

MIMO ARQ 无线通信系统中发送天线选择的联合优化

史志华

(东南大学 无线工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了获得 MIMO 系统的巨大容量, 同时降低系统的实现代价, 人们越来越重视天线选择技术。文章基于 MIMO ARQ 无线通信系统, 针对发送天线选择和预编码技术的联合使用, 依照系统容量, 提出了一种次优的联合优化算法。这一算法把天线选择和预编码分成 2 个部分完成: 在重发数据时, 首先利用先前发送时的相关信息和当前的信道信息来选择发送天线; 在完成天线选择后, 再采用注水算法来优化预编码矩阵。仿真表明, 这一算法所获得的信道容量十分接近穷举法所得到的最大信道容量。

关键字: 多输入多输出; 自动重发请求; 天线选择; 预编码; 注水算法

中国分类号: TN92

文献标识码: B

文章编号: 1005-7641(2005)12-0043-04

0 引言

多输入多输出 (MIMO) 无线通信系统在接收端和发送端采用多个天线, 增加了系统的自由度, 从而使得 MIMO 系统具有极大的系统容量。理论证明, MIMO 系统的容量是和发送天线数和接收天线数两者中的最小值近似成线性关系^[1-3]。但是天线数的增加, 同样也带来了系统复杂度和实现代价的增加, 尤其是对 RF 部件而言^[4-5]。天线选择技术能够在保留 MIMO 系统大部分优点的同时, 有效地降低系统复杂度和实现代价。

目前天线选择技术已经得到了广泛的研究。Molisch 等人给出了 MIMO 系统采用天线选择时容量的上界^[6]。由于最优天线选择算法的复杂度太高, 人们按照各种准则提出了逼近最优性能但复杂度较低的次优算法^[7-9]。文献[4-5]对天线选择技术做了很好的概述。

未来的 MIMO 无线通信系统需要提供更高的数据速率和更可靠的通信质量, 这必须采用可靠的检错和纠错机制。仅仅采用前向纠错 (FEC) 往往不够, 这就要求采用自动重发请求 (ARQ) 技术。把采用 ARQ 技术的 MIMO 系统称为 MIMO ARQ。文章将针对 MIMO ARQ 系统, 研究在数据重发时, 如何利用以前发送时的有关信息来联合优化当前的发送天线选择和预编码器, 从而进一步提高系统容量。

1 系统模型

假设 MIMO 系统有 N_t 个发送天线, N_r 个接收天线, 采用预编码时, 系统的输入输出模型为^[10]

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{E_s}{N_t}} \mathbf{H} \mathbf{W} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中 \mathbf{H} 为信道矩阵; \mathbf{W} 是预编码矩阵; \mathbf{y} 是接收信号向量; \mathbf{x} 是发送信号向量, 满足 $E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \mathbf{I}_{N_t}$; \mathbf{n} 是噪声向量, 满足 $E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = N_0 \mathbf{I}_{N_r}$ 。

假设发送端已知信道信息, 当 MIMO 系统采用发送天线选择技术时, 在 N_t 个发送天线中选择 L 个天线用来发送信号, 共有 $C_{N_t}^L$ 种可能的选择, 把每一种选择得到的信道矩阵记为 $\mathbf{H}^{(i)}$, $i \in S = \{1, 2, \dots, C_{N_t}^L\}$, 这时采用预编码的系统容量为

$$C = \max_{i \in S} \max_{\mathbf{W}} \{ \log_2 \det(\mathbf{I}_L + \frac{\rho}{L} \mathbf{W}^H \mathbf{H}^{(i)H} \mathbf{H}^{(i)} \mathbf{W}) \} \quad (2)$$

式中 ρ 是信噪比 (SNR), $\|\mathbf{W}\|_F^2 = N_t$ 。

在 MIMO ARQ 系统中, 第一次发送时的信道矩阵记为 \mathbf{H}_0 , 第 n 次重发时的信道矩阵记为 \mathbf{H}_n 。在每一次重发时, 天线选择也都有 $C_{N_t}^L$ 种可能, 相应地把第 n 次重发时选择得到的矩阵记为 $\mathbf{H}_n^{(ni)}$, $ni \in S_n = \{1, 2, \dots, C_{N_t}^L\}$ 。第 N 次重发时的容量为

$$C = \max_{ni \in S_0} \max_{ni \in S_1} \max_{ni \in S_N} \max_{\mathbf{W}_N} \{ \log_2 \det(\mathbf{I}_L + \frac{\rho}{L} \sum_{n=0}^N \mathbf{W}_n^H \mathbf{H}_n^{(ni)H} \mathbf{H}_n^{(ni)} \mathbf{W}_n) \} \quad (3)$$

