

## 北斗星座仿真的单天线姿态确定技术研究

孟 骞,刘建业,曾庆化

(南京航空航天大学 自动化学院 导航研究中心,江苏 南京 210016)

**摘 要:**载体姿态测量的实际需要和多天线姿态测量的局限性决定了单天线姿态测量系统拥有广泛的发展前景。分析了单天线测姿的应用价值和基本原理,从我国的具体国情出发,提出了基于北斗卫星星座仿真的单天线姿态确定技术研究的方法。利用 STK 平台对目前组网运行的北斗卫星星座和理想的北斗满卫星星座进行了仿真,利用 Matlab 平台进行了实验,仿真实验结果和误差分析表明,北斗卫星星座仿真的单天线姿态确定技术在适用条件和测姿准确性等方面效果理想,在一定精度要求下满足应用需要,对建立实用可靠的单天线测姿具有积极的推动作用。

**关键词:**北斗;STK;单天线;姿态确定

**中图分类号:**TP391.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-654X(2013)05-0023-04

### Research on Single- antenna Attitude Determination Based on Beidou Constellation Simulation

MENG Qian, LIU Jian- ye, ZENG Qing- hua

(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** To overcome the actual needs of the attitude measurement and the limitations of multi- antenna attitude measurement, the principle and the application value of the single- antenna attitude measurement was analyzed. Two models of Beidou constellation (now and future) were simulated on STK, and the corresponding data was introduced in Matlab for attitude identification. The simulation results and the error analysis showed that the single- antenna attitude determination technology based on the Beidou constellation was satisfied under certain accuracy requirements, which has positive value for the practical application of the single- antenna attitude measurement.

**Key words:** Beidou; STK; single- antenna; attitude determination

### 引言

利用 GNSS 天线实现载体姿态的实时高精度测量是卫星导航研究领域的热点之一<sup>[1]</sup>。较为成熟的多 GNSS 天线载体测姿技术已经在较多的领域获得了应用<sup>[2]</sup>,但由于多天线系统所需的接收机和天线配套量较多,因此大大增加了系统的运行成本和复杂程度。此外,特定的应用环境、小体积载体和表面不规则载体等一系列因素也限制了多天线测姿系统的应用<sup>[3]</sup>。

相比而言,单 GNSS 天线载体测姿技术研究和应用显得尤为迫切,该测姿技术可以利用单 GNSS 天线满足低成本、小体积以及独特构造载体的测姿需求。一般的单 GNSS 天线测姿算法的主要思想是通过接收机获取载体的位置和速度信息,基于速度加速度模型,计算出载体的伪姿态角。但该算法对接收机数据采样

率要求较高,且载体速度和加速度不能过大,载体须尽量保持协调飞行,否则测姿精度难以保证。

本文利用卫星工具包软件 STK,对国产北斗卫星导航系统截止到 2013 年 3 月份的 14 颗组网卫星星座和 2020 年预计达到的满卫星星座进行了仿真<sup>[4]</sup>,基于民航客机进行了模拟飞行实验,后期数据利用 Matlab 平台进行了解算和验证,实验结果表明,两种仿真星座下的测姿精度差别不大,但满卫星星座条件下误差分布更加稳定,更符合民航客机正常飞行和北斗单天线姿态测量系统有效工作的实际需要<sup>[5]</sup>。基于北斗导航系统的单测姿天线技术具有一定的实际应用精度,鉴于北斗系统在安全性和独立性方面相较于 GPS 的优势,本文所得到的结论对建立稳定可靠的单天线测姿具有积极的推动作用。

收稿日期:2013-04-28

修订日期:2013-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目资助(91016019;60904091;61104188);江苏省高校优势学科建设工程项目、中央高校基本科研

业务费专项基金资助项目(NP2012103;NP2011049)

作者简介:孟 骞(1990-),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要研究方向为卫星导航、组合导航、卫星测姿等。

## 1 单天线姿态测量技术

### 1.1 坐标系定义

文中将用到五种坐标系:站心坐标系、飞机机体坐标系、当地地理系、轨迹坐标系和大地坐标系。本文对模型进行适当简化,假设地球平面是水平的,并且地球在空间中是固定不动的,可以不用考虑地球自转带来的影响,这一假设对于大部分的飞行载体来说是适用的,并且可以确认对求解的结果影响不大<sup>[6]</sup>。

