

文章编号 :1007-5321(2005)06-0030-04

# 天线和传播对室内 MIMO 信道容量的影响

吕剑刚<sup>1</sup>, 吕英华<sup>1</sup>, 张洪欣<sup>1</sup>, 梁 静<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 通信网络综合技术研究所, 北京 100876; 2. 中国人民解放军 66083 部队, 北京 102488)

**摘要** :采用 2 维射线跟踪法分析了视距、非视距室内传播环境和天线阵列结构对多入多出(MIMO)系统容量补累积分布函数(CCDFs)的影响。室内传播环境和天线阵列结构对 MIMO 系统容量 CCDFS 有重要的影响。10% 中断容量也表明,室内环境中存在独立同分布(i.i.d.)瑞利信道容量大于线性阵容量,线性阵容量大于矩形阵容量或圆形阵容量的关系,而且视距环境中系统容量要低于非视距环境中系统容量。结果表明,这些结论对合理设计 MIMO 系统有重要的意义。

**关键词** :多入多出;射线跟踪法;容量补累积分布函数;阵列结构;中断容量

**中图分类号** :TN820;TN919.3 **文献标识码** :A

## Antenna and Propagation Effect on Capacity of Indoor MIMO Channel

LÜ Jian-gang<sup>1</sup>, LÜ Ying-hua<sup>1</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>1</sup>, LIANG Jing<sup>2</sup>

(1. School of Telecommunication and Network Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Unit 66083 of the Chinese People Liberation Army, Beijing 102488, China)

**Abstract** : The effects on capacity complementary cumulative distribution functions(CCDFs) of multiple-input multiple-output(MIMO) channel caused by the different antenna array structures and indoor propagation environments of both line-of-sight(LOS) and non-line-of-sight(NLOS) cases are analyzed by using a 2-D SBR(shooting-and-bouncing) ray-tracing method. Antenna array structures and indoor propagation environments affect the CCDFS significantly. 10% outage capacities show that in both LOS and NLOS indoor environments, there exist a fixed relationship that independent and identically distribution(i.i.d.) rayleigh channel capacities are larger than the capacities equipped with linear antenna array which are larger than the capacities equipped with rectangular antenna array or capacity equipped with circular antenna array. And the capacities of NLOS MIMO channel are larger than the capacities with LOS path. The results show these conclusions are very useful for designing MIMO system.

**Key words** : multiple-input multiple-output; ray-tracing; capacity complementary cumulative distribution functions; antenna array structure; outage capacity

MIMO 无线数字通信系统也称为大容量数据无线传输系统。Foschini<sup>[1]</sup>和 Telatar<sup>[2]</sup>的研究工作表明,在理想情况下使用 MIMO 技术的无线通信系统容量随发射机和接收机端的最小天线数目线性

增加。

由于 Foschini<sup>[1]</sup>和 Telatar<sup>[2]</sup>等人所预测的容量是在天线单元之间不存在相关性,散射丰富的理想情况下取得的,当信道存在相关性时信道容量会降

低<sup>[3]</sup>。在实际传播环境中 MIMO 系统如何实现理论预测的容量需进一步研究,因此 MIMO 信道测量成为研究的热点。但由于 MIMO 信道的复杂性,以及进行 MIMO 信道测量成本非常高,所以采用近些年已被广泛应用于传播预测和无线信道建模的射线跟踪法<sup>[4-5]</sup>对 MIMO 系统性能进行分析就成为一个很好的选择。

大量的研究对 MIMO 系统所能取得的容量增益进行了分析,但如何合理地设计发射和接收端天线阵列来进一步取得 MIMO 系统的容量所开展的研究非常少。由于短距离无线通信系统有可能成为 MIMO 技术最重要的应用领域,因此本文用射线跟踪法研究了天线阵列结构对视距和非视距室内环境中 MIMO 信道容量的影响。

## 1 射线跟踪法和 MIMO 容量计算

### 1.1 射线跟踪法

射线跟踪法是按照几何光学和一致性散射理论,将发射机发射电磁波做平面波近似,考虑了电波视距传播、透射、绕射和散射效应。到目前已经提出了多种射线跟踪算法,如 SBR 算法、镜像算法和混合算法。在这些算法中 SBR 算法是基本的、最常用的算法,同镜像算法相比可以分析更加复杂环境的点。但是三维 SBR 射线跟踪算法是非常耗时的,在目前实现起来有困难。因此本文采用二维 SBR 射线跟踪算法对 MIMO 系统的容量进行了分析<sup>[5-7]</sup>。