式中 $\|\mathbf{W}_n\|_F^2 = N_t$, $n = 0, 1, \dots, N$ 。

由于在第 N 次重发时, 前面 $N-1$ 次发送所作的发送天线选择和对应的最优预编码矩阵都已经确定 (把选择好的发送天线对应的信道矩阵和最优预编码器分别记为 $\mathbf{G}_0, \mathbf{G}_1, \dots, \mathbf{G}_{N-1}, \mathbf{W}_0^{\text{opt}}, \mathbf{W}_1^{\text{opt}}, \dots, \mathbf{W}_{N-1}^{\text{opt}}$), 不能再更改, 所以在第 N 次重发时, 只要确定如何选择 $\mathbf{H}_N^{(ni)}$ 以及对应的预编码矩阵 \mathbf{W}_N , 公式如下

$$C = \max_{ni \in S_N} \max_{\mathbf{W}_N} \{ \log_2 \det(\mathbf{I}_L + \frac{\rho}{L} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{W}_n^{\text{opt}H} \mathbf{G}_n^H \mathbf{G}_n \mathbf{W}_n^{\text{opt}} +$$

$$\frac{\rho}{L} \mathbf{W}_N \mathbf{H}_N^{(N)} \mathbf{H}_N^{(N)} \mathbf{W}_N \} \quad (4)$$

显然在 MIMO ARQ 系统中, 联合优化过程是一个序贯的优化过程, 即先当 $n=0$ 时, 求得 \mathbf{G}_0 和 $\mathbf{W}_0^{\text{opt}}$, 然后在此基础上求得 \mathbf{G}_1 和 $\mathbf{W}_1^{\text{opt}}$, 依此类推。

如果采用穷举的方式来选择发送天线并作最优预编码, 那么在每次发送时都需要采用注水算法^[10]或广义注水算法^[11], 运算量太大, 不利于工程实现。由此, 提出了一种低复杂度、性能逼近最优结果的次优联合优化算法。

2 次优联合优化算法

前面提到, 穷举法是最优的, 但是复杂度太高, 所以寻找复杂度低、性能好的次优算法成为必然。为了能够降低复杂度, 需要做适当的简化和近似, 考虑下面 2 点:

(1) 如果在选择天线的过程中还要考虑最优预编码, 将导致天线选择十分复杂。为了降低选择发送天线的复杂度, 在选择天线的过程中不考虑最优预编码器, 即把单位阵作为预编码器。在选择好发送天线后, 采用广义注水算法^[11]来求解对应的最优预编码矩阵。

(2) 从现有的天线选择算法中, 选择一种实现复杂度较小、性能良好、易于推广到 MIMO ARQ 系统的算法, 把这一算法做相应的修正, 使其能够适用于 MIMO ARQ 系统。由于在求解最优预编码时需要采用广义注水算法, 所以希望在天线选择算法过程中避免使用注水算法, 即不采用类似文献[7]提出的那一类算法。

基于以上考虑, 选择文献[9]中的快速天线选择算法作为原型。这一算法的性能优于基于最大欧式范数的算法^[8], 和 Gorokhov 的算法^[12]性能接近, 但复杂度低一些。文献[9]中, 这一算法是用来选择接收天线的, 为了能够应用于 MIMO ARQ 系统中的发送天线的选择, 需要对算法做一些修正。下面详细描述应用于 MIMO ARQ 系统中的修正算法。

修正算法在初始化时首先设定一个空集 S_{sel} 用来存放已选择好的发送天线标号, 一个满集合 S_{un} 用来存放还未被选择的发送天线的标号, 在每一步选择的过程中, 选择一个新的天线并入集合 S_{sel} , 同时把这一天线从集合 S_{un} 中去除, 使得此时信道容量最大。

当第一次发送(即 $n=0$)时, 选择天线的算法和文献[9]中的算法一样。选择好发送天线后, 得到相应的信道矩阵 $\mathbf{G}_0 = \mathbf{H}_{0,L}$, 通过注水算法确定最优预编码矩阵 $\mathbf{W}_0^{\text{opt}}$, 这样第一次发送时, 对应的信道容量可以表示为^[10]

$$C(\mathbf{G}_0) = \log_2 \det(\mathbf{I}_L + \gamma \mathbf{A}_0) \quad (5)$$

式中 $\gamma = \rho/L$; $\mathbf{A}_0 = \mathbf{W}_0^{\text{opt}H} \mathbf{G}_0^H \mathbf{G}_0 \mathbf{W}_0^{\text{opt}}$ 。

