

# 适合高速铁路通信的多天线技术研究<sup>\*</sup>

王海波<sup>1</sup>, 尹学锋<sup>2</sup>

(1.北京交通大学宽带无线移动通信研究所 北京 100044; 2.同济大学电子信息学院 上海 201804)

## 摘要

迅猛发展的高速铁路对宽带无线接入技术提出了新的挑战,特别是现有蜂窝移动网络标准中广泛使用的MIMO技术在高速铁路场景下能否有助于提高频谱效率成为一个重要的问题。本文针对高速铁路场景下的列车与轨道沿线发射塔之间的无线信道特性研究了一种最大化小区边缘信道容量的多天线设置方式,并将其性能和传统的天线设置方式进行了对比。仿真结果表明,本文所采用的方法在不同的小区边缘低信噪比环境下、小区边缘附近的不同位置上和不同的K因子环境下都取得了优于传统天线间隔的信道容量。

关键词 高速铁路; MIMO; 信道容量; 直射径

## 1 引言

随着我国高速铁路的迅猛发展,为高速移动中的列车乘客提供宽带无线接入服务成为移动业务新的业务热点。在长达数小时的旅程中,乘客所需的通信服务从传统的语音、电子邮件、上网浏览、多媒体业务到乘客信息系统服务,要求列车无线通信同时满足高速移动和高数据速率,这对移动通信技术提出了新的挑战。一方面,在我国单列高铁列车中就集中了500~1 000名乘客,为如此众多的乘客提供宽带无线接入所需的数据传输速率至少在100 Mbit/s~1 Gbit/s数量级。在频谱资源已经十分稀缺的今天,无论车—地链路采用何种技术标准,都必须具备很高的频谱效率才能满足这一数据传输速率的要求。另一方面,与普通的蜂窝网络不同,高铁专用无线网络的地面天线塔距离轨道很近(正常距离30 m以内,隧道内2 m以内),同时有很强的直射径(line of sight, LoS),因此列车快速穿越多个蜂窝小区

覆盖范围使车—地天线距离随着小区切换而周期性地快速变化,导致信道容量周期性地快速波动。例如,时速360 km/h的列车只需10 s即可穿越一个覆盖范围1 000 m的小区,同时信道容量将经历低—高—低的波动。在高铁宽带无线接入所要承载的多种业务中,纯数据业务(如上网冲浪、电子邮件等)因对时延和抖动不敏感而不受这种信道容量波动的影响,但实时业务如VoIP(voice over IP, IP承载语音)、视频电话等业务的QoS(quality of service, 服务质量)将因此恶化。如果小区边缘的数据速率太低而暂时无法传输实时业务,乘客将体会到语音或视频的停顿或抖动。

MIMO(multi input multi output, 多入多出)技术是目前公众蜂窝网中用以提升频谱效率和传输可靠性的主要技术手段之一。通常认为,在多径传输效应强烈的城市内特别是室内环境下适合用MIMO多数据流传输提高频谱效率,因为这时的MIMO信道矩阵容易满足满秩的条件;而在郊区和乡村环境由于直射径的存在,MIMO在频谱效率方面的增益被减弱了<sup>[1]</sup>,这是因为沿不同传输路径到达的信号之间的相关性增强导致MIMO信道矩阵的秩缺失,从

\* 国家自然科学基金资助项目(No.61001071),北京交通大学校科技基金(No.2010RC010),上海市自然科学基金项目(No.10ZR1432700)

而降低了信道容量<sup>[2,3]</sup>。直到 I Sarris 和 A R Nix 提出了通过优化 MIMO 天线间距的方法来保持空间子信道之间的正交性,揭示了直射径主导的 MIMO 信道也可以满足而最大化信道容量的条件<sup>[4,5]</sup>。这种方法也被 Matthaiou M 等应用于汽车通信的研究中<sup>[6]</sup>。

能否通过优化 MIMO 技术提高高铁专用移动蜂窝小区边缘的数据速率是本文的核心问题。上述工作<sup>[4-6]</sup>所采用的方法适合于存在较强直射径的高铁无线信道,但都是针对发射—接收天线距离很近而 SNR (signal to noise ratio, 信噪比)却很高(例如 20 dB)的环境。高铁无线通信的小区边缘却具有发射—接收天线距离远和低 SNR 的特点,在此环境中上述 MIMO 天线优化方法是否还能带来信道容量增益是有待研究的。为此,本文利用直射径下的 MIMO 信道容量最大化条件对高铁无线传输链路的小区边缘信道容量进行了分析,并在低 SNR 条件下将其与传统的 MIMO 天线设置方式进行了性能分析和对比。