1)地面惯性坐标系( $O_g X_g Y_g Z_g$ ):相对于地球表面不动的一种坐标系,原点取自地面上的某一点,本文中默认为飞机在地面上的起飞点, $X_g$ 轴位于水平面内,指向飞机的航线, $Z_g$ 轴垂直于地面向下, $Y_g$ 轴由右手定则确定。

2)飞机机体系( $O X_b Y_b Z_b$ ):原点位于载体的质心, $Y_b$ 为横滚轴,沿纵轴指向载体的头部方向; $X_b$ 为俯仰轴,与横滚轴垂直指向载体右方; $Z_b$ 为航向轴,与 $Y_b$ 、 $X_b$ 符合右手螺旋定则。

3)当地地理坐标系( $O X_l Y_l Z_l$ ):原点位于载体的质心, $X_l$ 为沿参考椭圆西圈方向指向东; $Y_l$ 为沿参考椭圆子午圈方法指向北; $Z_l$ 为沿参考椭圆外法线方向指向天顶。

4)轨迹坐标系( $O X_t Y_t Z_t$ ):假设载体相对于当地地理坐标系的速度为 $v$ , $Y_t$ 沿 $v$ 方向, $X_t$ 指向载体的右方, $Z_t$ 与 $Y_t$ 、 $X_t$ 符合右手螺旋定则。

5)大地坐标系( $\phi, \lambda, h$ ):大地纬度 $\phi$ 是过载体的基准椭圆面法线与赤道面的夹角;大地经度 $\lambda$ 是过载体的子午面与格林尼治参考子午面之间的夹角;大地高度 $h$ 是从载体到基准椭圆面的法向距离,基准椭圆面以外为正,以内为负。

### 1.2 飞机的两种姿态

1)常规姿态:机体坐标系相对于地理坐标系的转角关系,用欧拉角( $\psi, \theta, \varphi$ )表示。 $\psi$ 为偏航角,是 $Y_b$ 在水平面上投影与 $Y_l$ 之间的夹角; $\theta$ 为俯仰角,是 $Y_b$ 与当地水平面之间的夹角; $\varphi$ 为横滚角,是 $X_b$ 与水平面之间的夹角。

2)伪姿态:轨迹坐标系相对于当地地理坐标系的转角关系,用欧拉角( $\psi_t, \theta_t, \varphi_t$ )表示。 $\psi_t$ 为伪航向角,是 $Y_t$ 在水平面上投影与 $Y_l$ 之间的夹角; $\theta_t$ 为伪俯仰角,是 $Y_t$ 与当地水平面之间的夹角; $\varphi_t$ 为伪横滚角,以 $X_t$ 轴在水平状态时指向为参考轴, $X_t$ 绕 $Y_t$ 转动的角度,代表了可观察到的速度矢量的侧向变化率。

### 1.3 载体姿态解算

利用GNSS接收机可以得到GNSS天线相对于地球运动的速度分量 $v_e, v_n, v_u$ ,然后通过微分的方式求取加速度 $a_e, a_n, a_u$ ,定义伪航向角以北偏东为正,范围为

$0^\circ \sim 180^\circ$ 。可由GNSS天线的东向和北向速度得到<sup>[7]</sup>:

$$\psi_s = \arctan(v_e/v_n) \quad (1)$$

通过天向速度和地速求出伪俯仰角:

$$\theta_s = \arctan(v_u/\sqrt{(v_e^2 + v_n^2)}) \quad (2)$$

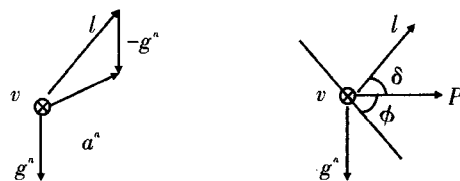
下面介绍通过加速度和载体速度计算载体的伪横滚角。首先将加速度 $a$ 分解为 $v$ 的切线方向和法线方向分量,并将切向方向和法向方向表示为 $a^t$ 和 $a^n$ ,则:

$$\begin{cases} a^t = \frac{av}{|v|^2}v = [a_e^t, a_n^t, a_u^t] \\ a^n = a - a^t = [a_e^n, a_n^n, a_u^n] \end{cases} \quad (3)$$

同样的把东北天坐标系中的重力加速度 $g = [0, 0, -g_0]$ 也沿 $v$ 的切线方向和法线方向分解为 $g^t$ 和 $g^n$ ,则:

$$\begin{cases} g^t = \frac{gv}{|v|^2}v = [g_e^t, g_n^t, g_u^t] \\ g^n = g - g^t = [g_e^n, g_n^n, g_u^n] \end{cases} \quad (4)$$

