

超低旁瓣天线平面近场测量中随机误差对远场方向图的影响

杨莘元,孙继禹,崔金辉,郝静涛

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了增强现代舰用天线系统的抗干扰能力,必须提高天线旁瓣的测量精度。基于此给出了用平面近场技术测量超低旁瓣天线时,旁瓣测量总误差与待测天线参数、近场幅相随机误差的数学模型;在相同的测量条件下,天线旁瓣越低,旁瓣测量误差越大;旁瓣测量总误差随着近场测量幅相误差的增大而增大;近场分布的口径效率与旁瓣电平的误差方差成反比。建立了近场幅相随机误差所引起的误差谱的表达式。对随机误差对远场方向图的影响进行了计算机仿真验证;结果表明,幅相误差主要影响远场方向图的旁瓣;该验证方法首次采用阵元数较少的线阵,仿真效果接近采用多阵元平面阵的情况。

关键词:超低旁瓣天线;平面近场测量;随机误差

中图分类号:TN820 文献标识码:A 文章编号:1006-7043(2004)02-0200-04

Effect of random errors of planar near-field measurements with ultra-low sidelobe antennas on antenna far-field pattern

YANG Xin-yuan, SUN Ji-yu, CUI Jin-hui, HAO Jing-tao

(School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The expressions of sidelobe measurement errors versus the relative parameters of antenna under test (AUT) and near-field amplitude and phase random errors are presented by using a planar near-field technique to measure ultra-low sidelobe antennas. It is concluded that: under the same conditions, sidelobe measurement errors will be larger if the antenna sidelobe level is lower. The caliber efficiency of near-field distribution is in inverse proportion to the error variance of the sidelobe level. This shows that the amplitude and phase errors mainly affect a far-field pattern's sidelobe level. The expression of error spectra caused by near-field amplitude and phase random errors is built and the related computer simulations are presented.

Key words: ultra-low sidelobe antenna; planar near-field measurement; random errors

平面近场技术近年来被广泛应用于超低旁瓣天线等一系列高性能天线的测量中。为了保证此类天线的测量精度,必须对平面近场测量所引起的误差进行分析和补偿。近场测量技术的误差研究是近场测量的一个重要分支,是平面近场测量技术的关键问题。研究结果显示,平面近场测量的主要误差源有 18 项^[1],按其产生的原因可分为 4 个方面,即:探头误差,机械扫描定位误差,测量系统误差,测量环境误差。在常规天线的测量中,系统误差对平面近场测量起决定性作用,而测量环境误差的影响很小。但

对于超低旁瓣天线的测量,测量环境误差的影响不能忽略。因此,作为环境测量误差中的一种,随机误差将影响测量精度。所以,必须对随机误差源对天线远场产生的误差进行研究并通过计算机仿真给出定量分析。

1 旁瓣电平测量误差与近场幅相随机误差,天线参数的关系^[2,3]

一般情况下,天线近场区的扫描面总是有限的,因此总假设扫描面足够的大,使得由有限截断面带来的误差极小,以至可以忽略,进而只研究随机误差的影响。根据平面近场测量的近远场变换理论,波谱

收稿日期:2003-04-17。

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(F01-01)。

作者简介:杨莘元(1944-),男,教授,博士生导师。

函数 $D(k_x, k_y)$ 的表达式为

$$D(k_x, k_y) = C \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} P_{mn} \cdot \exp(jk_x m \Delta x + jnk_y \Delta y). \quad (1)$$

式中: P_{mn} 为近区探头输出电压; M, N 分别为 x, y 方向上的总采样点数; Δ_x, Δ_y 分别为 x, y 方向上的采样间隔; C 为常数, 为简化分析, 令其为 1; k_x, k_y 分别为 x, y 方向的矢量波数.