在研究中对室内环境做了简化,认为墙壁是单层有耗介质,而且没有考虑门、窗户和家具等物体的影响。

### 1.2 MIMO 系统容量的计算

考虑一个窄带的、点到点的、接收机精确信道估计的、无反馈的,发射机每个发射天线具有相同平均发射功率的慢衰落 MIMO 系统。MIMO 信号模型为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{r}$  为  $M \times 1$  的接收信号矢量; $\mathbf{s}$  为  $N \times 1$  发射信号矢量; $\mathbf{n}$  为  $M \times 1$  独立同分布加性复白高斯噪声矢量,每个分量的方差是  $\sigma^2$ ; $\mathbf{H}$  为  $M \times N$  信道矩阵,其中第  $i$  行、第  $j$  列矩阵元素表示为  $h_{ij}$ ,  $N$  和  $M$  分别是发射和接收天线数目。

按照 Telatar<sup>[2]</sup>和 Foschini<sup>[1]</sup>的结果,MIMO 容量为

$$C = \text{lb} \left[ \det \left( \mathbf{I}_M + \frac{\rho}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right) \right] \quad (2)$$

其中  $E |h_{ij}|^2 = 1, i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$ ;  $\det$  表示对方阵求行列式值; $\rho$  为接收机每根接收天线分支上的平均信噪比(SNR); $C$  表示系统容量。这样就可以从射线跟踪法得到的参数来构造信道矩阵  $\mathbf{H}$ ,然后按照式(2)得出系统容量  $C$ 。发射和接收天线对之间的信道冲激响应可以表示为所有被接收天线接收的射线矢量和<sup>[8-9]</sup>

$$g_{ij}(t) = \sum_{k=0}^M \sqrt{P_k} \cdot e^{i\theta_k} \cdot \delta(t - \tau_k) \quad (3)$$

其中  $P_k$ 、 $\theta_k$  和  $\tau_k$  分别为接收功率、位相角和第  $k$  根射线的相对时延; $M$  为被接收的射线的数目; $\delta(t)$  为  $\delta$  函数。因此窄带的系统频率响应为

$$h_{ij} = \sum_{k=0}^M \sqrt{P_k} \cdot e^{i\theta_k} \cdot e^{-i2\pi f_0 \tau_k} \quad (4)$$

利用式(4)构建信道矩阵  $\mathbf{H}$ 。 $P_k$ 、 $\theta_k$  和  $\tau_k$  等参数可以利用射线跟踪法得到。这样所有的  $N \times M$  个  $h_{ij}$  就都是复数。接收天线放置于 1 000 个随机位置的小范围里。接收机平均信噪比为 18 dB。计算每个信道样本的容量  $C$ ,就可以得到 CCDFS。

### 1.3 非视距及视距的传播环境和天线阵结构

图 1 是某室内传播环境平面图。发射天线阵固定于走廊。接收天线阵放于房间 A 中 1 000 个随机选取的位置,天线阵的取向是固定,发射天线阵同接收天线阵之间是非视距传播。墙壁为单层各向同性非磁性介质,其参数  $\epsilon_r$  为 5; $\mu_r$  为 1; $\sigma$  为 0.01 mA/m<sup>2</sup>。外墙壁和室内墙壁的厚度分别为 0.35 m 和 0.15 m。

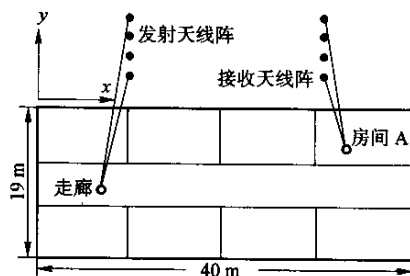


图 1 非视距室内平面图

图 2 是某室内传播环境平面图。发射天线阵固定在图 2 所示 A 位置。接收天线阵放于 1 000 个随机选取的 B 位置,但天线阵的取向是固定的,这样发射天线阵同接收天线阵之间存在视距传播路径。墙壁是单层的各向同性非磁性介质,其参数  $\epsilon_r$  为 5; $\mu_r$  为 1; $\sigma$  为 0.01 mA/m<sup>2</sup>。墙壁的厚度为 0.35 m。

