

文章编号 1005-0388(2007)01-0059-05

# 应用定向天线测量无线信道角度功率谱<sup>\*</sup>

李 纪<sup>1,2</sup> 张尔扬<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, liji@nudt.edu.cn, 湖南 长沙 410073;

2. 总参通信工程设计研究院, 辽宁 沈阳 110005)

**摘要** 针对无线信道角度功率谱测量问题, 提出了一种简单而新颖的测量方法。利用定向天线进行方位角扫描的功率测量, 观测值、天线方向图和角度功率谱之间构成第一类 Fredholm 积分方程, 通过求解积分方程可以得到角度功率谱。利用低通滤波器对观测数据进行预处理可以克服解积分方程的病态问题, 改变滤波器参数并结合最小均方误差准则, 可以得到角度功率谱的最小均方误差估计。仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词** 无线信道, 角度功率谱, 定向天线, 解卷积

**中图分类号** TN929.5      **文献标识码** A

## Estimation of power azimuth spectrum for wireless channel using directional antenna measurements

LI Ji<sup>1,2</sup> ZHANG Er-yang<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, liji@nudt.edu.cn, Changsha Hunan 410073, China; 2. Institute of Communication Engineering Design of General Staff, Shenyang Liaoning 110005, China)

**Abstract** A novel method for estimating power azimuth spectrum (PAS) of wireless channel is presented in this paper. Based on azimuth-scanning power measurements by using directional antenna, a Fredholm integral equation of the first kind can be constructed from the measured data, the antenna pattern and the PAS. The estimations of PAS can be achieved by solving the integral equation. The ill-conditioned problems can be overcome by pre-processing the observed data by employing a lowpass filter. The minimum mean square error (MMSE) estimation of PAS can be achieved by selecting the proper parameters of the lowpass filter based on the MMSE criterion. Simulation results show that the method presented is effective.

**Key words** wireless channel, power azimuth spectrum, directional antenna, deconvolution

## 1 引言

角度功率谱 (power azimuth spectrum, PAS。以下简称角度谱) 是无线信道重要的统计特性, 它直接影响了信道的多普勒功率谱<sup>[1]</sup> (时间相关特性) 和空间相关特性<sup>[2]</sup>。因此, 在信道建模以及无线系统性能分析过程中, 准确的信道角度谱是不可或缺的。

在文献[3]~[6]中, 研究人员进行了大量的信道测量及信道参数估计的工作, 并得到了很多重要的结论。但是, 上述文献中的信道测量往往需要复杂而昂贵的信道测量系统, 并需要对海量的测量数据利用复杂的阵列信号处理算法得到信道参数的联合估计。虽然这可以全面地描述信道特性, 但是在很多

\* 收稿日期: 2005-07-24.

基金项目: 国防预研基金资助项目(113030401)

应用中,譬如利用 Jake's 模型和 Clarke 模型对平坦信道进行建模<sup>[7][8]</sup>,分析 MIMO 信道的空间相关特性<sup>[9]</sup>及信道容量<sup>[2][10]</sup>等,角度谱是最受关注的信道统计特性。因此,研究一种简便易行的方法来获取实际信道的角度谱具有重要的理论意义与实际意义。

## 2 信道模型

无线通信环境中,当收发两端的距离远大于收发天线的高度差时,可以假设接收信号为大量平面波的叠加<sup>[1]</sup>,这就是经典的平面波假设。考虑频率非选择性静态信道,即发射端和接收端之间没有相对运动,则在经典平面波假设下,接收信号可表示为

$$y(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \sqrt{g(\theta_l - \psi)} \cdot s(t) + n(t) \quad (1)$$

其中  $y(t)$ 、 $s(t)$  和  $n(t)$  分别代表接收信号、发射信号和加性噪声;  $L$  是子波的数量;  $g(\theta)$  是接收天线的增益方向图,  $\theta = 0^\circ$  为主瓣方向;  $\psi$  是主瓣方向与视线方向之间的夹角; 随机变量  $a_l$  是第  $l$  个子波对应于方位角  $\theta_l$  的复幅度, 可以合理地假设  $a_0, a_1, \dots, a_{L-1}$  相互独立<sup>[3]</sup>; 同样可以假设随机变量  $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{L-1}$  相互独立。

