

文章编号 1005-0388(2006)04-0635-05

# 差分空时系统的天线选择算法<sup>\*</sup>

宋高俊<sup>1,2</sup> 熊邦书<sup>1</sup> 郭业才<sup>2</sup>

(1. 南昌航空工业学院电子工程系, sgjahlgdx@mail.china.com,  
江西 南昌 330063; 2. 安徽理工大学电子工程系, 安徽 淮南 232001)

**摘 要** 一般的天线选择算法都需要信道状态信息, 根据信道参数选择天线。然而, 估计多输入多输出(MIMO)系统的信道参数大大增加了系统复杂性, 而且, 在快衰落信道中, 信道估计是很困难的。基于正交空时编码和接收信号向量的范数, 提出了非相干的天线选择算法(NON-AS), 不需要估计信道, 并将算法应用于差分空时系统。性能分析和仿真结果表明, 在高信噪比情况下, NON-AS 算法能实现和完全复杂性系统同样的分集增益。

**关键词** 差分空时编码, 天线选择, 分集增益, 编码增益, 成对错误概率, 完全复杂性  
**中图分类号** TN914 **文献标识码** A

## Antenna selection algorithm for differential space-time system

SONG Gao-Jun<sup>1,2</sup> XIONG Bang-shu<sup>1</sup> GUO Ye-cai<sup>2</sup>

(1. Nanchang Institute of Aeronautical Technology, sgjahlgdx@mail.china.com,  
Nanchang Jiangxi 330063, China; 2. Dept. of Electronic Engineering, Anhui  
University of Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract** In general, algorithm of antenna selection requires channel states information, and the chosen antennas have to satisfy the characteristic of channel parameters. For MIMO systems, the estimation of channel parameters will enlarge greatly the system complexity, especially it is very difficult to estimate channel parameters in the fast fading channels. Based on orthogonal space-time coding and the F-2 norm of received signal vector, a non-coherent antenna selection algorithm, which does not require to estimate channel parameters, is presented in this paper. Performance analysis and simulation results show that in case of high signal noise ratio, the non-coherent antenna selective algorithm can achieve the same diversity gain as full complexity system.

**Key words** differential space-time coding, antenna selection, diversity gain, coding gain, pair-wise error probability, full complexity

## 1 引 言

无线传输系统的容量和性能在很大程度上受到衰落和干扰的限制, 使用多个天线发送和接收(MIMO)可以极大的改善系统的性能, 提高系统的频谱

效率<sup>[1,2]</sup>。增加天线数提供了更多的空间自由度——或是通过空间复用来增加数据速率, 或是通过空时编码增加分集改善系统的性能。然而, 多天线系统所付出的代价是需要更多的射频链路, 这会导致系统成本和复杂性上升。因此, 在收发两端射频链路

\* 收稿日期: 2004-12-30.

基金项目: 江西省教育厅自然科学基金资助, 赣教技字[2006]159 号

确定的情况下,如何提高系统的性能,是一个重要的研究领域。其中采用天线选择技术是一种可行而有效的方法,受到人们的关注。

对于 MIMO 系统的天线选择,目前的文献已提出了多种天线选择方案,包括发射天线选择<sup>[3],[4]</sup>、接收天线选择<sup>[5]</sup>和发射接收混合选择方法<sup>[6],[7]</sup>等。然而这些方法都假设在发射机或接收机处能准确的获得信道参数,属于相干检测的天线选择。在系统天线较多和信道快衰落的情况下,信道的估计是很困难的,即使能实现,系统也将是非常复杂,并且需要更多的训练时间,导致传输效率降低。有关信道状态信息未知情况下的天线选择研究还未见报导。基于正交空时编码和 MIMO 系统接收信号矢量的 F-2 范数,提出了一种简单的非相干天线选择 (NON-AS) 算法,天线选择无需信道信息,并将算法应用于差分空时分组编码系统。成对符号错误概率分析和仿真结果表明,在高信噪比情况下,天线选择系统能实现和完全复杂性系统同样的分集增益,即,通过增加廉价的天线元件就能实现很大的系统分集性能增加。

