

# OFDM 系统中采用自适应天线阵列的下行分组 调度算法研究和性能比较<sup>\*</sup>

张金文, 王文博

(北京邮电大学 电信工程学院 无线信号处理与网络实验室, 北京 100876)

**摘要:** 基于 OFDM 下行系统, 提出并比较了自适应天线阵列和分组调度算法结合的三种方式: (1) 分组调度选择用户, 自适应天线服务用户; (2) 自适应天线参与选择用户, 并且服务用户; (3) 空分方式选择用户, 自适应天线服务用户。仿真结果显示自适应天线阵列可以明显提高小区吞吐率等指标, 并且 (2) 和 (3) 的性能优于 (1)。

**关键词:** OFDM; 分组调度; 自适应天线阵列

**中图分类号:** TN 911 **文献标识码:** A

## 1 引言

基于 OFDM 的下一代宽带无线接入系统 (4G) 目前是业界很热的研究领域之一。3G 的物理层基于 DS-CDMA, 但是由于 4G 支持的数据速率越来越高, 甚至达到 Gbps, 占用的频带宽度也越来越大, 并且多径造成的频率选择性衰落, 以及 Rake 接收机性能的下降, 都导致 DS-CDMA 并不适合 4G 更大带宽, 更高传输速率的要求。

以 OFDM 为代表的多载波调制技术通过串/并变换, 加长了符号持续时间, 使得符号间干扰得到很好的抑制。另外由于多载波调制技术将较宽的频带拆分成较窄的子载波, 而每个子载波上信道的变化可以认为是平坦的, 这样很好的解决宽带上的频率选择性衰落的问题<sup>[1,2]</sup>。

除了采用多载波调制技术外, 4G 另一个比较显著的特点是在收发双方都将采用多天线技术。而多天线技术以自适应天线阵列 (AAA: Adaptive Antenna Array) 和多入多出 (MIMO: Multiple Input Multiple Output) 为代表<sup>[3]</sup>。

本文将研究在 4G 中分组调度算法和 AAA 结合的问题。分组调度最初用在时域中多个经历平坦衰落用户的调度, 以获得时域的时间分集增益。对于 OFDM 来说, 频率选择性衰落却可以利用起来。OFDM 将频带分割成正交的子载波, 频率选择性衰落将导致不同的子载波增益。这也使得在 OFDM 系统中可以在频域实现多用户分集<sup>[4]</sup>。通过分组在时域和频域的调度, 可以避免在较差的信道上 (时隙, 子载波等) 浪费过多的传输功率。

自适应天线阵列可以明显的提高系统容量, 改善系统性能<sup>[5]</sup>。对于基于 OFDM 系统的分组调度来说, 自适应天线阵列的作用也主要体现在两个方面。一种是维持每个时间频率资源只分配给单一的用户, 采用传统的分组调度方法或者考虑自适应天线的因素来选择用户, 然后采用自适应天线来改善传输的性能。第二种是打破原来单一时间频率资源只能分配给单一用户的限制, 在满足一定条件的前提下, 将同一时间频率资源分配给尽量多的用户。这两种方式都能够明显提高系统的容量。

本文基于 OFDM 本身的特点进行分析, 引出 OFDM 系统中自适应天线阵列和分组调度算法的三种结合方式: (1) 分组调度选择用户, 自适应天线服务用户; (2) 自适应天线参与选择用户, 并且服务用户, 使用分组调度算法来维持用户间的公平性; (3) 空分方式来选择用户, 自适应天线服务用户。在第 2 节中分析这三种结合方式; 在第 3 节中, 对使用的系统仿真平台以及各种模型进行简单的阐述; 在第 4 节中, 对三种结合方式的性能仿真结果给予分析和比较; 最后在第 5 节给出研究结论。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2006-07-10 修订日期: 2006-09-22

## 2 OFDM 系统中的采用自适应天线阵列的分组调度模型

本文使用的分组调度算法为轮循调度算法 (RR), 最大载干比调度算法 (MaxCI), 比例公平性调度算法 (PF)。研究的天线阵列都是线性等间距 (LES) 阵列。天线单元之间的间距为波长的 1/2。

### 2.1 分组调度和自适应天线的简单结合

分组调度和自适应天线最简单的结合, 就是采用全向天线分组调度算法来选择用户。选择用户后, 采用自适应天线来对用户进行数据的传输。用户将采用更加高效传输方式 (比如更高阶的调制方式) 来提高用户的吞吐量并满足其它 QoS 请求。

