

文章编号: 1001-893X(2010)08-0041-05

## 八天线 TD-LTE 系统的波束赋形算法分析<sup>\*</sup>

郭彬, 樊迅, 曹伟, 李亚麟, 蒋智宁

(上海贝尔股份有限公司, 上海 200070)

**摘要:** 多天线是天线技术的发展趋势, TD-LTE 引入了 8 发 2 收的天线配置。基于小间距多天线阵列, 利用 TDD 系统信道互易性, 波束赋形技术可以根据上行导频获得信道信息, 形成对基带(中频)信号的最佳组合或者分配, 补偿无线传播过程中由空间损耗、多径效应等因素引入的信号衰落与失真, 同时降低同信道用户间的干扰。EBB(Eigen-based Beamforming) 算法是波束赋形主要算法之一, 该算法在整个波束空间中, 找到使接收信号功率最大的赋形权矢量。通过仿真, 对 EBB 算法在各种应用场景下的性能进行了分析, 结果表明八天线 EBB 波束赋形算法可以正确实现波束合成, 在低速或上行信道信息估计误差较小情况下能够明显提高系统性能。

**关键词:** TD-LTE; 波束赋形; 特征值分解; EBB; SCM-E

**中图分类号:** TN929.5    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.009

## 8 Antennas Eigen-based Single Stream Beamforming Algorithm for TD-LTE System

GUO Bin, FAN Xun, CAO Wei, LI Ya-lin, JIANG Zhi-ning

(Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

**Abstract:** Multi-antenna technology is the mobile telecommunication trend and an  $8 \times 2$  antenna configuration is introduced in TD-LTE recently. Based on small distance multi-antenna arrays, in such a system, by utilizing the TDD-system-specific channel reciprocity characteristic, the beamforming gets channel information from uplink signals, then forms the best combination or distribution of base - band (IF) signal, compensates signals fading and distortion caused by factors such as space loss or multi-path effects in wireless communication process, while reducing co-channel interference between users. EBB (Eigen-based Beamforming) algorithm is one of the main algorithms for beamforming. EBB algorithm finds the weight vector in the whole beam space, which makes the receiving signal power biggest. Through simulation, the EBB algorithm performance under various application scenarios is analysed. The results show that the 8 antennas EBB algorithm can correctly achieve beam synthesis and significantly improve the system gain under the cases with low speed and small channel estimation error.

**Key words:** TD-LTE; beamforming; eigen value decomposition (EVD); eigen - based beamforming; SCM-E

3G 通信技术的演进技术, 其中定义了 LTE-FDD

### 1 引言

(Frequency Division Duplexing) 和 LTE-TDD (Time Division Duplexing) 两种方式。多天线技术是 LTE 中的

\* 收稿日期: 2010-05-28; 修回日期: 2010-06-28

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX03002-001)

Foundation Item: The National Science & Technology Major Project (No. 2009ZX03002-001)

重要技术之一,通过多天线系统可以获得分集增益、阵列增益以及空分复用增益。波束赋形技术是一种基于小间距多天线阵列的线性预处理技术,可以根据系统性能指标,形成对基带(中频)信号的最佳组合或者分配。相对于频分双工(FDD)系统而言,TDD 系统可以利用无线信道互易性,使用上行信号反馈获得上行信道信息,并将这些信道信息应用于下行发送的开环波束赋形技术中,有效地挖掘系统发端的多天线增益,扩大系统覆盖,提高系统容量,增强抗干扰的能力。

基于特征值分解的 EBB(Eigen-based Beamforming)算法是波束赋形主要算法之一。EBB 算法通过对用户空间相关矩阵进行特征分解,找到最大特征值对应的特征向量即为权矢量,从而实现波束赋形。

TD-LTE 引入了 8 发 2 收的天线配置,到 LTE-A 则将会引入 8 发 8 收的天线配置<sup>[3]</sup>。本文描述了如何将 EBB 算法应用于八天线 TD-LTE 系统,并参照 3GPP 标准搭建了完整 TD-LTE 下行八天线波束赋形系统仿真平台,采用 SCM-E 信道对基于特征值分解的八天线单流波束赋形算法进行了性能仿真分析。