2 信号模型

考虑 Tarokh 提出的两发射天线差分分组编码系统的天线选择,系统有  $M$  个接收天线。假设系统有两个发射和  $L$  个接收射频链路 ( $L < M$ ),即系统只在接收机处采用天线选择。根据天线选择准则,从  $M$  个接收天线中选择  $L$  个接收天线连接到  $L$  个射频链路。假设发射机和接收机都无信道状态信息,采用差分空时分组码传输信号。根据文献<sup>[8]</sup>,每个接收天线的信号模型为

$$\begin{bmatrix} r_{1,j} \\ r_{2,j} \end{bmatrix} = \sqrt{\gamma} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1,j} \\ h_{2,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,j} \\ n_{2,j} \end{bmatrix}$$

$j = 1, \dots, L$

(1)

或写为矩阵形式

$$\mathbf{R}_{j,k} = \sqrt{\gamma} \mathbf{C}_k \mathbf{H}_{j,k} + \mathbf{N}_{j,k} \quad j = 1, \dots, L$$

(2)

其中  $\gamma$  是每个接收天线的信噪比,  $\mathbf{R}_{j,k}$ 、 $\mathbf{C}_k$ 、 $\mathbf{H}_{j,k}$  和  $\mathbf{N}_{j,k}$  分别是第  $j$  个接收天线在第  $k$  个时隙的接收信号、差分编码信号、等效信道和噪声,它们的定义分别为

$$\mathbf{R}_k \triangleq \begin{bmatrix} r_{1,k} & -r_{2,k}^* \\ r_{2,k} & r_{1,k}^* \end{bmatrix}$$

(3)

$$\mathbf{C}_{k'} \triangleq \begin{bmatrix} c_{1,k'} & c_{2,k'} \\ -c_{2,k'}^* & c_{1,k'}^* \end{bmatrix}$$

(4)

$$\mathbf{H}_k \triangleq \begin{bmatrix} h_{1,k} & -h_{2,k}^* \\ h_{2,k} & h_{1,k}^* \end{bmatrix}$$

(5)

$$\mathbf{N}_k \triangleq \begin{bmatrix} n_{1,k} & -n_{2,k}^* \\ n_{2,k} & n_{1,k}^* \end{bmatrix}$$

(6)

在第  $k$  个时隙中,  $L$  个接收天线的信号可以联合表示为

$$\mathbf{R}_k = [\mathbf{R}_{1,k} \cdots \mathbf{R}_{L,k}]$$

(7)

3 天线选择算法

应用式(7),对  $L$  个接收天线的信号实施差分运算后线性叠加,则有

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{R}_k \mathbf{R}_{k-1}^H = \sum_{m=1}^L \mathbf{G}_{m,k}$$

(8)

$$\mathbf{G}_k = \sum_{j=1}^L \gamma | \mathbf{H}_{j,k} | \mathbf{S}_k + \sum_{j=1}^L (\sqrt{\gamma} \mathbf{C}_k \mathbf{H}_{j,k} \mathbf{N}_{j,k-1}^H + \sqrt{\gamma} \mathbf{H}_{j,k}^H \mathbf{C}_k^H \mathbf{N}_{j,k} + \mathbf{N}_{j,k} \mathbf{N}_{j,k-1}^H)$$

(9)

式中  $\mathbf{G}_{m,k} = \mathbf{R}_{m,k} \mathbf{R}_{m,k-1}^H$ 。根据式(9)和文献<sup>[8]</sup>,可求得发射信号的最大似然解

$$\hat{\mathbf{S}} = \arg \max_{\mathbf{S}_{1,k}, \mathbf{S}_{2,k}} R_e \{ \text{tr} [\mathbf{S}_k^H \mathbf{G}_k] \}$$

(10)

其中

$$\mathbf{S}_k \triangleq \begin{bmatrix} s_{1,k} & s_{2,k} \\ -s_{2,k}^* & s_{1,k}^* \end{bmatrix}$$

(11)

