

# 分布式 MIMO 系统中的一种可控式天线选择

弓宇宏<sup>①②</sup>, 王霞<sup>①</sup>, 云婵<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;

<sup>②</sup>综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**【摘要】**基于信道容量最大化准则, 提出了一种专门针对分布式多入多出(MIMO)系统的可控式天线选择算法。该算法在射频链路数( $L_t$ )固定的前提下分两步执行, 第一步进行动态的端口选择, 第二步利用穷举搜索法在已选定的端口间选出 $L_t$ 个最优天线, 通过阈值的设定控制天线选择的复杂度和性能的平衡。仿真结果表明, 在合适的门限值范围内, 该算法具有很好的跟踪特性, 具有接近于最优的容量性能, 同时大大降低了天线选择复杂度。

**【关键词】**分布式 MIMO 系统; 端口选择; 天线选择; 门限

**【中图分类号】**TN929.5

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1002-0802(2010)07-0054-04

## A Controllable Antenna Selection for Distributed MIMO Systems

GONG Yu-hong<sup>①②</sup>, WANG Xia<sup>①</sup>, YUN Chan<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

<sup>②</sup>State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**【Abstract】**Based on the criteria of maximal capacity, a controllable antenna selection algorithm for distributed MIMO system is proposed in this paper. With fixed number of radio links ( $L_t$ ), the algorithm is implemented in two steps. The first step is to select ports dynamically, and the second is to select  $L_t$  optimal antennas from the selected ports through exhaustive search. Simulation results show that, in a proper range of threshold value, the proposed algorithm could present an excellent tracking capability and near-optimal capacity performance, while greatly reduce the computational complexity of antenna selection.

**【Key words】**distributed MIMO system; port selection; antenna selection; threshold

### 0 引言

MIMO 是无线移动通信领域智能天线技术领域的重大突破, 该技术能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统容量和无线传输链路的质量, 极大地改善系统的性能<sup>[1-2]</sup>。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度上升。因此, 在收发两端射频链路数限定的情况下, 如何提高系统的性能, 已经成为一个重要的研究领域。采用天线选择技术是一种可行而有效的方法, 越来越受到人们的关注。

目前, 已经有很多文献提出了多种天线选择方案。例如, 文献[3]给出了一种最优的天线选择算法, 它是采取穷举搜索

的思想从所有可能的天线阵子集中找出使系统容量最大的天线子集; 文献[4]提出了基于最大 Frobenius 范数的一种简单的算法(NBS), 通过选择信道矩阵中具有最大范数的列(或行)来对天线进行选择; 文献[5-6]分别研究了基于最小误码率和最小欧几里德距离的天线选择算法。不过, 这些算法都是在集中式 MIMO 系统中提出的, 专门针对分布式 MIMO 系统的天线选择研究还很少。因为分布式 MIMO 系统起源于集中式 MIMO 系统, 通常能够用于集中式 MIMO 中的天线选择算法都能在分布式 MIMO 系统中直接应用, 但是这样并不能发挥分布式 MIMO 的特点。文献[7-8]分别在分布式 MIMO 系统中提出了基于范数与相关性和基于功率与速率分配的天线选择算法。现在以移动台为中心, 根据分布式 MIMO 系统的多端口特性, 分别考虑移动台到各个端口的“端口信道”, 动态选择传输质量“好”的端口, 然后在所选出的端口间再依照传统的天线选择方法选出所需要的天线。

收稿日期: 2009-08-03。

作者简介: 弓宇宏(1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信系统及其天线选择技术; 王霞(1965-), 女, 副教授, 主要研究方向为移动通信理论与技术; 云婵(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信系统及其信号检测技术。

## 1 系统模型

分布式 MIMO 系统可以表示为  $(M, N, L)$ ，如图 1 所示，它包括  $N$  个具有一定距离分布的天线端口，每个端口有  $L$  根天线，这  $N$  个端口通过光纤或电缆连接到同一个中心处理基站，移动用户则装备  $M$  个天线。