当第 $N > 0$ 次重发时, 对应的信道容量可以表示为(不考虑第 N 次重发时的预编码)

$$C(\mathbf{G}_N) = \max_{\mathbf{N} \in S_N} \{ \log_2 \det(\mathbf{I}_L + \gamma \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{A}_n + \gamma \mathbf{H}_N^{(N)} \mathbf{H}_N^{(N)}) \} \quad (6)$$

记 $\Sigma = \mathbf{I}_L + \gamma \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{A}_n$, 其对角元素表示为 λ_i ($i = 1, 2, \dots, L$), 那么(6)式可以表示为

$$C(\mathbf{G}_N) = \max_{\mathbf{N} \in S_N} \{ \log_2 \det(\Sigma + \gamma \mathbf{H}_N^{(N)} \mathbf{H}_N^{(N)}) \} \\ \max_{\mathbf{N} \in S_N} \{ \log_2 \det((\Sigma) \det(\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_N^{(N)} \Sigma^{-1} \mathbf{H}_N^{(N)H})) \} \quad (7)$$

式(7)要最大化, 相当于最大化 $\det(\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_N^{(N)} \Sigma^{-1} \mathbf{H}_N^{(N)H})$, 采用和上面类似的方法, 根据信道容量最大化的原则, 依次选择 L 个天线。由于式(7)中的 $\det(\Sigma)$ 在第 N 次重发时是定值, 对容量的贡献是一个数值固定的加项, 不影响发送天线的选择, 为了简化表示, 下面的公式中将忽略这一项。第 $k+1$ 步选择对应的信道容量(不考虑预编码)为

$$C(\mathbf{H}_{N,k+1}) = \log_2 [\det(\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_{N,k+1} \Sigma_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{N,k+1}^H)] = \\ \log_2 [\det(\mathbf{I}_{n_r} + \gamma [\mathbf{H}_{N,k} \mathbf{h}_j] \Sigma_{k+1}^{-1} [\mathbf{H}_{N,k} \mathbf{h}_j]^H)] = \\ \log_2 [\det(\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_{N,k} \Sigma_k^{-1} \mathbf{H}_{N,k}^H + \gamma \lambda_{k+1}^{-1} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H)], \\ J \in S_{\text{un}} \quad (8)$$

式中 Σ^{-1} 是 Σ 的逆阵的前 k 行和前 k 列构成; $\mathbf{H}_{N,k}$ 为在第 N 次发送时, 已选择好的 k 个天线对应的信道矩阵。

利用矩阵公式 $\det(\mathbf{I} + \mathbf{AB}) = \det(\mathbf{I} + \mathbf{BA})$, 式(8)可以表示为下面的迭代式

$$C(\mathbf{H}_{N,k+1}) = \log_2 (\det(\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_{N,k} \Sigma_k^{-1} \mathbf{H}_{N,k}^H)) (\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \lambda_{k+1}^{-1} (\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_{N,k} \Sigma_k^{-1} \mathbf{H}_{N,k}^H)^{-1} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H)) = \\ C(\mathbf{H}_{N,k}) + \log_2 (\det(\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \lambda_{k+1}^{-1} (\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_{N,k} \Sigma_k^{-1} \mathbf{H}_{N,k}^H)^{-1} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H)) = \\ C(\mathbf{H}_{N,k}) + \log_2 (\det(1 + \gamma \lambda_{k+1}^{-1} \mathbf{h}_j^H (\mathbf{I}_{n_r} + \gamma \mathbf{H}_{N,k} \Sigma_k^{-1} \mathbf{H}_{N,k}^H)^{-1} \mathbf{h}_j)), J \in S_{\text{un}} \quad (9)$$

这时, 已经得到和文献[9]形式相同的表达式, 以下算法的具体步骤和文献[9]类似。

由式(9)可以看出, 在每次重发时, 采用上面介绍的次优算法来联合优化 MIMO ARQ 系统发送天线的选择, 在选择好天线后, 采用广义注水算法来求解最优预编码器 $\mathbf{W}_N^{\text{opt}}$, 上述描述的算法称为次优联合优化算法。

次优联合优化算法的运算量主要由天线选择算法和广义 waterpouring 算法 2 部分组成。其中天线选择部分的实现复杂度和文献[9]中的算法几乎一样, 只

增加了少量运算量用来计算 $\gamma \lambda_i^{-1}, k \in (1, 2, \dots, N_t)$ 。广义注水算法的运算量也和注水算法相近, 仅仅增加了一个 L 长度的序列排序过程。另外需要存储器来存放 Σ , 在下次重发时进行天线选择和最优预编码器的设计都需要用到 Σ 。

