

块对角化下用户天线联合选择的改进

毕晓君, 张梦莹⁺, 朱 瞳

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了满足块对角化对天线数的限制并降低硬件的复杂性及成本,提出一种改进的块对角化下用户天线联合选择方法。利用差分算法收敛速度快、收敛精度高、全局寻优能力强等特点搜索可能的天线子集以最大化系统和数据率,与目前解决用户天线联合选择问题效果最好的算法对比,基于差分进化算法的用户天线联合选择具有更高的精度,且在大多数情况下效率也更高,更适于解决块对角化下的用户天线联合选择。

关键词:块对角化;差分进化算法;用户天线联合选择;天线子集;和数据率

中图法分类号: TP301 **文献标识号:** A **文章编号:** 1000-7024 (2013) 04-1388-05

Improved joint user and antenna selection of block diagonalization

BI Xiao-jun, ZHANG Meng-ying⁺, ZHU Tong

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to satisfy the condition on the number of antenna of block diagonalization and decrease the complexity and costs of the hardware, an improved joint user and antenna selection algorithm is put forward. It is employed to search possible antenna subsets for maximizing system sum rate due to fast convergence rate, high convergence accuracy and brilliant global searching ability. Simulation results show that joint user and antenna selection based on differential evolution has better accuracy and, in most cases, higher efficiency compared with the existing best algorithm.

Key words: block diagonalization; differential evolution algorithm; joint user and antenna selection problem; antenna subset; sum rate

0 引言

在多用户多输入多输出(MU-MIMO)系统中,需要进行预编码以消除多用户干扰(multiple user interference, MUI)。块对角化(block diagonalization, BD)算法是一种比较实用的预编码策略,它可以彻底消除多用户干扰且复杂度较低,适用于用户端有多根天线的情况^[1]。但是BD算法存在发射天线数必须大于等于各接收端所有接收天线数之和的局限,目前大多数算法^[2-3]仅仅通过用户调度来解决这一局限,没有考虑天线选择。接收天线选择使得同一时刻可以为更多的用户提供服务,使得用户得到的服务更为公平。此外,天线选择可以较好解决MIMO系统多天线所带来的高成本和空时编码复杂等问题。因此BD预编码下用户天线联合选择的研究具有十分重要的现实意义。文献[4]提

出了一种基于用户间信道范数的用户天线联合选择方法,虽然算法的复杂度较低,但该算法总是贪婪地调度信道矩阵范数最大的用户的天线且倾向于调度最多可调度的用户,对接收天线子集的搜索也不全面,以致系统和数据率较低。文献[5]在文献[4]的基础上,提出一种基于子空间相关性的用户组群技术以进一步降低算法的复杂度,是目前解决该问题比较理想的算法,但仍没有克服上述搜索不全面的缺点。

用户天线联合选择是一个组合优化问题,组合优化问题常用智能优化算法来求解^[6],但目前还没有人用智能优化算法解决块对角化下的用户天线联合选择。差分进化算法^[7]近年来提出的比较优秀的智能优化算法,具有全局搜索能力强,收敛速度快等特点。为此本文提出一种块对角化预编码下基于差分进化算法的用户天线联合选择算法,

收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61175126); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(HEUCFZ1209); 教育部博士点基金项目(20112304110009)

作者简介: 毕晓君(1964-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,研究方向为信息智能处理技术、智能优化算法、数字图像处理;十通讯作者: 张梦莹(1987-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向为智能优化算法;朱瞳(1987-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究方向为宽带信号处理、检测与识别。E-mail: keaimaoazhu@yahoo.cn

该算法可以搜索所有可能的用户接收天线子集, 充分利用天线多样性以达到系统和数据率最大化。

1 MU-MIMO 系统

1.1 块对角化预编码

设在 MU-MIMO 下行链路中, 活跃用户数为 K , 基站同一时刻调度的用户为 K , 基站的天线数记为 M , 用户 i 的总天线数记为 N_i 。用户 i 接收端有 n_i 个射频 (Radio Frequency, RF) 链。设基站到各用户的信道为通常的 Rayleigh 平坦衰落, 则基站到用户 i 的信道矩阵可表示为 $H_i \in C^{N_i \times M}$, H_i 的每个元素为独立同分布的 $CN(0, 1)$ 随机变量。则某一用户 i 接收到的信号 y_i 可表示为式 (1)

$$y_i = H_i \sum_{j=1}^K F_j s_j + w_i = H_i F_i s_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K H_i F_j s_j + w_i \quad (1)$$