可以将近场旁瓣测量的所有误差源产生的总误差等效为随机误差, 认为随机误差是附加在近场电压信号上的 1 个小信号, 将其加入到近区探头输出电压的幅度和相位上, 令 ε_{mn} 为探头输出电压的相位, 则

$$D(k_x, k_y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |P_{mn}| (1 + \delta_{mn}) \times \exp(jk_x m \Delta x + jk_y n \Delta y + j\phi_{mn} + j\varepsilon_{mn}). \quad (2)$$

δ_{mn}, ϕ_{mn} 分别为 P_{mn} 的幅度和相位的随机误差, 并假设它们是独立的随机变量.

令 $\Psi_{mn} = m k_x \Delta x + n k_y \Delta y + \varepsilon_{mn}$, 则上式变为

$$D(k_x, k_y) = C \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |P_{mn}| (1 + \delta_{mn}) \times \exp(j\phi_{mn} + j\Psi_{mn}) = [D_1(k_x, k_y) + jD_2(k_x, k_y)]. \quad (3)$$

D_1, D_2 分别为上式的实部和虚部, 并且服从渐进正态分布.

利用数学期望, 方差的概念, 概率密度函数的性质以及阵列天线分析和随机误差理论, 数学中的级数, 多重积分, 贝赛尔函数得到旁瓣电平误差的概率密度函数为

$$p(a') = \frac{a'}{(\sigma')^2} \exp\left(-\frac{(a')^2 + 1}{2(\sigma')^2}\right) I_0\left(\frac{a'}{(\sigma')^2}\right). \quad (4)$$

式中: a' 为归一化副瓣电平, $(\sigma')^2$ 为旁瓣电平的误差方差, $I_0(x)$ 为零阶贝塞尔函数.

若定义取样平面口径效率为

$$\left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} P_{mn} \right|^2 / (MN \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |P_{mn}|^2). \quad (5)$$

则可得出天线远场方向图旁瓣电平的误差方程为

$$\sigma' = \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} P_{mn} \right| \sqrt{\frac{\sigma_\phi^2 + \sigma_\delta^2}{2MN\eta}} / [(FSLL)(1 - \sigma_\phi^2/2)]. \quad (6)$$

式中: σ_δ^2 为幅度误差的方差, σ_ϕ^2 为相位误差的方差, FSLL 为天线远区方向图旁瓣电平.

由式(6)可得出以下结论: 相同的测量条件下, 旁瓣越低的天线, 旁瓣测量的总误差就越大; 近场幅相测量误差越大, 旁瓣测量的总误差越大; 近场分布的口径效率越低, 天线远场方向图旁瓣电平的误差方差就越大.

2 随机误差所引起的误差谱的表达式^[4]

由近场耦合系统散射矩阵的分析

$$b'_0(\mathbf{P})/a_0 = F' \exp(-j\gamma d) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S'_{01}(\mathbf{k}_t) \times S_{10}(\mathbf{k}_t) \exp[-j\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{P}] d\mathbf{k}_x d\mathbf{k}_y. \quad (7)$$

式中: $b'_0(\mathbf{P})$ 为探头输出的复波谱, \mathbf{P} 为探头在扫描面的横向分量, $S'_{01}(\mathbf{k}_t)$ 为探头的接收波谱, $S_{10}(\mathbf{k}_t)$ 为被测天线的波谱, F' 为失配因子, \mathbf{k}_t 为矢量波数的横向分量, γ 为纵向分量, d 为待测天线与扫描面之间的距离. 对上式进行傅里叶逆变换, 令 $D(\mathbf{k}_t) = S'_{01}(\mathbf{k}_t) \cdot S_{10}(\mathbf{k}_t)$ 为横向波谱的耦合积, 得

$$D(\mathbf{k}_t) = \frac{\exp(j\gamma d)}{4\pi^2 a_0 F'} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} b'_0(\mathbf{P}) \exp(j\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{P}) dx dy = \frac{\exp(j\gamma d)}{4\pi^2 F' A} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B(\mathbf{P}) \exp(j\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{P}) dx dy. \quad (8)$$

式中: $B(\mathbf{P}) = b'_0(\mathbf{P})/b'_0(\mathbf{P}_0)$ 为探头天线的归一化输出, $A = a_0/b'_0(\mathbf{P}_0)$ 是待测天线输入端的入射波与探头在参考点输出之比, 称为归一化常数.

