

脉冲天线近场测量技术

刘木林，张士选

(西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室 陕西 西安 710071)

摘要：给出了发射信号的脉冲参数,根据时域平面波理论得到了相应的远场特性计算公式,并结合实际要求给出了脉冲天线近场测量系统的配置方案。最后根据实测数据分析了脉冲天线近场测量中要注意的一些问题。

关键词：脉冲天线 天线测量 微波接收机

中图分类号 TM154 文献标识码 A 文章编号 :1001-2400(2005)02-0242-05

Pulsed antenna near-field measurement technique

LIU Mu-lin , ZHANG Shi-xuan

(State Key Lab. of Antennas and Microwave Technology , Xidian Univ. , Xi'an 710071 , China)

Abstract: The pulsed antenna near-field measurement technique is a novel antenna measurement technique developed since the 1990's. Pulse parameters of the transmitted signal are presented in this paper. With the plane-wave theory of time-domain fields, computing formulas of the far-field pattern are obtained. A setup scheme of the pulsed antenna near-field measurement system adaptable to practical requirements is given. Finally, some questions that ought to be paid attention to in pulsed antenna near-field measurement is analyzed on the basis of measured near-field data.

Key Words : pulse antenna ;antenna measurement ;microwave receiver

在传统的天线测量中,天线的信号源都是工作在连续波状态下的。但是随着无线电通讯市场的扩大和无线电通讯技术的不断改进和完善,特别是在有源发射/接收组件出现以后,已经可以制造出多波束和具有明显改进性能的有源阵列天线。这些天线的出现使连续波天线测量方法在天线的性能测试方面,如脉冲工作模式下的测试,多频点、多波束状态下的快速测试,超低副瓣天线的近场测试^[1],大功率发射和小功率接收模式下的测试以及由于测试过程中的需要对有源阵列天线的控制等,遇到了前所未有的挑战。

脉冲天线近场测量技术是 20 世纪 90 年代为适应这种需要而发展起来的新型天线测量技术。它发射的是大功率的周期脉冲调制的射频信号,可以实现仅通过一次测量就可以知道天线在很多频率点上的频率特性的目的,再有时间窗的作用,可以消除多次反射所带来的影响。所以脉冲天线近场测量技术在现代天线测量中具有巨大的优越性和发展前景。

1 理论分析

1.1 脉冲参数

在脉冲天线近场测量中,发射的是周期脉冲调制的射频信号,信号形式如图 1 所示,也就是在周期矩形脉冲信号和余弦信号的乘积,其参数主要包括脉冲宽度(PW),脉冲重复频率(PRF)即脉冲重复周期 PRP 的倒数,占空系数 duty cycle,载波信号频率 ω_c 等。由傅里叶变换可得其频域示意图,如图 2 所示。在接收端,接收机对接收到的信号进行解调,然后对检波后的脉冲进行抽样采集。

收稿日期 2004-04-29

基金项目 国家部委预研基金资助项目(7.4.9.2)

作者简介 刘木林(1979-),男,硕士。

万方数据

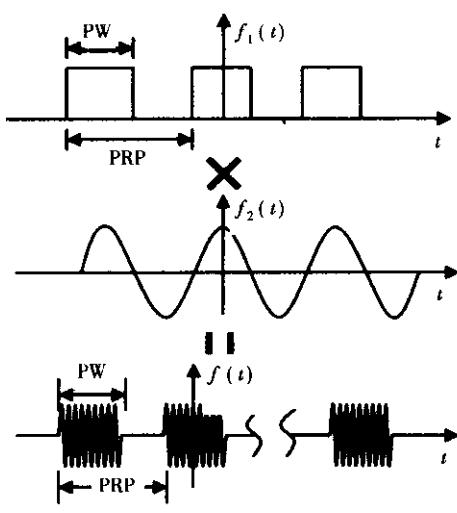


图1 周期性脉冲调制信号

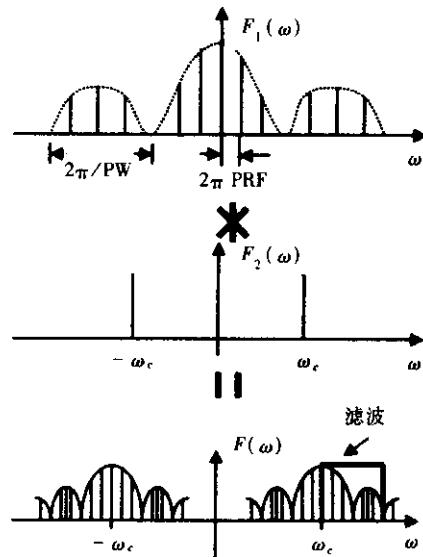


图2 脉冲调制信号的频域示意图

1.2 时域平面波理论

在近场测量技术中,可以根据在位于近场范围内的扫描平面上得到的时域近场数据,利用近远场变换原理,来得到被测天线的远场特性。假设问题如图3所示,根据时域近场数据,利用傅里叶变换,得到频域近场数据为

$$E_\omega(r_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(r_0, t) \exp(j\omega t) dt. \quad (1)$$