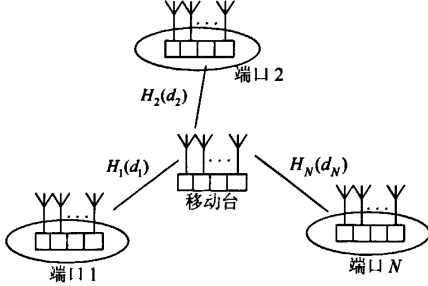


图 1  $(M, N, L)$  分布式 MIMO 系统

假设信道是平坦的准静态衰落的，分布式 MIMO 系统的信号模型可以表示为：

$$r(t, d) = H(d)s(t) + z(t), \quad (1)$$

其中， $s(t)$  是  $NL \times 1$  维发送信号， $r(t, d)$  和  $z(t)$  分别是  $M \times 1$  维的接收信号和  $(0, \sigma_z^2)$  加性高斯白噪声。 $H(d)$  是与距离向量  $d(d = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T)$  有关的  $M \times NL$  信道矩阵。其中  $d_i$  是移动台到第  $i$  个基站端口的距离。

$$H(d) = [H_1(d_1) \ H_2(d_2) \ \dots \ H_N(d_N)], \quad (2)$$

$H(d)$  的元素  $H_i(d_i)$  可以表示为：

$$H_i(d_i) = \begin{bmatrix} h_{i1}^1(d_i) & h_{i1}^2(d_i) & \dots & h_{i1}^L(d_i) \\ h_{i2}^1(d_i) & h_{i2}^2(d_i) & \dots & h_{i2}^L(d_i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{iM}^1(d_i) & h_{iM}^2(d_i) & \dots & h_{iM}^L(d_i) \end{bmatrix}_{M \times L}, \quad (3)$$

$h_{mi}^l(d_i)$  是从基站的第  $i$  个端口的第  $l$  根天线到移动台第  $m$  个天线之间的信道衰落系数：

$$h_{mi}^l(d_i) = \text{Normal}(0, \sqrt{\frac{s_i(d_i)}{2}}) + j\text{Normal}(0, \sqrt{\frac{s_i(d_i)}{2}}), \quad (4)$$

$s_i(d_i)$  表示接收平均功率的阴影衰落慢变化：

$$s_{\text{dB}} = 10\lg(s_i(d_i)) \sim N(u_{\text{dB}}, \sigma_{\text{dB}}^2), \quad (5)$$

$\sigma_{\text{dB}}$  是  $10\lg(s_i(d_i))$  的标准方差， $u_{\text{dB}}$  是  $s_i(d_i)$  的对数均值，单位为 dB。它由路径损耗决定，可以表示为：

$$u_{\text{dB}} = 10\lg(P_{\text{total}} / NL) - 4 \times 10 \times \lg(d_i), \quad (6)$$

$P_{\text{total}}$  表示  $N$  个基站端口上总的发射功率。

## 2 信道容量分析

假设接收端完全已知信道状态信息，而发射端未知。用  $H$  表示信道矩阵， $H_i$  表示天线选择后的信道矩阵。则在下行链路中，信道容量可以写为<sup>[2]</sup>：

$$C = \log_2(\det(I_M + \frac{\rho}{NL} HH^H)), \quad (7)$$

公式中  $I_M$  表示  $M$  维的单位矩阵， $\rho$  表示信噪比， $(\cdot)^H$  表示矩阵的共轭转置， $\det(\cdot)$  表示矩阵的行列式求值。

如前所述，在分布式 MIMO 系统中  $H = [H_1, H_2, \dots, H_N]$

( $H_i$  即是第  $i$  个端口信道) 将其带入式 (7) 后，信道容量可以写为<sup>[9]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} C &= \log_2(\det(I_M + \frac{\rho}{NL} HH^H)) = \\ &= \log_2(\det(I_M + \frac{\rho}{NL} (H_1 H_1^H + H_2 H_2^H + \dots + H_N H_N^H))) = \\ &= \log_2(\prod_i (1 + \frac{\rho}{NL} (\lambda_i^1 + \lambda_i^2 + \dots + \lambda_i^N))) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

其中， $\lambda_i^p, p = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, \dots, M$ ，表示端口信道  $H_p$  的第  $i$  个特征值。

同理，天线选择后的信道容量可以表示为（假设选择了  $n$  个端口）：

$$\left. \begin{aligned} C_s &= \log_2(\det(I_M + \frac{\rho}{NL} H_s H_s^H)) = \\ &= \log_2(\prod_i (1 + \frac{\rho}{nL} (\lambda_i^1 + \lambda_i^2 + \dots + \lambda_i^n))) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