这种简单结合的问题在于选择用户的时候没有考虑自适应天线带来的影响。

### 2.2 机会波束赋型调度

机会波束赋型调度的过程<sup>[6]</sup>:

- 首先, 形成一个随机的波束, 并且发送训练序列。接收到训练序列的每个用户开始测量和估计接收的 SINR。
- 估计的 SINR 或者等效的支持速率被反馈到基站;
- 基于反馈的信息, 调度器选择要调度的用户, 并且随用户数据发送用户标识以及支持调制和编码信息;
- 数据被传送后, 基站重新形成新的波束, 发送训练序列。

相对于 0 中的简单结合, 这种方法在选择用户方面更加准确。同时还可以通过采用 PF 算法来满足用户对吞吐量以及公平性方面的要求。

### 2.3 共信道用户的约束

在讨论采用空分方式区分用户之前, 先分析共信道用户的约束。

对于系统来说, 可以把同一个信道分配给相同小区的用户, 主要受到如下几个因素的制约<sup>[8]</sup>: (1) 信道传播特性; (2) 天线的参数—主瓣的宽度, 以及旁瓣的增益; (3) 用户的空间分布。

这些因素决定了一个信道是否能够分配给多个用户来使用。下面将讨论两个基本条件。第一个条件和共信道用户的角度间隔相关, 第二个条件跟共信道的用户距离基站的远近相关。只有满足这两个条件, 两个同小区的用户才能共享相同的信道。

条件一: 同小区两个共信道用户的角度间隔必须满足下式:

$$\varphi \geq \frac{\alpha}{2} + \frac{\min(\alpha, \beta)}{2}$$

其中,  $\alpha$  为信道的角度扩展,  $\beta$  为天线主瓣的宽度。

条件二: 同小区两个共信道的用

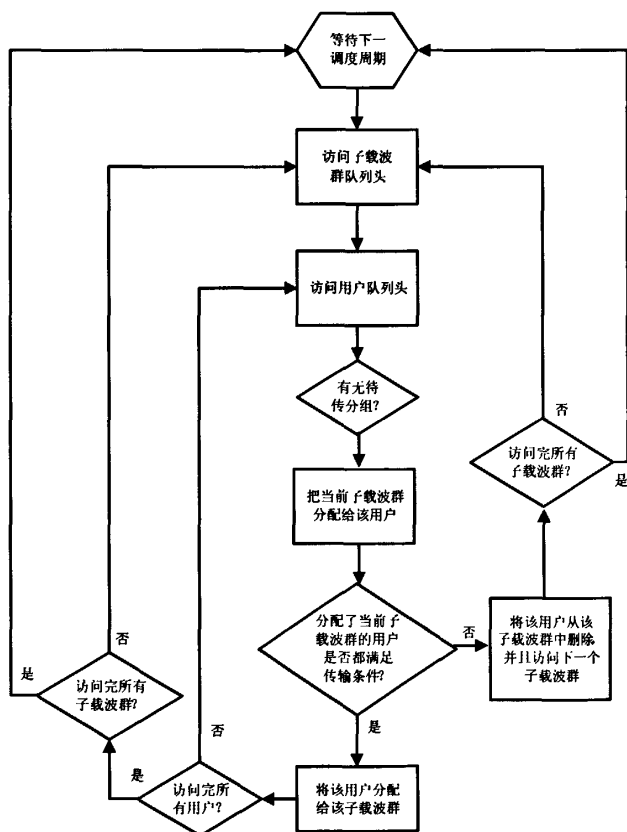


图 1 RFO 调度算法流程图

户的和基站距离的下限和上限须满足下式：

$$\frac{d_{\min}}{d_{\max}} \geq \left( \frac{rP_I \text{SIR}_0}{P_D} \right)^{1/\gamma}$$

其中， $d_{\min}$  为干扰用户和基站的最近距离， $d_{\max}$  为目标用户和基站最远的距离， $P_I$  为干扰用户的发射功率， $P_D$  为目标用户的发射功率， $r$  为旁瓣增益， $\text{SIR}_0$  是需要达到的  $\text{SIR}$ 。

2.4 随机适配调度算法<sup>[7]</sup>

考虑一种最简单的情况，和传统的轮循调度算法有一定的相似性，称其为随机适配调度算法（Random Fit OFDM），简称为 RFO 调度算法。

RFO 随机选择一个用户分配给当前时隙，然后检查已分配该时隙的用户集合，如果满足某一准则（比如满足共信道用户的两个条件），那么就把时隙分配给该用户。一旦遇到不满足该准则的用户，则完成当前时隙的分配，让该用户分配到下一时隙，以此循环。图 1 显示了 RFO 算法的工作流程。

