

文章编号:1004-9037(2010)04-0490-05

基于降元集合的组分层空时结构发送天线选择

于 波^{1,2} 张兴周¹ 吕秀丽²

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨, 150001; 2. 大庆石油学院电子科学学院, 大庆, 163318)

摘要: 针对结合空时分组编码和分层空时的组分层空时(Group layered space-time, GLST)系统, 提出了一种基于降元集合的发送天线选择算法。在信道矩阵列向量Euclidean范数排序的基础上, 构建与较大范数列向量对应的天线元减少的集合。对该降元集合的子集进行重构信道矩阵QR分解, 通过比较各子集R矩阵对角元素的最小值, 选定与其最大值对应的天线子集。并结合采用正交空时分组编码和分层空时的GLST, 分析了所提出算法的性能和计算复杂度。仿真结果表明, 该算法的性能明显优于几种常见的快速天线子集选择算法。当合理选择降元集合元素数量时, 该算法以很高的概率达到最优。

关键词: 天线选择; 组分层空时; 空时分组编码; QR 分解

中图分类号: TN929.5; TN911

文献标识码: A

Transmit Antenna Selection Based on Reduced-Element Sets for Group Layered Space-Time Architectures

Yu Bo^{1,2}, Zhang Xingzhou¹, Lü Xiuli²

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China;
2. College of Electronic Science, Daqing Petroleum Institute, Daqing, 163318, China)

Abstract: For group layered space-time (GLST) combined with space-time coding and layered space-time, a fast antenna selection algorithm is presented based on the reduced-element set (RES). According to column vectors sorted by Euclidean norm, RES of transmit antennas is built. Elements in RES are little more than active transmit antennas. Based on QR decomposition of the reconstructed channel matrices over all subsets in RES, minima of diagonal elements in R matrices is obtained, and the subset with the maximum is selected. For the combined orthogonal STBC and LST architectures, the performance and the computational complexity of the algorithm are analyzed. Simulation results show that the algorithm outperforms the existing methods, thus it can approach optimal performance with the high probability.

Key words: antenna selection (AS); group layered space-time (GLST); space-time block coding (STBC); QR decomposition

引 言

多输入多输出(Multi-input multi-output, MIMO)技术可实现较高的空分复用增益和分集增益, 是提高通信速率和通信质量的重要手段, 将在后3G时代的无线通信领域中得到广泛应用。为了能在较高的频带利用率下获得较高的误码率性能, 文献[1-2]折衷地考虑了空分复用和分集增益, 对空时分组编码^[3](Space-time block coding,

STBC)结合分层空时结构(Layered space-time, LST)^[4]的组分层空时结构(Group layered space-time, GLST)及其解码方法进行了分析和研究。天线数的增加可提高系统性能, 但在实际通信系统中, 多天线阵元的使用增加了射频链路的硬件成本。在相同的系统性能下, 从多元天线中选择子集的方案, 可降低系统硬件成本^[5]。近年来, 对STBC或LST系统天线选择的研究文献较多^[6-9], 但直接针对GLST结构的天线选择方案研究较少。文中根据GLST结构的特点, 提出了一种快速的发射天线

子集选择算法,该算法首先利用信道矩阵列向量的 Euclidean 范数对被选择天线进行降元处理,然后针对重构信道矩阵采用 QR 分解(QR decomposition, QRD)算法实现次优的天线子集选择。仿真实验表明,所提出算法的误码性能接近穷尽搜索算法,较现有的几种快速天线选择算法有明显提升。概率分析验证了文中算法能以较大概率达到最优,并为接收天线阵元个数不同时确定备选阵元个数提供了依据。

1 系统模型

考虑由 M_t 根发射天线和 M_r 根接收天线构成的 GLST 系统,发送数据经 G 个相同结构的 STBC 编码器,每个 STBC 编码器对应 m 个发射天线,从 M_t 根发射天线中选择 $L_t = Gm (M_t \geq L_t)$ 根天线用于有效发射。

