

# 雷达天线机电轴一致性标定方法研究

王东伟<sup>1</sup> 姜黎<sup>1</sup> 刘勇<sup>1</sup> 贺燕<sup>1</sup> 刘越东<sup>2</sup>

(1. 北京航天计量测试技术研究所,北京 100076; 2. 北京遥感技术研究所,北京 100076)

**摘要** 介绍一种标定雷达天线机电轴一致性的方法,即确定结构坐标系和波束坐标系之间的转换关系。在雷达天线结构上固定一玻璃立方镜,用于坐标转换。在实验室和微波暗室进行两次测量,分别得到结构坐标系与立方镜的关系、波束坐标系与立方镜的关系,解决了单次测量误差大的问题。进行数据处理及不确定度评定,验证了机电轴一致性。

**关键词** 雷达天线 坐标转换 立方镜 测量方法

## Research of Calibration Method for Radar Antenna Electromechanical Axis Consistency

WANG Dong-wei<sup>1</sup> JIANG Li<sup>1</sup> LIU Yong<sup>1</sup> HE Yan<sup>1</sup> LIU Yue-dong<sup>2</sup>

(1. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076)

**Abstract** A method of calibration method for radar antenna electromechanical axis consistency is introduced. The aim is to get transformation of structure coordinate and wave coordinate. Fixing a cubic prism on the face of radar antenna is to transform coordinate. To solve the problem of oversize error in single measure, it measures twice in lab and microwave anechoic chamber, and calibrates transformation of structure coordinate and wave coordinate with cubic prism coordinate. Through date processing and uncertainty evaluation, the electromechanical axis consistency is varified.

**Key words** Radar antenna Coordinate transformation Cubic prism Measurement method

## 1 引言

目前,雷达已广泛应用于各行各业,特别是在航空航天等军工行业更是有重要应用,如空间交会对接、航母机舰对接、目标监测等,成为战争胜利的重要保障<sup>[1]</sup>。其工作原理是利用电磁波探测目标的电子设备,通过发射电磁波对目标进行照射并接收

其回波,由此获得目标的距离、速度、方位、高度等信息。其中,天线是雷达的重要组成部分,可作为发射装置或接收装置,用于发射和接收电磁波。

为保证雷达达到最佳的性能,需要完成多种测量与标定,雷达天线的机电轴一致性标定是其中一项重要内容。本文以此为应用背景,提出了一种新型标定方法,并对不确定度进行了评定,满足了雷达

天线的测试准确度要求。

## 2 坐标转换方法

在不同坐标系下的参数在建立关系之前必须进行坐标系之间的相互转换,尤其是在设计和测试过程中涉及到了多形式坐标系的表达方式,坐标系转换尤为重要。

本文所提出的标定方法中,坐标转换主要利用立方镜的结构特性,使其作为转换介质。如图 1 所示,立方镜是由六个镜面组成的立方体<sup>[2]</sup>,通常使用微晶玻璃制成,部分使用金属研磨而成。六个面当中有五个面为工作面,一面为安装面,微晶玻璃材料制成的工作面通常会镀膜。立方镜相邻工作面两平面夹角满足  $90^\circ \pm 2''$ ,以其中两个相互垂直的表面法线确定某两个坐标轴方向,右手规则确定第三轴。如图 2 所示,立方镜正面法线确定 z 轴正向,右侧面法线确定 y 轴正向,右手准则确定 x 轴正向。由于要求不同,在实际工作中可以根据需求不同依右手准则自由定义各坐标轴。

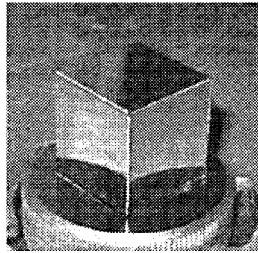


图 1 立方镜

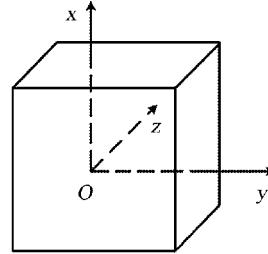


图 2 立方镜坐标系

在实际雷达天线标定过程中,对于立方镜的测量,采用结构测量和光学测量两种方法。

结构测量法通常使用高准确度测量仪进行测量,如高准确度三坐标测量机,目前不确定度为:  $U = (0.3 + L/1000) \mu\text{m} (k=2)$ 。微晶玻璃立方镜的表面平面度可达到  $0.3 \mu\text{m}$ ,通过多点测量的平均效应,其方向的测量误差可小于  $1''$ 。测量过程中,使用三坐标测量机测量相邻三个工作面,定义三面交点为原点,选择两面法线为坐标轴指向,建立坐标系。