根据式(9)中矩阵信号  $\mathbf{S}_k$  的  $S_{1,1}$  分量,每个瞬时信道的比特错误率为

$$P_e = Q(\sqrt{\gamma\beta/4}) \leq e^{-\frac{\gamma\beta}{8}}$$

(12)

上式中信道参数  $\beta \triangleq \sum_{j=1}^L | \mathbf{H}_{j,k} |$ ,或写为  $\beta = \sum_{j=1}^L \beta_j$ ,  $\beta_j \triangleq | \mathbf{H}_{j,k} |$  是第  $j$  个接收天线的信道参数,  $|A|$  表示矩阵  $A$  的行列式。式(12)中考虑到了每个 BPSK 符号的能量是  $1/2$ 。式(12)表明了最佳天线的选择准则:在已获得信道状态信息条件下,为了使系统的比特错误率  $P_e$  最小,应选择信道参数  $\beta$  最大的天线子集,即从  $M$  个接收天线中选择信道参数  $\{\beta_j, j = 1, \dots, L\}$  最大的  $L$  个天线,使

$$m^* = \max_{m \in G} (\sum_{j=1}^L \beta_j)_m$$

(13)

其中  $m$  表示  $G = \binom{M}{L}$  种接收天线组合中的第  $m$  组选择。在无信道状态信息情况下,选择最佳的天线子集是不可能的,因此,提出了一种次最佳的非相干天线选择算法。将式(1)写成矢量方程

$$\mathbf{r}_j = \sqrt{\gamma} \mathbf{C} \mathbf{h}_j + \mathbf{n}_j$$

(14)

其中  $j$  是接收天线标号,为了表示简便,式(14)中已

舍弃了时间指标  $k$ 。因此,天线选择目标函数可以表示为

$$\begin{aligned} J(m) &= \left( \sum_{j=1}^L \| \mathbf{r}_j \|^2 \right)_m \\ &= \left[ \sum_{j=1}^L \gamma | \mathbf{H}_j | + \right. \\ &\quad \left. \sum_{j=1}^L (\sqrt{\gamma} \mathbf{h}_j^H \mathbf{C}^H \mathbf{n}_j + \sqrt{\gamma} \mathbf{C} \mathbf{h}_j \mathbf{n}_j^H) \right]_m \end{aligned} \quad (15)$$

其中式(15)中已忽略了高阶噪声项,并且使用了关系  $| \mathbf{H}_j | = \| \mathbf{h}_j \|^2$ 。显然,目标函数  $J(m)$  是信道  $\sum_{j=1}^L \gamma | \mathbf{H}_j |$  的渐近无偏估计,随着信噪比的增大,估计误差趋于零。从而得到无信道信息情况下的天线选择算法为

$$m_0 = \max_{m \in G} J(m) = \max_{m \in G} \left( \sum_{j=1}^L \| \mathbf{r}_j \|^2 \right)_m \quad (16)$$

其中  $m_0$  是根据算法(16)找到的最佳天线子集。

## 4 性能分析

本节主要通过分析平均比特错误率,研究非相干天线选择算法的性能。然而,采用算法(16)时,精确的获得信道概率分布的解析表达式是很困难的,因此也就无法给出平均比特错误率和编码增益及分集增益的一般解析关系。下面我们讨论一种简单的分析方法,研究在大信噪比时非相干天线选择系统的性能,理解在衰落信道中影响系统性能的主要因素。

根据式(15)可知,在大信噪比条件下,目标函数  $J(m)$  趋近等效信道  $\sum_{j=1}^L \gamma | \mathbf{H}_j |$ , 因此算法(16)和(13)得到的天线子集信道参数  $\beta$  的概率分布渐近相同。从而算法(13)的性能可以看作高信噪比条件下算法(16)的渐近性能。下面分析算法(13)的平均比特错误率性能。