假设各发射-接收天线间的子信道平稳且相互独立,接收端可理想无偏估计得到信道状态信息,并利用一低速链路把天线子集选择序数反馈给发送端。

设欲发送数据 $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_G]^T$, 第 i 组数据为 $\mathbf{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ig}]^T, i = 1, 2, \dots, G, g$ 为每组数据量,满足 $E[\mathbf{b}, \mathbf{b}^H] = I_{g \times g}, E[\cdot] 表示 [\cdot] 的数学期望值, $I_{g \times g}$ 表示 g 阶单位阵。当所有 G 层数据子流采用相同的数据速率,STBC 编码周期为 K 时,经 STBC 后的发送信号矩阵为 $\mathbf{S}_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iK}]^T$, 为 $m \times K$ 矩阵,而 $s_{ij} = A_{ij}b_i + B_{ij}b_i^*$ 。 A_{ij}, B_{ij} 为 $m \times g$ 系数矩阵, $j = 1, 2, \dots, K$ 。 $M_r \times K$ 维接收信号矩阵 \mathbf{Y} 可表示为$

$$\mathbf{Y} = \sqrt{E_b} [\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_G] [\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_G]^T + \mathbf{V} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T$, y_i 为 M_r 行列向量; \mathbf{H}_i 为第 i 个 STBC 对应的 $M_r \times m$ 维信道矩阵, $i = 1, \dots, G$; \mathbf{V} 是 $M_r \times K$ 维噪声矩阵,其元素满足方差为 σ_n^2 的零均值复高斯分布。 E_b 表示发送信号的平均能量。

根据空时分组编码结构,经重构处理后

$$\bar{\mathbf{y}} = \sqrt{E_b} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{b} + \bar{\mathbf{v}} \quad (2)$$

式中 $\bar{\mathbf{y}} = [\bar{y}_1^T, \dots, \bar{y}_K^T]^T$, 并且有

$$\bar{y}_j = \begin{cases} y_j & B_{ij} = 0_{m \times g} \\ y_j^* & A_{ij} = 0_{m \times g} \end{cases}, j = 1, \dots, K \quad (3)$$

$\bar{\mathbf{v}}$ 为重构后的接收噪声向量,其协方差为单位矩阵 I_{KM_r} ; $\tilde{\mathbf{H}}$ 为重构信道矩阵,即

$$\tilde{\mathbf{H}} = [\tilde{\mathbf{H}}_1, \dots, \tilde{\mathbf{H}}_G] \quad (4)$$

其中,第 i 组空时码的等效子信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_i$ 为

$$\tilde{\mathbf{H}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_i \mathbf{A}_{ii} + \mathbf{H}_i^* \mathbf{B}_{ii}^* \\ \vdots \\ \mathbf{H}_i \mathbf{A}_{iK} + \mathbf{H}_i^* \mathbf{B}_{iK}^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

经过矩阵重构后,GLST 被式(3)表示为等效的垂直分层空时结构,可利用迫零检测和结合连续干扰消除的 QRD 检测^[10]等进行解码。

2 发送天线选择

2.1 基于重构信道 QRD 的天线选择

由式(2-5)得到天线子集 w 所对应信道的重构矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_w$,经 QRD 得到 $\tilde{\mathbf{H}}_w = \tilde{\mathbf{Q}}_w \tilde{\mathbf{R}}_w$,则最优天线子集 w_{opt} 为

$$w_{opt} = \operatorname{argmax}_{w \subseteq W} \{ \min_l |(\tilde{\mathbf{R}}_w)_l| \} \quad (6)$$

其中 W 表示全部发射天线构成的集合, $(\tilde{\mathbf{R}}_w)_l$ 为 $\tilde{\mathbf{R}}_w$ 的第 l 个对角元素。

