

文章编号 1005-0388(2004)01-0124-05

多波束天线下多层蜂窝小区切换性能分析^{*}

张祖凡^{1,2} 杜惠平¹ 朱维乐²

(1. 重庆邮电学院, zhangzf@cqupt.edu.cn, 重庆 400065;

2. 电子科技大学, 四川 成都 610054)

摘要 分析了一种基于多波束天线在垂直面发射形成的多层次蜂窝移动通信小区结构的切换性能。在切换算法中引入了以移动台所接收有用信号功率与干扰信号功率之和作为切换发起的判断规则之一, 讨论了在阴影衰落无线传播环境下, 该多层次小区的3种切换发起规则, 并给出了相应的切换发起概率表示式。最后计算机模拟结果比较了不同切换发起规则下切换发起概率与小区区群数和基站天线俯仰角间的关系。

关键词 切换概率, 多波束天线, 多层小区蜂窝, 移动通信

中图分类号 TN929.5 文献标识码 B

Handover performance analysis of multi-cell cellular configuration with multi-beam antennas in mobile communications systems

ZHANG Zu-fan^{1,2} DU Hui-ping¹ ZHU Wei-le²

(1. Chongqing University of Posts and Telecommunications, zhangzf@cqupt.edu.cn, Chongqing 400065, China; 2. University of Electronic and Science Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract A new multi-cell cellular configuration networks is provided for analysis of handover initiation probability, which is based on multi-beam base-station antenna splitting in the elevation-radiating plane. The sum of the mobile received signal power including desired and interference signal has been introduced into the handover initiation algorithm, along with the idea, we present three models of handover initiation algorithm with the shadowing process of Gaussian distribution. The formulation of handover initiation probability of those algorithms is also analyzed. The validity of the presented models has been checked through the comparison with simulation results. The results presents the performance characteristic of handover initiation varies with cluster number and base-station antenna elevation angle for the three algorithms.

Key words Handover probability, multi-beam antennas, multi-cell cellular, mobile communications.

1 引言

切换概率是蜂窝移动通信系统的重要性能指标之一。切换是指在蜂窝移动通信系统中,从当前通信信道转移到另一个信道通话的过程,一方面移动用户的切换过程将直接影响到系统网络操作过程,另一方面系统内用户的切换概率也是影响系统容量的重要因素之一。移动用户切换发起的主要原因有两个方面^[1]:其一是用户离开当前服务区域进入相邻小区;其二是用户当前信道上的信道质量较差而需要得到另一信道质量较好的信道。切换发起的实质是由用户接收信号质量确定的,基于这一实质的相关切换算法得到了大量的研究^[2~4]。天线阵列作为提高无线通信信道质量有效途径之一,近年来在移动通信中得到广泛的应用研究^[5],基于阵列天线下的切换算法也开始成为阵列天线在移动通信系统中应用研究的重要方向之一^[6~7]。

本文分析了一种基于多波束天线在垂直面发射形成的多层蜂窝移动通信小区结构的切换发起概率。切换发起算法中引入了移动台接收到的有用信号功率与干扰信号功率之和作为判断规则之一。基于这一考虑,本文讨论了在阴影衰落的无线传播环境下,该多层小区的3种切换发起规则并给出了相应的切换发起概率表示式。最后计算机模拟结果比较了不同切换发起规则下切换发起概率与小区区群数和基站多波束天线俯仰角的关系。

2 系统分析模型

文献[8]中提出了基于多波束天线在垂直面发射形成的多层蜂窝移动通信小区结构,以此小区结构为基础对本文系统分析模型进行描述。如图1中所示,基站多波束天线在俯仰面内的多波束辐射,形成一个多圆环状的服务区域,每一个圆环区域为一个子小区(sub-cell)。这一小区结构包含两层意思:其一小区是由基站天线多个波束分别形成的覆盖区域所组成;其二,由N个使用相同信道组的基站称为组成一个区群(cluster)数为N或频率复用因子为N的小区结构^[1],采用这一定义,将每个基站的信道组分成M个子组,分别安排在M个不同波束内,且相邻同信道组干扰层(tier)基站的信道子组采用逆序分配,即如图1中的中心基站BS₁从内向外的M个波束分别分配子信道组为{f₁, ..., f_M},则相邻同信道组干扰层基站BS₂, ..., BS_N的M个波束从内向外的子信道组的分配为{f_M, ..., f₁}