## 2 八天线 TD-LTE 波束赋形系统结构

本文所设计的波束赋形系统在基站端采用 8 根交叉极化天线,移动终端采用两根垂直极化天线,如图 1 所示。移动终端通过在上行发送的信道探测参考信号(Sounding Reference Signal,SRS),基站端对接收的 SRS 进行信道估计,从而获得上行信道信息,再利用 TDD 系统的信道互易性得到下行信道信息,然后通过特征值分解得到加权矢量用于下行波束赋形<sup>[4]</sup>。

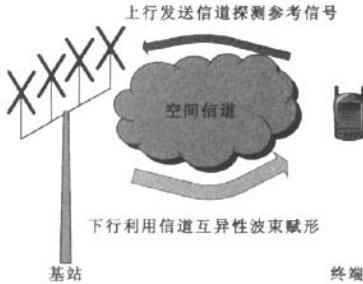


图 1 TD-LTE 中八天线单流波束赋形系统结构  
Fig. 1 TD-LTE 8 antennas beamforming system structure

考虑到减少 SRS 信号占用资源以及基站的处理时间,终端通常只选择在个别上行子帧发送 SRS 信号;同时,还要避免 SRS 信号与下行子帧之间时

延太久,造成信道信息的过时。本文设计了一种兼顾上述两种问题的 SRS 信号发送模式,如图 2 所示。当上下行配置采用上下行配置 1 时<sup>[2]</sup>,信道探测参考信号采用 2 ms 周期发送,在特殊子帧上的上行信道探测参考信号获取信道信息应用于第一个下行子帧,在上行帧的信道探测参考信号结果用于第二个下行帧和特殊子帧发送下行数据,这样能够保证每个下行子帧用于波束赋形的上行信道探测参考信号都在 2 ms 以内,而不是使用过期的信道信息。这种配置在很大程度上减少了上行信道探测参考信号延迟对下行波束赋形性能的影响,又不会占用较多的时频资源。

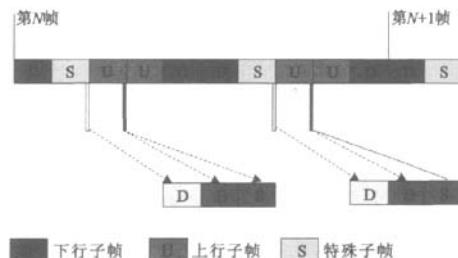


图 2 信道探测参考信号周期配置  
Fig. 2 Sounding reference signal feedback period configuration

## 3 TD-LTE 系统中基于特征值分解的单流波束赋形算法实现

图 3 为所设计的八天线波束赋形发射机系统实现框图。该系统主要包括上行赋形权重产生处理和下行波束赋形处理两部分。

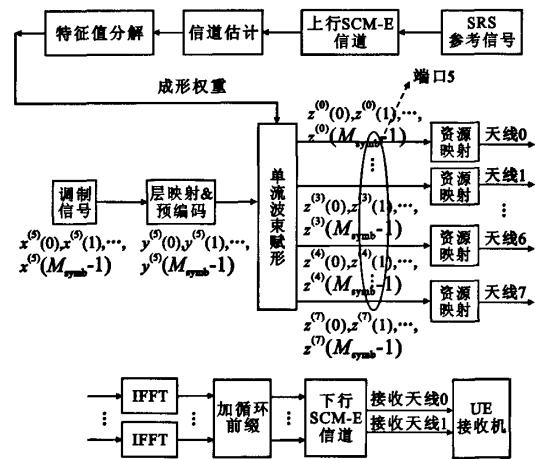


图 3 八天线波束赋形系统实现框图  
Fig. 3 Single user single layer eigen-based beamforming transmitter

### 3.1 上行赋形权重产生处理

在上行接收链路中将收到的 UE 发送的信道探测参考信号经过信道估计模块 (Channel Estimation, CE) 得到上行信道信息  $\tilde{H}_{u,a,k}^{SRS}$ , 其中,  $u$  为用户序号,  $a$  为天线序号,  $k$  为分配给该用户可使用的资源块序号。这里只考虑单用户, 因此可以忽略  $u$ 。