## 2 系统模型和问题定义

本文所基于的高速铁路宽带无线接入系统架构如图 1 所示。车厢内部的多模式基站为多种类型的用户终端提供无线接入,并通过车顶天线与铁轨沿线的网络单元进行通信。铁轨沿线由少数车地连接控制单元通过 RoF (radio

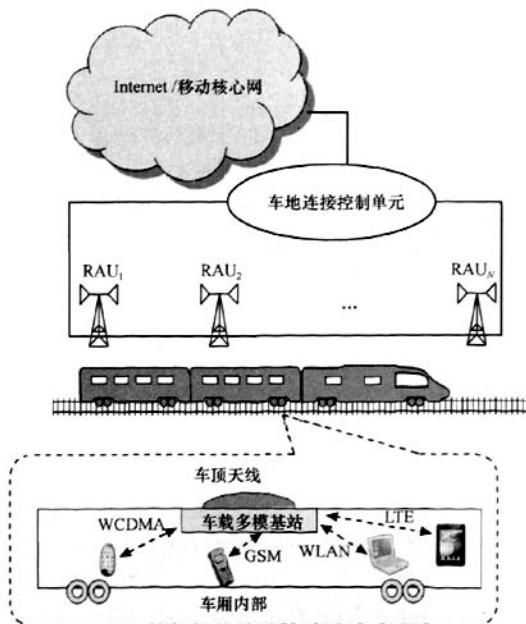


图 1 高速铁路宽带无线接入系统架构

over fiber, 光纤承载射频) 技术控制大量低成本的 RAU (remote antenna unit, 远端天线单元), 并通过网关连接移动核心网或 Internet。即铁轨沿线的网元和车顶天线收发信机共同为车载基站和移动/Internet 核心网提供了一条高速移动中的透明传输通道, 其中车地连接控制单元负责基带信号处理、信号调制解调、媒体接入控制、路由、无线资源管理和移动性管理等功能, RAU 仅负责射频信号放大、发送和接收<sup>[7]</sup>。从物理层传输角度, 下文称每个 RAU 覆盖的范围为一个 RAU 小区, 以区别于传统的基站小区。

本文假设图 1 所示系统中 RAU 含有  $M$  个天线单元, 车顶天线设置了  $N$  个天线单元, 因此基带复离散信号的输入—输出关系可以表示为:

$$y=Hx+n \quad (1)$$

其中,  $x \in C^{M \times 1}$  是发射信号向量,  $y \in C^{N \times 1}$  是含有噪音的接收信号向量,  $n \in C^{N \times 1}$  是符合循环正态分布的加性高斯白噪声,  $H \in C^{M \times N}$  是 MIMO 信道传输矩阵。在直射径存在时, 假设信道为莱斯信道模型, 则  $H$  可以被分解为两部分, 即确定性的自由空间传播分量  $H_L$  和随机性的散射分量(多径传播部分)  $H_W$ :

$$H=\sqrt{\frac{K}{K+1}} H_L + \sqrt{\frac{K}{K+1}} H_W \quad (2)$$

其中,  $K$  代表莱斯模型中的  $K$  因子。用  $m, n$  分别代表发射和接收天线单元的索引, 则矩阵  $H_L$  中第  $m$  个发射天线单元到第  $n$  个接收天线单元之间的信道响应可以写作  $e^{-jkd_{m,n}}$ , 其中  $k=2\pi/\lambda$  是对应于载波波长  $\lambda$  的波数,  $d_{m,n}$  是天线单元  $m, n$  之间的距离。假设发射和接收天线阵列单元之间各个  $d_{m,n}$  不同造成的电磁波传播能量损耗区别很小可以忽略, 则归一化的矩阵  $H_L$  可以表示为:

$$H_L = \begin{bmatrix} e^{-jkd_{1,1}} & \cdots & e^{-jkd_{1,N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jkd_{M,1}} & \cdots & e^{-jkd_{M,N}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对一个在接收机侧具有理想信道信息, 而发射机侧没有信道信息的系统而言, 单位带宽内的信道容量(或频谱效率)为:

$$C=\log_2\left(\det\left(I_N + \frac{SNR}{M} HH^H\right)\right) \quad (4)$$

其中,  $I_N$  是  $M \times N$  的单位矩阵,  $SNR$  为接收天线上收到的平均信噪比,  $[\cdot]^H$  表示共轭转置运算。