光学测量法一般是用自准直的方法进行测量,测量仪器包括自准直仪和带自准直功能的经纬仪。本测量使用的是经纬仪,因为经纬仪不仅可以进行立方镜方向的传递,而且可以对特制靶标进行测量,

实现空间坐标的现场测量,利用这一特点,可以实现微波暗室条件下波束坐标系和立方镜坐标系转换关系的测量。

## 3 机电轴一致性标定方法

机电轴一致性的标定主要是测量波束方向(即电轴方向)与结构坐标系的夹角关系。波束方向在微波暗室通过平面近场扫描测量得到,由于此测量状态下,结构坐标系已被遮挡,且现有技术条件下测量误差较大,故使用二次测量方式,通过坐标转换计算夹角关系。

### 3.1 结构坐标系测量

结构坐标系的标定使用高准确度三坐标测量机进行测量。

三坐标测量机是一种高准确度坐标类测量仪器,将各种几何元素的测量转化为这些几何元素上一些点集坐标位置的测量。在测得这些点的坐标位置后,再由软件按一定的评定准则算出这些几何元素的尺寸、形状、相对位置等。从原理上说,它可以测量任何工件的任何几何元素的任何参数<sup>[3]</sup>。

如图 3 所示为一种雷达天线的结构形式。将雷达天线固定在坐标机平台上,使用测头测量立方镜指定的相邻三个平面,三个平面交点为原点,以 Z 轴为第一轴, Y 轴为第二轴建立坐标系。在该坐标系下测量结构坐标系,确定两坐标系之间的转换关系。

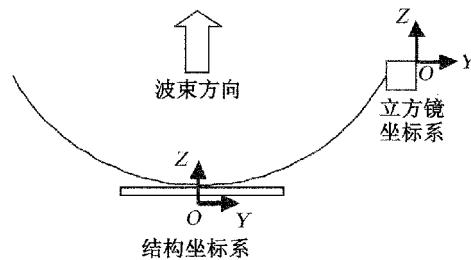


图 3 雷达天线结构形式图

### 3.2 波束方向测量

波束方向的标定使用带自准直功能的电子经纬仪进行测量,该测量需要在微波暗室进行,通过电磁场信号采集系统测得在扫描架坐标系下的空间波束指向。

电子经纬仪测量系统是用手工进行光学瞄准的非接触移动式三维测量系统,用于几何量测量。采

用前方交汇原理,至少用2台经纬仪瞄准同一点进行测量。以2台电子经纬仪的工作系统为例,其原理见图4<sup>[4]</sup>。

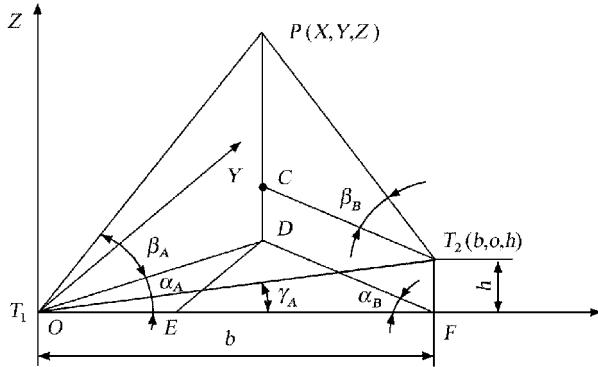


图4 空间前方交会原理图

如图5所示,使用4台经纬仪进行测量,其中2台( $T_1, T_2$ )用于建站,测量扫描架坐标系,另外2台( $T_3, T_4$ )用于自准直,测量立方镜坐标系,通过4台经纬仪之间的关系,建立起扫描架坐标系和立方镜坐标系的关系。