2.5 首先适配调度算法<sup>[7]</sup>

对 RFO 算法进行改进。当遇到不满足的用户时，不是结束当前时隙的分配，而是继续检查其余的未分配时隙的用户。直到所有未分配时隙的用户都不满足准则的时候，才开始分配下一时隙。将改进的 RFO 算法命名为首先适配调度算法（First Fit OFDM），简称为 FFO 调度算法。在此不再显示 FFO 的算法流程图。

2.6 最优适配调度算法

最优适配调度算法类似于传统的 MaxCI 算法，简称为 BFO 算法。首先，选择接收功率最低的用户分配得当前时隙，然后检查所有未分配时隙的用户，从那些满足准则的用户中选出最适合的一个用户（也就是说，把该时隙分配给此用户后，对已分配该时隙的其他用户的影响最小）。以此循环，直到所有未分配时隙的用户都不满足准则的时候，才开始分配下一时隙。

3 仿真模型

本论文中的网络仿真模型如图 3 所示。在该仿真平台中仿真一个集中的基站控制器，用于完成切换等集中的无线资源管理算法。通过 19 个基站来模拟无限大的传播环境。用户在这 19 个小区中按照定义的移动模型进行随机游动。在仿真平台中，用户的数目是可以随意改变的，可以通过改变系统中的用户数量，以及配置的业务情况来模拟网络在不同的负载情况下的各种性能。

仿真平台用到的一些参数如表 1 所示。

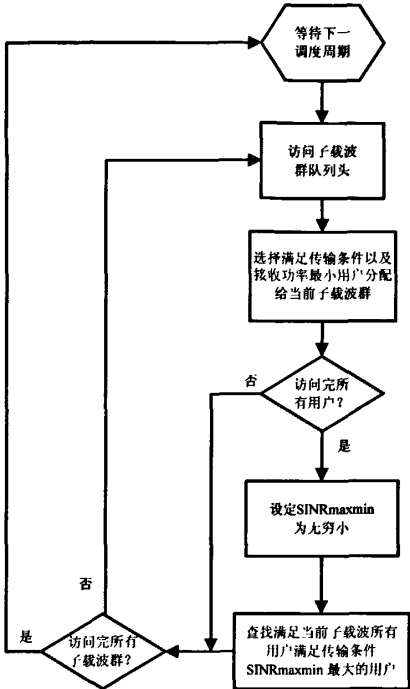


图 2 BFO 调度算法流程图

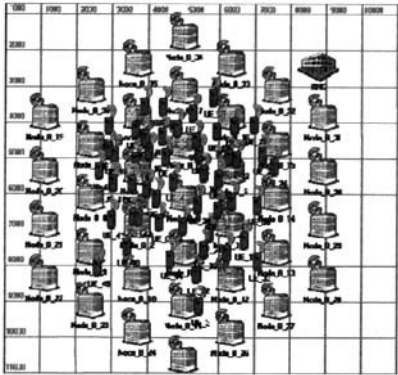


图 3 仿真平台网络模型

表 1 仿真平台配置参数

BSC 数量	1	
BS 数量	19	
MS 数量（每小区）	1, 5, 10, 100, 等等	可以随意取值
基站间距离	1500 米	
天线	全向和自适应天线阵列	
路径损耗模型	$L = 114.6 + 33.77 \lg R$	$R$ 的单位是公里
阴影衰落模型	对数正态阴影衰落	
阴影衰落的均方差	8dB	
阴影衰落的相关距离	20m	
载频	5GHz	
带宽	100MHz	

## 4 仿真结果和分析

### 4.1 分组调度算法和 AAA 的简单结合

仿真的用户数为 40 个, 配置的 MCS 的数量为 4 种, 分别为 QPSK 1/2CR, QPSK 3/4CR, 16QAM 3/4CR 和 64QAM 3/4CR。配置的业务为 PBR 10M 的实时流型业务, 调度算法仿真了 RR, MaxCI 和 PF 调度算法和 AAA 结合的情况。

图 4 显示了 RR, MaxCI 以及 PF 调度算法在采用和不采用 AAA 情况下的性能比较, 从仿真结果得到, AAA 的采用明显的增加了系统的吞吐量, 对于 RR 和 PF 增加了约 25%, MaxCI 增加了约 10%。

