

中图分类号:TN911.22;TN820

文献标志码:A

文章编号:1674-2230(2011)03-0047-05

# 基于天线混淆的可变速率 STBC 设计

武 萌<sup>1</sup>,尹训锋<sup>2</sup>,景丹玉<sup>2</sup>

(1.装甲兵工程学院控制工程系,北京 100072; 2.海军 91917 部队,北京 102100)

**摘要:**固定速率高速 STBC(space-time block code)具有较高的频谱利用率,但是,高速 STBC 在低信噪比时的性能较差,而且频谱利用率不能随着信道条件的改善而改善。提出了一种可以根据信道条件而改变编码速率的可变速率 STBC 设计方案。仿真结果表明,采用可变速率 STBC 可以达到较大的有效吞吐容量,适合应用于高数据率通信的场合。

**关键词:**MIMO;STBC;天线混淆;有效吞吐容量

## Design of Alterable Rate Space-Time Block Codes Based On Transmit Antenna Shuffling

WU Meng<sup>1</sup>, YIN Xun-feng<sup>2</sup>, JING Dan-yu<sup>2</sup>

(1. Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. Unit 91917 of PLA, Beijing 102100, China)

**Abstract:** Changeless high-speed space-time block code (STBC) has better frequency efficiency, but the low signal noise ratio performance is poor, and frequency efficiency can not changing with signal noise ratio. An alterable rate scheme is proposed for space-time block codes. Coding rate of the proposed scheme alters with the changing of feedback channel condition. Simulation results show that the proposed method with alterable rate can achieve large effective throughput, which accounts for that our scheme is fit for high-speed communications.

**Key words:** MIMO; STBC; antenna-shuffling; effective throughput

## 1 引言

克服无线信道所固有的衰落和时变特性,进而高效、可靠地传输信息一直是无线通信的发展方向。但无线信道所固有的衰落和时变特性始终是系统设计者面临的挑战。研究表明,多输入多输出(MIMO)和空时编码技术结合可以提高了系统的传输性能。空时编码中的 STBC 以其简单的结构和可靠的性能受到越来越广泛的重视。

Alamouti 首先提出了两发射天线的空时分组码(STBC)的概念<sup>[1]</sup>,STBC 可以在接收端采用简单的线性处理进行解码,从而降低了接收机的复杂度。此后,V. Tarokh 和 H. Jafarkhani 等人在

Alamouti 码的基础上提出了一种基于正交设计的 STBC(OSTBC)<sup>[2]</sup>的编码技术。OSTBC 能够实现全发射分集,但对于复正交设计,在发射天线数大于 2 时不能同时达到全发射分集和全编码速率<sup>[2]</sup>。为了使 STBC 在发射天线较多的情况下也能获得较高的速率,Jafarkhani 等人提出了准正交空时分组码(QOSTBC)的概念<sup>[3]</sup>,所构成的 QOSTBC 具有部分正交的特性,在保证达到一定误码率的前提下可以实现全速率传输。为了进一步提高 STBC 的编码效率,使其能够应用在更高速的传输场合,编码速率 > 1 的高速 STBC 也得到了广泛研究<sup>[5-7]</sup>,这些高速的 STBC 可以提高 STBC 的有效

收稿日期:2010-11-10;修回日期:2011-01-12

作者简介:武萌(1981—),女,山东泰安人,讲师,硕士,主要研究方向为导航制导,自动控制、信号与信息处理。

吞吐容量。

文献[5-6]提出的高速 STBC 能够提高 STBC 的编码速率,提高 MIMO 通信系统的频谱利用率,但是采用固定速率的 STBC 方案在高信噪比条件下频谱利用率不能随着信道条件的改善而改善;文献[7]提出了基于优化功率分布的变速率空时分组编码,频谱利用率得到了改善。采用文献[6]的天线混淆空时分组码方案,本文提出了一种根据信道条件的变化而速率可变的闭环 STBC 设计方案。