由于在实际运动中,法方向的加速度分量 $a^n$ 是由提升加速度 $l$ 和沿速度法方向的重力加速度分量 $g^n$ 合成的,那么在此提升加速度 $l$ 可以视为由载体的升力和重力合力产生,故存在如下关于加速度合成的表达式(见图1(a)): $l = a^n - g^n$



(a) 提升加速度示意图 (b) 伪横滚角示意图

图1 加速度和伪横滚角度求解示意图

利用 $g$ 和 $v$ 可以构造一个水平向量 $P$ :

$$P = g \times v = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & -g_0 \\ v_e & v_n & v_u \end{vmatrix} \quad (5)$$

$l$ 和 $P$ 的夹角为:

$$\delta = \arccos\left(\frac{l^T P}{|l||P|}\right) \quad (6)$$

可以得到伪横滚角(见图1(b)):

$$\varphi_s = \frac{\pi}{2} - \delta = \arcsin\left(\frac{l^T P}{|l||P|}\right) \quad (7)$$

利用伪姿态角与载体姿态角度的转换关系,即可求解出相应的载体航向与水平姿态角度,实现单天线的定向测姿。

## 2 北斗导航系统星座构建研究

北斗卫星导航系统是我国自行研制的全球卫星定位与通信系统。我国正在实施北斗卫星导航系统建

设,已成功发射 16 颗北斗导航卫星。2012 年底,系统已经具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力。2020 年左右,建成覆盖全球的北斗卫星导航系统<sup>[8]</sup>。

利用 STK 仿真软件产生高精度的北斗卫星星座数据和飞机运行轨迹。STK 是美国 Analytical Graphics 公司开发的专业卫星工具包软件,可以快速方便地分析复杂的陆、海、空、天任务,并提供易于理解的图表和文本形式的分析结果,确定最佳解决方案。还可以提供分析引擎用于计算数据、并可显示多种形式的二维地图,显示卫星和其他对象如运载火箭、导弹、飞机、地面车辆、目标等。它的核心能力是产生位置和姿态数据、获取时间、遥感器覆盖分析。

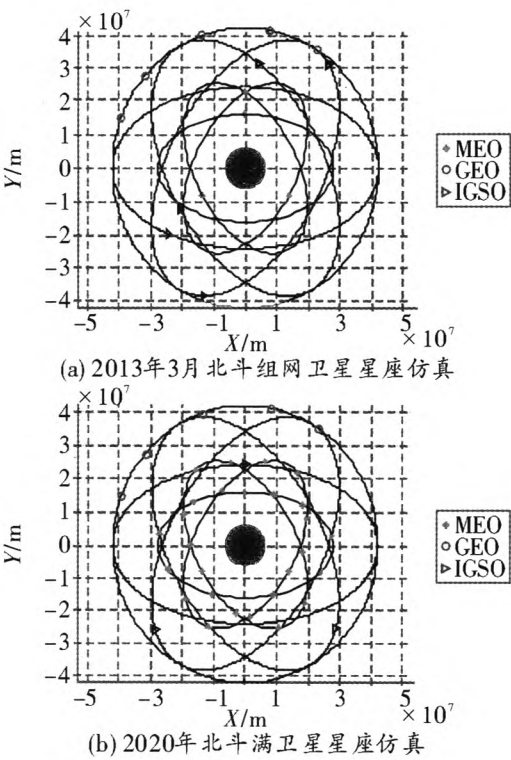


图2 不同时期的北斗卫星星座仿真

表 1 两种仿真星座数据对比

星座	静止轨道卫星 (GEO)	倾斜地球同步 卫星(IGSO)	中地球轨道 卫星(MEO)
14 颗卫星星座	5 颗	5 颗	4 颗
35 颗卫星星座	5 颗	3 颗	27 颗

本实验将对两种北斗卫星导航星座进行仿真,即:截止 2013 年 3 月的已发射 16 颗卫星的实时区域导航系统和 2020 年计划完成的 35 颗卫星满星座导航系统。目前北斗卫星导航系统已经发射卫星 16 颗,其中 14 颗组网运行并提供服务,包括 5 颗地球静止轨道卫星,5 颗倾斜地球同步卫星和 4 颗中地球轨道卫星<sup>[9]</sup>。具体仿真数据如表 1 所示,图 2 中(a)和(b)分别为两

