity systems based on IEEE 802.16d[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management engineering)*, 2007, 29(12): 7–10.
- [4] 刘鸣, 袁超伟, 贾宁. 智能天线技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 33–46.
- Liu Ming, Yuan Chao-wei, and Jia Ning. *Technology of Smart Antenna and Application*[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 33–46.
- [5] Kraus D and Marhefka J. *Antennas: For All Applications*. Third Edition[M]. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc, 2002: 34–39.
- [6] Brown W C, Saunders R, and Stavrou. Characterization of polarization diversity at the mobile[J]. *Vehicular Technology*, 2007, 56(5): 2440–2447.
- [7] Yan Zhou and Sayeed M. Probability of error and capacity of multipolarization antenna systems for downlink mobile communications[J]. *Vehicular Technology*, 2006, 55(1): 256–269.
- [8] Huang Jing-jing, Tong Kin-fai, and Baker. A new polarization reconfigurable microstrip antenna for diversity array [C]. Radar Conference, RADAR '08, Rome, 2008: 1–4.
- [9] Shih-Hsun and Kai Chang. A novel reconfigurable microstrip antenna with switchable circular polarization [J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6: 160–162.
- [10] 田唯人. 失配微波系统的圆极化轴比分析[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(4): 51–56.
- Tian Wei-ren. Analysis of the circular polarization axial ratio in mismatching microwave systems[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2007, 26(4): 51–56.

冷文: 男, 1967年生, 讲师, 研究方向为智能天线设计、可重构天线设计、移动通信应用、计算机应用。

王安国: 男, 1958年生, 教授, 研究方向为通信系统理论、天线理论与设计、射频电路分析与设计。

## 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>