在实际计算中,QRD 可采用施密特正交方法来实现。

2.2 基于降元集合的快速天线选择

GLST 系统的分组编码器常采用 Alamouti 码^[3]等正交空时编码,信道重构后各 STBC 所对应的等效子信道矩阵各列向量具备自正交性。在信道向量正交计算时只需计算各组间发射天线对应信道向量的相互正交性,从而降低了对各向量正交性的要求,据此提出的基于降元集合的天线选择算法步骤如下:

(1)根据信道矩阵列向量 Euclidean 范数排序,得到天线序数集合 $W_{M_t} = \{k_1, k_2, \dots, k_{M_t}\}$,其中 $k_i \in \{1, 2, \dots, M_t\}, i = 1, 2, \dots, M_t$,满足 $\|h_{k_1}\| \geq \|h_{k_2}\| \geq \dots \geq \|h_{k_{M_t}}\|$ 。

令 $W_N = \{k_1, k_2, \dots, k_N\}$,其中 $M_t \geq N \geq L_t, w \in W_N$ 为选择的天线序数子集,则由 w 对应的信道根据式(4,5)经重构后得到 $\tilde{\mathbf{H}}_w, \tilde{\mathbf{R}}_w$ 的 QRD 可表示为

$$\tilde{\mathbf{H}}_w = \tilde{\mathbf{Q}}_w \tilde{\mathbf{R}}_w \quad (7)$$

(2)天线子集的选择准则为

$$w_N = \operatorname{argmax}_{w \subseteq W_N} \{ \min_l |(\tilde{\mathbf{R}}_w)_l| \} \quad (8)$$

其中 $(\tilde{\mathbf{R}}_w)_l$ 为 $\tilde{\mathbf{R}}_w$ 的第 l 个对角元素。

该算法利用信道向量的 Euclidean 范数排序后,通过选择 N 值,忽略小范数向量所对应的天线,得到备选天线序数集合。当 N 值与 M_t 相差较大时,降元算法的复杂度得到明显降低。

3 算法性能及其复杂度分析

利用重构信道矩阵 QR 分解结果, 把式(7)代入式(2), 并用 \tilde{Q}_w^H 乘以式子两边得到处理后的接收信号向量

$$\bar{y} = \sqrt{E_b} \tilde{R}_w b + \bar{v} \quad (9)$$

其中 $\bar{v} = Q_w^H \bar{v}$ 与 \bar{v} 同分布的噪声向量。第 l 个子流的接收信号 \bar{y}_l 可表示为

$$\bar{y}_l = (\tilde{R}_w)_{ll} b_l + \sum_{j=l+1}^{L_t} (\tilde{R}_w)_{lj} b_j + \bar{v}_l \quad (10)$$

若检测顺序是从 b_{L_t} 到符号 b_1 , 假设检测第 l 数据子流时, 已检测的 $l-1$ 个子流的数据对该数据的影响被正确地估计并消除。此时, 式(10)的等式右边中间项影响等于零, $|(\tilde{R}_w)_{ll}|^2$ 决定第 l 子流检测后信噪比 ρ_l , 表示为

$$\rho_l = \frac{E_b}{L_t \delta_n^2} |(\tilde{R}_w)_{ll}|^2, l = 1, \dots, L_t \quad (11)$$

最差数据流的检测后信噪比将决定着系统的中断容量^[11], 对天线选择来说, 最大化最小检测后信噪比 $\min_{l \in \{1, \dots, L_t\}} \rho_l$ 可最优化系统的中断容量, 结合式(11)就得到了天线子集的选择准则式(6)。

在 GLST 系统中, 基于重构信道的天线选择相对与常规信道的天线选择, 具有两个方面的改进:

(1) 当 $M_t \geq L_t$ 时, 基于常规信道 H_w 的 QRD, 最大化 R 矩阵的最小对角元素可得到选定的天线子集, 在接收端可同样基于 H_w 的 QRD 对其进行信号检测, 若此时采用重构等效信道检测可得到常规检测更优的性能, 但由于天线选择并非针对重构信道而设计, 会造成明显性能损失。而由式(6)可以看出, 重构信道 QRD 的天线选择针对重构信道而设计, 更适合于优良的重构信道的线性检测。