在 EBB 算法中, 对用户空间相关矩阵进行特征分解, 以找到最大特征值对应的特征向量作为权矢量, 实现波束赋形技术。由上行信道信息计算得出用户相关矩阵为

$$\mathbf{C}_k = (\tilde{H}_{a,k}^{SRS})^H * \tilde{H}_{a,k}^{SRS} \quad (1)$$

式中,  $(\cdot)^H$  表示矩阵的共轭转置操作。八天线系统中对于每个资源块  $k$ ,  $\mathbf{C}_k$  的结果均为一个  $8 \times 8$  矩阵。

对  $\mathbf{C}_k$  的特征值分解如下:

$$\mathbf{C}_k \triangleq \mathbf{V} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (2)$$

式中,  $\boldsymbol{\Sigma}$  为升序排列的非负对角矩阵。每个资源块  $k$  对应的  $\mathbf{V}^k$  为相关矩阵  $\mathbf{C}_k$  的右特征向量集合,  $\mathbf{V}^k$  为一个  $8 \times 8$  矩阵:

$$\mathbf{V}^k = [\mathbf{V}_1 \ \mathbf{V}_2 \ \mathbf{V}_3 \ \mathbf{V}_4 \ \mathbf{V}_5 \ \mathbf{V}_6 \ \mathbf{V}_7 \ \mathbf{V}_8] \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{V}_i^k$  表示  $\mathbf{V}^k$  的第  $i$  列, 分别对应不同特征值的特征向量, EBB 算法选择  $\mathbf{V}^k$  的第一列  $\mathbf{V}_1^k$  (对应最大特征值) 作为每个资源块  $k$  的波束赋形的加权矢量  $\mathbf{W}^k$ , 这里每一个资源块的  $\mathbf{W}^k$  都是一个  $8 \times 1$  向量。

### 3.2 下行波束赋形处理

根据 LTE 物理层协议——3GPP 36.211 协议<sup>[2]</sup>, 信道编码调制后的数据可以表示为  $x^{(5)}(0), x^{(5)}(1), \dots, x^{(5)}(M_{\text{symb}} - 1)$ , 其中  $M_{\text{symb}}$  为调制后符号数。数据经过预编码模块, 预编码模块完成从码字 (Codeword) 到层 (Layer) 的映射。根据 3GPP 36.211 协议, 当系统只有一个码字和一个层时, 该模块为直通模块, 处理如式(4), 将数据映射到端口 5。

$$y^{(5)}(i) = x^{(0)}(i) \quad (4)$$

式中,  $i = 0, 1, 2, \dots, M_{\text{symb}} - 1$ 。

经层映射后的结果序列  $y^{(5)}(i)$  进入到单流波束赋形模块。在单流波束赋形模块中使用前面生成的加权矢量对数据进行加权, 如下式:

$$\begin{bmatrix} z^{(0)}(i) \\ \vdots \\ z^{(7)}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{W}(i)y^{(5)}(i) \quad (5)$$

经加权后的结果为  $\mathbf{z}(i) = [\dots \ z^{(p)}(i) \ \dots]^T, i = 0, 1, 2, \dots, M_{\text{symb}} - 1, z^{(p)}(i)$  对应每根物理天线  $p$  上的信号,  $p \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。

加权后得到八天线上的信号通过资源映射模块映射到对应天线时频资源, 然后通过逆快速傅里叶变换 (IFFT)、添加循环前缀, 生成 LTE 下行 OFDM 信号。由发射机产生的信号通过 SCM-E 信道进入到终端接收机进行接收, 与其它发送模式基本一致, 这里就不详细介绍了。

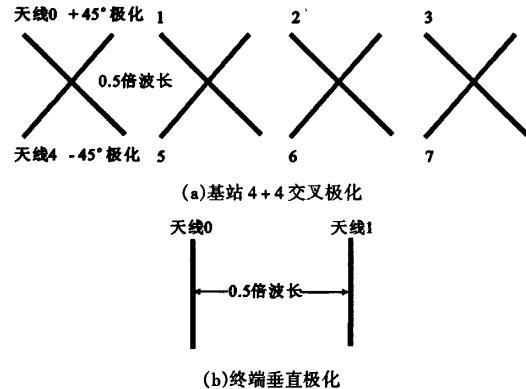


图 4 基站及终端天线极化方式  
Fig. 4 The system antennas configuration

## 4 仿真分析与结论

通过搭建完整的 TD-LTE 系统仿真平台对本文描述的单流波束赋形 EBB 算法进行了仿真分析。仿真中采用了 3GPP 在 TR25.996 中提出的 SCM-E 信道模型<sup>[5]</sup>, 基站端采用 4+4 双极化天线, 终端采用两根垂直极化天线。4+4 双极化天线是一种典型的八天线配置, 其天线形态适合使用单流或者双流波束赋形技术。