式中: s_i ——发送给用户 i 的 L_i 维的数据向量, L_i ——独立数据流的个数, 通常情况下, 假设 L_i 等于 RF 链数 n_i ; $F_i \in C^{M \times L_i}$ ——预编码矩阵; w_i ——均值为 0, 协方差为 $\sigma^2 I_{N_i}$ 的加性高斯白噪声向量; $\sum_{j=1, j \neq i}^K H_i F_j s_j$ ——其他用户对用户 i 的干扰项, 为去除多用户干扰, 应使

$$H_i F_j = 0, \forall j \neq i \quad (2)$$

定义 $\tilde{H}_i = [H_i^T \cdots H_{i1}^T H_{i+1}^T \cdots H_K^T]^T$ 为用户 i 所有干扰用户的信道矩阵集合, 则用户 i 的预编码矩阵 F_i 一定在 \tilde{H}_i 零空间。若 F_i 存在, 天线数目应满足^[8]

$$M \geq \sum_{i=1}^K N_i \quad (3)$$

即当一个用户被调度就使用其全部接收天线时, 发射天线数必须大于等于 K 个被调度用户所有接收天线数之和。

块对角化预编码时的最大系统和数据率 C 可以表示为^[9]

$$C = \max_{\sum_{i=1}^K \text{tr}(F_i F_i^H) = p} \sum_{i=1}^K \log_2 \det \left(I_{N_i} + \frac{1}{\sigma^2} H_i F_i F_i^H H_i^H \right) \quad (4)$$

1.2 用户天线联合选择

MIMO 系统通过发射接收端使用多天线的方式增大信号传输的鲁棒性和信道容量, 因此需要在发送端和接收端设置多个天线及其 RF 处理链路。这就不可避免地导致 RF 链路的硬件成本的增加和天线数目增加所导致的空时编解码的复杂性。由于 RF 链路的成本远高于天线的成本, 因此可以在系统中设置较多的天线及较少的处理链路 (即 $n_i \leq N_i$), 再从所有的天线中选择最佳的天线组合进行处理, 这就是天线选择^[10]。因此, 天线选择可以降低硬件的成本和复杂度。

由于系统仅有 n_i 个处理链路, 同一时刻用户 i 可以最多使用 N_i 中的 n_i 个天线。则式 (3) 应改写为

$$M \geq \sum_{i=1}^K n_i \quad (5)$$

为了解决 RF 链有限的问题并在同一时刻服务更多的用户, 对用户进行接收天线选择。令 $\Theta_i = \{1, 2, \dots, N_i\}$, $i = 1, 2, \dots, K$ 代表用户 i 可用天线的全集, $\theta_i \subset \Theta_i$, $|\theta_i| = n_i$ 代表可能选择的天线子集。保证用户端接收天线数的和不大于发射天线数的前提下, 在一个已知时隙内选择 $K \leq K$ 个用户和其最好的 n_i 个天线的组成的子集, 得到的系统的和数据率是

$$C = \sum_{i=1}^K \log_2 \det \left(I_{N_i} + \frac{1}{\sigma^2} H_i(\theta_i) F_i(\theta_i) F_i(\theta_i)^H H_i(\theta_i)^H \right) \quad (6)$$

式中: $H_i(\theta_i) \in C^{n_i \times M}$ ——用户 i 经过天线选择之后的信道矩阵, 即 H_i 只保留 θ_i 所对应的行, $F_i(\theta_i)$ —— $H_i(\theta_i)$ 对应的预编码矩阵。因此最大化系统和数据率就是选择最优天线子集以使式 (6) 最大。

2 差分进化算法

DE 本质上是一种基于实数编码的具有保优思想的贪婪遗传算法, DE 首先产生一定数量的初始种群, 然后通过适应度计算, 再对每个个体进行变异、交叉和选择操作更新种群, 新的种群再进行适应度计算, 变异、交叉和选择操作, 反复迭代, 直到满足停止条件为止。具体介绍如下:

(1) 变异操作: 第 t 代个体 $X_i(t)$, ($i = 1, 2, \dots, popnum$) 的变异个体 $v_i(t+1)$ 为

$$v_i(t+1) = X_{r3}(t) + F \cdot (X_{r1}(t) - X_{r2}(t)) \quad (7)$$

式中: F ——变异因子, $r1, r2, r3 \in \{1, 2, \dots, popnum\}$ 为互不相同的整数。

(2) 交叉操作: 个体 $X_i(t)$ 与变异个体 $v_i(t+1)$ 进行交叉操作, 产生试验个体 $u_i(t+1)$

$$u_{ik}(t+1) = \begin{cases} v_{ik}(t+1), & \text{rand} \leq CR \text{ or } k = w \\ X_{ik}(t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中: CR ——交叉概率因子, $X_{ik}(t)$ ——第 t 代种群中第 i 个个体的第 k 维分量。Rand —— $[0, 1]$ 之间的随机数。W ——第 i 个个体对应的从 $[1, 2, \dots, D]$ 中随机选择的一个整数。

(3) 选择操作: 当经过变异与交叉操作后生成的新个体优于父代个体 $X_i(t)$ 才被保留, 否则父代个体被保留进入下一代。

3 基于差分进化算法的用户天线联合选择

采用差分进化算法解决用户天线联合选择问题, 就是将个体映射为用户接收天线子集, 再利用种群内变异、交叉和选择操作产生优化智能指导搜索, 使得个体所代表的

用户接收天线子集向适应度函数更大的方向进化，最终得到最优的用户接收天线子集使得式（6）最大。

用户天线联合选择问题是先调度 $K \leq K$ 个用户再选择每个被调度用户最好的 n_i 个天线的组成的子集以满足 BD 对天线数的限制。假设每个移动终端 RF 链路数相等，即 $n_i = n$, $i=1, 2, \dots, K$, 由式（5）得最多可调度 $\lceil M/n \rceil$ 个用户 ($\lceil \cdot \rceil$ 表示向下取整)，在每个被调度用户 N_i 个接收天线中选出最好的 n 个天线。为了反映出所有解的情况，将所有活跃用户的每一个接收天线都映射到差分进化算法个体 X 的一维，即 $D = \sum_{i=1}^K N_i$ ，令 $x_{\sum_{i=1}^{j-1} N_i + 1}^{j-1}, x_{\sum_{i=1}^{j-1} N_i + 2}^{j-1} \dots x_{\sum_{i=1}^j N_i}^j$ 对应第 j 个用户的全部天线。由于 DE 是一种基于实数编码的进化算法，而用户天线联合选择问题的解是离散的，因此本文改变 DE 的个体编码形式以适应用户天线联合选择问题。将 DE 的每一个个体 X 的每一维分量 x_j , $j=1, 2, \dots, D$ 的大小理解成天线隶属度，隶属度越大的维对应的天线越有可能被选择。本文算法先对每个个体产生一个不大于 $\lceil M/n \rceil$ 的正整数 K ，然后调度该个体的 K 个用户，这种调度方式保证了种群可以搜索到全部可行的用户组合。一个用户是否被调度应依据该用户全部接收天线的情况来判断，为此对每个个体进行“降维”，以每个用户全部接收天线隶属度的和代表该用户的隶属度（即 $x_{\sum_{i=1}^{j-1} N_i + 1}^{j-1} + x_{\sum_{i=1}^{j-1} N_i + 2}^{j-1} + \dots + x_{\sum_{i=1}^j N_i}^j$ 代表第 j 个用户的用户隶属度）。用户隶属度越大越应该被调度，即调度每个个体用户隶属度最大的 K 个用户，然后再对每个被调度用户选择天线隶属度最大的 n 个天线，至此完成了 DE 的编码过程。DE 的编码能够将每个 $\sum_{i=1}^K N_i$ 维的个体 X 转化为一种可能的用户天线联合选择方案。此外，经过变异、交叉操作得到的实验个体 u 依然按照上述的编码方式得到离散的解后再进行选择操作。