(2) 当 $M_t < L_t$ 时, 基于 H_w 的 QRD 得到的 R_w 矩阵为 $M_t \times L_t$, 其对角元素仅有 M_t 个, 已不能反映 L_t 根天线信道的全部特征, 并且此时无法利用常规信道实现线性检测。对于重构等效信道, 只需满足 $KM_t \geq L_t$ 就可实现天线选择和信号检测, 其中 K 为 STBC 编码周期。

基于降元集合的天线选择以重构 QRD 算法为选择准则, 由于忽略了信道增益较小的天线元, 降低了备选集合的元素数量, 使得计算量得到显著降低。在表 1 中, 结合 Alamouti 空时分组码的 GLST 结构, 给出了几种算法基于复数乘法的计算次数的表达式。从中可以看出, 基于重构信道的 QR 分解

算法的计算量并未比常规信道 QR 分解算法的计算量上升, 而是略有下降。这主要由于尽管重构后的等价信道矩阵行数增加, 但由于正交分组编码的采用, 使得每个分组内的各列具有正交特性, 在施密特正交过程中, 仅需计算一列, 其他列的正交化结果与其具有特定的关系, 无需再计算, 而且 Euclidean 范数相等。当 M_t 较大时, 合理选取 N 值, 基于降元集合的天线选择算法, 在性能下降较小的前提下可明显降低计算量。在图 1 中给出了当 $M_t = 4$, $L_t = 4$ 时几种算法的计算量直观比较。可以看出随着 M_t 的增大, 降元集合算法计算量优势更加明显。

表 1 几种天线选择算法的复杂度

几何投影逐加算法 ^[7]	$\sum_{k=1}^{L_t} M_t (M_t + k + 1 + 1/2) (M_t - k)$
常规 QRD 算法 ^[8,9]	$M_t \times M_t / 2 + C_{M_t}^{L_t} \times 2L_t(L_t - 1)M_t$
重构信道的 QRD 算法	$M_t \times M_t / 2 + C_{M_t}^{L_t} \times (2L_t + 1)(L_t/2 - 1)M_t$
基于降元集合的算法	$M_t \times M_t / 2 + C_N^{L_t} \times (2L_t + 1)(L_t/2 - 1)M_t$

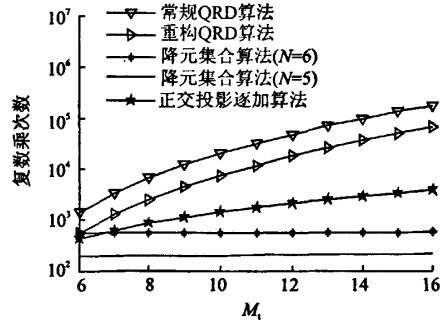


图 1 几种天线选择算法计算量 ($M_t = 4, L_t = 4$)

4 仿真实验

在仿真实验中, STBC 采用 Alamouti 空时码, 发射天线子集 $L_t = 4$, 分层数 $G = 2$, 采用 QPSK 调制。

4.1 GLST 系统天线子集选择算法性能的比较

对文中提出的基于降元集合的重构信道 QRD 算法的性能进行仿真, 并与基于范数选择 (Norm-based selection, NBS)^[6]、正交投影逐加^[7]、常规 QRD^[8,9] 等天线选择算法以及无天线选择时的性

能进行比较。仿真中所采用的解码算法均为重构矩阵下基于QRD的SIC(Successive interference cancellation)检测。

采用发射天线总数 $M_t=12$,图2,3分别给出了 $M_r=2$, $M_r=4$ 时的性能仿真曲线。其中SNR为每根接收天线上的平均信噪比,表示为 $\text{SNR} = E_b/(L_r\sigma_n^2)$,若令 $\sigma_n^2=1$,则 $\text{SNR} = E_b/L_r$ 。