根据频域近场数据,利用近远场变换原理,得到频域远场特性^[2]为

$$\begin{aligned} F_\omega(\theta, \phi) &= \frac{ik \cos \theta}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_\omega(r_0) \exp(-ik\hat{r} \cdot r_0) dx_0 dy_0 = \\ &\frac{ik}{2\pi} \hat{r} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{z} \times E_\omega(r_0) \exp(-ik\hat{r} \cdot r_0) dx_0 dy_0, \end{aligned}$$

$$z > z_0, \quad (2)$$

其中 $r = \hat{x}x + \hat{y}y + \hat{z}z$ 是空间点, $\hat{r} = |\mathbf{r}|/\mathbf{r}$, $r_0 = \hat{x}x_0 + \hat{y}y_0 + \hat{z}z_0$ 为扫描平面上的测量点, $k = \omega/c$ 为波数, c 为自由空间中的光速, $E(r_0, t)$ 为扫描平面上 r_0 处 t 时刻的电场值, $E_\omega(r_0)$ 为变换后扫描平面上的频域近场数据(下标 ω 表示频域), $F_\omega(\theta, \phi)$ 为天线的频域远场方向图。也可以由扫描平面上所测的时域近场数据,根据时域近远场变换公式得到时域远场方向图,利用傅里叶变换得到频域远场方向图。

假设信号的限制带宽为 ω_{\max} , 则时间抽样间隔 $\Delta t = \pi/\omega_{\max}$, 扫描平面上的空间抽样点处电场的持续时间 $T_0 = (N_t - 1)\Delta t$ (N_t 表示记录时间信号在整个持续时间内的时间抽样次数), 抽样时刻为 $t = t_0 + l_t \Delta t$, 空间抽样点 $r_{0mn} = m \Delta x_0 \hat{x} + n \Delta y_0 \hat{y}$ ($m = -N_x/2, 0, \dots, N_x/2, n = -N_y/2, \dots, N_y/2$), 空间抽样间隔 $\Delta x_0 = \Delta y_0 = \pi c / \omega_{\max}$, 如图3所示的有限扫描平面为 $[(N_x + 1)\Delta x_0] \times [(N_y + 1)\Delta y_0]$ 。根据式(1)利用上述条件可得

$$-i\omega \hat{z} \times E_\omega(r_0) = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{l_t=0}^{N_t-1} \hat{z} \times \frac{\partial E}{\partial t}(r_0, t_0 + l_t \Delta t) \exp(i\omega(t_0 + l_t \Delta t)), \quad |\omega| < \omega_{\max}, \quad (3)$$

其中微分计算可采用线性插值公式进行计算。根据频域抽样定理, 可得到频域近远场变换公式的数值算法为

$$\begin{aligned} F_\omega(\theta, \phi) &= -\frac{\Delta x_0 \Delta y_0}{2\pi c} \hat{r} \times \sum_{m=-N_x/2}^{N_x/2} \exp[-i(\omega/c)m \Delta x_0 \cos \phi \sin \theta] \cdot \\ &\sum_{n=-N_y/2}^{N_y/2} (-i\omega) \hat{z} \times E_\omega(r_{0mn}) \exp[-i(\omega/c)n \Delta y_0 \sin \phi \cos \theta]. \end{aligned} \quad (4)$$