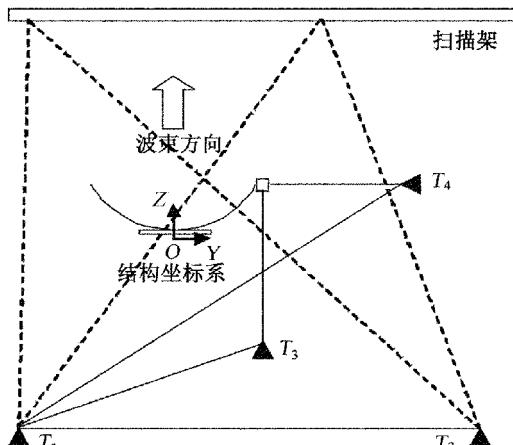


图5 微波暗室现场测量俯视图

扫描架是一个二维的直线位移装置,具有水平轴和垂直轴,可以在扫描平面内移动测试探针实现信号采集。在扫描平面内改变测试探针所在移动台位置,通过测量平面内一定数量的取样点确定扫描架坐标系。测量过程中,在移动台固定一个靶标,用经纬仪( $T_1, T_2$ )同时瞄准测量,如图5虚线所示。测量不同位置的移动台的靶标,即可得到扫描架不同点的坐标值。扫描架坐标系的建立是以其扫描的平面法向为第一轴,垂直方向平台的移动方向为第二轴,某初始零点为原点。

扫描架的探测器可检测波束方向和扫描架坐标系的转换关系,  $T_1, T_2$  经纬仪可测量扫描架坐标系,  $T_3, T_4$  经纬仪可测量棱镜坐标系,4台经纬仪也可以通过角度转换建立关系,这样即可得到波束方向和立方镜坐标系的转换关系。

通过结构坐标系测量和波束方向的测量,可分别得到结构和波束相对于立方镜的关系,通过坐标转换得到波束在结构坐标系的夹角关系,即为所求。

### 3.3 数据处理

本项目的数据处理主要使用矩阵转换法和特征点转换法,其中任一种方法都可以完成本项工作,将二者结合则更加快捷。

#### 3.3.1 转换矩阵法

转换矩阵主要表示了两个坐标系任意两轴的夹角关系进行组合而成的变换矩阵。转换矩阵法数学关系为  $a_i = \mathbf{W}A_i - C$ , 其中  $a_i$  为目标坐标系坐标值,  $\mathbf{W}$  为转换矩阵,  $A_i$  初始坐标系坐标值,  $C$  为平移量<sup>[4]</sup>。

在实际测量过程中,由于本文只关心夹角关系,不考虑平移量,则

$$A_{lj} = \mathbf{W}_1 A_{jg} \quad (1)$$

$$A_{smj} = \mathbf{W}_2 A_{lj} \quad (2)$$

$$D_{bs} = \mathbf{W}_3 A_{smj} \quad (3)$$

式中:  $A_{jg}$ ——结构坐标系;  $A_{lj}$ ——棱镜坐标系;  $A_{smj}$ ——扫描架坐标系;  $D_{bs}$ ——波束方向;  $\mathbf{W}_1$ ——结构坐标系至棱镜坐标系的转换矩阵;  $\mathbf{W}_2$ ——棱镜坐标系至扫描架坐标系的转换矩阵;  $\mathbf{W}_3$ ——扫描架坐标系至波束方向的转换矩阵。

根据式(1),(2),(3)可得到

$$D_{bs} = \mathbf{W}_3 \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_1 A_{jg} \quad (4)$$

通过式(4)即可求得波束在结构坐标系下的关系。

#### 3.3.2 特征点转换法

对于每个坐标系,最少可使用3个点进行表示,如原点( $O_i$ )和2个坐标轴上的特征点( $Y_i, Z_i$ ),而对于一个方向,2个特征点即可表示。

设棱镜坐标系下,结构坐标系的特征点为( $O_{jg}, Y_{jg}, Z_{jg}$ ),波束的特征点为( $D_{bs1}, D_{bs2}$ ),共计5个特征点,利用( $O_{jg}, Y_{jg}, Z_{jg}$ )建立坐标系,得到此时波束的特征点为( $D'_{bs1}, D'_{bs2}$ ),两点连线即可得到波束在结构坐标系下的关系。