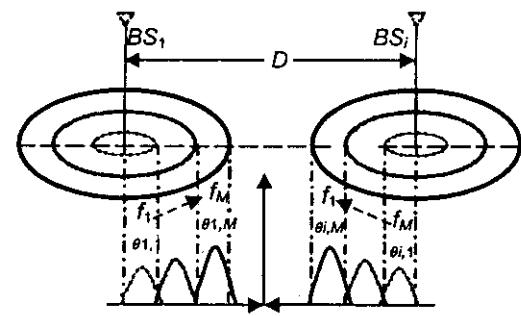


图1 系统模型

2.1 天线辐射模型

如果假定基站天线束辐射方向图在方位面与俯仰面的变化是相互独立的,则方向图函数 $f(\theta, \phi)$ 可以描述为^[9]

$$f(\theta, \phi) = f_e(\theta) f_a(\phi) \quad (1)$$

其中 $f_e(\theta)$ 和 $f_a(\phi)$ 分别表示天线在俯仰面和方位面方向图函数。如果天线在方位面内是一个全向辐射,则式(1)可以表示为

$$f(\theta, \phi) = f_e(\theta) f_a(\phi) = C_a f(\theta) \quad (2)$$

其中 C_a 表示天线在方位面辐射增益。由于所感兴趣的是俯仰面辐射变化对系统的影响,为了分析方便,一般可以假定 $C_a = 1$ 。

假定第 i 个基站天线有 M 个相互独立的波束,且 $f_i(\theta)$ 为天线方向性函数, $f_{i,k}(\theta)$ 为第 k 个波束的方向性函数,则式(2)可以改写为

$$f_i(\theta) = \prod_{k=1}^M f_{i,k}(\theta) \quad (3)$$

为了尽可能实现各个波束覆盖区域内均匀覆盖,可以假定天线各波束的方向性函数

$$f_{i,k}(\theta) = \begin{cases} \cos^{-n}(\theta - \theta_{i,kmax}), \\ \cos^{-n}(\theta_{i,kmax} - \Delta\theta), \\ \cos^{-n}(\theta_{i,kmax} + \Delta\theta), \\ 0, \end{cases} \quad (4)$$

$\theta_{i,kmax} - \Delta\theta \leq \theta \leq \theta_{i,kmax} + \Delta\theta$
 $\theta_{i,kmax} + \Delta\theta \leq \theta \leq \theta_{i,k+1max} + 2\Delta\theta$
 $\theta_{i,k-1max} + \Delta\theta \leq \theta \leq \theta_{i,kmax} - \Delta\theta$
 其他

其中, $\theta_{i,kmax}$ 表示第 i 基站中第 k 个波束辐射最大方向, $\Delta\theta$ 为波束宽度, n 为路径传播损耗,一般取值为 3~4。这里波束方向性函数是理想化的方向性函数。

2.2 无线传播与干扰模型

蜂窝移动通信无线传播环境下,移动台所接收

基站的信号强度变化,可以简单描述为一个慢速变化的均值上加上一个快速变化值,即所谓的阴影/慢衰落上的瑞利/快衰落。移动台接收一个基站发射载频为 w_c 的连续信号的强度可以表示为

$$s(t) = L(t)R(t)e^{jw_c t + j\phi(t)} \quad (5)$$

其中, $L(t)$ 和 $R(t)$ 分别表示信号强度随时间的慢变化和快变化随机变量, $\phi(t)$ 是一个服从均匀分布的随机相位。而且 $L(t)$ 是一个概率密度函数服从对数正态分布的随机变量, 即如果定义一个新的变量 p

$$p = 10\log_{10} L^2 \quad (6)$$

则变量 p 概率密度函数服从正态分布函数, 即

$$f(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-(p - \mu)^2/2\sigma^2) \quad (7)$$

其中, 参数 σ 表示阴影效应衰落程度的标准偏差, 其取值一般为 $6 \sim 13$ dB, μ 是一个表示信号强度的平均值, 可以表示为

$$\mu = 10\log_{10} \left| \frac{f(\theta)}{d^n} \right| \quad (8)$$

其中, d 表示移动台与基站间的距离。这里已将天线的发射功率归一化。

一般地, 区群数为 N 的小区结构下, 如图 1 中所示可以简单地认为中心/参考基站 BS_1 有 $N-1$ 个同频干扰基站 BS_2, \dots, BS_N 均匀分布在其周围。如果假定基站间的水平距离为 D , 则各干扰基站位置以参考基站为极点的极坐标可以表示为 (D, ϕ_k) , 且

$$\phi_k = 2\pi(k-2)/(N-1) \quad k = 2, \dots, N \quad (9)$$

通过简单的几何分析, 可以得到移动台与各基站天线间的距离为

$$d_{1,k} = h/\cos(\theta_{1,k}) \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} d_{i,k} &= [D^2 + (h/\sin(\theta_{1,k}))^2 - 2Dh\cos(\phi_k)/ \\ &\quad \sin(\theta_{1,k}) + h^2]^{1/2} \\ &= [D^2 + [h/\sin(\theta_{1,k})]^2 - 2Dh\cos \\ &\quad [2\pi k/(N-1)]/\sin(\theta_{1,k}) + h^2]^{1/2} \\ &\quad k = 2, \dots, N \end{aligned} \quad (10b)$$