为了分析的简单,本节的分析只考虑  $L=1$  的情况,即从  $M$  个接收天线中选择一个天线接收。显然,每个接收天线的信道参数  $\beta_j$  是相互独立的  $\Gamma$  随机变量,

$$\beta_j = | h_{1,j} |^2 + | h_{2,j} |^2, j = 1, \dots, M \quad (17)$$

其概率密度函数和概率分布函数分别为

$$f_{\beta}(y) = ye^{-y} \quad (18)$$

$$F_{\beta}(y) = 1 - e^{-y}(1 + y) \quad (19)$$

以上已假设了  $\{h_{i,j}, i=1,2, j=1, \dots, M\}$  是独立的零均值方差为 1 的高斯随机变量。 $M$  个接收天线的信道参数构成了顺序统计量  $\{\beta_{(j)}, j=1, \dots, M\}$ , 满足

$\beta_{(M)} > \beta_{(M-1)} > \dots > \beta_{(1)}$ 。其中最大参数  $\beta_{(M)}$  的概率密度函数为<sup>[10]</sup>

$$f_{\beta(M)}(y) = M f_{\beta}(y) (F_{\beta}(y))^{M-1} \quad (20)$$

系统的平均误比特率为

$$P = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{\gamma y/4}) f_{\beta(M)}(y) dy \quad (21)$$

由于系统的平均误码性能主要取决于  $y \rightarrow 0^+$  时  $f_{\beta(M)}(y)$  的特性<sup>[11]</sup>, 将  $f_{\beta(M)}(y)$  作多项式展开则式(21)可以写为

$$\begin{aligned} P &= \int_0^{\infty} \int_{\sqrt{\gamma y/4}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \left[ y \left( \frac{y^2}{2} \right)^{M-1} + \right. \\ &\quad \left. o \left( y \left( \frac{y^2}{2} \right)^{M-1} \right) \right] dx dy \end{aligned} \quad (22)$$

在(22)式中交换积分次序,可求得,

$$\begin{aligned} P &= \frac{2^{3M-1}}{\sqrt{\pi} \gamma^{2M}} \int_0^{\infty} y^{2M-1/2} e^{-y} dy + o(\gamma^{-(2M+1)}) \\ &= \frac{2^{3M-1}}{\sqrt{\pi} \gamma^{2M}} \Gamma \left( 2M + \frac{1}{2} \right) + o(\gamma^{-(2M+1)}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$P = \frac{2^{3M-1}}{\gamma^{2M}} \left( 2M - \frac{1}{2} \right)! + o(\gamma^{-(2M+1)}) \quad (24)$$

考虑大信噪比极限,则有

$$P \approx \frac{2^{3M-1}}{\gamma^{2M}} \left( 2M - \frac{1}{2} \right)! \quad (25)$$

这表明,在大信噪比情况下,采用相干天线选择能实现的满分集增益为  $2M$ 。因此,大信噪比情况下,采用非相干天线选择算法(16)能渐进实现满分集增益  $2M$ 。

## 5 性能仿真

本节通过仿真研究算法(16)的性能。仿真中假设每个发射天线到每个接收天线的衰落是相互独立的,系统的频谱效率为  $R=1\text{b/s/Hz}$ , 因此采用了 BPSK 调制。系统性能由不同信噪比(SNR)时的比特错误率(BER)评估。

**仿真实验 1** 接收天线数不同时天线选择系统的性能

图 1 是两个发射天线和两个接收天线的天线选择系统的误码性能曲线,采用了(2,1)选择方案,即从两个接收天线中选择一个天线接收。为了比较性能,图中还给出了无天线选择的两发射天线和两接收天线差分分组码<sup>[7]</sup>的性能曲线。比较两曲线的下降坡度可知,在高信噪比情况下,它们的分集增益渐进相同。这说明,使用天线选择能渐进实现满分集增益,这一结论与上节的理论分析是一致的。这一结论也能从图 2 中的两发射天线和 3 个接收天线的