无线信道的角度谱描述了接收信号的均值功率的空间分布特性,是方位角的函数<sup>[11]</sup>。根据上面的定义,角度谱可以表示为<sup>[5]</sup>

$$p_A(\theta) = c \cdot E[|a|^2 \theta] \cdot f_A(\theta) \quad (2)$$

其中  $f_A(\theta)$  为方位角的概率密度函数;  $c$  是归一化系数,简便起见,在后面的推导中将其忽略。式(2)说明角度谱正比于方位角为  $\theta$  条件下,条件期望功率与方位角概率密度的乘积,这具有直观的物理意义。

## 3 测量方程

考虑发射信号是频率为  $\omega_0$  的未调制载波,接收天线的主瓣方向为  $\psi$ ,此时接收功率的依赖于  $\psi$  的条件数学期望为

$$\begin{aligned} E[|y(t)|^2 | \psi] &= E\left[\left|\sum_{l=0}^{L-1} a_l \sqrt{g(\theta_l - \psi)} \cdot e^{j\omega_0 t} + n(t)\right|^2\right] \\ &= E\left[\left|\sum_{l=0}^{L-1} a_l \sqrt{g(\theta_l - \psi)}\right|^2\right] + E[|n(t)|^2] \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} E[|a_l|^2] \cdot g(\theta_l - \psi) + N_0 \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} E[|a_l|^2 | \theta_l] P(\theta = \theta_l) \cdot g(\theta_l - \psi) + N_0 \end{aligned}$$

(3)

上式中,  $N_0$  是噪声功率;  $P(\theta = \theta_l)$  代表随机变量  $\theta$  取值为  $\theta_l$  的概率。当  $L \rightarrow \infty$  时, 上式可以写成积分形式

$$\begin{aligned} E[|y(t)|^2 | \psi] &= \int_{\theta} E[|a|^2 \theta] g(\theta - \psi) \\ &\quad f_A(\theta) d\theta + N_0 \\ &= \int_{\theta} p_A(\theta) \cdot g(\theta - \psi) d\theta + N_0 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)表明,定向天线接收功率依赖于主瓣方向的条件数学期望可以表示为角度谱与天线增益方向图的乘积在方位角上的积分。显然,可以合理地假设上式中噪声功率  $N_0$  与接收天线的方向  $\psi$  无关,并可以容易的通过关闭发射机进行测量得到,将其移到等式左边,得到

$$\begin{aligned} z(\psi) &\triangleq E[|y(t)|^2 | \psi] - N_0 \\ &= \int_{\theta} p_A(\theta) \cdot g(\theta - \psi) d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

上式即为利用定向天线测量角度谱的测量方程,这是一个第一类 Fredholm 积分方程。

## 4 角度谱估计

利用定向天线在方位角  $[-\pi, \pi]$  区间上等间隔扫描并测量接收功率,离散扫描方位角为  $\psi_n$  ( $n = 0 \dots N-1$ ), 根据测量方程(5), 并且假设天线方向图为偶函数,可以得到

$$z(\psi_n) = \sum_{n'=0}^{N-1} p_A(\psi_{n'}) g(\psi_n - \psi_{n'}) \Delta\phi \quad (6)$$

其中  $\Delta\phi = 2\pi/N$  为方位角扫描间隔。由于  $p_A(\theta)$  和  $g(\theta)$  可以看作是以  $2\pi$  为周期的周期函数,因此序列  $\{z(\psi_n)\}$ 、 $\{p_A(\psi_n)\}$  和  $\{g(\psi_n)\}$  之间构成循环卷积的关系<sup>[12]</sup>,用下标  $n$  代替  $\psi_n$ ,并忽略常系数  $\Delta\phi$ ,可以将循环卷积写为

$$z(n) = p_A(n) \circledast g(n), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (7)$$

其中  $\circledast$  表示  $N$  点循环卷积。在得到观测序列  $z(n)$  和已知天线增益方向图的条件下,通过解卷积过程,即可得到角度谱的离散估计。