其中, 基站天线高度为 h , $\theta_{1,k}$ 为移动台与参考基站 BS_1 在俯仰面的夹角。

下面考虑参考基站 BS_1 服务范围内的移动台接收信号强度。第 k 个波束内服务用户所接收到信号强度可以表示为

$$\begin{aligned} s_{1,k}(t) &= L_{1,k}R_{1,k}e^{j\phi_{1,k}} + \sum_{i=2}^N L_{i,M-k+1} \cdot \\ &\quad R_{i,M-k+1}e^{j\phi_{i,M-k+1}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 等式右边中第一项表示有用信号, 第二项表示干扰信号。 $L_{i,j}$ 和 $R_{i,j}$ 中的下标表示第 i 个基站第 j 个波束。

由于这里不考虑快衰落的影响, 将 $R_{i,k}$ 的值归一化为 1, 即 $\langle R_{i,k}^2 \rangle = 1$, 则可以定义用户信号功率 $C_{1,k}$ 与干扰信号的瞬时功率 $I_{1,k}$ 如下

$$C_{1,k} = L_{1,k}^2 \quad (12)$$

$$I_{1,k} = \sum_{i=2}^N L_{i,k}^2 \quad (13)$$

由等式(12)和(13), 可以得到移动台接收信号总功率 $T_{1,k}$ 和信号噪声功率比 $R_{1,k}$ 为

$$\begin{aligned} T_{1,k} &= 10\log_{10}(C_{1,k} + I_{1,k}) \\ &= 10\log_{10} \left(\sum_{i=1}^N L_{i,k}^2 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} R_{1,k} &= 10\log_{10}(C_{1,k}/I_{1,k}) \\ &= 10\log_{10}(L_{1,k}^2 / \sum_{i=2}^N L_{i,k}^2) \end{aligned} \quad (15)$$

由于 $L_{i,k}^2$ 是一对数正态分布变量, 显然 $10\log L_{i,k}^2$ 是一个正态分布变量, 假定该正态分布变量的均值为 $\mu_{i,k}$ 、标准偏差为 $\sigma_{i,k}$, 则由式(7)可得

$$\mu_{i,k} = 10\log_{10} \left| \frac{f_{i,k}(\theta)}{d_{i,k}^n} \right| \quad (16)$$

由式(14)和(15)可以发现, $T_{1,k}$ 和 $R_{1,k}$ 是多个对数正态分布变量之和。文献[10]中指出, 多个对数正态分布变量之和可以近似由另一个对数正态分布变量来表示。如果假定干扰源均值中 $\{\mu_{i,k}\}$ 最大值为 μ_1 , 所有信号源的标准偏差相同且表示为 σ_I , 则有 $T_{1,k}$ 和 $R_{1,k}$ 的分布为

$$T_{1,k} = 10\log_{10} \left(\sum_{i=1}^N L_{i,k}^2 \right) \sim N(\mu_T, \sigma_T) \quad (17)$$

$$R_{1,k} = 10\log_{10} \left(L_{1,k}^2 / \sum_{i=2}^N L_{i,k}^2 \right) \sim N(\mu_R, \sigma_R) \quad (18)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mu_T &\approx \mu_{1,k} + \left(\mu_1 + \xi \ln(N-1) + \frac{\sigma_I^2}{2\xi} - \right. \\ &\quad \left. \frac{\xi}{2} \ln \left(\frac{N-2 + e^{\sigma_I^2/\xi^2}}{N-1} \right) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\sigma_T \approx \sqrt{\sigma_{1,k}^2 + \xi^2 \ln \left(\frac{N-2 + e^{\sigma_I^2/\xi^2}}{N-1} \right)} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \mu_R &\approx \mu_{1,k} - \left(\mu_1 + \xi \ln(N-1) + \frac{\sigma_I^2}{2\xi} - \right. \\ &\quad \left. \frac{\xi}{2} \ln \left(\frac{N-2 + e^{\sigma_I^2/\xi^2}}{N-1} \right) \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\sigma_R \approx \sqrt{\sigma_{1,k}^2 + \xi^2 \ln \left(\frac{N-2 + e^{\sigma_I^2/\xi^2}}{N-1} \right)} \quad (22)$$