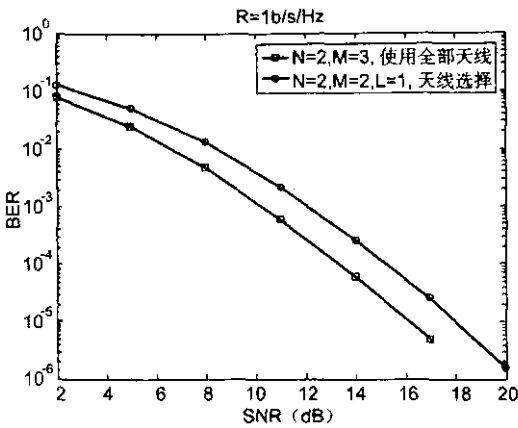


图 1 2 个接收天线的 (2,1) 天线选择系统性能

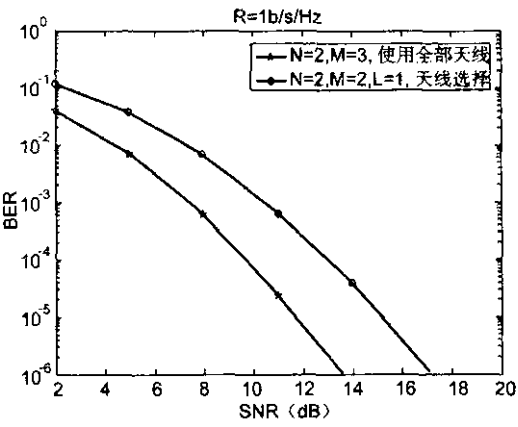


图 2 3 个接收天线的 (3,1) 天线选择系统性能

(3,1) 天线选择系统性能加以验证。此外,从图 2 中还可以观察到,在接收天线增多的情况下,虽然使用天线选择能渐进实现满分集增益,但与满复杂性系统(使用全部天线)比较,编码增益的损失增大。例如,在比特错误率为  $10^{-4}$  时,采用 (2,1) 选择的系统性能与满复杂性系统的性能差距约为 2 dB,而 (3,1) 选择系统的性能与满复杂性系统的差距增加到 3.3 dB。

图 3 中给出的是有不同接收天线的天线选择系统的性能比较,其中包括了无天线选择的两发射天线和单接收天线系统的性能曲线。显然,随着可选择接收天线的增多,系统的分集增益明显增大。例如,接收天线数从 1 增加到 2、3 和 4 时,BER 为  $10^{-3}$  的差错性能分别提高了约 5.7 dB、7.1 dB 和 8.2 dB。但是图中的曲线也表明,当接收天线再增加时,性能的增加趋于饱和;另一方面,天线数的增加势必造成天线选择复杂性的上升,因此,在工程中,性能和复杂性要综合考虑,从图 3 也能看到,只要采

用 3~5 个天线就能实现大部分可能分集增益。

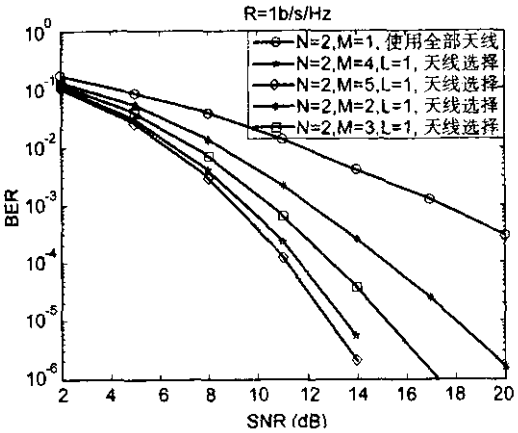


图 3 不同接收天线数的天线选择系统性能比较

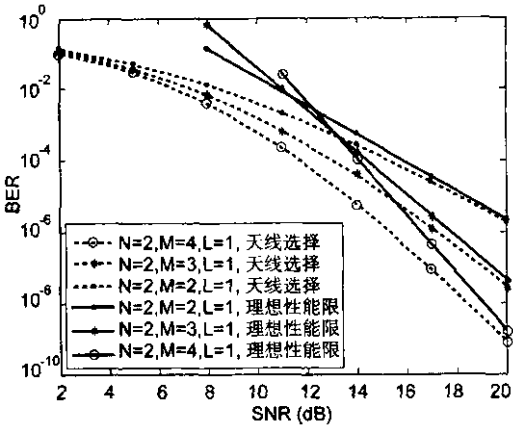


图 4 非相干天线选择系统性能与式 (25) 的理想性能限的比较

仿真实验 2 非相干天线选择算法的性能限

图 4 给出了高信噪比条件下,非相干的天线选择算法(16)与理论限(25)的仿真性能比较。显然,在高信噪比情况下,非相干算法的性能逐渐的逼近理论限,这与上节的分析是一致的。这也表明,在大信噪比时,式(25)正确的预测了非相干天线选择算法的分集增益和编码增益。