令  $Z(k)$ 、 $P_A(k)$  和  $G(k)$  分别表示序列  $z(n)$ 、 $p_A(n)$  和  $g(n)$  的  $N$  点 DFT, 则<sup>[12]</sup>

$$Z(k) = P_A(k)G(k), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{p}_A(n) &= \text{IDFT}[P_A(k)] \\ &= \text{IDFT}[Z(k)/G(k)] \end{aligned} \quad (9)$$

虽然  $z(n)$ 、 $p_A(n)$  和  $g(n)$  不是时间序列,但是

这里仍然利用“频谱”的概念来直观地描述相应 DFT 序列  $Z(k)$ 、 $P_A(k)$  和  $G(k)$  的特性。通常, 天线方向图不是理想的冲激函数,  $G(k)$  具有低通特性, 则在高频域  $|1/G(k)|$  趋于无穷大, 根据式(9), 即使观测序列存在微小的高频扰动, 都将引起估计值的巨大变化, 这就是解卷积的病态问题<sup>[13]</sup>。由于在实际的无线信道中, 角度谱的 DFT 通常具有低通特性, 因此在解卷积过程中可以在频域先对  $Z(k)$  进行低通滤波预处理, 从而克服病态问题。

虽然在频域的低通滤波预处理可以采用理想低通特性的滤波器, 但是为了抑制 IDFT 之后的“拖尾”现象, 可以通过增加过渡带来实现。汉宁窗是一种易于实现并且旁瓣抑制性能出色的窗函数, 因此我们选择汉宁窗函数来设计滤波器的过渡带, 滤波器的频谱由图 1 和式(10)给出

$$F(k) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq k_p - 1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left\{ \frac{\pi [k - (k_p + m)]}{m+1} \right\}, & k_p \leq k \leq k_p + m - 1 \\ 0, & k_p + m \leq k \leq \left[ \frac{N-1}{2} \right] \\ f(N-1-k), & \left[ \frac{N-1}{2} \right] + 1 \leq k \leq N-1 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $k_p \geq 1$  和  $m \geq 1$  分别为通带和过渡带长度, 并且  $k_p + m \leq \left[ (N-1)/2 \right]$ ,  $\left[ \cdot \right]$  代表下取整函数。从上式和图 1 中可以看出, 滤波器的特性由参数  $k_p$  和  $m$  决定。

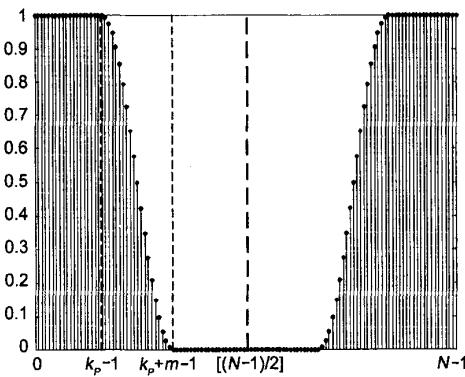


图 1 利用汉宁窗设计过渡带的低通滤波器频谱

利用低通滤波器抑制解卷积病态问题的角度谱估计流程如图 2 所示, 在参数取值范围内调整  $k_p$  和  $m$ , 结合最小均方误差估计准则, 可以得到最小均方误差意义下的角度谱估计。

$$\hat{P}_A(n) = \text{IDFT}[P'_A(k)] = \text{IDFT}\left[\frac{Z(k)F(k)}{G(k)}\right] \quad (11)$$

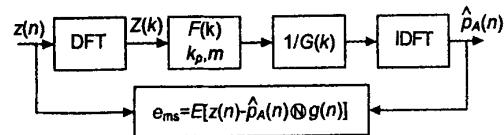
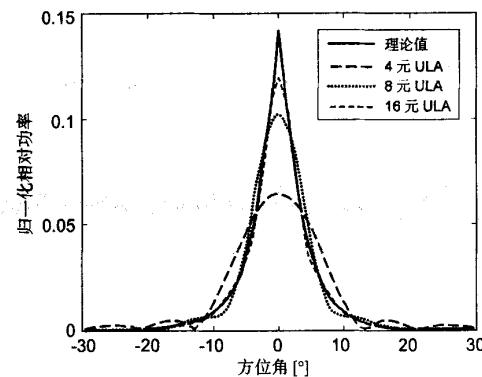