## 2 天线混淆高速 STBC 原理

考虑图 1 所示的 MIMO 通信系统。假设信道为准静态瑞利衰落信道。信道系数在一帧内保持不变而在帧与帧之间是变化的。假设信道状态信息在发射端未知,而在接收端已知,采用 Jafarkhani 码构造 STBC,采用 QPSK 调制,编码矩阵表示为:

$$X_4 = \begin{bmatrix} X_{12} & X_{34} \\ -X_{34}^* & X_{12}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $X_{12} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$ ,  $X_{34} = \begin{bmatrix} x_3 & x_4 \\ -x_4^* & x_3^* \end{bmatrix}$ 。在接收端,(1)式经过信道传输后的接收信号表示为:

$$\underline{r} = HX_4 + \underline{n} \quad (2)$$

其中,  $\underline{r} = (r_1, r_2, r_3, r_4)^T$  表示接收信号,  $H = (h_1, h_2, h_3, h_4)^T$  表示信道衰落,  $\underline{n} = (n_1, n_2, n_3, n_4)^T$  表示信道中存在的噪声。(2)式的等效接收形式表示为:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2^* \\ r_3^* \\ r_4 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_2^* & -h_1^* & h_4^* & -h_3^* \\ h_3^* & h_4^* & -h_1^* & -h_2^* \\ h_4 & -h_3 & -h_2 & h_1 \end{bmatrix}}_{H_4} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \\ n_3^* \\ n_4 \end{bmatrix}}_{\underline{n}} \quad (3)$$

下面以 4 天线 STBC 为例说明高速 STBC 的

构造原理<sup>[6]</sup>。选取信息比特  $b_0, b_1$  作为控制信息。采用图 2 所示的天线发射方法,当  $b_0, b_1$  取不同值时的等效信道矩阵可以表示为:

$$b_0 b_1 = (00) \Rightarrow H_0 = H_4 \quad (4)$$

$$b_0 b_1 = (01) \Rightarrow H_1 = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_4 & h_3 \\ h_2^* & -h_1^* & h_3^* & -h_4^* \\ h_4^* & h_3^* & -h_1^* & -h_2^* \\ h_3 & -h_4 & -h_2 & h_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b_0 b_1 = (10) \Rightarrow H_2 = \begin{bmatrix} h_1 & h_3 & h_4 & h_2 \\ h_3^* & -h_1^* & h_2^* & -h_4^* \\ h_4^* & h_2^* & -h_1^* & -h_3^* \\ h_2 & -h_4 & -h_3 & h_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$b_0 b_1 = (11) \Rightarrow H_3 = \begin{bmatrix} h_1 & h_3 & h_2 & h_4 \\ h_3^* & -h_1^* & h_4^* & -h_2^* \\ h_2^* & h_4^* & -h_1^* & -h_3^* \\ h_4 & -h_2 & -h_3 & h_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

可以看出,在 4 个时间间隔内发射 4 个符号的同时还有控制信息  $b_0 b_1$  随着空时编码符号一起发射。

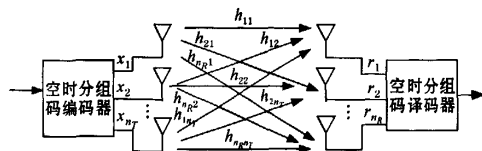


图 1 STBC 模型

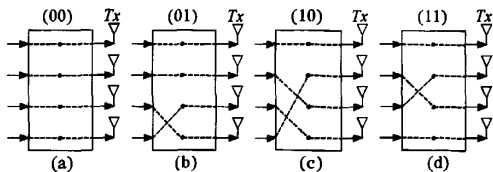


图 2 天线混淆原理图

## 3 可变速率 STBC 的设计

### 3.1 可变速率 STBC 的编码

可变速率 STBC 原理如图 3 所示,信源信息分为两部分:一部分经过调制后进行 STBC 编码,然后通过天线发射出去,另一部分作为控制信息和

信道反馈的信息一起通过速率控制器实现STBC的可变速率传输。

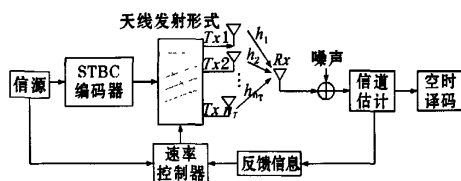


图3 可变速率STBC原理图

可变速率STBC的速率控制器根据信道反馈信息来选择控制信息的数量。若信道条件较好,则选择较多的信源信息作为控制信息,此时,STBC的编码速率就相应较高;反之,若信道条件较差,则选择较少的信源信息作为控制信息,此时,STBC的编码速率就相应较低;若信道条件很差,就不选择信源信息作为控制信息,此时,编码速率就是普通STBC的编码速率。为简化系统复杂性,节约信道成本,信道反馈信息以二进制编码的形式直接为速率控制器提供控制信息数量。考虑4天线空时分组码系统,采用MPSK调制,接收端的信噪比为:

$$SNR = \frac{\alpha^2 - \beta^2 \sigma_s^2}{\alpha \sigma_n^2} \quad (8)$$

其中,  $\alpha = \sum_{i=1}^4 |h_i|^2$ ,  $\beta = 2\text{Re}[h_1^*(h_4^*) - h_2^*(h_3^*)]$ ,  $\sigma_s^2$  为接收端的所有发射信号功率,  $\sigma_n^2$  为噪声功率。接收端通过(8)式计算出接收信噪比并根据信噪比的大小计算出适合的控制信息数量。4天线空时分组码系统能提供的天线混淆数量为24个,最大支持的控制信息数量为  $n_{\max} = \lfloor \log_2(4!) \rfloor = 4$ , 用2位二进制编码  $(i, j)$  表示,通过(9)式的编码映射方式可方便的把控制信息数量  $n$  反馈给发射端的速率控制器。

$$(i, j) = \begin{cases} (0, 0) & n = 0 \\ (0, 1) & n = 1 \\ (1, 0) & n = 2 \\ (1, 1) & n = 3 \end{cases} \quad (9)$$

在可变速率STBC系统中,调制后的信源信息采用(1)式所示的编码矩阵进行空时分组编码,编码后的信息在速率控制器作用下,通过选择不同的天线发射方式发射出去。天线发射方式的数量是和发射天线数量相关的,若发射天线数量为

$n_T$ , 对应编号分别为  $1, 2, \dots, n_T$ , 以发射天线编号的不同组合表示不同的发射方式,则天线发射方式的数量为  $n_T! = n_T(n_T - 1) \cdots 1$ , 支持的最大控制信息数量为  $n_{\max} = \lfloor \log_2(n_T!) \rfloor$ , 反馈信道需要传送的信息位数为:  $\lceil \log_2(\lfloor \log_2(n_T!) \rfloor) \rceil$ , 其中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整,  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整。

在发射天线数量为  $n_T$  时,若系统采用MPSK调制方式,则可变速率STBC的最大频谱利用率为:

$$\eta = \frac{1}{n_T} M \left( \frac{\lfloor \log_2(n_T!) \rfloor + n_T}{\log_2 M} \right) \text{ bit/s/Hz} \quad (9)$$

在不考虑天线对发射符号的影响的情况下,采用QPSK调制,可变速率STBC的最大频谱利用率和发射天线的数量之间的关系如图4所示。

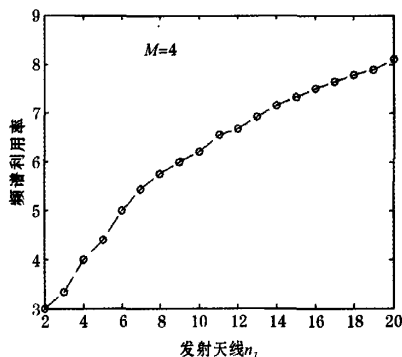


图4 发射天线数量和频谱利用率之间的关系

### 3.2 可变速率STBC的译码

可变速率STBC采用多通道匹配滤波的方法进行译码,若在某一信噪比条件下,控制信息的数量为  $n$  bit, 则有  $2^n$  种天线发射方式。接收端的等效接收信号表示为:

$$r = H_j x + n \quad (10)$$

其中,  $H_j (j \in \{1, \dots, 2^n\})$  表示不同控制信息下的等效信道接收矩阵。以4天线空时分组系统为例,采用Jafarkhani 准正交空时分组码,其等效信道矩阵满足<sup>[6]</sup>:

$$H_i^H H_j = \begin{cases} H_i & i = j \\ \tilde{H}_i & i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{其中, } H_i = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & \beta \\ 0 & \alpha & -\beta & 0 \\ 0 & -\beta & \alpha & 0 \\ \beta & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix},$$

$\tilde{H}_i =$ 

$$\begin{bmatrix} \Sigma(h_i h_j)_{11} & \Sigma(h_i h_j)_{12} & \Sigma(h_i h_j)_{13} & \Sigma(h_i h_j)_{14} \\ \Sigma(h_i h_j)_{21} & \Sigma(h_i h_j)_{22} & \Sigma(h_i h_j)_{23} & \Sigma(h_i h_j)_{24} \\ \Sigma(h_i h_j)_{31} & \Sigma(h_i h_j)_{32} & \Sigma(h_i h_j)_{33} & \Sigma(h_i h_j)_{34} \\ \Sigma(h_i h_j)_{41} & \Sigma(h_i h_j)_{42} & \Sigma(h_i h_j)_{43} & \Sigma(h_i h_j)_{44} \end{bmatrix},$$