## 3 最大化 LoS 条件下的 MIMO 信道容量

对只有直射径, 没有多径散射部分的 MIMO 信道而



言,  $H=H_L$ , 令式(4)中的信道容量最大化的条件如下:

$$HH^H=MI_N \quad (5)$$

即 MIMO 信道中的各空间子信道是完全正交的, 而单位带宽信道容量等效于  $N$  个独立的子信道之和  $C_{\max}=N\log_2(1+SNR)$ 。从简单的情况开始, 首先考虑  $M=N=2$  的特殊情况。参考文献[5]已证明此时信道容量最大化的条件是:

$$|d_{1,1}-d_{2,1}+d_{2,2}-d_{1,2}|=\left(r+\frac{1}{2}\right)\lambda, \quad r \in Z^* \quad (6)$$

其中,  $Z^*$  为正整数的集合。要实现这一条件, 必须考虑现实的高铁车—地天线设置方式。

假设高铁车—地无线传输场景俯视图如图 2 所示, 列车自南向北沿平行于  $y$  轴的方向行驶, 以 RAU 天线单元 1 所在位置为原点, RAU 天线间距为  $S_1$ ; 车载天线单元 1 距  $y$  轴的距离为  $x_0$ , 车载天线单元间距为  $S_2$ 。 $D$  为 RAU 天线单元 1 和车载天线单元 1 之间的距离,  $\theta$  为 RAU 天线单元 1 和车载天线单元 1 之间的连线和  $x$  轴的夹角。为了减少列车高速行驶的空气阻力, 车载天线单元应尽量和地面平行布放; 同时为了令不同直射径的 AoA(angle of arrival, 到达角)在 RAU 小区边缘 ( $D \gg x_0$ ) 时更易于分辨, 本文中的两组天线平行于  $x$  轴放置。为了简化问题, 假定 RAU 和车载天线近似处于同一高度。对图 2 中的场景进行二维分析, 得到所有天线单元对之间的欧氏距离为:

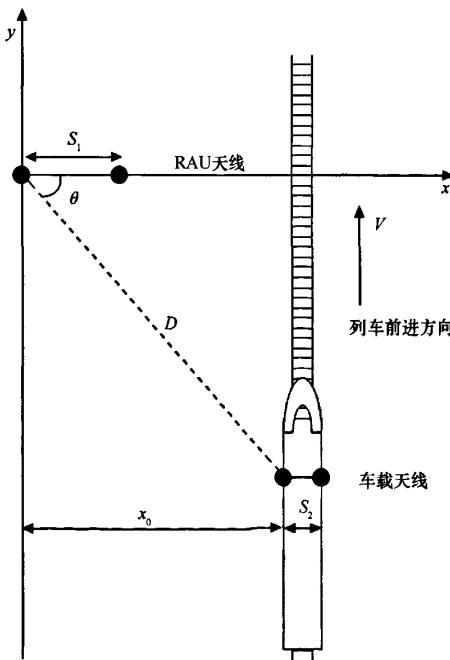


图 2 高铁宽带接入系统天线设置的俯视图

$$d_{1,1}=D \quad (7)$$

$$d_{1,2}=\sqrt{(D-S_1 \cos \theta)^2+(S_1 \sin \theta)^2} \quad (8)$$

$$d_{2,1}=\sqrt{(D+S_2 \cos \theta)^2+(S_2 \sin \theta)^2} \quad (9)$$

$$d_{2,2}=\sqrt{[D-(S_1-S_2) \cos \theta]^2+[(S_1-S_2) \sin \theta]^2} \quad (10)$$

式(7)~(10)可以通过引入一组泰勒级数简化:

$$\begin{aligned} \sqrt{(D+a)^2+b^2} &=(D+a)\sqrt{1+\frac{b^2}{(D+a)^2}} \\ &\approx(D+a)+\frac{b^2}{2(D+a)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

此方法在满足  $(D+a)^2 \gg b^2$  的前提下是精确的, 显然该前提在本文所研究的小区边缘场景内是成立的。将式(11)应用于式(7)~(10)并将结果代入式(6), 可以得到所研究场景内的 MIMO 信道容量最大化条件:

$$S_1 S_2 \approx \left(r+\frac{1}{2}\right) \frac{\lambda D}{(\sin \theta)^2} \quad (12)$$