图 2 角度功率谱估计流程

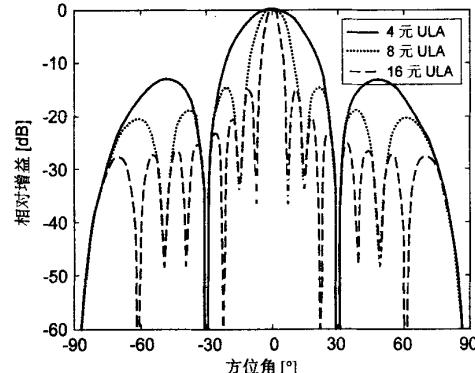
## 5 性能分析及仿真验证

在获得观测序列  $z(n)$  之后, 影响角度谱估计精度的关键因素是天线的方向性。天线方向性的影响可以在频域直观地理解。由式(8)可知, 观测过程等效于频域的频谱相乘, 由于  $G(k)$  具有低通特性, 使得  $P_A(k)$  的高频分量被抑制, 而且为了克服病态问题进行的预处理过程中损失的信息是不可恢复的。显然, 为了保留  $P_A(k)$  的高频信息, 最根本的办法是使  $G(k)$  具有丰富的高频分量, 即定向天线应具有很强的方向性。

图 3 给出了针对角度扩展为 5° 的 Laplacian 分



(a) 估计值与理论值

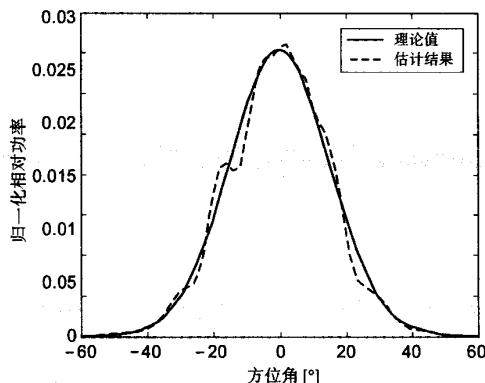


(b) 相应天线方向图

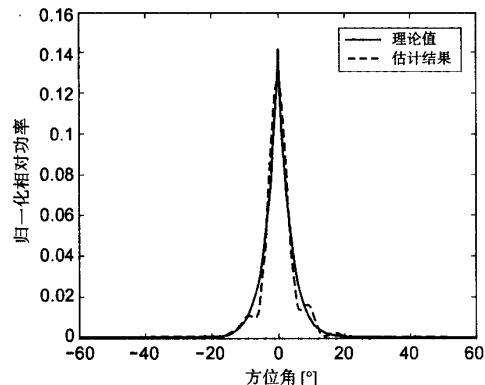
图 3 利用不同的定向天线估计角度谱的结果

布<sup>[3]</sup>角度谱, 利用不同阵元数的均匀线阵(uniform linear array, ULA)进行仿真的方位角扫描测量所得到的最小均方误差估计, 以及相应的天线方向图。天线的阵元均为全向天线, 间距二分之一波长。观测序列  $z(n)$  由(6)式直接计算得到, 方位角扫描间隔为  $1^\circ$ 。从图中可以看出, 当天线方向性增强时, 估计值可以更好的逼近理论值。

图 4 给出了利用随机信道模型以及 Monte Carlo 仿真方法得到观测数据, 并利用本文方法得到的角度谱估计。其中随机信道模型中接收端的角度谱分别被建模为角度扩展为  $15^\circ$  的高斯(Gaussian)分布和角度扩展为  $5^\circ$  的 Laplacian 分布, 定向天线采用上述的 8 元均匀线阵。可以看出, 利用本文的方法可以有效的估计出接收端的角度谱。



(a) Gaussian 分布角度谱



(b) Laplacian 分布角度谱

图 4 基于随机信道模型得到的角度谱估计结果

## 6 结论

利用定向天线测量无线信道的角度谱是一种简单而新颖的方法, 由测量数据估计角度谱可以归结为求解第一类 Fredholm 积分方程的问题。在天线万方数据

方向图为偶对称的条件下, 通过等间隔方位角扫描测量, 可以将积分方程转化为循环卷积, 利用离散傅里叶变换来解卷积可以得到角度谱的估计。解卷积的病态问题通过利用低通滤波器对观测数据的预处理来克服, 改变滤波器的参数并结合最小均方误差准则, 可以得到最小均方误差意义下的角度谱估计。天线的方向性对估计精度有着重要影响, 天线方向性越强, 对角度谱的估计越准确。仿真结果表明, 该方法是有效的。