系统载波频率为 5.2 GHz,波长  $\lambda$  为 5.8 cm。接收机和发射机天线阵列是由 8 个全向天线组

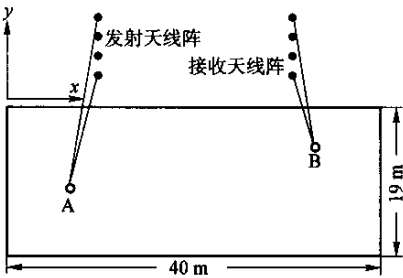


图 2 视距室内平面图

成,发射端和接收端天线结构相同,并且发射机和接收机天线阵天线间隔  $d$  也相同,天线单元都是垂直极化。

图 3 是本文研究的 3 种天线阵列结构,用射线跟踪法分析了分别为  $0.5\lambda$  和  $5\lambda$  2 种天线间隔时,视距和非视距的室内环境中天线阵列结构对 MIMO 系统 CCDFS 的影响。

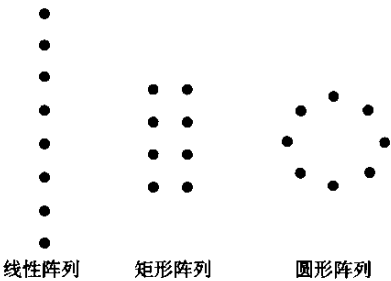


图 3 8 天线单元的天线阵列结构

## 2 2 种典型室内传播环境中的结果及分析

### 2.1 非视距室内传播环境

图 4 和图 5 是非视距室内环境中,射线跟踪和蒙特卡洛仿真得到的容量 CCDFS 曲线。

图 4 表明,天线阵天线间隔为  $0.5\lambda$  时和独立同分布瑞利信道 CCDFS 曲线相比,各天线阵列系统 CCDFS 曲线显著向左偏移,即容量发生降低;其中矩形阵列和圆形阵列的 CCDFS 曲线比较接近,但都明显低于线性阵列容量。从表 1 也可以看出,天线间隔为  $0.5\lambda$  时,线性阵列的 10% 中断容量要小于独立同分布瑞利信道中断容量大约  $6 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,但要大于矩形阵列  $3 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$  左右,大于圆形阵列  $4 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$  左右。

中断容量是非常有意义的一个系统性能度量,  $\alpha\%$  的中断容量表示 CCDFS 曲线上  $(100 - \alpha)\%$  概率时 MIMO 系统容量<sup>[10]</sup>。表 1 为射线跟踪法和蒙

特卡罗仿真得到的非视距环境中的系统 10% 中断容量。

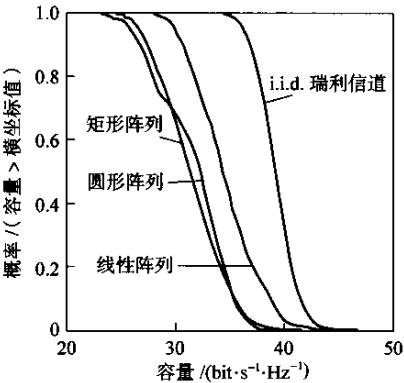


图 4 天线间隔为  $0.5\lambda$  不同阵列结构 CCDFS

表 1 10% 中断概率时的中断容量

非视距环境	线性阵列/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )	矩形阵列/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )	圆形阵列/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )	i.i.d. 瑞利信道容量/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )
$0.5\lambda$	30.736 5	27.411 9	26.761 9	36.906 3
$5\lambda$	36.037 0	35.983 6	35.455 3	36.906 3

图 5 表明天线间隔为  $5\lambda$  时,不同天线阵列结构 MIMO 系统的 CCDFS 都比较接近 i. i. d. 瑞利信道 CCDFS 曲线,即天线间隔为  $5\lambda$  时,天线阵列结构对系统的容量影响变小,都可以取得 Telatar 所预测的独立同分布瑞利信道的容量增益。从表 1 也可以看出,此时各天线阵列结构的 10% 中断容量相差不超过  $0.5 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,和独立同分布瑞利信道的 10% 中断容量的差别也不超过  $1.5 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,仍旧有独立同分布瑞利中断容量 > 线性阵中断容量 > 矩形阵中断容量或圆形阵中断容量的关系存在。