3 仿真结果

为了验证所提出的次优联合优化算法的性能, 利用计算机仿真来对比 3 种算法所获得的 Shannon 信道容量 (Ergodic Capacity)。第 1 种算法是按照式(4), 采用穷举的办法, 对每一种可能的选择都采用广义注水算法求出相应的最优预编码矩阵, 从中选择性能最好的, 称为穷举联合优化算法 (Joint Optimal), 这种方法获得的信道容量是最大的; 第 2 种算法是在每次发送时不考虑前面的信息, 按照式(2)采用穷举的办法选择天线和相应的最优预编码矩阵, 称为穷举独立优化算法 (Independent Optimal); 第 3 种算法就是文章提出的次优联合优化算法 (Joint SubOptimal)。

在仿真中, MIMO ARQ 系统的重发次数设为 2, 即 $N = 2$ 。

仿真环境 1: 仿真采用平坦衰落信道。信道矩阵 $\mathbf{H}_n (n = 0, 1)$ 中的每个元素都是均值为 0、方差为 1 的复高斯变量, 各个元素之间是独立的。在 $N_t = 6$ 个发射天线中选择 $L = 3$ 个用来发送信号, 接收天线的数目为 $N_r = 3$, 仿真结果如图 1 所示。

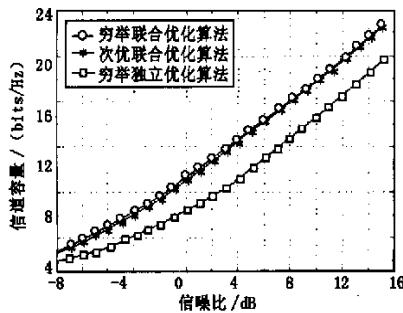


图 1 独立同分布信道下 3 种算法对应的信道容量 ($N_t = 6, L = 3, N_r = 3$)

仿真环境 2: 仿真采用平坦衰落信道, 但信道矩阵 $\mathbf{H}_n (n = 0, 1)$ 的列之间具有相关性。采用模型: $\mathbf{H}_n = \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t^{1/2}$, 其中 \mathbf{R}^{101} 为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.9 & 0.81 & 0.729 \\ 0.9 & 1 & 0.9 & 0.81 \\ 0.81 & 0.9 & 1 & 0.9 \\ 0.729 & 0.81 & 0.9 & 1 \end{bmatrix}$$

在 $N_t = 4$ 个发射天线中选择 $L = 2$ 个用来发送信号, 接收天线的数目为 $N_r = 2$, 仿真结果如图 2 所示。

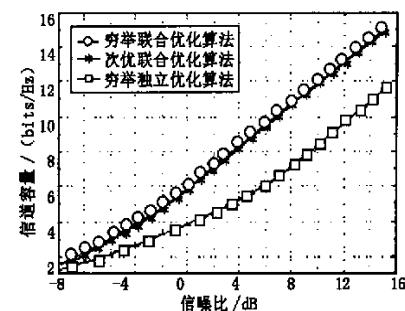


图 2 相关信道下 3 种算法对应的信道容量 ($N_t = 4, L = 2, N_r = 2$)

从仿真结果可以看出, 文章提出的次优联合优化算法的性能和穷举联合优化算法的性能几乎一样, 也就是表明次优的算法的性能已经非常逼近最优的性能。穷举联合优化算法在每次发送时都需要 $C_{N_t}^L$ 次广义注水算法 (当 $N = 0$ 时, 是采用注水算法)。通过前面的分析可以知道, 算法复杂度远小于穷举联合优化算法。

同时, 从仿真结果可以看到, 在 2 种情况 (仿真环境) 下, 算法性能都大大好于穷举独立优化算法。在第 1 个仿真中, 信道容量为 12 bits/Hz 时, 次优算法比穷举独立优化算法性能大约提高 4 dB; 在第 2 个仿真中, 当信道容量为 8 bits/Hz 时, 算法性能比穷举独立优化算法提高 6 dB 左右。次优联合优化算法性能良好的关键在于, 选择发送天线时, 充分利用了和前面多次发送相关的信息。

4 结束语

文章针对同时采用预编码技术和发送天线选择技术的 MIMO ARQ 系统, 提出了一种次优的联合优化算法。该算法在重发数据时, 利用以前发送时的信息和当前的信道信息来联合进行发送天线的选择, 选择好发送天线后, 采用注水算法 (当 $N = 0$ 时) 或广义注水算法 (当 $N > 0$ 时) 来计算最优预编码矩阵。仿真表明, 该算法所得到的性能已经逼近最优性能, 而计算复杂度却比得到最优性能的穷举联合优化算法大大减少。