图 5 显示了吞吐量随用户数变化的情况。采用 AAA 后的分组调度算法随用户数增加的趋势和不采用 AAA 的分组调度算法大致一致。在 AAA 和分组调度简单结合这种机制下, AAA 的采用只是改变了单个用户服务的性能, 并没有显示改变用户间的资源分配情况。

采用理想分组丢弃机制的时延情况如图 6 所示。采用 AAA 后, 由于增加了吞吐量, 从而使得分组的时延得到一定的改善。分组时延的改善对于 RR 和 PF 两种公平调度算法的改变是比较明显的, 分组时延下降约 5%~10%。对于 MaxCI, 分组时延几乎没有改善。

### 4.2 机会波束赋型调度

图 7 显示了机会波束赋型调度算法和采用/不采用 AAA 情况下的 PF 调度算法的吞吐量比较。机会波束赋型调度算法比采用 AAA 的 PF 调度算法的吞吐量高 20%~40%左右, 特别是在用户数达到 40 之后。而且机会波束赋型调度算法可以逼近系统的吞吐量上限。在这里, 机会波束赋型调度算法采用的是随机波束赋型+PF 调度的组合, 由于随机波束赋型使得用户之间的 SIR 的差别增加, 使得系统能够更多的趋向服务信道条件更好的用户, 而 PF 调度虽然能维持用户之间的公平性, 但是它的平均速率的下降速度无法跟上用户信道条件差别的变化速度, 而在 PF 和 AAA 的简单结合中, 仍然是采用 PF 来选择用户, 而采用 AAA 来服务用户, 最终公平性会牺牲一定系统的吞吐量。

图 8 显示了分组时延的比较, 基于刚才对系统吞吐率的分析, 机会波束赋型 PF 调度算法的分组时延也优于 AAA 和 PF 的简单结合。

### 4.3 空分方式

图 9 显示 RFO, FFO 以及 BFO 三种算法和前面两种机制的比较。从吞吐量上来看,  $RFO < FFO < BFO$ 。设定了每个子载波群最多被 3 个用户所空分复用, BFO 的性能要好于机会波束赋型 PF 调度, FFO 的吞吐量性能也好于 PF 和 AAA