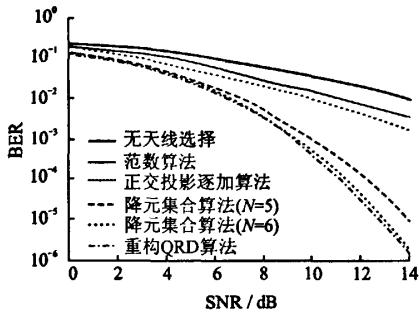


图2 几种天线选择算法的性能($M_r=2$)

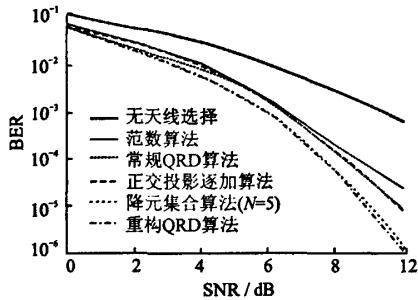


图3 几种天线选择算法的性能($M_r=4$)

从图2,3中可以看出,两种接收条件下,基于降元集合算法的性能明显优于其他几种天线选择算法,并且与穷尽搜索的重构矩阵QRD天线选择算法性能很接近。图2中,当误码率为 10^{-5} 时,基于降元集合的算法在 $N=5$ 和 $N=6$ 与穷尽搜索的最优选择相比较,分别约差1.2和0.2 dB,并明显优于NBS算法和几何正交投影算法。图3中,当误码率为 10^{-5} 时,基于降元集合的算法在 $N=5$ 与穷尽搜索方法相比较差0.1 dB,而常规QRD算法及几何正交投影算法与穷尽搜索方法相差大约1.0 dB。

基于降元集合的重构矩阵QRD算法性能与穷尽搜索方法接近。对 $M_r=2$ 和 $M_r=4$ 两种接收条件下,分别取 $N=6$ 和 $N=5$,仅仅导致轻微的性能下降。

4.2 N 值大小对系统性能的影响

令 w_{opt}^j 表示第 j 次信道变化下由式(7)得到的最优天线子集, $j=1,2,\dots,\beta$, β 为信道的变化次数。

定义

$$c_N = \begin{cases} 1 & a_{\min}^j = k_N \\ 0 & a_{\min}^j \neq k_N \end{cases} \quad (12)$$

其中 $a_{\min}^j = \arg \min_{a' \in w_{\text{opt}}^j} \{ ||h_{a'}|| \}$, a' 为最优天线子中的天线序数, $N=L_r, L_r+1, \dots, M_r, k_N \in W_{M_r}$ 。

则最优天线子集在 W_{M_r} 中随变量 N 变化的概率分布函数可定义为

$$F(N) = \sum_{j=1}^{\beta} \sum_{i=L_r}^N c_i^j / \beta \quad (13)$$

在图4,5中,针对 $M_r=2, M_r=4$ 两种接收情况下,仿真分析了 $\beta=10^5$ 次信道变化,不同 N 值时,概率分布函数随接收天线变化的情况。

从图4可以看出,在接收天线 $M_r=2$ 情况下,当 $N=L_r=4$ 时,即等价于采用基于范数的天线子集选择方法, $F(4)$ 的值较小;而 $F(5)$ 和 $F(6)$ 的值得到了明显提高。以 $M_r=12$ 为例, $F(4)$ 约为0.38,而 $F(5)$ 和 $F(6)$ 分别约为0.74和0.90,就是说当采用基于降元集合的天线选择算法,取 $N=6$ 时,约90%的概率可得到最优天线子集,所以从图2中可看出此时性能与穷尽搜索时性能非常接近。