$\Sigma(h_i h_j)_{mn} (m, n, i, j \in \{1, \dots, 4\})$  表示信道矩阵  $H_i, H_j$  中的信道系数  $h_i, h_j$  及其共轭  $h_i^*, h_j^*$  之间的乘累加。对接收信号 (10) 分别进行匹配滤波得:

$$H_i^H \underline{r} = H_i^H H_j \underline{x} + H_i^H \underline{n}, (i = 1, \dots, 2^n) \quad (12)$$

对 (12) 式采用成对最大似然译码判决规则<sup>[3]</sup>, 可以得到使 (12) 式最大的等效信道接收矩阵  $H_k$  ( $k \in \{1, 2, \dots, 2^n\}$ ), 根据信源控制信息和等效信道接收矩阵  $H_k$  的映射关系可以得到控制信息:

$$\hat{\underline{x}}^k = [\hat{x}_1^k, \dots, \hat{x}_n^k]^T \quad (13)$$

利用 (12) 式成对最大似然判决准则的结果可以得到空时编码的译码信息:

$$\hat{\underline{x}}^{\text{STBC}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n_r})^T \quad (14)$$

将 (13) 式和 (14) 式合并就得到可变速率 STBC 的最终译码结果。

## 4 仿真结果及性能分析

本文在准静态瑞利衰落信道中对可变速率 STBC 的有效吞吐容量进行仿真, 采用 4 发射天线和 1 接收天线。在仿真过程中, 假定每一发射天线到接收天线的衰落都是相互独立的, 并且接收机完全知道 CSI, 而发射机不知道。为了提高空时分组码的分集性能, 采用星座旋转的 Jafarkhani 准正交空时分组<sup>[4]</sup>作为编码矩阵来构造 STBC, 采用 QPSK 调制, 最优旋转角度  $\theta = \frac{\pi}{4}$ , 编码矩阵表示为:

$$X_4 = \begin{bmatrix} X_{12} & X_{34}(\theta) \\ -X_{34}^*(\theta) & X_{12}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $X_{34}(\theta) = \begin{bmatrix} x_3 e^{j\theta} & x_4 e^{j\theta} \\ -x_4^* e^{-j\theta} & x_3^* e^{-j\theta} \end{bmatrix}$ 。仿真时信道反馈 SNR 和控制信息数量  $n$  之间的关系采用如下形式:

$$n = \begin{cases} 0 & \text{SNR} \leq 15\text{dB} \\ 1 & 15\text{dB} < \text{SNR} \leq 20\text{dB} \\ 2 & 20\text{dB} < \text{SNR} \leq 25\text{dB} \end{cases} \quad (16)$$

图 5 所示的是 4 天线可变速率 STBC 和 QOSTBC 以及基于优化功率分布的可变速率 STBC 的有效吞吐容量比较图, 仿真均采用 QPSK 星座旋转调制方式。从图 5 可以看出, 在低信噪比时, 低码率的基于优化功率分布的可变速率 STBC 具有较好的性能, 本文可变速率 STBC 具有和 QOSTBC 相同的有效吞吐容量, 随着信噪比的逐渐改善, 高码率的基于优化功率分布的可变速率 STBC 和本文可变速率 STBC 的有效吞吐容量也得到改善。

基于优化功率分布的可变速率 STBC 是通过在单位时隙内传送不同的信息组合来实现可变速率的特性, 码率的大小和时隙有关, 而信道的时变特性限制了发送时隙的大小, 进而影响到码率的大小, 使得该方案在快变系统中的应用受到限制, 系统采用开环方式, 不能跟随信道条件自适应的选择码率。本文提出的可变速率 STBC 克服了以上不足。

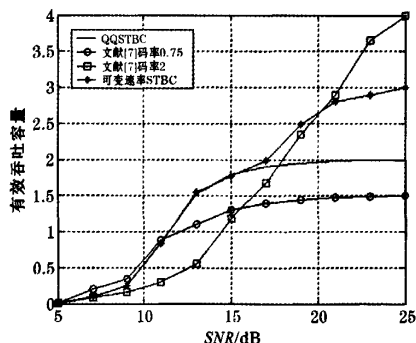


图 5 可变速率 STBC 有效吞吐容量比较图

## 5 结论

采用 MIMO 和 STBC 相结合的技术是提高无线数据传输速率的有效方法。为了进一步提高 MIMO 系统的信息传输速率, 本文提出了一种可变速率 STBC 的设计方法。这种方法根据信道条件的不同采用不同速率的 STBC, 适合应用在信息传输速率较高的场合。

### 参考文献:

- [1] ALAMOUTI S M. A Simple Transmitter Diversity Scheme for Wireless Communication [J]. IEEE J Select Areas