例如个体 $X = [0.9 \ 0.5 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.4 \ 0.3 \ 0.6 \ 0.9 \ 0.2]$ ，假设有 3 个活跃用户，每个用户有 3 根接收天线和 2 个 RF 链，基站端有 4 根发射天线，即 $M=4$, $N_1=N_2=N_3=3$, $n=2$ ，假设 $K=2$ ，则对于该个体选择用户 1 和用户 3，因为这两个用户的用户隶属度最大（分别是 2.1 和 1.7 大于用户 2 的 1.5），对于用户 1 选择天线 1 和天线 3（0.9 和 0.7 对应的天线），对于用户 3 选择天线 1 和 2（0.6 和 0.9 对应的天线）。这种编码方式可以达到使适应度较高的天线对应的维在该个体中相对较大的效果，并通过 DE 的选择操作被保留下来，而在后续的操作中这些隶属度高的天线也更容易被选择。同时 DE 的交叉变异操作又为种群开拓新解提供了可能，最终算法通过反复迭代不断逼近更优秀的解。

由此，基于差分进化算法的用户天线联合选择的具体流程如图 1 所示。

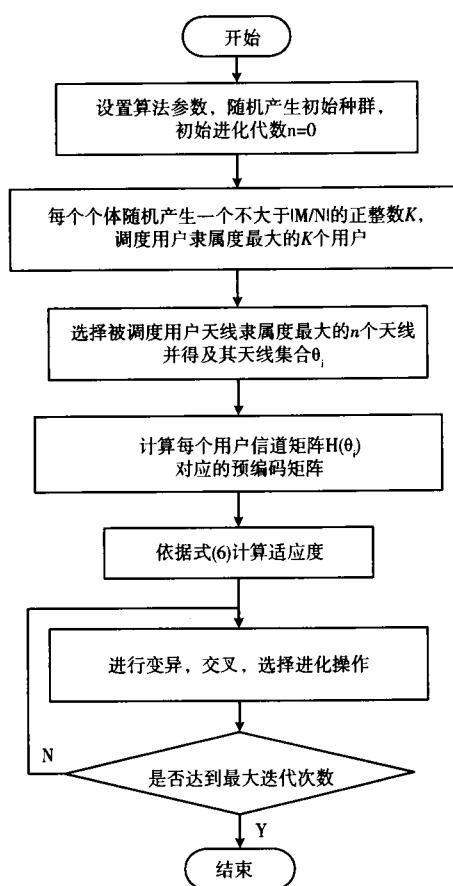


图 1 基于差分进化算法的用户天线联合选择流程

4 实验仿真与结果分析

为验证本文提出的基于差分进化算法的用户天线联合选择算法的有效性，这里进行了仿真实验，与目前效果最好的文献 [5] 提出的用户天线联合选择进行对比试验，参数的设置与文献 [5] 一致。

实验环境为 Pentium CPU 2.6GHz、内存 4GB 的计算机。假设活跃用户的接收天线数相等，即 $N_i = N$, $i=1, 2, \dots, K$, RF 链路数 $n=2$ 。设置本文算法种群数 10，总的迭代次数设为 10。所有结果都是经 3000 次独立信道实现后取统计平均得到的。分别比较活跃用户数，天线数和信噪比对系统和数据率的影响。

图 2 给出了发射天线数 $M=6$ 时 BD 的平均和数据率随用户数的变化情况。当接收天线数 $N=n=2$ 时，仅进行用户调度无需进行天线选择，图中所示的用户调度算法仍来源于文献 [5]。由图 2 可以看出在不同的用户数下，本文算法的性能始终优于文献 [5] 提出的用户天线联合选择算法，且本文和文献 [5] 算法 ($N=4$ 时) 得到的和数据率都高于仅进行用户调度时 ($N=n=2$ 时) 的和数据率。这是因为增加的接收天线子集等效于额外的用户，由此带来的多用户增益。