在大信噪比的情况下，该信道容量可近似为：

$$\left. \begin{aligned} C_s &\approx \log_2(\prod_i (\frac{\rho}{nL} (\lambda_i^1 + \dots + \lambda_i^n))) = \\ &= M \log_2(\frac{\rho}{nL}) + \log_2(\prod_i (\lambda_i^1 + \dots + \lambda_i^n)) \geq \\ &= M \log_2(\frac{\rho}{nL}) + \log_2(\sum_{p=1}^N (\prod_i \lambda_i^p)) = \\ &= M \log_2(\frac{\rho}{nL}) + \log_2(\sum_{p=1}^N (\det(H_p H_p^H))) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

## 3 可控式天线选择

假设天线选择是在分布式 MIMO 系统下行链路中发射端进行的，发射端（中心基站处）射频链路数固定为  $L_i$ ，且满足  $L_i \leq L$ 。

从公式 (10) 可知，对于确定的  $n$ ，端口所对应的行列式值越大，它对信道容量的贡献也就越大。因此，若要使天线选择后的信道容量最大化，只需要从  $N$  个端口中选择具有最大行列式值的前  $n$  个端口。至于究竟需要选择多少个端口是由所设定的门限值来决定的。将最大行列式的值与其余端口的行列式值之比分别和门限值进行比较，若大于门限值，说明该端口对信道容量的贡献很小，所以可以忽略，否则将被选定为传输端口。门限值设置的越大，说明行列式值越小的端口被选上的机会就越大，所选出的端口数就可能越多，最多为  $N$ ，相当于没有进行端口选择。即门限值越大，最终会导致天线选择的性能越好，但同时计算复杂度也越高；门限值越小则反之。所以门限值的设置应该是在性能与复杂度之间取一个折中。接着，再从这已经选出的  $n$  个端口间利用最优的穷举搜索法<sup>[3]</sup>选出  $L_i$  个有效天线。

总之，所提出算法的实现主要有两个步骤，第一步动态选定端口；第二步选定天线。具体实现过程描述如下：

(1) 初始化

信道矩阵为  $H = [H_1, H_2, \dots, H_N]_{M \times NL}$ ；

射频链路数为  $L_i$ ；门限值  $\gamma_0$ ；

## (2) 端口选择

分别计算  $\det(H_p H_p^H)$ ,  $p=1,2,\dots,N$ ,

$$q = \arg \max_{p=1,2,\dots,N} \det(H_p H_p^H);$$

循环:

for  $p=1,2,\dots,N$

$$\gamma = \frac{\det(H_q H_q^H)}{\det(H_p H_p^H)};$$

if  $\gamma < \gamma_0$

选择端口  $p$  作为传输端口;

else

舍弃端口  $p$ ;

endif

endfor

## (3) 天线选择

假设在第 2 步选出了  $n$  个端口, 则这一步应该是在这  $n$  个端口的  $nL$  根天线间选出  $L_t$  根最优天线。假设  $nL$  根天线中含有  $L_t$  根天线的所有天线子集序号集合为  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{\binom{nL}{L_t}}\}$ , 最优的天线子集序号为  $\omega_*$ ,  $\tilde{H}_{\omega_*}$  为序号为  $\omega_*$  的天线子集所对应的信道矩阵。则该算法可以表述为:

$$\omega_* = \arg \max_{\omega \in \omega} \log_2 \left( \det \left( I_M + \frac{\rho}{nL} \tilde{H}_{\omega_*} \tilde{H}_{\omega_*}^H \right) \right). \quad (12)$$

值得说明的是, 以上算法分析虽然是针对分布式 MIMO 系统下行链路发射端的, 但是由于信道的对称性, 同样适用于上行链路的接收端天线选择。虽然是假设  $L_t \leq L$ , 但是很容易扩展到  $L_t > L$  的情况, 只需在该算法第 2 步的开始时连续选定  $\lfloor L_t/L \rfloor + 1$  个具有最大行列式值的端口 (而不是只选出一个), 再用第一个最大行列式的值与其余端口行列式的值之比和门限值进行比较, 其余算法过程保持不变。之所以作这样的假设只是为了便于分析。

## 4 仿真分析

利用蒙特卡洛仿真, 仿真取 10000 次结果的平均值, 比较了所提出的算法 (可控式算法) 与传统的最优算法<sup>[10]</sup>、NBS<sup>[11]</sup>随机选择算法。仿真区域如图 2 所示。