## 4 性能分析

在本节中, 将应用前述的容量最大化条件对一个典型高铁无线接入小区的边缘进行 MIMO 信道性能分析并与普通的天线设置方式进行比较。假设信号载频为我国 LTE 标准可能在户外使用的 2.6 GHz, 小区半径 500 m,  $x_0=14$  m, 在小区边缘  $D \approx 500$  m  $\gg x_0$ , 因此  $\theta \approx 90^\circ$ ,  $\sin \theta \approx 1$ 。令  $r=0$ ,

$$S_1 S_2 \approx \frac{1}{2} \lambda D = 28.8262 \text{ m}。考虑到列车宽度的限制, 根据容$$

量最大化条件取  $S_1=28.8262$  m,  $S_2=1$  m, 此设置在本文中称为最优天线设置。此时  $S_1 > x_0$ , RAU 天线的两个单元间距已经大于 RAU 到铁轨的距离, 这意味着满足小区边缘信道容量最大化条件的 RAU 侧天线单元需要横跨铁轨分别设置, 类似于通常所说的 CoMP(cooperative multi point, 协作多点) 方式。下面将在同等条件下将最优天线设置和  $S_1=S_2=0.5\lambda$  (半波长设置) 及  $S_1=S_2=10\lambda$  (10 倍波长设置) 的信道容量进行比较。

### 4.1 在确定性的 LoS 信道不同信噪比下的性能

当  $H=H_L$ , 在  $D=500$  m 处根据式(4)导出的不同天线设置导致的 MIMO 信道容量如图 3 所示。

从图 3 中可以看到, 在低信噪比的条件下, 最优化的天线设置依然比常规的天线设置方式有着显著的频谱效率(或单位带宽信道容量)增益, 并且该增益随着 SNR 的提高而持续增加, 在 SNR 为 5 dB 时该增益即达 1 bit/(s·Hz)。而 10 倍波长天线间距和常规的半波长天线间距性能基本

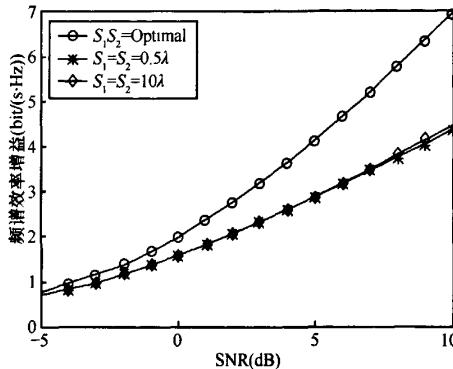


图3 低信噪比下不同天线设置的频谱效率

一致,这说明简单地增大天线单元距离以减少不同发射—接收天线单元对之间子信道相关性的做法在纯直射径信道下并不能有效提高信道容量。

#### 4.2 在确定性的LoS信道下距离变化的影响

上述天线最优的条件是根据一个特定的位置设定的,下面讨论当列车在小区边缘移动而偏离了特定位置时的信道容量。为此我们计算了列车沿轨道在小区边缘 $y \in [-500, -400]$ 的范围内不同天线设置的信道频谱效率,如图4所示。

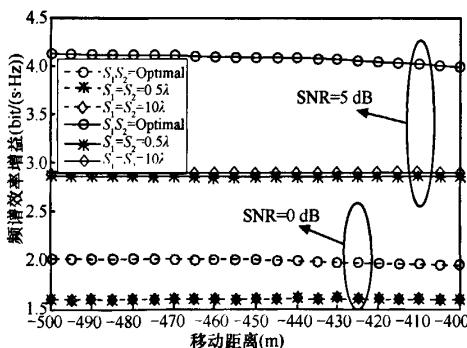


图4 小区边缘不同位置的频谱效率

图4中的结果显示,在保持平均SNR不变的条件下,最优天线设置的频谱效率随着列车位置由小区边缘向小区中心(RAU所在位置)方向的移动只有轻微的下降(小于0.1 bit/(s·Hz))。结合参考文献[5]中的结果,可以发现这是由于在这个距离范围上,车载天线沿y轴移动位置对角度θ的改变很小所致。由此可以得出结论,本文提出的最优天线设置方法在LoS信道下相对常规MIMO天线设置的信道容量增益在高铁RAU小区边缘的较大范围内都稳定地存在。

#### 4.3 存在多径散射信道下的性能

前面的性能曲线都是在 $H=H_L$ 的理想LoS条件下取

得的,下面采用式(2)中的 $H_w$ 包含非LoS分量的MIMO信道模型分析不同天线设置方式的性能。式(2)中的 $H_w$ 代表信道的多径散射部分,需要用随机过程描述。由于本文研究的最优天线设置方式中发射和接收端的天线单元间距较大,其相关性较小,因此可以假定 $H_w$ 中的每个元素符合独立同分布 $h_{n,m} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 。从而由确定性和随机性部分共同组成的信道具有遍历性容量:

$$C_{\text{Ergodic}} = E \left[ \log_2 \left( \det \left( I_N + \frac{\text{SNR}}{M} H H^H \right) \right) \right] \quad (13)$$