根据实际需要, $D(\mathbf{k}_t)$ 是空间频宽有限函数, 因此可以应用取样定理求解上式得

$$D(\mathbf{k}_t) = \frac{\exp(j\gamma d)}{4\pi^2 F' A} \delta_x \delta_y \sum B(\mathbf{P}) \exp(j\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{P}). \quad (9)$$

式中: δ_x, δ_y 分别为沿 x, y 方向的近场数据点距, 式(9)可用快速傅里叶变换求解. 下面推导误差模型. 没有误差时, 探头天线的输出为

$$B(\mathbf{P}) = a(\mathbf{P}) \exp[j\Psi(\mathbf{P})]. \quad (10)$$

$a(\mathbf{P})$ 为其幅度, $\Psi(\mathbf{P})$ 为其相位.

误差存在时, 对幅度和相位的测量会有随机误差, 设它们分别为 $\Delta a(\mathbf{P}), \Delta \Psi(\mathbf{P})$, 这样接收探头的输出为

$$B'(\mathbf{P}) = [a(\mathbf{P}) + \Delta a(\mathbf{P})] \exp[j[\Psi(\mathbf{P}) + \Delta \Psi(\mathbf{P})]] - a(\mathbf{P}) \exp[j\Psi(\mathbf{P})]. \quad (11)$$

测量数据的误差为

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mathbf{P}) &= B'(\mathbf{P}) - B(\mathbf{P}) = [a(\mathbf{P}) \times \\ &[\exp(j\Delta \Psi(\mathbf{P})) - 1] + \Delta a(\mathbf{P}) \exp(j\Delta \Psi(\mathbf{P}))]. \end{aligned} \quad (12)$$

展开式(12)指数相位的误差因子,省略误差三阶以上项,得

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mathbf{P}) \approx & [\Delta a(\mathbf{P}) + ja(\mathbf{P})\Delta\Psi(\mathbf{P}) + \\ & ja(\mathbf{P})\Delta\Psi(\mathbf{P}) - a(\mathbf{P})\Delta\Psi^2(\mathbf{P})/2]e^{j\Psi(\mathbf{P})}. \end{aligned} \quad (13)$$

由傅里叶变换具有线性的性质,可以得到误差谱为

$$\Delta D(\mathbf{k}_t) = \frac{e^{jyd}}{4\pi^2 F' A} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(\mathbf{P}) e^{jk_t \cdot \mathbf{P}} dx dy. \quad (14)$$

先考虑式(14)中幅度误差项的影响,将式(12)代入式(14),令 $\Phi(\mathbf{k}_t, \mathbf{P}) = \Psi(\mathbf{P}) + \mathbf{k}_t \cdot \mathbf{P}$,将积分化为求和形式,则幅度误差项的形式为

$$\Delta D_a(\mathbf{k}_t) = C\delta_x\delta_y \sum_{i=1}^N [\Delta a(\mathbf{P}_i) \cos \Phi(\mathbf{k}_t, \mathbf{P}_i) + j\Delta a(\mathbf{P}_i) \sin \Phi(\mathbf{k}_t, \mathbf{P}_i)]. \quad (15)$$

N 为采样点的总数。

再考虑相位误差项在旁瓣区域的影响。观察式(12),相位误差中起主导作用的是 $ja(\mathbf{P})\Delta\Psi(\mathbf{P})e^{j\Psi(\mathbf{P})}$,忽略其他项,得出随机误差所引起的误差谱为

$$\begin{aligned} \Delta D_\Psi(\mathbf{k}_t) = & \frac{e^{jyd}}{4\pi^2 F' A} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} ja(\mathbf{P})\Delta\Psi(\mathbf{P}) \times \\ & e^{j\Psi(\mathbf{P})} dx dy = jC\delta_x\delta_y \sum_{i=1}^N [a(\mathbf{P})\Delta\Psi(\mathbf{P}_i) \times \\ & \cos \Phi(\mathbf{k}_t, \mathbf{P}_i)] + ja(\mathbf{P})\Delta\Psi(\mathbf{P}_i) \sin \Phi(\mathbf{k}_t, \mathbf{P}_i)]. \end{aligned} \quad (16)$$