2 测量系统

为更好的进行脉冲天线近场测量,要求脉冲天线近场测量系统具有高测量速度、高测量精度;可进行宽带中频接收,具有良好直线性的宽动态范围;对脉冲宽度、脉冲重复频率和占空系数的灵敏度要高;对发射的调制脉冲可进行同步接收,对接收触发延迟可进行补偿。实际上,测量系统的性能要求可归纳为两点:系统的高灵敏度和严格同步接收问题。如果接收机的信噪比不是足够大,就需要进行平均以降低噪声干扰、提高灵敏度,但这是降低测量速度为代价的。优化灵敏度的另外一个考虑就是远程遥控混频器的选择和基本混频技术的使用,并尽可能地降低射频连接损耗^[3]。系统同步问题是设计脉冲天线近场测量系统的一个决定性因素,它要求微波接收机必须与入射的脉冲调制的射频信号同步。接收机在目标信号到来时,对调制信号进行解调,并打开射频开关,对解调后的脉冲进行抽样采集,抽样点的选取要使得接收机的响应达到最佳,而不会抽样到非常低的信号值、甚至是噪声,以满足峰值稳定状态要求;同时触发延迟的调节又要使得系统具有最好的可重复性。

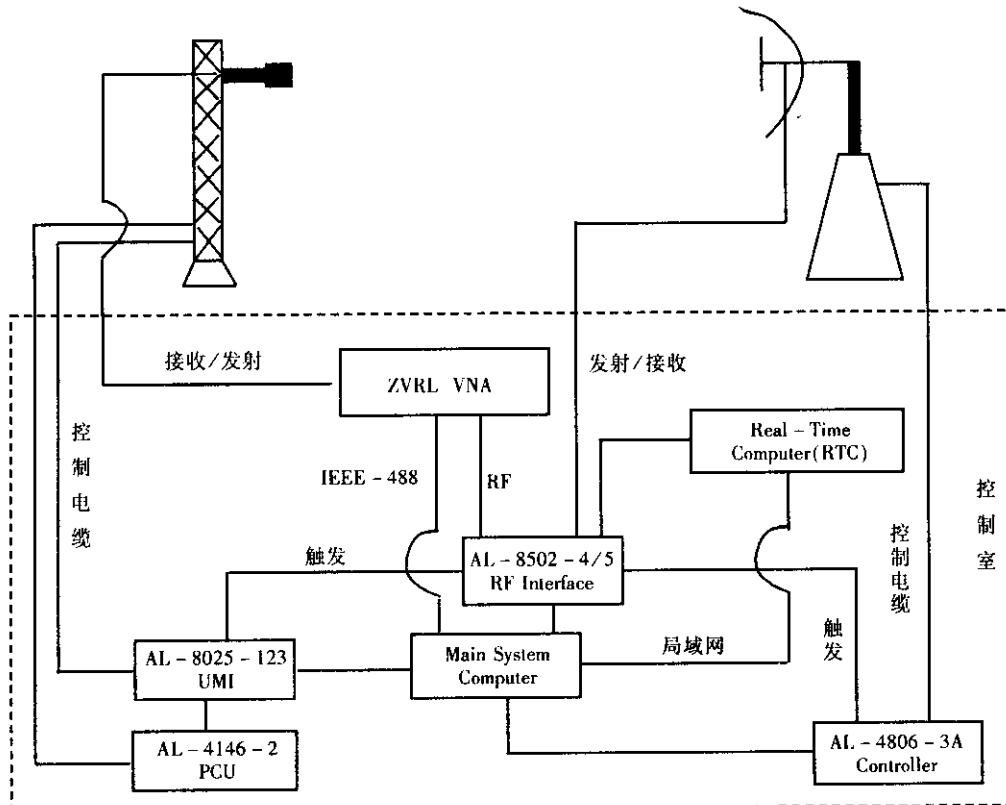


图 4 脉冲天线近场测量系统配置方案

图 4 给出了脉冲天线近场测量系统的配置方案。系统包含有 ZVRL 网络分析仪,其内含一个集成的频率合成信号源和一个接收装置,它可用于连续波测量,灵敏度可达 -110 dBm (频率范围在 20 GHz 以内, 使用 3 kHz 中频带宽),也可用于脉冲测量,不过灵敏度至少要下降 9.5 dB ;射频接口器 AL-8502-4/5,接收来自于 ZVRL 的射频输入,给出射频输出,并提供 AL-8025-123,AL-4806-3A 和实时计算机(RTC)的触发信号;RTC 用来处理所有的实时控制、测量同步和脉冲操作任务;扫描架控制器 AL-8025-123(UMI)和 AL-4146-2(PCU)以及转台控制器 AL-4806-3A;主计算机通过专门的测量软件根据设定的参数发出指令,对测量进行总体控制,并对接收数据进行处理分析。

下面给出该测量系统的部分性能指标。频率范围 $1 \sim 40 \text{ GHz}$,脉冲重复频率 $300 \sim 5000 \text{ Hz}$,占空系数 $1\% \sim 10\%$,接收机的灵敏度 -110 dBm ,动态范围 80 dB ,增益测量精度 $\pm 0.3 \text{ dB RMS}$,极化隔离度 -35 dB ,交叉极化数据

极化精确度 $\pm 2.0 \text{ dB RMS}$ (-35 dB) , 波束指向精确度 $\leq \pm 0.02 \text{ deg RMS}$.