6 结论

提出了 MIMO 系统的非相干天线选择算法,并应用于差分空时编码系统,天线选择不需要信道信息。导出了高信噪比情况下,天线选择系统的成对符号错误概率,并仿真研究了算法的性能。根据性能分析和仿真的结果可知,在高信噪比时,天线选择系统能实现和完全复杂性系统同样的分集增益。

# 参考文献

- [1] X Ma and G B Giannakis. Full-diversity Full-rate complex-field space-time coding [J]. IEEE. Trans. Signal Processing , 2003, 51(11): 2917~2930.
- [2] 宋高俊,周正中,钟俊. 多天线对角空频编码传输[J]. 电波科学学报,2005,20(1):132~136.  
G J Song,Z Z Zhou,J Zhong. Multiple-antenna diagonal space-frequency coding signaling[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005,20(1):132~136.
- [3] S Thoen, L Perre,B Gyselinckx, *et al.*. Performance analysis of combined transmit-SC/receive-MRC [J]. IEEE Trans. Commun. 2001, 49(1): 5~8.
- [4] Z Chen, B Vucetic, J Yuan ,*et al.*. Analysis of transmit antenna selection/Maximal-ratio combining in rayleigh fading channels[C]. in Proc. IEEE ISTT03, Yokohama, Japan, 2003: 94.
- [5] I Bahceci, T M Duman, and Y Altunbasak. Antenna selection for multiple antenna transmission systems: performance analysis and code construction[J]. IEEE Trans. Information Theory, 2003, 49(10): 2669~2881.
- [6] X Cai, and G B Giannakis. Performance analysis of combined transmit selection diversity and receive generalized selection combining in rayleigh fading channels [J]. IEEE Trans. Wireless communication ,2004, 3(6): 1980~1983.
- [7] D A Gore and A J Paulraj . MIMO antenna subset selection with space-time coding [J]. IEEE. Trans. Signal Processing , 2002, 50(10): 2580~2588.
- [8] 宋高俊,周正中,钟俊. 多符号网格码和差分空时分组码的级连方法[J]. 信号处理,2004, 20(4): 32~39.

- [9] V Tarokh and H Jafarkhani. A differential detection scheme for transmit diversity[J]. IEEE J. Select. Areas Commun. , 2000, 18(7): 1169~1174.
- [10] N Kong and L B Milstein. Average SNR of a generalized diversity selection combining scheme[J]. IEEE Communications Letters, 1999, 3(3): 57~59.
- [11] W Zhengdao and G B Giannakis. A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels [J]. IEEE Trans. Commun. 2003, 51(8): 1389~1398.



宋高俊 (1959—) 男,安徽人,博士,副教授,主要研究方向是移动通信和通信信号处理。



熊邦书 (1968—),男,江西人,博士,副教授,研究方向为三维信息获取与处理、CAD&CG、计算机图形学等。



郭业才 (1962—) 男,安徽人,博士,教授,主要研究方向是通信与水声信号处理。

(上接 634 页)



张瑜 (1963—),男,河南人,1986年毕业于西安电子科技大学,2005年前为中国电波传播研究所高级工程师,现为河南师范大学物理与信息工程学院高级工程师。曾先后主持军工研究项目七项,参与研究项目数十项,在不同的学术刊物上发表论文 39 篇,获部、省、市科技成果奖多次。目前主要从事教学和电波传播技术、雷达低角跟踪技术等科研工作。



郝文辉 (1966—),男,河南人,中国电波传播研究所高级工程师,曾先后主持军工研究项目 4 项,参与研究项目数十项,在不同的学术刊物上发表论文 6 篇,获部、省、市科技成果奖多次,目前主要从事通信工程技术与应用研究。

## 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>