## 参考文献

- [1] Jakes W C. Microwave Mobile Communications [M]. 2 ed. New York: Wiley-IEEE Press, 1994.
- [2] Pedersen K I, Mogensen P E, Fleury B H. Spatial channel characteristics in outdoor environments and their impact on BS antenna system performance [A]. In: IEEE VTC '98 [C]. Ottawa, Canada: 1998, 719-724.
- [3] Pedersen K I, Mogensen P E, Fleury B H. A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2000, 49: 437-447.
- [4] Kuchar A, Rossi J-P, Bonek E. Directional macrocell channel characterization from urban measurements [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2000, 48: 137-146.
- [5] Hampicke D, Schneider C, Landmann M, et al.. Measurement-based simulation of mobile radio channels with multiple antennas using a directional parametric data model [A]. In: IEEE Proceedings, VTC'01-Fall, 54th [C]: 2001, 1073-1077.
- [6] Fleury B H, Tschudin M, Heddergott R, et al.. Channel parameter estimation in mobile radio environments using the SAGE algorithm [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 1999, 17: 434-450.
- [7] 杨大成. 移动传播环境 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 李焱, 张璐, 许家栋. 基于移动端多天线系统的无线衰落信道模型 [J]. 电波科学学报, 2003, 18 (6): 712-716.  
Li Y, Zhang L, Xu J D. Wireless fading vector channel model for multi-antenna system at mobile terminals [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18 (6): 712-716.
- [9] 王自力, 龚耀寰. MIMO 宏小区窄带信道模型的相关性能分析 [J]. 电波科学学报, 2005, 20 (1): 37-42.

- Wang Z L, Gong Y H. Correlation characteristic analysis of MIMO macro-cell narrowband channel model [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20 (1): 37-42.
- [10] Paulraj A, Nabar R, Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [11] Durgin G D. Space-Time Wireless Channels [M]. NJ: Prentice Hall, 2002.
- [12] Oppenheim A V, Schafer R W, Buck J R. Discrete-Time Signal Processing [M]. 2nd ed. NJ: Prentice Hall, 1999.
- [13] 邹谋炎. 反卷积和信号复原 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

(上接第 16 页)

- ings of 55th IEEE Vehicular Technology Conference [C]. Piscataway: IEEE Press, 2002, 1178-1181.
- [8] R B Ertel, J H Reed. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(11): 1829-1840.
- [9] He Yan, Hu Hanying, Zhou Shan. A TOA based believable factor mobile location algorithm [A]. Proceedings of 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. Piscataway: IEEE Press, 2004, 260-263.
- [10] Liu Ying, Wang Shuxun. TOA estimation method using fourth order cumulants [A]. Proceeding of 5th IEEE International Conference on Signal Processing [C]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000, 210-214.
- [11] J Winter, C Wengerter. High resolution estimation of the time of arrival for GSM location [A]. Proceedings of 51th IEEE Vehicular Technology Conference [C]. Piscataway: IEEE Press, 2000, 1343-1347.
- [12] L J Greenstein. A new path-gain/delay spread propagation model for digital cellular channels [J]. IEEE Transactions on VT, 1997, 46(2): 477-484.



**李 纪** (1977—), 男, 吉林人, 国防科技大学电子科学与工程学院博士生, 主要研究方向为无线信道建模与仿真技术。

- 张尔扬** (1941—), 男, 江苏人, 国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、自适应信号处理、通信抗干扰、复杂电子系统仿真。

- [13] Y T Chan, K C Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.



**常 戎** (1971—), 男, 陕西人, 博士生, 主要研究方向射频技术、无源定位技术。



**吕善伟** (1937—), 男, 辽宁人, 博士生导师, 主要研究方向电磁场与微波技术、射频技术与天线工程。

Email: lueshw@yahoo.com.cn



**王鹏宇** (1976—), 男, 内蒙古人, 博士生, 主要研究方向微波技术与嵌入式应用。

Email: wpybuua@163.com

## 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>