3 计算机仿真

国内对于天线近场测量方面的计算机模拟一般都是在平面阵的条件下进行的,对于误差的分析与补偿也不例外。近场测量的理论适用于多种形式的阵列天线,为了验证此理论具有的普遍性,本文区别于通常情况下的仿真方法,采用直线阵进行分析。

先计算理论 E 面的远场方向图,然后求出超低旁瓣天线的近场分布,引入近场幅相随机误差,再由近远场变换计算出 E 面的远场方向图,并与理论 E 面的远场方向图进行比较,以观察近场幅相随机误差对结果的影响。

将半波偶极子天线沿 x 轴排列成 10 元线阵。

电流分布为 -55 dB 的切比雪夫分布。阵元间隔为 dx ;扫描面到阵列中心的间距为 d ;扫描面沿 x 方向, y 方向的采样点数分别为 M', N' ;沿 x 方向, y 方向的取样间隔分别为 $\Delta x, \Delta y$ 。取 $f = 200$ MHz, $dx = 0.66 \lambda$, $d = 0.902 \lambda$, $M' = 87$, $N' = 65$, $\Delta x = 0.092 \lambda$, 阵元所在的平面 $z_0 = -\lambda/40$, 幅度误差和相位误差分别为 σ_A, σ_P 。

1) 理论 E 面的远场方向图与理论近远场变换所得的 E 面远场方向图的比较;