## 4 测量不确定度评定

### 4.1 数学模型

对微波暗室平面近场扫描测量系统进行测量,给出方位角/俯仰角标准值,与测量值相比较,则有

$$\Delta\alpha = \alpha' - \alpha \quad (5)$$

式中:  $\Delta\alpha$  —— 方位角测量误差, (°);  $\alpha'$  —— 方位角测量值, (°);  $\alpha$  —— 方位角标准值, (°)。

$$\Delta\beta = \beta' - \beta \quad (6)$$

式中:  $\Delta\beta$  —— 俯仰角测量误差, (°);  $\beta'$  —— 俯仰角测量值, (°);  $\beta$  —— 俯仰角标准值, (°)。

### 4.2 灵敏系数

由  $u^2(y) = \sum \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$ , 可得合成标准不确定度  $u_e$ , 且应满足

$$u_e(\alpha)^2 = c_\alpha^2 u(\alpha)^2 + c_{\alpha'}^2 u(\alpha')^2 \quad (7)$$

$$u_e(\beta)^2 = c_\beta^2 u(\beta)^2 + c_{\beta'}^2 u(\beta')^2 \quad (8)$$

式中:  $c(\bullet)$  —— 灵敏系数,  $c_\alpha = -1$ ,  $c_{\alpha'} = 1$ ,  $c_\beta = -1$ ,  $c_{\beta'} = 1$ 。

### 4.3 不确定度来源

表 1 标准不确定度分量来源和说明

序号	标准不确定度分量名称		说明
1	微波暗室平面近场扫描测量系统引入的分量	扫描架移动系统引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_1)/u(\beta_1)$	B 类评定
		电磁场信号采集系统引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_2)/u(\beta_2)$	B 类评定
2	标定系统引入的分量	自准直瞄准所引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_1)/u(\beta_1)$	A 类评定
		三坐标测量机引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_2)/u(\beta_2)$	B 类评定
		立方镜垂直度引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_3)/u(\beta_3)$	B 类评定
		电子经纬仪测量系统读数引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_4)/u(\beta_4)$	B 类评定
		环境温度引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_5)/u(\beta_5)$	B 类评定

### 4.4 标准不确定度

4.4.1 扫描架移动系统引入的标准不确定度分量  $u(\alpha_1)/u(\beta_1)$

扫描架测量误差不大于  $\pm 0.05\text{mm}$ , 扫描范围为 1m, 引入的角度误差为:  $\arctan(0.10\text{mm}/1\text{m}) \approx 20.63''$ , 此项按均匀分布, 则标准不确定度分量为

$$u(\alpha_1) = \frac{20.63''}{\sqrt{3}} \approx 11.91'' \quad (9)$$

$$u(\beta_1) = \frac{20.63''}{\sqrt{3}} \approx 11.91'' \quad (10)$$

4.4.2 电磁场信号采集系统引入的标准不确定度分量  $u(\alpha_2)/u(\beta_2)$

电磁场信号采集系统引入的角度最大允许误差为  $18''$ , 此项按均匀分布, 则标准不确定度分量为

$$u(\alpha_2) = \frac{18''}{\sqrt{3}} \approx 10.39'' \quad (11)$$

$$u(\beta_2) = \frac{18''}{\sqrt{3}} \approx 10.39'' \quad (12)$$

4.4.3 自准直瞄准所引入的标准不确定度分量  $u(\alpha_1)/u(\beta_1)$

在相同条件下, 在某固定位置重复进行 10 次测量, 10 次测量数据的实验标准差为  $s_\alpha = 1.2''$ ,  $s_\beta = 1.2''$ , 在实际测量时一般做 3 次重复测量取平均值, 则测量重复性引入的标准不确定度分量可用 A 类评定方法计算

$$u(\alpha_1) = 1.2''/\sqrt{3} \approx 0.69'' \quad (13)$$

$$u(\beta_1) = 1.2''/\sqrt{3} \approx 0.69'' \quad (14)$$

4.4.4 三坐标测量机引入的标准不确定度分量  $u(\alpha_2)/u(\beta_2)$

三坐标测量机校准证书中给出示值最大允许误差为  $(0.6 + L/600)\mu\text{m}$ , 包含因子  $k = 2$ , 由于  $L \leq 300\text{mm}$ , 引入的误差为:  $0.6 + 300/600 = 1.1\mu\text{m}$ , 则标准不确定度为

$$u(\alpha_2) = \frac{\arctan(1.1\mu\text{m}/300\text{mm})}{2} \approx 0.38'' \quad (15)$$

$$u(\beta_2) = \frac{\arctan(1.1\mu\text{m}/300\text{mm})}{2} \approx 0.38'' \quad (16)$$