种星座仿真的平面示意图。

3 仿真实现

本实验的仿真载体为民航飞机,天线设置于机身中部,仿真时间为 3 600 s。模拟了飞机包括低速起飞、加速爬高、减速降落在内的多种低中高速运动状态,各种飞行状态之间平稳过渡,不考虑大动态或大转弯等极端特殊情况。设置了 STK 中北斗卫星导航系统接收天线的传感器模型,只接收仰角高于 10°的导航星数据,最终从 STK 中导出精确的北斗卫星、接收机位置、可见性链路等信息,信息输出间隔为 1 s,即输出频率为 1 Hz。STK 模拟场景的设置工作和飞机的航路设计分别见图 3 和图 4。

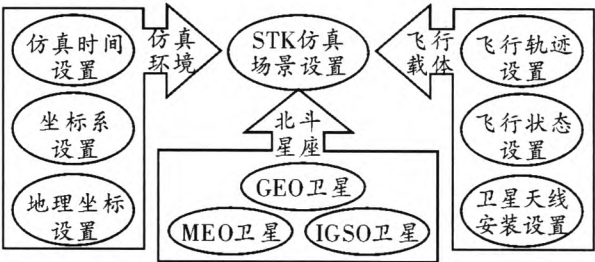


图3 STK 仿真场景设置图

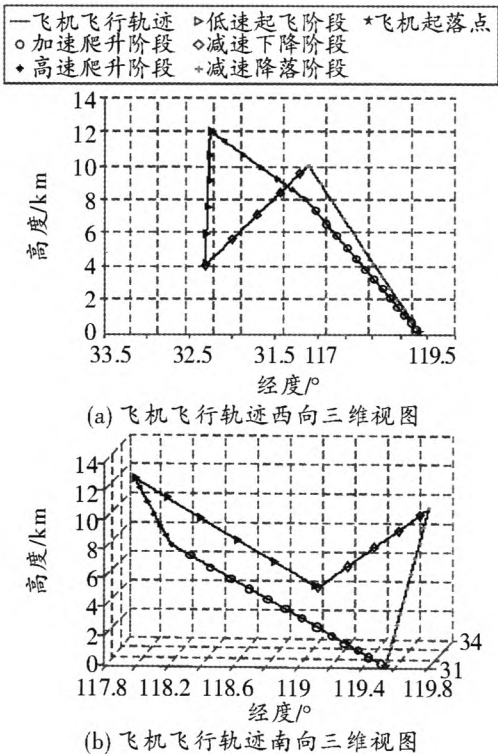


图4 不同方向的飞机飞行轨迹视图

4 误差分析

将 STK 仿真的数据导入 Matlab 平台进行后期处理。按照上述算法进行仿真,得到飞机三个伪姿态角,

并与 STK 产生的理想数据进行比较,分析三个伪姿态角的误差分析结果,表 2 对两种仿真星座条件下的误差均值和标准差进行了对比。

表 2 飞机伪姿态角误差数据对比

姿态角	14 颗组网卫星星座		35 颗满卫星星座	
	均值	标准差	均值	标准差
伪航向角	0.001 7°	0.075°	0.000 8°	0.057°
伪俯仰角	-0.002 1°	0.074°	0.001 0°	0.056°
伪横滚角	0.037 9°	1.651°	0.039 8°	1.270°

由表 2 可知,由于北斗卫星导航系统已经实现了亚太地区的高精度、高可靠的定位、导航和授时服务,实验仿真环境在中国地域,在现阶段组网星座和未满足卫星星座两种仿真情况下,单天线测姿的精度差别不大,但是满卫星星座的误差分布要更加稳定。这是因为当天仿真是基于平飞的民航客机的情况,没有考虑到大动态或者大角度问题。由于当前在轨运行的中

轨道卫星(MEO)较少,真实民航飞机处于盘旋等飞行状态时,将会导致星况不良等问题,造成解算失效等后果,因此,对于可靠的北斗单天线姿态测量系统还需要全星座的支持。

图 5(a)、(b)和(c)分别为起飞阶段、途中飞行阶段和降落阶段的误差条形图,在理想值的基础上附加误差,条码上下宽度越大,表明误差相对越大。由于组网星座和理想星座情况下的测姿精度差别不大,现以当前组网星座为例进行分析。