### 4.1 算法容量性能分析

为了仿真结果具有典型性, 将移动台位置固定在  $P$  点, 因为 4 个端口距  $P$  点的距离是相等的, 显然相对于其它位置点,  $P$  点的端口选择是最复杂的。

图 3 通过比较传统算法与可控式算法, 可以看出后者不论是遍历容量曲线还是 CDF 曲线都与传统的最优算法曲线非常接近。说明该算法在  $\gamma_0 = 5$  时具有接近最优的容量性能。

图 4 主要是为了比较  $\gamma_0 = 5$  (即门限值为 5 的曲线) 和  $\gamma_0 = 1$  (即门限值为 1 的曲线) 时的可控式算法。从图中可以看出,  $\gamma_0 = 5$  时可控式算法曲线与最优算法曲线基本重合, 但  $\gamma_0 = 1$  时, 相对于最优算法却下降了约 1 bit/s/Hz。正如前

面分析所说, 门限值  $\gamma_0$  变小, 算法的计算复杂度降低, 但同时性能也降低。

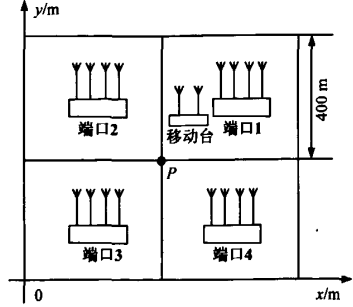
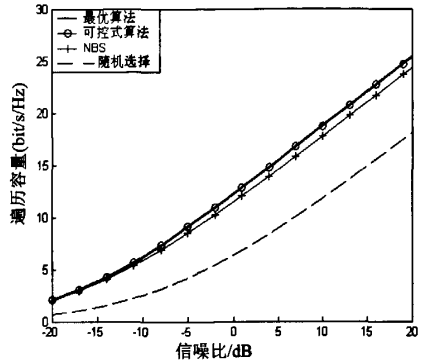
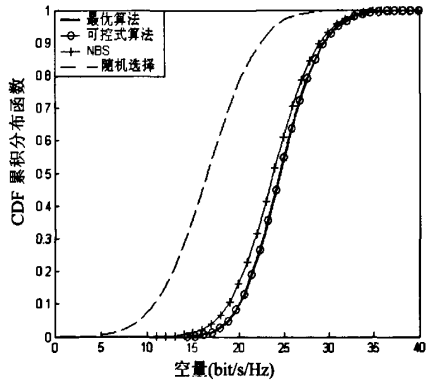


图 2 (2, 4, 4) 分布式 MIMO 系统



(a) 遍历容量随信噪比的变化



(b) 容量分布函数 CDF 曲线

图 3  $L_t=2$  和  $\gamma_0=5$  时的系统容量

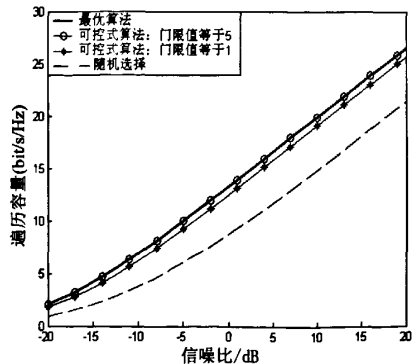


图 4  $L_t=4$  和  $\gamma_0=5$  与 1 时的系统容量

4.2 算法复杂度分析

纵观算法实现过程，行列式计算是影响算法计算复杂度的关键因素。传统最优选择采取的是穷举算法，需要进行  $\binom{NL}{L_t}$  次行列式计算，提出的算法只需要进行  $N + \binom{nL}{L_t}$  次行列式计算。例如当  $M=2, N=4, L=4, L_t=2, \gamma_0=5$  的情况下，表格 1 通过比较最优算法和可控式算法的实现分别所需的行列式计算次数；表 2 比较了图 3(b)中的最优算法和可控式算法的 CDF 曲线在 Matlab 中分别仿真实现时的运行时间。从表 1 和表 2 可以看出，可控式算法在算法的计算复杂度和实现上较传统最优算法都有明显的优势。