表 1 仿真参数配置

Table 1 Simulation parameters configuration

配置参数	参数值
上下行配置	1 (DSUUDDSUUD)
系统带宽/MHz	20
占用资源块数	50
调制方式	QPSK
码率	1/3
下行信道估计	理想信道估计
上行信道估计	理想信道估计
仿真信道类型	SCM-E
场景类型	城市宏小区 (urban macro)
天线极化方式	基站交叉极化, 终端垂直极化
终端移动速度/(km/h)	默认 3

八天线 EBB 波束赋形算法通过上行信道反馈

信息,再通过特征值分解找到最大来波方向,利用权重加权实现波束合成,因此如果终端移动速度过快,会导致上行信道反馈信息失去时效性,从而使来波方向估计不准,造成增益下降。图 5 给出了在不同终端移动速度下 EBB 波束赋形算法的误块率(BLER)信噪比曲线。可以看出,在低速情况(3 km/h)时,1% BLER,SNR 工作点约为 -9.8 dB;随着终端速度的增加,波束赋形增益明显下降,在 210 km/h,误块率 1%,SNR 工作点约为 -3.5 dB,增益下降约 6 dB。可见八天线波束赋形增益主要体现在终端低速移动的场景。

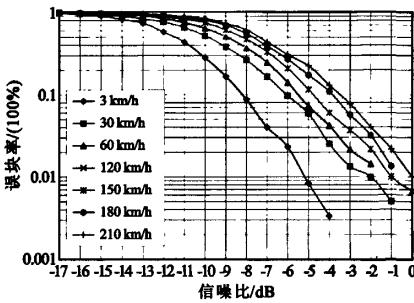


图 5 不同终端速度下波束赋形性能对比

Fig. 5 The beamforming performance under different UE speeds

EBB 算法中利用上行信道估计结果计算波束赋形权重,因此上行信道估计结果误差(MSE)会导致波束赋形权重不准,从而影响波束赋形增益,上行信道估计误差是工程上需要评估的重要指标。图 6 给出了信道估计误差 MSE 分别在 0.1、0.05、0.01、0.005 下的算法性能,可以看出在误差为 0.1 时,1% BLER 处,增益下降约 0.5 dB。该算法在一定信道估计误差下仍然能够维持较好的波束赋形增益。

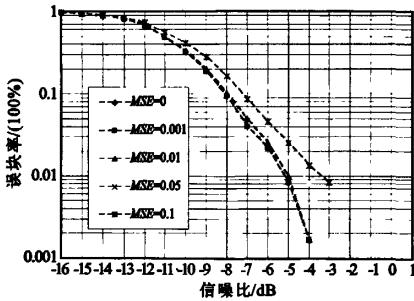


图 6 不同上行信道估计误差下波束赋形性能对比

Fig. 6 The beamforming performance under different UL channel estimation errors

以上仿真结果表明,八天线 EBB 波束赋形算法可以正确实现波束合成,相对于传统发送方式能够明显提高系统增益。本文对波束赋形在不同应用场景下的性能分析结果对实际系统设计具有较大参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 3GPP TS 36.300 V8.9.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access E – UTRA and Evolved Universal Terrestrial Radio Access E – UTRAN Overall description[S].
- [2] 3GPP TS 36.211 V8.9.0, Physical Channels and Modulation[S].
- [3] 2010ZX03002 – 002, TD – LTE 面向商用基站研发[S]. 2010ZX03002 – 002, TD – LTE commercial eNodeB R&D [S]. (in Chinese)
- [4] 李亚麟,樊迅,胡波,等.天线校准误差建模即对开环波束赋形技术的影响[J].电讯技术,2010,50(3):45 – 48.  
LI Ya-lin, FAN Xun, HU Bo, et al. Modeling of Antenna Calibration Error and its Impact on Open – Loop Beamforming [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50 (3): 45 – 48. (in Chinese)
- [5] 3GPP TR 25.996 V9.0.0, Spacial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations[S].