在讨论和仿真中, 都是假设发送端已知信道信息, 但在实际系统中通常是不满足的。接收端如何利用非理想信息来同时优化发送天线的选择和预编码器的设计, 这些将是继续研究的内容。 (Z)

参考文献:

- [1] I. E. Telatar, Capacity of multi-antenna Gaussian Channels [J]. European Trans. Telecomm., 1999, 10(6): 585–595.
- [2] G. J. Foschini, M. J. Gans. On limits of wireless communica-

- tions in a fading environment when using multiple antennas [J]. *Wireless Personal. Commun.*, 1998, (6): 311 - 335.
- [3] V. Tarokh, N. Seshadri, A. R. Calderbank. Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criteria and code construction [J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1998, 44 (3): 744 - 765.
- [4] S. Sanayei, A. Nosratinia, Antenna selection in MIMO systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42 (10): 68 - 73.
- [5] A. F. Molisch, M. Z. Win, MIMO systems with antenna selection [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2004, 5 (1): 46 - 56.
- [6] A. F. Molisch, M. Z. Win, J. H. Winters. Capacity of MIMO systems with antenna selection, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun., 2001, 6: 570 - 574.
- [7] S. Sandhu, R. Nabar, D. Gore, A. Paulraj, Near-optimal selection of transmit antennas for a MIMO channel based on Shannon capacity, in Proc. Asilomar Conf. Signal, Syst., Comput., 2000, (1): 567 - 571.
- [8] D. A. Gore, A. Paulraj, MIMO antenna subset selection with space - time coding [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2002, 50 (10): 2 580 - 2 588.
- [9] M. Gharavi-Alkhansari, A. B. Gershman, Fast antenna subset selection in MIMO systems [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2004, 52 (2): 339 - 347.
- [10] A. Paulraj, R. Nabar, D. Gore, *Introduction to space - time wireless communications* [M]. Cambridge University Press, 2003.
- [11] Haitong Sun, Harvind Samra, Zhi Ding, Jonathan Manton. Constrained Capacity of Linear Precoded ARQ in MIMO Wireless Systems [J]. *ICASSP*, 2005, (1): 18 - 23.
- [12] A. Gorokhov, Antenna selection algorithms for MIMO transmission systems [J]. *Proc. IEEE ICASSP*, 2002, (1): 2 857 - 2 860.

史志华(1980 -),男,江苏丹阳人,硕士研究生,主要研究方向为移动通信系统。

Optimization of transmit antenna selection associated with pre-coding for MIMO ARQ wireless systems

SHI Zhi-hua

(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Not only to achieve the huge capacity of MIMO systems, but also to realize a low-cost and low-complexity, the antenna selection technique is attracting more and more attention. Based on the MIMO ARQ wireless communication system, to combine the transmitting antenna selection and pre-coding, according to system capacity, this paper proposed a sub-optimal algorithm. This sub-optimal algorithm consists of two stages, which are transmit antenna selection and pre-coding. At each retransmission, the transmit antennas are firstly selected according to the information from previous transmission and current channel state, and then the pre-coding matrix is optimized by the water-pouring algorithm. Simulation results show that the channel capacity achieved by this proposed algorithm approaches the maximum capacity achieved by the exhaustion method.

Key words: MIMO; Automatic Repeat reQuest (ARQ); antenna selection; pre-coding; water-pouring algorithm

(上接第 35 页)

邢志民(1976 -),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为电力线通信。

侯思祖(1962 -),男,山西运城人,教授,研究方向为电力通信新技术。

Compare and research of the channel characteristics of two kinds of middle voltage power line

XING Zhi-min, HOU Si-zu

(Dept. of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The power line communication is one of the communication methods, which has its particular advantages. The application of middle voltage power line communication has a broad range and foreground. The channel characteristics are very important technical parameters in middle voltage power line communications. In order to assess the transmission characteristics of the medium power line, this paper presents two examples. One is in a Beijing dweller, where the underground distribution line voltage is 10 kV. Another is an aerial cable, which is in Baoding, the voltage is also 10 kV. We tested and studied the noise, impedance character and transmission attenuation in the frequency range of 10 kHz ~ 35 MHz. By using Matlab and analyzing the data, the channel characters of two different kinds of the middle voltage power lines were presented in this paper, the bandwidth effect caused by the channel characteristics and the countermeasures of settling this effect are discussed.

Key words: middle voltage power line; noise transmission attenuation; channel characteristics; aerial cable; underground cable

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)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)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),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>