3 测量结果及分析

实际上,脉冲天线近场测量系统的性能就是被测天线的脉冲参数和测量系统本身特性的函数。对于一个给定的接收机,根据脉冲参数和系统特性参数之间的关系,可以分为5个工作区域^[3,4]。为了很好地进行脉冲天线近场测量,一般工作于全脉冲特性区域。在这个区域,系统进行脉冲仿形模式测量,其响应与输入脉冲一致,见图5。

在图4所示的测量系统中,使用型号为BJ-14的标准矩形波导探头,波导口尺寸: $a = 165 \text{ mm}$, $b = 82.5 \text{ mm}$,所测喇叭的尺寸: $A = 557 \text{ mm}$, $B = 413 \text{ mm}$, $H = 410 \text{ mm}$,探针与被测天线之间的距离 $d = 720 \text{ mm}$,空间抽样间隔 $\Delta x_0 = \Delta y_0 = 108 \text{ mm}$, $N_x = N_y = 28$ 。将所测的实验数据代入式(3)和(4),通过计算机编程算出被测天线的频域远场方向图。为便于比较,下面给出的均为频率1.30 GHz,方位角为0°的远场方向图(即喇叭天线的E面方向图)。图6给出了脉冲测量与连续波测量两种模式下远场方向图的比较,可以看出两条曲线吻合得非常好。图7给出了PRF为1000 Hz时不同脉冲宽度下远场方向图的比较,从中可以分析得知,在脉冲重复频率满足系统稳定时间的情况下,脉冲宽度的不同会对测量结果产生很大的影响,不适当的脉冲宽度会造成方向图的严重失真。这种失真是由于脉冲宽度太窄,造成其峰值功率的减小,包络失真,出现这种情况的时候,可以采用平均的方法来补偿,如图8所示。进一步的研究表明,在脉冲宽度满足系统稳定条件时,脉冲重复频率对测量结果的影响不大,而当脉冲宽度非常窄或者是脉冲重复频率非常小的时候,提高脉冲的占空系数将有利于减小误差、改善测量。