这里, $\xi = 10/\ln 10$ 。

2.3 切换发起算法

不同于常用的切换发起算法,这里引入接收信号总功率作为发起判断规则之一,定义了3种移动台从波束 k 切换到相邻波束 $k+1$ 切换发起规则,即已假定移动台运动方向是由波束 k 覆盖范围向相邻波束 $k+1$ 覆盖范围内移动。实质上,这一假定对处于两波束覆盖区域间移动台切换发起行为都是适用的。

Model 1: 接收信号总功率和有用信号与干扰信号功率之比均低于门限值 T_{th} 和 R_{th} 时,即

$$p_{k \rightarrow k+1} = p\{R_{1,k} + R_{th} < R_{1,k+1}, T_{1,k} + T_{th} < T_{1,k+1}\} \quad (23)$$

Model 2: 有用信号与干扰信号功率之比低于门限值 T_{th} 的条件下,接收信号总功率低于门限值 R_{th} ,即

$$p'_{k \rightarrow k+1} = p\{R_{1,k} + R_{th} < R_{1,k+1} \mid T_{1,k} + T_{th} < T_{1,k+1}\} \quad (24)$$

Model 3: 接收信号总功率低于门限值 R_{th} 的条件下,有用信号与干扰信号功率之比低于门限值 T_{th} ,即

$$p''_{k \rightarrow k+1} = p\{T_{1,k} + T_{th} < T_{1,k+1} \mid R_{1,k} + R_{th} < R_{1,k+1}\} \quad (25)$$

显然,Model 1 的切换发起概率值最小,为了比较这3种规则,以 Model 1 的切换发起概率作为参考,定义切换发起概率之比(Ratio of probability)

$$\Delta' = \frac{p_{k \rightarrow k+1}}{p'_{k \rightarrow k+1}} = p\{T_{1,k} + T_{th} < T_{1,k+1}\} \quad (26)$$

$$\Delta'' = \frac{p''_{k \rightarrow k+1}}{p_{k \rightarrow k+1}} = p\{R_{1,k} + R_{th} < R_{1,k+1}\} \quad (27)$$

由等式(17~22),可以将等式(26)和(27)进一步表示为

$$\begin{aligned} \Delta' &= \frac{p_{k \rightarrow k+1}}{p'_{k \rightarrow k+1}} = p\{T_{1,k} + T_{th} < T_{1,k+1}\} \\ &= \int_0^\infty f_T(T_{1,k}) \left[\int_{T_{1,k+1} = T_{1,k} + T_{th}}^\infty \right. \\ &\quad \left. f_T(T_{1,k+1}) \right] dT_{1,k} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \Delta'' &= \frac{p_{k \rightarrow k+1}}{p''_{k \rightarrow k+1}} = p\{R_{1,k} + R_{th} < R_{1,k+1}\} \\ &= \int_0^\infty f_R(R_{1,k}) \left[\int_{R_{1,k+1} = R_{1,k} + R_{th}}^\infty \right. \\ &\quad \left. f_R(R_{1,k+1}) \right] dR_{1,k} \end{aligned} \quad (29)$$

这里, $f_{T/R}(\cdot)$ 是一个正态分布的概率密度函数(见等式(7))。

3 计算机模拟结果与分析

通过计算机数值模拟,比较了不同切换发起规则下切换发起概率与小区区群数和基站多波束天线俯仰角的关系。模拟过程中,假定基站天线高度 $h = 30m$, 基站间距离 $D = 1km$, 标准偏差 $\sigma_t = 6dB$, 门限值 $R_{th} = T_{th} = 6dB$, 波束宽度 $\Delta\theta = \pi/36$, 以及传播损耗 $n = 3$ 。

图2是某一波束最大指向在俯仰面 $\theta = \pi/4$ 时,概率比值与小区区群数 N 的关系模拟图。由图可以看出,概率比值随 N 值的增大而减小,且相同 N 值下 Model 2 较 Model 3 概率比值大,且随 N 增加两者的概率比值逐渐趋于相等,即 Model 2 的切换发起概率相对 Model 3 小,这一点可以解释为当 N 值较小时干扰信号功率小,总信号功率小、信噪功率比大,因此 Model 2 的切换发起概率相对 Model 3 小,随 N 值增大干扰信号功率增加,总功率与信噪功率比对切换发起的贡献逐渐接近,从而 Model 2 和 Model 3 的切换发起概率逐渐接近。同时随着 N 值的增大切换发起概率比值下降,这是由于干扰功率增大,总信号功率增大、信噪功率比降低,因而切换发起概率增加。