- Commun, 1998, 16(8):1451 - 1458.
- [2] TAROKH V, JAFARKHANI H, CALDERBANK A R. Space - Time Block Codes from Orthogonal Designs[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1999, 45(5):1456 - 1467.
- [3] JAFARKHANI H. A Quasi - Orthogonal Space - Time Block Code[J]. IEEE Trans Commun, 2001, 49(1):1 - 4.
- [4] SU W, XIA X G. Signal Constellations for Quasi - Orthogonal Space - Time Block Codes with Full Diversity [J]. IEEE Trans Inform Theory, 2004, 50(10):2331 - 2347.
- [5] SUSHANTA D, AL - DHAHIR N, CALDERBANK R. Novel Full - Diversity High - Rate STBC for 2 and 4 Transmit Antennas [J]. IEEE Commun Lett, 2006, 10(3):171 - 173.
- [6] 尹训锋,曾凡鑫,武萌. 基于天线混淆的高速空时分组码系统设计[J]. 通信对抗, 2007, 97(2):34 - 38.
- [7] 杨惠生. 可变速率空时编码技术研究[D]. 吉林:吉林大学, 2007.

(上接第 41 页)

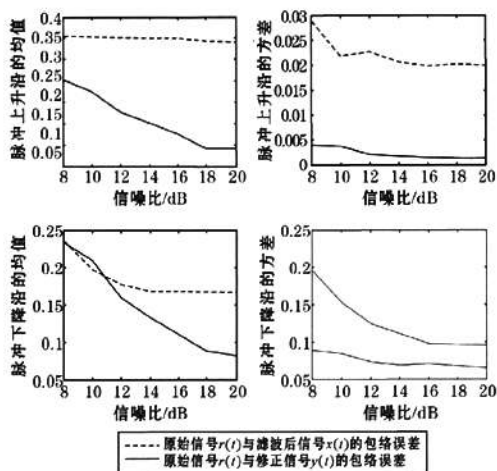


图 9 SNR = 8 ~ 20dB 时  $x(t)$  和  $r(t)$  与原始信号  $r(t)$  的上升/下降沿误差比较

从图 9 中可以得出,相同信噪比下,修正的脉冲上升/下降沿的误差均值和方差均小于滤波后脉冲上升/下降沿的误差,证明了不同信噪比条件下 LSSVR 算法都有较好的性能,稳定性强,对噪声不敏感,且修正信号的误差随着信噪比的提高而减小有明显的。

## 5 结束语

本文仅以幂级数描述的非线性模型定性分析了接收机系统对截获脉冲信号的包络产生的不利影响,然后通过 LSSVR 算法辨识接收机系统传递函数的逆系统模型,恢复接收信号的原始包络信息,仿真实验结果证明了该方法的有效性。实际

接收机信道的非线性涉及系统采用的器件性能 and 设计技术水平,幂级数模型并不能精确描述系统的各种非线性因素。同时, LSSVR 矩阵求逆运算量及运算复杂性随模型维数增高而加大,实时性比较差。采用径向基函数的 LSSVR 学习参数  $\gamma$  和  $\sigma^2$  的选取也对算法的模型预测能力和算法的效率有很大的影响。如何改进 LSSVR 算法,提高信号处理的实时性,是待解决的问题。

## 参考文献:

- [1] 林肖辉. 侦察接收机信道非线性特性分析[J]. 无线电工程, 2009, 39(9):55 - 57.
- [2] 蓝鲲, 陆寿茂, 闫俊武. 动态测量系统的逆系统设计[J]. 遥测遥控, 2002(3):35 - 40.
- [3] GOETHALS I, PELCKMNS K. Identification of MIMO Hammerstein Models Using Least Squares Support Vector Machines[J]. Automatica, 2005, 41(7):1263 - 1272.
- [4] SUYKENS J, VANDEWALLE J. Least Squares Support Vector Machine Classifiers[J]. Neural Processing Letter, 1999, 9(3):293 - 300.
- [5] 王定成, 方廷建, 高理富, 等. 支持向量机回归在线建模及应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(1):89 - 91.
- [6] 祖海燕, 孙丽萍, 刘德胜. 基于支持向量机中纤维板施胶系统逆模型的辨识[J]. 林业科学, 2010, 46(2):171 - 174.
- [7] 刘胜, 宋佳, 李高云. PSO 并行优化 LSSVR 非线性黑箱模型辨识[J]. 智能系统学报, 2010, 5(1):51 - 56.

## 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>