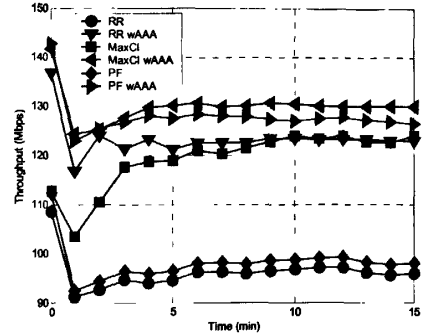


图 4 RR, MaxCI 和 PF 算法吞吐量比较

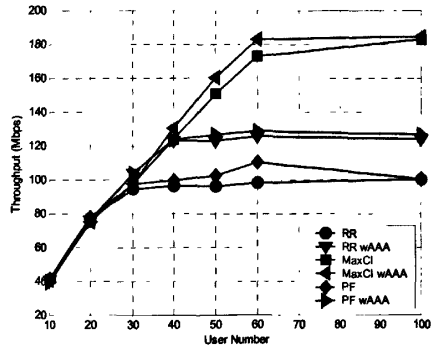


图 5 吞吐量随用户数变化

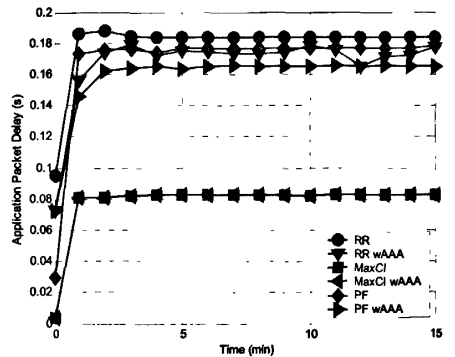


图 6 RR, MaxCI 和 PF 分组时延比较

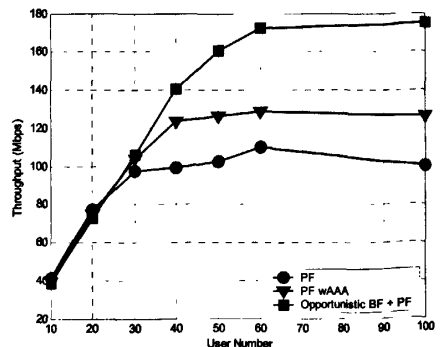


图 7 吞吐量随用户数变化

的简单结合, RFO 的性能最差, 但是相对不采用 AAA 的 PF 算法, 其性能还是有一定的提升。

## 5 结论

本文针对基于 OFDM 的下行天线阵列系统以及分组调度系统进行研究, 比较了三种不同的分组调度算法和自适应天线阵列结合的方式, 以及它们对系统性能的影响。通过仿真结果的比较, 对不同的结合方式以及不同的调度算法, AAA 的采用可以提高吞吐量 20% 以上。由于采用 AAA 来选择用户进行服务, 并且通过随机波束赋型来增加用户信道衰落的变化, 结合方式 (2) 比结合方式 (1) 吞吐量提高 30% 以上, 分组时延明显下降。结合方式 (3) 和结合方式 (2) 性能相差不是很大, 大约吞吐量提升约 10% 左右。

在本文的基础上可以对分组调度算法和自适应天线的合作进一步研究。使得二者能更加智能的配合在一起, 进一步提升系统性能。

## 参考文献:

- [1] Nathan Yee, Jean-Paul Linnartz, Gerhard Fettweis. Multi-Carrier CDMA in Indoor wireless Radio Networks [Z]. PIMRC 93
- [2] 王文博, 郑佩. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 人民邮电出版社, 2003.
- [3] D Gesbert, M Shafi, D S Shiu, P Smith, A Nagnuib. From Theory to Practice An Overview of MIMO Space-time coded wireless systems [J]. IEEE J Select Areas Communication, 2003, 21(4): 281-302.
- [4] R Knopp, P A Humblet. Multiple-accessing over Frequency-selective Fading Channels [A]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C]. 1995-09. 1326.
- [5] Joseph C Liberti, JR Theodore S Rappaport. Smart Antenna for Wireless Communications [Z]. Prentice Hall
- [6] Pramod Viswanath, David Tse, Rajiv Laroia. Opportunistic Beamforming Using Dumb Antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002-06. 1277-1294.
- [7] Faisal Shad, Terence D Todd, Vytas Kezys, John Litva. Dynamic Slot Allocation (DSA) in Indoor SDMA/TDMA Using a Smart Antenna Base-station [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(1).
- [8] N Gerlich, M Tangemann. Towards a Channel Allocation Scheme for SDMA-based Mobile Communication Systems [R]. Research Report No. 104, Institute of Computer Science, University of Wurzburg, Denmark, 1995-02.

**作者简介:** 张金文 (1977-), 博士, 主要研究方向: 宽带无线通信系统资源调度算法研究; 王文博 (1965-), 教授, 博士生导师, 电信工程学院院长, 从事 3G/B3G 以及各种无线接入系统研究。

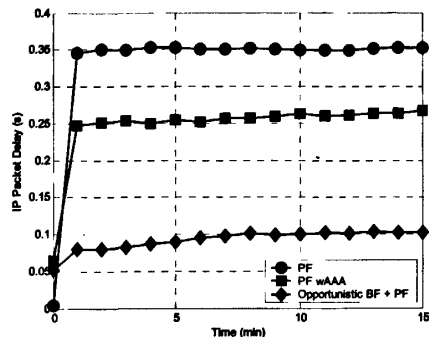


图8 IP 分组时延比较

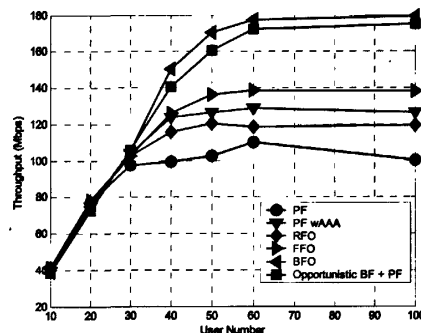


图9 吞吐量随用户数变化

## Research and comparison of packet scheduling algorithms deploying adaptive antenna arrays in OFDM systems

ZHANG Jin-wen, WANG Wen-bo

(Wireless Signal Processing and Network Lab, School of Telecommunication Engineering,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Three schemes of combination of packet scheduling (PS) and adaptive antenna arrays (AAA) for OFDM systems are proposed and compared in this paper. They are: (1) PS selects user(s), AAA serves it/them; (2) PS and AAA select user(s), AAA serves it/them; (3) AAA selects user(s), AAA serves it/them. From simulation results, AAA can increase the system performance compared with single antenna transmission. And (2) and (3) are better than (1).

**Key words:** OFDM; packet scheduling; adaptive antenna arrays

## 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>