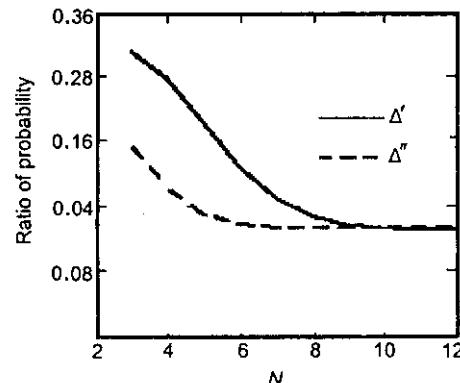
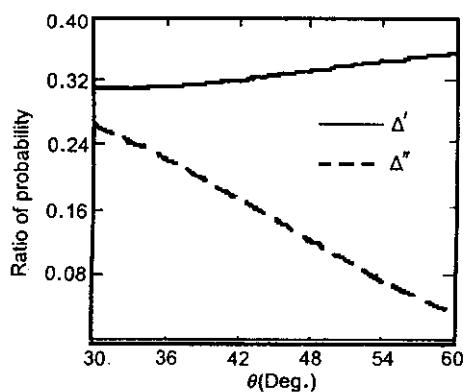


图2 概率比值与区群 N 的关系

图3是小区区群 $N = 6$ 时,概率比值与各波束俯仰角 θ 的关系模拟图。由图可以看出,在相同俯仰角条件下,Model 2 的切换发起概率相对 Model 3 的小,且随俯仰角的增大,Model 2 的概率比值增大而 Model 3 的减小。这一点可以解释为随着 θ 值增加,干扰信号功率降低、总信号功率降低,信噪功率比相对提高,因此 Model 2 的切换发起概率降低,Model 3 的切换发起概率增加。

图3 概率比值与俯仰角 θ 的关系

4 结论

本文通过理论分析和计算机模拟,讨论了一种基于多波束天线在垂直面发射形成的多层蜂窝小区结构下的切换发起概率。计算机模拟结果表明同时考虑信号总功率和信噪功率比时的切换发起概率最低,而考虑信噪功率比条件下考虑信号总功率的切换发起概率最大,这一结果和理论分析较好地吻合。由于不同切换发起规则对系统的复杂程度不一样,因此进一步工作需要对切换发起概率与系统规划及相关方面进行折衷考虑,以及对多波束天线波束形成方面更实际的考虑,从而构造一种新的基于多波束天线的蜂窝移动通信小区及相关技术。

参考文献

- [1] T S Rappaport. Mobile communications principles and practice[M]. 北京:电子工业出版社,1999.
- [2] G W Jin, E S Cho. Efficient multi-layered CDMA cell configuration Avoiding inter-cell hard handoffs[J]. IEICE Trans. Commun., 1999, 82(5):776~779.

- [3] F Graziosi, M Pratesi. A multicell model of handover initiation in mobile cellular networks[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1999, 48(3): 802~814.
- [4] J S WU. Channel segregation method in a two-tier CDMA system[J]. IEICE Trans. Commun., 2001, 84(3): 605~613.
- [5] 张祖凡,杜惠平,赵为粮.自适应天线在移动通信中的应用[J].电波科学学报,2000,15(增):1~6.
- [6] J S Blogh, P J Cherriaman. Adaptive antenna array assisted dynamic channel allocation techniques[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2001, 19(2): 305~311.
- [7] M H Ahmed. Soft capacity analysis of TDMA systems with slow-frequency hopping and multiple-beam smart antennas[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2002, 51(4): 636~646.
- [8] 张祖凡,杜惠平.一种动态小区结构的载干比性能分析[J].电波科学学报,2002,17(6):569~572.
- [9] J H Winters, M J Gans. The range increase of adaptive versus phased arrays in mobile radio systems[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1999, 48(2):353~362.
- [10] Y S Yeh, S C Schwartz. Outage probability in mobile telephony due to multiple log-normal interferers[J]. IEEE Trans. Commun., 1984, 33(4):380~387.

张祖凡 (1972-),男,湖北人,电子科技大学博士研究生,主要研究方向为智能天线与无线通信技术、移动通信资源管理等。

杜惠平 (1966-),男,山西人,重庆邮电学院教授,博士,中国通信学会理事。

朱维乐 (1942-),男,四川人,电子科技大学教授、博士生导师。

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>