图5显示了在小区边缘( $D=500$  m)经过 $10^5$ 次独立的 $H_w$ 实现后得到的不同天线设置和不同K因子下的信道容量累积分布函数,其中 $\text{SNR}=5$  dB,K分别取值为5、10和15 dB。从图5中可以发现,随着K因子的增大,最优天线设置相对半波长天线设置的频谱效率增益不断扩大。因为最优天线的信道容量CDF(cumulative distribution function, 累积分布函数)曲线随着K因子的增大向右移动,而半波长天线设置的CDF却向左移动。这一结果说明,在存在强烈直射径的环境下例如高铁车—地无线接入

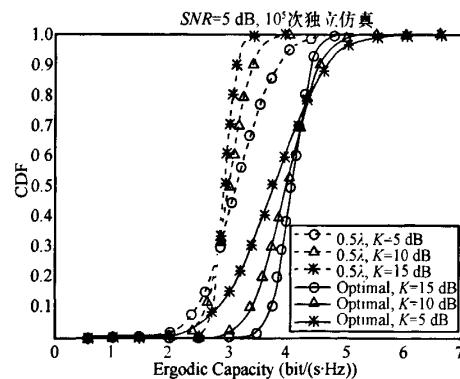


图5 不同天线设置和不同K因子下的信道容量累积分布函数



的场景,符合最优天线设置条件的 MIMO 信道容量明显优于常规的半波长天线设置。其中的原因在于,通常的半波长天线设置 MIMO 技术是利用城市或室内多径散射丰富的环境来增加信道的秩从而获得信道容量增益的,在直射径强烈的条件下由于其天线单元的强相关性而丧失了满秩的条件。本文中的最优天线设置却是在直射径下获得信道满秩的,因此直射径越强其容量增益越明显。

## 5 结束语

本文针对高速铁路场景下的列车与轨道沿线 RAU 之间的无线信道特性研究了一种最大化小区边缘信道容量的多天线设置方式,并将其性能和传统的天线设置方式进行对比。这种最优化的天线间距可以根据载波波长、小区边缘到 RAU 的距离以及列车的几何尺寸限制共同决定。仿真结果表明,本方法在不同的小区边缘低信噪比环境下、小区边缘附近的不同位置上和不同的  $K$  因子环境下都取得了优于传统天线间隔的信道容量。

## 参考文献

- 1 Foschini G, Gans M. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Pers Comm*, 1998, 6(3):311~335
- 2 McNamara D P, Beach M A, Fletcher P N, et al. Capacity variation of indoor multiple input multiple output (MIMO) channels. *IEE Electronics Letters*, 2000, 36(24):2 037~2 038
- 3 Cottatelluci L, Debbah M. On the capacity of MIMO rice channels. In: Proc of 42nd Allerton Conference, Illinois, USA, 2004
- 4 Sarris I, Nix A R. Design and performance assessment of high-capacity MIMO architectures in the presence of a line-of-sight component. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(4): 2 194~2 202
- 5 Sarris I, Nix A R. Design and performance assessment of maximum capacity MIMO architectures in line-of-sight. *IEE Proceedings in Communications*, 2006, 153(4):482~488
- 6 Matthaiou M, Laurenson D I, Wang Chengxiang. Capacity study of vehicle-to-roadside MIMO channels with a line-of-sight component. In: Wireless Communications and Networking Conference 2008, Las Vegas, USA, March 31-April 3 2008
- 7 于晓溪,谈振辉,章佳懿等.一种适合高速铁路的宽带无线接入网络架构. *电信科学*, 2010, 26 (7):32~36

[作者简介] 王海波,北京交通大学讲师,主要研究方向为陆地超高速移动通信、移动组播、TDD 信道互易性;尹学锋,同济大学副教授,主要研究方向为无线通信中的信号处理、信道建模技术。

# Capacity Study of MIMO Technique for High-Speed Train Communications

Wang Haibo<sup>1</sup>, Yin Xuefeng<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Broadband Wireless Mobile Communications, Beijing JiaoTong University, Beijing 100044, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract** In this paper, the performance of MIMO systems for high-speed train communication systems was investigated. For a train-to-trackside channel with strong line-of-sight(LoS) component, a specific antenna geometry was adopted to optimize the channel capacity at the cell-edge which achieve sub-channel orthogonality. Numerical result proves that the investigated scheme achieves significant capacity gain comparing to conventional MIMO antenna settings.

**Key words** high speed railway, MIMO, channel capacity, line of sight

(收稿日期:2010-12-29)

## 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](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>