从图5中可以看出,在接收天线 $M_r=4$ 情况下, $F(4)$ 的值随 M_r 值的增大迅速下降,同样以 $M_r=12$ 为例, $F(4)$ 约为0.65,而 $F(5)$ 和 $F(6)$ 分别约为0.92和0.98,说明当基于降元集合的天线选择算法,取 $N=5$ 时,以92%的概率可得到最优天线子集,从图3中可看出此时性能与穷尽搜索时性能非常接近。

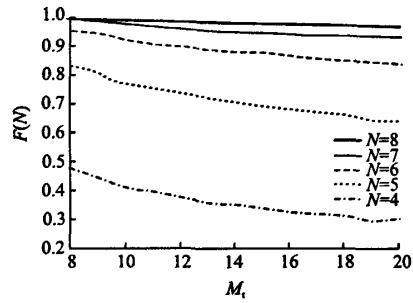


图4 不同 N 值时概率分布与 M_r 的关系($M_r=2$)

图4,5从概率分析的角度,表明了取不同 N 时,基于降元集合QRD算法性能达到最优的概率大小,为 N 值的选取提供了依据。

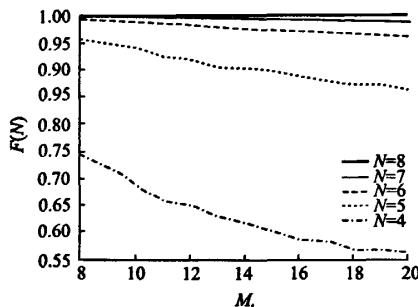


图5 不同 N 值时概率分布与 M 的关系 ($M_r=4$)

5 结束语

GLST 系统具有STBC 和LST 的综合特点。针对GLST 系统,根据重构QRD 算法得到了一种新的快速算法。该算法通过Euclidean 排序得到降元的备选集合,可显著地降低天线子集选择算法的复杂性。而当 N 值选择适当时,复杂度的降低对性能影响甚微,是一种比较适合于GLST 结构的快速天线子集选择算法。

参考文献:

- [1] Dai L, Sfar S, Letaief K B. An efficient detector for combined space-time coding and layered processing [J]. IEEE Trans Commun, 2005, 53(9):1438-1442.
- [2] Dai L, Sfar S, Letaief K B. A quasi-orthogonal group space-time architecture to achieve a better diversity-multiplexing tradeoff [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2007, 6(4):1295-1307.
- [3] Alamouti S M. A simple diversity technique for wireless communications [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 1998, 16(8):1451-1458.
- [4] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Bell Labs Tech, 1996, 1(2):41-59.
- [5] Heath R W, Sandhu S, Paulraj A. Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers [J]. IEEE Commun Lett, 2001, 5(4):142-144.
- [6] Neasmith E A, Beaulieu N C. New results on selection diversity [J]. IEEE Trans Commun, 1998, 46(3):695-704.
- [7] Berenguer I, Wang X, Wassell I J. Transmit antenna selection in linear receivers: geometrical approach [J]. IEE Electron Lett, 2004, 40(5):292-293.
- [8] Mohammad G A, Gershman A B. Fast antenna subset selection in MIMO systems [J]. IEEE Trans Signal Process, 2004, 52(2):339-447.
- [9] 李黎, 朱光喜, 肖琳. 基于置换QR 分解的V-BLAST 天线子集选择 [J]. 通信学报, 2006, 27(9):21-26.
- [10] Wubben D, Bohnke R, Rinas J. Efficient algorithm for decoding layered space-time codes [J]. Electron Lett, 2001, 37(22):1348-1350.
- [11] Gorokhov A, Gore D, Paulraj A. Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: theory and algorithms [J]. IEEE Trans Signal Process, 2003, 51(11):2796-2807.

作者简介:于波(1968-),男,副教授,研究方向:MIMO 通信系统、阵列信号处理,E-mail:yubo68@yahoo.com;张兴周(1947-),男,教授,博士生导师,研究方向:通信与信息系统、光电信号处理与宽带通信;吕秀丽(1971-),女,副教授,博士研究生,研究方向:数字图像处理、通信信号处理。

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>