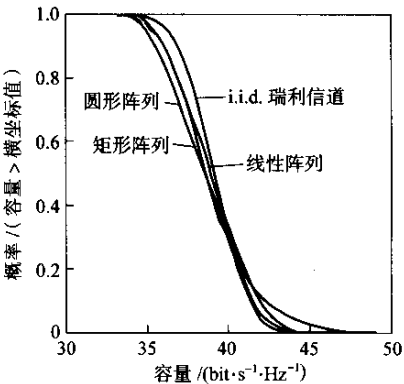


图 5 天线间隔为  $5\lambda$  的不同阵列结构 CCDFS

2.2 视距室内传播环境

图 6 和图 7 是在视距的室内环境中,射线跟踪法和蒙特卡洛仿真得到的容量 CCDFS 曲线。

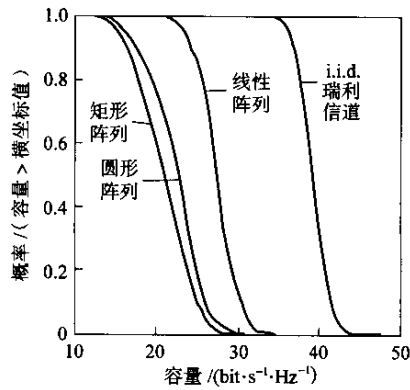


图 6 天线间隔为  $0.5\lambda$  不同阵列结构 CCDFS

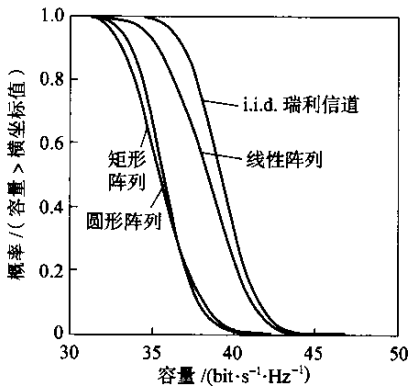


图 7 天线间隔为  $5\lambda$  的不同阵列结构 CCDFS

从图 6 可以看出,天线阵的天线间隔为  $0.5\lambda$  时,与独立同分布瑞利信道 CCDFS 曲线相比,各天线阵列系统 CCDFS 曲线显著向左偏移,即容量明显降低,其中矩形阵列的曲线偏移最大,其次是圆形阵列,然后是线性阵列。从表 2 也可以看出,天线间隔为  $0.5\lambda$  时,线性阵列 10% 中断容量要小于独立同分布瑞利信道中断容量  $12\text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,但要大于圆形阵列大约  $6.5\text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 、大于矩形阵列的 10% 中断容量约  $8\text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。

表 2 10% 中断概率时的中断容量

视距 环境	线性阵列/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )	矩形阵列/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )	圆形阵列/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )	i.i.d.瑞利 信道容量/ ( $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ )
$0.5\lambda$	24.292 8	16.302 1	17.600 1	36.906 3
$5\lambda$	35.273 2	33.078 8	33.695 8	36.906 3

图 7 表明天线间隔为  $5\lambda$  时,和独立同分布瑞利信道 CCDFS 相比较,各天线阵列结构的 CCDFS

曲线都向左发生偏移,其中线性阵列的向左偏移的程度最小,容量降低最小,圆形阵列次之,矩形阵列容量降低最大。从表 2 也看出,天线间隔为  $5\lambda$  时,线性阵列的 10% 中断容量小于独立同分布瑞利信道中断容量  $1.5\text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$  左右,大于圆形阵列  $1.5\text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ,大于矩形阵列的中断容量  $2.0\text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$  左右。但与天线间隔为  $0.5\lambda$  时情况相比,在视距的室内环境中独立同分布瑞利中断容量 > 线性阵中断容量 > 圆形阵中断容量或矩形阵中断容量的关系仍然存在。

从前面结果可以发现,存在视距路径的室内环境中系统容量低于非视距室内环境中系统容量,即视距环境会降低系统容量。这可以解释为由于视距路径的出现,MIMO 信道相关性增加,从而系统容量降低。

3 结 论

室内传播环境和天线阵列结构对系统容量 CCDFS 有重要的影响,而且随着天线间隔的减小,对系统的影响越显著。但无论视距还是非视距室内环境中,线性阵容量大于圆形阵容量或矩形阵容量。因此要想实现 MIMO 系统的容量增益,就应该根据实际的传播环境对天线阵进行合理的设计。

参考文献：

[1] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communication, 1998, 6 (3): 311-335.