#### 作者简介:

郭彬(1980-),男,辽宁沈阳人,2008 年获东北大学通信与信息系统专业博士学位,现为上海贝尔有限公司无线研发部门高级系统工程师,主要从事 TD – LTE 系统多天线系统算法设计、智能天线理论和技术研究等;

GUO Bin was born in Shenyang, Liaoning Province, in 1980. He received the Ph.D. degree from Northeastern University in 2008. He is now working for Alcatel – Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. as a system senior engineer in Wireless R&D Department. His research interests include algorithms design in TD – LTE MIMO wireless communication systems and smart antenna theory and technique, etc.

Email: bin.d.guo@alcatel – sbell . com . cn

樊迅(1975-),男,江苏南京人,2006 年获上海交通大学通信与信息系统专业博士学位,现为上海贝尔股份有限公司无线研发部门系统设计顾问工程师,主要从事 MIMO 无线通信系统中的信号检测、多用户检测、智能天线理论和技术等的研究;

FAN Xun was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1975. He received the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2006. He is now working for Alcatel – Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. as a system advisory engineer in Wireless R&D Department. His research interests include signal detection in MIMO wireless communication systems, multi – user detection and smart antenna, etc.

曹伟(1977-),女,湖北武汉人,2008年获新加坡国立大学无线通信专业博士学位,现为上海贝尔有限公司无线研发部门高级系统工程师,主要从事TD-LTE系统基带接收算法设计、MIMO OFDM技术研究等;

CAO Wei was born in Wuhan, Hubei Province, in 1977. She received the Ph. D. degree from National University of Singapore in 2008. She is now working for Alcatel - Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. as a senior engineer in Wireless R&D Department. Her research interests include baseband receiving algorithms in TD-LTE systems and MIMO OFDM technologies, etc.

李亚麟(1981-),男,安徽阜阳人,2008年获中国科学技术大学通信与信息系统专业博士学位,上海贝尔股份有限公司在站博士后,主要研究方向为多天线信号处理、多天线收发机设计;

LI Ya - lin was born in Fuyang, Anhui Province, in 1981. He

received the Ph. D degree from University of Science and Technology of China in 2008. He is now a post - doctor in the Post - doctorate Work Station in Alcatel - Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. His research interests are multi - antenna signal processing, and the design of multi - antenna transceiver.

蒋智宁(1976-),男,湖南人,2000年获中国科学技术大学通信与信息系统专业硕士学位,现为上海贝尔股份有限公司无线产品部系统设计顾问工程师,主要研究方向为移动通信基站系统的算法设计与仿真。

JIANG Zhi - ning was born in Hunan Province, in 1976. He received the M. S. degree from University of Science and Technology of China in 2000. He is now working for Alcatel - Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. as a system advisory engineer in Wireless R&D Department. His research interests include algorithm design and simulation of mobile communication basestation systems.

## 诚聘审稿专家启事

为了进一步加大审稿力度,充实审稿专家数据库,提高《电讯技术》的办刊质量,《电讯技术》编委会常年面向社会诚聘电子信息领域的专家、学者担任本刊的审稿专家。审稿专家将享有如下权利:

- (1)向本刊投稿通过评审后优先安排发表,并免收审稿费和版面费;
- (2)向本刊推荐稿件通过评审后优先安排发表,并酌情减免版面费;
- (3)获得每期免费赠阅的《电讯技术》及本刊编辑部编辑出版的《电讯技术动态》(月刊,内部交流,全彩色铜版纸印刷);
- (4)参加本刊举办的学术活动。

如果您有意应邀加入到本刊的审稿专家行列,敬请填写附表(可向编辑部索要电子版或在本刊网站 [www.teleonline.cn](http://www.teleonline.cn) 下载)后通过电子邮件发送到本刊编辑部邮箱,或直接注册为本刊审稿专家。我们承诺为您的个人信息保密,对于您的支持表示衷心感谢。

电 话:028-87555632 传 真:028-87538378 Email:[dxjs@swiet.com.cn](mailto:dxjs@swiet.com.cn), [dianxunjishu@china.com](mailto:dianxunjishu@china.com)

## 《电讯技术》审稿专家登记表

姓 名		单 位		
基 本 信 息	职务	联 系 方 式	通讯地址	邮 编
	职称		电 话	
	学历学位		传 真	
	从事专业		Email	
			QQ 号	
个人简介				

## 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>