表 1 理论算法复杂度比较

算法	所选端口数 $n$	算法复杂度(行列式计算次数)
最优算法	4	$\binom{16}{2}=120$
可控式算法	1	$4 + \binom{4}{2}=10$
可控式算法	2	$4 + \binom{2 \times 4}{2}=32$

表 2 Matlab 中算法(CDF)运行时间比较

算法	运行时间/s
最优算法	96
可控式算法	28

5 结语

针对分布式 MIMO 系统所具有的端口特征，提出了专门针对于分布式 MIMO 系统的天线选择方案。该方案分两步执行，第一步通过门限值的设置动态端口选择，第二步从已选定的端口间选出最优天线。仿真结果表明，虽然该算法是基于大信噪比的情况下推出的，但在低信噪比的时候仍然具有很好的性能。该算法通过调整门限值的大小可以在系统性能和复杂度之间进行可控式选择，适当的门限值设置可以使该算法在性能上接近于最优算法的同时实现了计算/实现复杂度的大大降低。但是还未找到如何找到最适合门限值的方

法，这是未来需要研究的一个难点。

参考文献

[1] FOSCHINI G J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 30(06): 331-335.

[2] TELATAR I E. Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels [J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10(05): 585-595.

[3] MOLISH A F, WIN M Z. MIMO Systems with Antenna Selection[J]. IEEE Microwave Magazine, 2004, 5(01): 46-54.

[4] CHEN Zhuo, YUAN Jinhong. Analysis of Transmit Antenna Selection/maximal-ratio Combining in Rayleigh Fading Channels[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2005, 54(04):1312-1321.

[5] YU Heejung, KIM Myung-Soon. Transmit Antenna Selection for MIMO Systems with V-BLAST Type detection[C]. Korea: IEEE, 2004: 634-638.

[6] KHARRAT K F, FONTENELLE S. Antenna Selection for MIMO Systems based on an Accurate Approximation of AQM Error Probability [C].Sweden: IEEE, 2005: 206-210.

[7] 刘慎发, 吴伟陵. 适用于分布式 MIMO 系统的快速天线选择算法[J]. 北京邮电大学, 2007, 30(03): 50-53.

[8] HAN Shuangfeng. Transmit Antenna Selection with Power and Rate Allocation for Generalized Distributed Wireless Communication Systems[C]. USA: IEEE, 2005: 2430-2434.

[9] PETERSEN K B, PEDERSEN M S. The Matrix ookbook[EB/OL]. (2009-05-24) [2009-07-13]. <http://matrixcookbook.com>.

[10] 唐苏文, 陈明. 分布式天线系统的功率有效性分析[J]. 通信技术, 2009, 42(03): 38-40.

[11] 梁亦亮, 尹俊勋. 一种自适应多层空时编码的 MIMO 传输方案[J]. 通信技术, 2008, 41(12): 94-96.

(上接第 53 页)

5 结语

在研究 SISO-OFDM 信道估计技术的基础上，针对 MIMO 多天线的系统特性，分析并仿真研究 MIMO-OFDM 中最小二乘信道估计算法。仿真结果表明在多径 Rayleigh 信道条件下，MIMO-OFDM LS 算法在误码率性能上优于 SISO-OFDM。

参考文献

[1] YANG H W. A Road to Future Broadband Wireless Access: MIMO-OFDM-based Air Interface[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(01):53-60.

[2] YE Li, SESHADRI N, ARTYAVISITAKUL S. Channel Estimation for OFDM Systems with Transmitter Diversity in Mobile Wireless

Channels[J]. IEEE Journal Select Areas Communication, 1999, 17(01):461-471.

[3] YE Li. Simplified Channel Estimation for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas[J]. IEEE Trans. On Wireless Communications, 2002, 1(01):67-75.

[4] SONG B, GUI L, ZHANG W. Comb Type Pilot Aided Channel Estimation in OFDM Systems with Transmit Diversity[J]. IEEE Trans. Broadcast, 2006(02):50-57.

[5] SUH C, HWANG C S, CHOI H. Comparative Study of Time-domain and Frequency-domain Channel Estimation in MIMO-OFDM Systems[C]. USA:IEEE, 2003:1095-1099.

[6] SONG B, GUI L, ZHANG W. Comb Type Pilot Aided Channel Estimation in OFDM Systems with Transmit diversity[J]. IEEE Trans. Broadcast., 2006(52):50-57.

## 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>