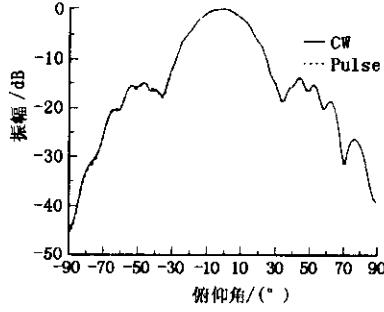


图6 脉冲测量和连续波测量两种模式下远场方向图的比较

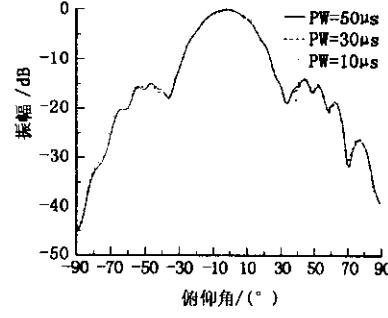


图7 不同脉冲宽度下方向图的比较

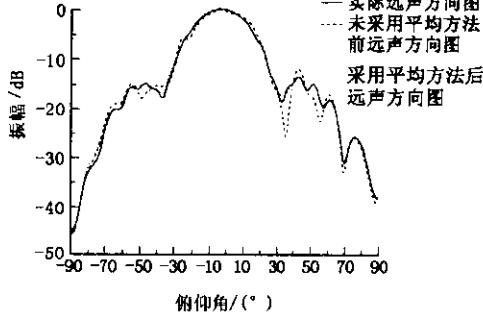


图8 平均方法使用的效果

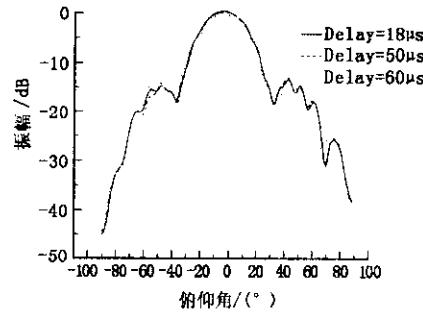


图9 不同触发延迟下远场方向图的比较

为使得接收机和脉冲调制的射频信号严格同步,在测量系统给定的情况下,可以通过适当地调节接收机的触发延迟来解决,不同的脉冲参数,其对应的最佳触发延迟是不同的。图9给出了PRF为1000 Hz,占空比为5%时不同触发延迟下远场方向图的比较。在研究过程中发现,脉冲宽度越长,其触发延迟的选择度就越大,对触发延迟的控制要求就越低;脉冲宽度越短,由于其峰值功率的减小和包络的明显失真,使得其触发延

迟的选择就越严格.

4 结 论

在脉冲天线近场测量中,发射信号为周期脉冲调制的射频信号,这比较接近于雷达的实用状态,对于提高雷达工作效率和系统性能的研究具有积极的意义.在研究中发现,脉冲参数(如脉冲宽度和脉冲重复频率)对于脉冲天线近场测量结果具有很大的影响,只有两者都满足系统的稳定条件时,才能很好地进行脉冲天线近场测量.同时为使得接收响应最佳,接收机和脉冲调制的射频信号要严重同步,需要根据脉冲参数适时地调节接收触发延迟.在实际应用中,可根据具体系统的接收特性以及测量要求来选择合适的脉冲参数.一般来说,对于不同的脉冲宽度,为保持接收机与激励脉冲信号的同步,需要设置不同的最佳脉冲延迟,既使得接收机的响应比较大,以满足峰值稳定状态要求,又要具有最好的可重复性.

参考文献:

- [1] Zhang Shixuan , Li Yong , Zhang Fushun , et al. A Study of Techniques for Measuring Ultra-low Sidelobe Antennas by the Near-field Method[J]. Journal of Xidian University , 2000 ,27(3):368-373.
- [2] Hansen T B , Yagbnjian A D. Plane-wave Theory of Time-domain Fields—Near-Field Scanning Applications[M]. Wiley : IEEE Press , 1999. 173-222.
- [3] Barnett C , Dunn D. Practical Considerations for Making Pulsed Antenna Measurement[M]. Long Beach : AMTA , 1994.
- [4] Swanson J , Shoulders R. Pulsed Antenna with the Agilent 8530A Microwave Receiver[M]. Long Beach : AMTA , 1994.

(编辑:齐淑娟)

(上接第 228 页)

- [2] Desmedt Y , Frankel Y. Shared Generation of Authenticators and Signatures[A]. Advances in Cryptology-Crypto'91[C]. New York : Springer-Verlag , 1991. 457-469.
- [3] Safavi-Naini R , Wang H , Lam K Y. A New Approach to Robust Threshold RSA Signature Schemes[A]. Information Security and Cryptology-ICISC'99[C]. Seoul : Springer , 1999. 184-196.
- [4] Hardjono T , Zheng Y. A Practical Digital Multisignature Scheme Based on Discrete Logarithms[A]. Advances in Cryptology-AUSCRYPT'92[C]. New York : Springer-Verlag , 1992. 123-132.
- [5] Ohta K , Okamoto T. A Digital Multisignature Scheme Based on the Fiat-Shamir Scheme[A]. Advances in Cryptology-ASIACRYPT'91[C]. Fuiyoshida : Springer-Verlag , 1991. 75-79.
- [6] Burmester M , Desmedt , Doi H , et al. A Structured ElGamal-type Multisignature Scheme[A]. Public Key Cryptography[C]. Victoria : Springer , 2000. 466-483.
- [7] Li Chuanming , Hwang T , Lee N Y , et al. (t, n) Threshold-multisignature Scheme and Generalized-multisignature Scheme Where Suspected Forgery Implies Traceability of Adversarial Shareholders[J]. Cryptologia , 2000 ,24(3):250-268.
- [8] Stinson D R. Cryptography : Theory and Practice[M]. [s.l.] : CRC Press , 1995. 343-350.
- [9] Padró C , Sáez G. Detection of Cheaters in Vector Space Secret Sharing Schemes[J]. Designs , Codes and Cryptography , 1999 ,16(1): 75-85.
- [10] 许春香 ,傅晓彤 ,肖国镇 . 矢量空间访问结构上的秘密共享 RSA 数字签名方案[J]. 西安电子科技大学学报 ,2004 ,31(1): 25-27.

(编辑:李维东)

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>