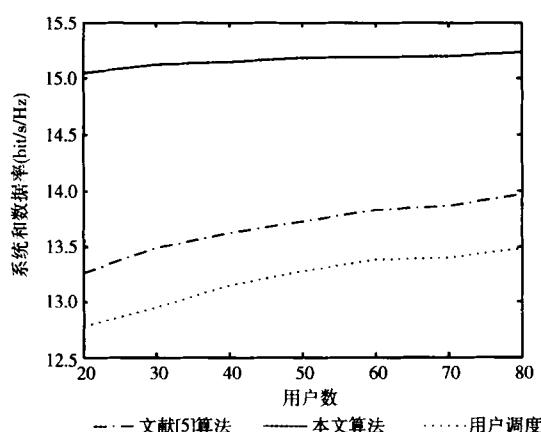


图2 平均和数据率比较 ($M=6$, $N=4$ or 2 , $\text{SNR}=10\text{dB}$)

图3给出了发射天线数 $M=8$ 时 BD 的平均和数据率随用户数的变化情况。由图2和图3可以看出在不同的发射天线数下, 本文算法的性能始终优于文献 [5] 算法。一方面是因为文献 [5] 算法倾向于调度最多可调度的用户, 当同时调度的用户较多时, MUI 较大, 对 MUI 的消除可能会降低系统的和数据率; 另一方面是因为文献 [5] 算法总是贪婪地调度信道矩阵范数最大的用户的天线。这两方面共同造成了文献 [5] 算法对天线子集的搜索不如本文算法全面。而随着用户数的增加本文算法和文献 [5] 算法性能的差距有一定缩小, 这是因为由于差分算法个体的维数随用户数的增加而线性增加, 解的空间也就更大, 因此对于一定的种群数和迭代次数, 更不易得到优秀的解, 这在一定程度上抵消了多用户增益所带来的和数据率增益。在本文中, 为了使得算法满足实时性的要求 (如表1、表2 所示), 固定了 DE 的种群数和迭代次数, 实际上当基站端的硬件处理速度较快时, 可以适当地提高种群数或/和迭代次数以达到更高的和数据率。

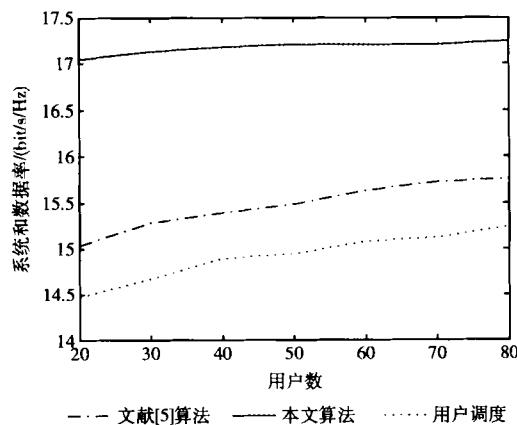


图3 平均和数据率比较 ($M=8$, $N=4$ or 2 , $\text{SNR}=10\text{dB}$)

图4给出了发射天线数 $\text{SNR}=0\text{dB}$ 时 BD 的平均和数据率随用户数的变化情况。比较图2和图4可以看出, 当信噪比较低 (0dB) 的时候, 本文算法达到的和数据率大约是文献 [5] 算法的2倍, 说明信噪比越低, 本文算法的优越性越显著。

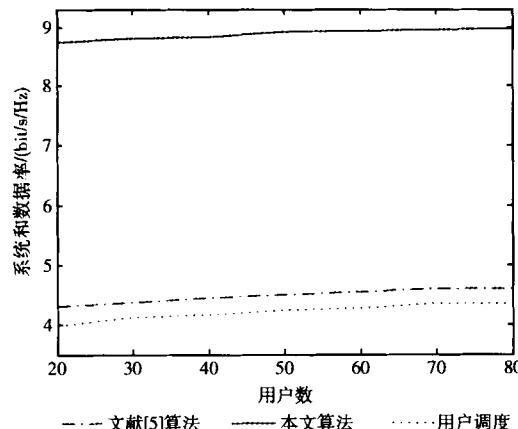


图4 平均和数据率比较 ($M=6$, $N=4$ or 2 , $\text{SNR}=0\text{dB}$)

表1给出了发射天线 $M=6$ 和 $M=8$ 时本文算法和文献 [5] 算法的平均运行时间。

表1 平均运行时间比较 ($M=6$ or 8 , $N=4$, $\text{SNR}=10\text{dB}$)