对比三个阶段的误差条形图,航向角和与俯仰角的误差在飞机在起飞和降落等低速飞行过程中误差相对较大,途中高速飞行时误差很小,全程最大误差基本控制在 0.5°;横滚角方面,由于是由加速度计算得到,噪声在处理过程中被放大,因此误差相对更大一些,但基本控制在 3°以内,飞机的飞行速度对横滚角误差影响并不明显。

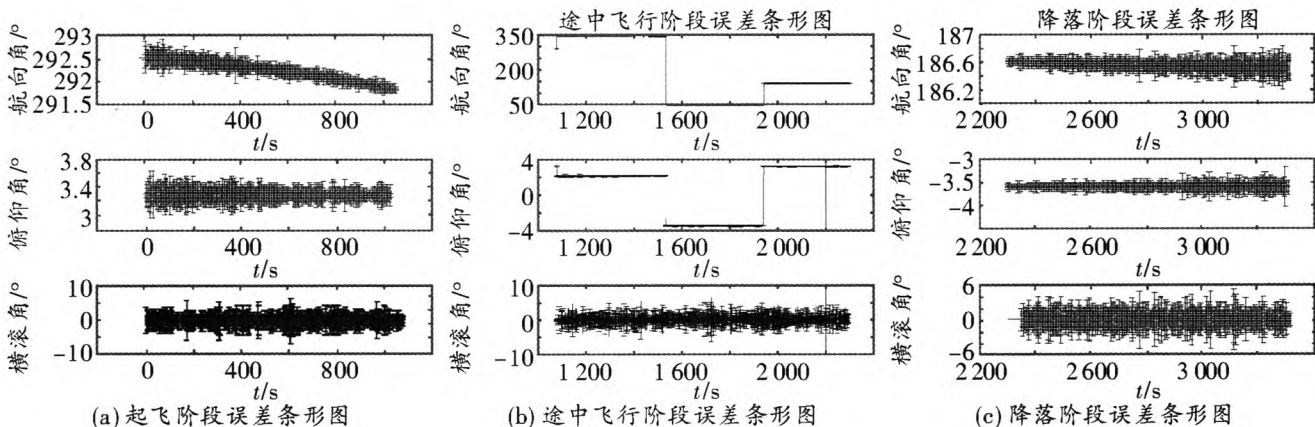


图 5 飞机飞行阶段误差条形图

5 结束语

本文从单天线测姿的基本原理出发,利用 Matlab 平台建立了基于北斗导航系统的单天线姿态确定模型。结合 STK 软件对北斗导航系统当前 14 颗组网卫星星座和 2020 年 35 颗卫星满卫星星座进行了仿真,以民航飞机为载体对其姿态进行了实验验证。实验结果和误差分析表明,在一定的适用条件和测姿准确性下均能输出较精准的结果,鉴于北斗导航系统为我国自主研制和建立的导航定位系统,这对单天线测姿的实际应用具有积极的推动作用。

参考文献:

[1] 徐定杰,党超,沈锋.一种解算整周模糊度几何算法实现 GPS 快速测姿[J]. 宇航学报,2011,32(12):2518-2525.  
[2] 赵伟,万德均,刘建业,等. GPS 载波相位整周模糊度的在航快速算法研究[J]. 中国惯性技术学报,2004,12

(1),P33-36.  
[3] 胡国辉,范胜林,胡恒章.低成本 GPS 姿态和航向系统的设计[J]. 仪器仪表学报,2001,22(1):72-75.  
[4] 潘艳辉,王韬,李华.非静止轨道卫星网络面向应用仿真分析[J]. 计算机仿真,2011,28(8):112-116.  
[5] 董良,曾庆化,邓孝逸,等.多功能捷联惯性导航仿真平台软件的设计及实现[J]. 航空计算技术,2012,42(6):88-91.  
[6] 刘大军.利用单天线 GPS 确定载体姿态的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2002.  
[7] 翟海廷,丛丽,秦红磊,等.基于单天线的 MEMS-INS/GPS 组合定姿方法[J]. 计算机工程与设计,2012,33(10):3999-4000.  
[8] 谭述森.北斗导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报,2008,29(2):391-396.  
[9] Wikipedia. The BeiDou Navigation Satellite System [G/OL]. 2012. 3 [2013. 3]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Beidou\\_Navigation\\_Satellite\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Beidou_Navigation_Satellite_System).

## 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,一直致力和专注于微波、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>