2) 引入近场随机误差,理论 E 面的远场方向图与近场通过近远场变换所得的 E 面远场方向图进行比较。

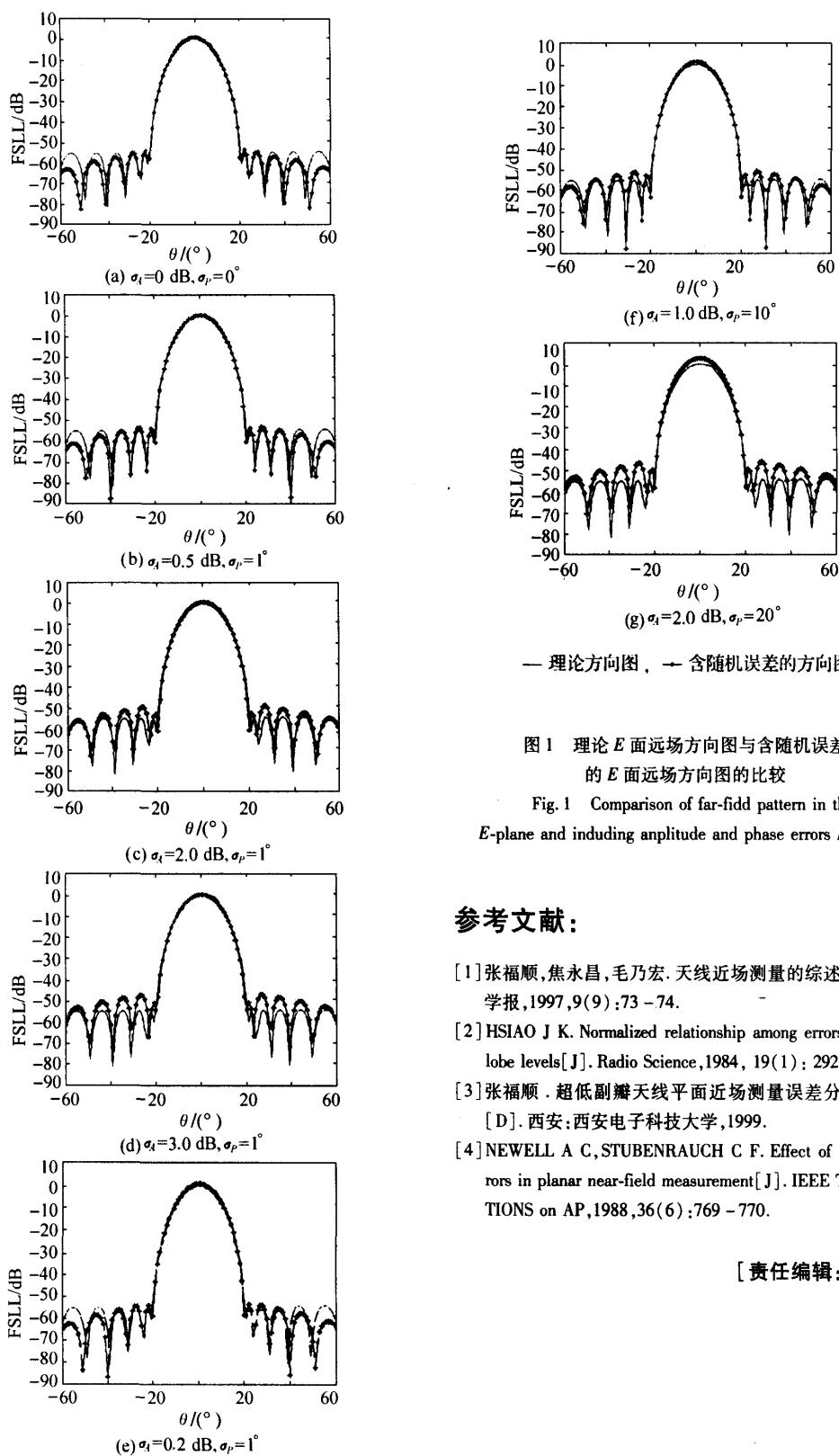
4 结 论

由平面近场测量中远场旁瓣电平误差与近场幅相随机误差及相关天线参数关系的数学模型,推导出了由近场幅相随机误差所引起的误差谱的表达式,并对随机误差对远场方向图的影响进行了计算机仿真验证。仿真结果显示,在无随机误差时,观察图 1(a),理论 E 面的远场方向图与近场通过近远场变换得到的远场方向图在角域范围 $-38^\circ \sim 38^\circ$ 内吻合,可以忽略扫描面截断误差带来的影响。引入随机误差后,各图在角域范围内的结果如下:

1) 观察图 1(b) ~ (d),保持相位误差不变,增大幅度误差,近远场变换所得远场方向图与理论远场方向图之间主瓣电平相比较没有变化,旁瓣电平之差逐渐增大;

2) 从图 1(e) ~ (g) 的仿真结果来看,同时增大幅度误差和相位误差,所引起的近远场变换远场方向图与理论方向图相比较,它们的旁瓣电平之差也越来越大。

人们更关心的是随机误差对远场方向图旁瓣电平的影响。通过图 1(c)的坐标值进行计算。图 1(c)中, $\sigma_A = 2.0$ dB, $\sigma_P = 1^\circ$: 理论远场方向图旁瓣电平为 -55 dB, 近远场变换远场方向图旁瓣电平为 -49.6 dB。为了从仿真结果来看,在工作频率为 120 MHz 时,在 $FSLL = -55$ dB 的情况下,使远场方向图旁瓣误差 < 5.4 dB, 则近场测量幅度误差 $\sigma_a < 2.0$ dB。



—理论方向图，—含随机误差的方向图

图1 理论E面远场方向图与含随机误差的E面远场方向图的比较

Fig. 1 Comparison of far-field pattern in theory E-plane and including amplitude and phase errors E-plane

参考文献:

- [1] 张福顺,焦永昌,毛乃宏.天线近场测量的综述[J].电子学报,1997,9(9):73~74.
- [2] HSIAO J K. Normalized relationship among errors and sidelobe levels[J]. Radio Science, 1984, 19(1): 292~302.
- [3] 张福顺.超低副瓣天线平面近场测量误差分析与补偿[D].西安:西安电子科技大学,1999.
- [4] NEWELL A C, STUBENRAUCH C F. Effect of random errors in planar near-field measurement[J]. IEEE TRANSACTIONS on AP, 1988, 36(6): 769~770.

[责任编辑:陈峰]

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>