[2] Telatar I E. Capacity of multi-antenna gaussian channels [J]. Eur Trans, 1999, 10(6): 585-595.

[3] 付景兴, 杨大成, 常永宇. 信道相关性对多入多出系统性能的影响[J]. 北京邮电大学学报, 2003, 26(1): 23-26. Fu Jingxing, Yang Dacheng, Chang Yongyu. The impact of channel correlation variation on the performance of multiple input-multiple output systems [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2003, 26(1): 23-26.

[4] 黄永明, 吕英华, 徐力, 等. 室内无线传播中一种混合建模方法的改进[J]. 北京邮电大学学报, 2004, 27(1): 13-17. Huang Yongming, Lü Yinghua, Xu Li, et al. An improved hybrid method for modeling indoor radio propagation [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004, 27(1): 13-17.

是,通过使用 LR-ZF 算法,在 16QAM 和 64QAM 调制时,系统性能得到了很大的改善,特别是在高信噪比的情况下,系统性能改善非常明显;对于 QPSK 调制,系统性能也有改善.同时,通过使用 LR-ZF 算法,系统的单个天线上在不使用码字复用时可以达到 ML 检测时的分集增益.仿真结果说明,在移动多径环境下,LR 算法仍然可以使系统性能获得提高.

#### 参考文献:

- [1] Yao Huan, Wornell G. Lattice-reduction-aided detectors for MIMO communication systems[ A ]. IEEE Proc Global Communications Conference ( GLOBECOM ) [ C ]. Taipei, Taiwan, 2002, 424-428.
- [2] Dirk Wubben, Ronald Bohnke. MMSE-based lattice-reduction for near-ML detection of MIMO systems[ A ]. ITG Workshop on Smart Antennas[ C ]. Munich, 2004. 18-19.
- [3] Windpassinger C, Fischer R F H. Optimum and sub-optimum lattice-reduction-aided detection and precoding for MIMO communication[ A ]. Canadian Workshop on Information Theory[ C ]. Ontario, 2003. 88-91.
- [4] Lenstra A K, Lenstra H W, Lovasz. L. Factoring polynomials with rational coefficients[ J ]. Math Ann, 1982, 261: 515-534.
- [5] Li Daoben. The perspectives of large area synchronous CDMA technology for the fourth-generation mobile radio [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41( 3 ): 114-118.
- [6] 董江波,王刚,李道本. CDMA 系统中 MAP 迭代多码检测技术的研究[ J ]. 北京邮电大学学报, 2004, 27( 6 ): 59-63.  
Dong Jiangbo, Wang Gang, Li Daoben. Iterative MAP multi-code detection for CDMA system[ J ]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004, 27( 6 ): 59-63.
- [7] 倪志,李道本. 非理想信道估计和相关 Nakagami 信道条件下空时发送分集的性能分析[ J ]. 北京邮电大学学报, 2004, 27( 5 ): 36-40.  
Ni Zhi, Li Daoben. Performance analysis of space-time block coding with imperfect channel estimation in correlated nakagami fading channels[ J ]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004, 27( 5 ): 36-40.
- [8] Ertel R B, Cardieri P, Sowerby K W, et al. Overview of spatial channel models for antenna array communication system[ J ]. IEEE Personal Commu, 1998, 5( 1 ): 10-22.
- [9] Chuah C N, Tse D, Kahn J M, et al. Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading [ J ]. IEEE Trans Inform Theory, 2002, 48( 3 ): 637-650.
- [10] Biglieri E, Proakis J, Shamai S. Fading channels: information-theoretic and communications aspect [ J ]. IEEE Trans Inform Theory, 1998, 44( 6 ): 2619-2692.
- [5] Iskander M F, Yun Z. Propagation prediction models for wireless communication systems[ J ]. IEEE Trans Microw Tech, 2002, 50( 3 ): 662-673.
- [6] Burr A. Evaluation of capacity of indoor wireless MIMO channel using ray tracing[ A ]. Proc Int Zurich Seminar Broadband Communications[ C ]. 2002. 28.1-28.6.
- [7] Ghobadi C, Shepherd P R, Pennock S R. 2D ray-tracing model for indoor radio propagation at millimeter frequencies, and the study of diversity techniques[ A ]. IEE Proc Microw Antennas Propag[ C ]. 1998, 145( 4 ): 349-353.

(上接第 33 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>