4.4.5 立方镜垂直度引入的标准不确定度分量  $u(\alpha_3)/u(\beta_3)$

通过立方镜校准证书给出的示值最大允许误差为  $1.8''$ , 此项按均匀分布, 则标准不确定度分量为

$$u(\alpha_3) = \frac{1.8''}{\sqrt{3}} \approx 1.04'' \quad (17)$$

$$u(\beta_3) = \frac{1.8''}{\sqrt{3}} \approx 1.04'' \quad (18)$$

#### 4.4.6 电子经纬仪测量系统测量读数引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_4)/u(\beta_4)$

电子经纬仪的示值最大允许误差为  $20L\mu\text{m}$ , 包含因子  $k=2$ , 测量距离为  $3.5\text{m}$ , 引入的误差为  $20 * 3.5\mu\text{m} = 0.07\text{mm}$ , 测量扫描架的范围为  $2\text{m}$ , 则标准不确定度分量为

$$u(\alpha_4) = \frac{\arctan(0.07\text{mm}/2\text{m})}{2} \approx 3.61'' \quad (19)$$

$$u(\beta_4) = \frac{\arctan(0.07\text{mm}/2\text{m})}{2} \approx 3.61'' \quad (20)$$

#### 4.4.7 环境温度引入的标准不确定度分量 $u(\alpha_5)/u(\beta_5)$

三坐标测量机温度变化量不大于  $0.3^\circ\text{C}$ , 现场测量温度变化量不大于  $2^\circ\text{C}$ , 温度的影响较小, 所以此项可忽略不计, 即

$$u(\alpha_5) = u(\beta_5) = 0 \quad (21)$$

#### 4.5 合成标准不确定度

暗室平面近场扫描系统引入的标准不确定度分量互不相关, 即

$$u(\alpha') = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u^2(\alpha'_i)} \approx 15.81'' \quad (22)$$

$$u(\beta') = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u^2(\beta'_i)} \approx 15.81'' \quad (23)$$

标定系统引入的标准不确定度分量互不相关, 即

$$u(\alpha) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u^2(\alpha_i)} \approx 3.84'' \quad (24)$$

$$u(\beta) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u^2(\beta_i)} \approx 3.84'' \quad (25)$$

因此, 合成标准不确定度  $u_c(\alpha), u_c(\beta)$  按式 (26), (27) 计算

$$u_c(\alpha) = \sqrt{u^2(\alpha) + u^2(\alpha')} \quad (26)$$

$$u_c(\beta) = \sqrt{u^2(\beta) + u^2(\beta')} \quad (27)$$

得

$$u_c(\alpha) \approx 16.27'' \quad (28)$$

$$u_c(\beta) \approx 16.27'' \quad (29)$$

#### 4.6 扩展不确定度

扩展不确定度  $U(\alpha), U(\beta)$  按式 (30), (31) 计算

$$U(\alpha) = k u_c(\alpha), k = 2 \quad (30)$$

$$U(\beta) = k u_c(\beta), k = 2 \quad (31)$$

式中:  $U(\alpha)$  —— 方位角扩展不确定度;  $U(\beta)$  —— 俯仰角扩展不确定度;  $u_c(\alpha)$  —— 方位角合成不确定度;  $u_c(\beta)$  —— 俯仰角合成不确定度;  $k$  —— 包含因子。

得

$$U(\alpha) = 2 \times 16.27'' \approx 33'' \quad (32)$$

$$U(\beta) = 2 \times 16.27'' \approx 33'' \quad (33)$$

## 5 结束语

本文介绍了一种标定雷达天线机电轴一致性的方法, 详细阐述了标定方法过程及各个坐标系的转换关系; 通过对所得数据进行后期处理和不确定度评定(扩展不确定度  $U$  为  $33''$ ), 可以实现雷达天线机械轴与电轴的一致性标定。

## 参考文献

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [2] 杨振, 李广云, 黄桂平, 吴杉. 基于自准直的立方镜姿态测量方法研究 [J]. 宇航计测技术, 2010, 30(2): 14 ~ 18.
- [3] 张国雄. 三坐标测量机 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- [4] 刘勇, 陈晓晖, 殷晴, 贺燕, 刘增启. 三维坐标变换在航天器机械测试中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 147 ~ 150.

## 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>