用户数	$M=6$		$M=8$	
	文献 [5] 算法 (s)	本文 算法 (s)	文献 [5] 算法 (s)	本文 算法 (s)
20	0.0264	0.0493	0.0403	0.0541
30	0.0387	0.0496	0.0599	0.0596
40	0.0525	0.0573	0.0822	0.0677
50	0.0640	0.0615	0.1025	0.0716
60	0.0740	0.0711	0.1153	0.0800
70	0.0871	0.0734	0.1598	0.0833
80	0.1003	0.0785	0.1654	0.0880

从表1可以看出, 在 $M=6$ 且系统用户数较少时, 文献 [5] 算法的速度优于本文算法; 但当用户数稍高, 本文算法的速度就优于文献 [5] 算法。在 $M=8$ 时, 本文算法的速度始终优于文献 [5] 算法。

由上述实验可以看出, 本文算法在不同用户数、发射天线数和信噪比下, 本文算法的得到系统和数据率始终高于文献 [5] 算法, 且当信噪比较低的时候, 这种优势更为显著。从算法效率上来讲, 本文算法在发射天线数较大或用户数较多的情况下均优于文献 [5] 算法。

5 结束语

在 MU-MIMO 系统块对角化预编码下，用户天线联合选择是目前研究的热点。本文提出一种基于差分进化算法的用户天线联合选择方法，可以搜索所有可能的用户接收天线子集，以满足块对角化对天线数的限制并降低硬件的复杂性及成本。通过与目前解决该问题效果最好的算法对比，实验结果表明在不同用户数、发射天线数和信噪比下，本文算法的数据率均好于现有算法，且在大多数情况下，效率也更高。因此本文算法适用于以系统和数据率最大化为目标的用户天线联合调度。此外，考虑用户间公平性时，本文算法也较易和比例公平算法相结合，以达到系统和数据率和公平度的折中。

参考文献：

- [1] SHEN Zukang, CHEN Runhua, Jeffrey G Andrews, et al. Low complexity user selection algorithms for multiuser MIMO systems with block diagonalization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 9 (54): 3658-3663.
- [2] Fujii, Masaaki. User scheduling for distributed-antenna zero-forcing beamforming downlink multiuser MIMO-OFDM systems [J]. IEICE Transactions on Communications, 2010, E93-B (9): 2370-2380.
- [3] Shreeram Sigdel, Robert C Elliott, Witold A Krzymien, et al. Greedy and genetic user scheduling algorithms for multiuser MIMO systems with block diagonalization [C] //Anchorage, AK, United states: IEEE Vehicular Technology Conference, 2009.
- [4] Shreeram Sigdel, Witold A Krzymien. Antenna and user subset selection in downlink multiuser orthogonal space-division multiplexing [C] //Wireless Pers Commun, 2010: 227-240.
- [5] Shreeram Sigdel, Witold A Krzymien. Simplified fair scheduling and antenna selection algorithms for multiuser MIMO orthogonal space-division multiplexing downlink [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology MARCH, 2009, 58 (3): 1329-1344.
- [6] PENG Peng. Research of the application of particle swarm optimization on combination optimization problems [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011: 1-2 (in Chinese). [彭芃. 粒子群算法在组合优化问题上的应用研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2011: 1-2.]
- [7] YANG Qiwen, CAI Liang, XUE Yuncan. A review of differential evolution algorithm [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21 (4): 506-513 (in Chinese). [杨启文, 蔡亮, 薛云灿. 差分进化算法综述 [J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21 (4): 506-513.]
- [8] SHANG Peng, ZHU Guangxi, SU Gang, et al. Multi-user selection with block diagonalization precoding [J]. Computer Science, 2010, 37 (4): 71-74 (in Chinese). [尚鹏, 朱光喜, 苏钢, 等. 块对角化预编码下的用户选择技术 [J]. 计算机科学, 2010, 37 (4): 71-74.]
- [9] QIAN Yiqun. Research on space-time coding and precoding for MIMO wireless communication systems [D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 75-76 (in Chinese). [钱铁群. MIMO 无线通信系统中的空时编码与预编码研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006: 75-76.]
- [10] Bai D, Mitran P, Ghassemzadeh S S, et al. Rate of channel hardening of antenna selection diversity schemes and its implication on scheduling [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2009, 55 (10): 4353-4365.

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>