

文章编号：1671-7449(2004)02-0151-05

分布式卫星 INSAR 系统中天线指向误差分析

张秋玲，郑卫平，王岩飞

(中国科学院电子学研究所，北京 100080)

摘要： 基于分布式卫星 INSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)系统的特点，建立了分布式卫星 INSAR 系统中天线指向误差和由此引起的天线波束偏移的确定关系，分析了天线波束偏移引起的接收信号信噪比、多普勒中心以及方位模糊比的变化和由此产生的测高误差。根据分析结果和系统设计中的误差分配可以提出对天线指向误差的限制。

关键词： 分布式卫星；干涉合成孔径雷达；数字高程图；天线指向；误差

中图分类号： TN958 文献标识码：A

Error Analysis of Antenna Pointing Based on Distributed Satellites INSAR System

ZHANG Qiu-ling, ZHENG Wei-ping, WANG Yan-fei

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: According to the characteristics of distributed satellites INSAR system, this paper derives the relation between the antenna pointing error and the antenna beam misalignment, analyses the influences induced by azimuth beam misalignment on receiving signal-to-noise ratio, Doppler centroid and azimuth ambiguity-to-signal ratio and the resulting height error. The constraint condition of the antenna pointing error is provided according to error distributed in system design.

Key words: distributed satellites; interferometric synthetic aperture radar (INSAR); digital elevation model (DEM); antenna pointing; error analysis

干涉合成孔径雷达(INSAR)是精确获取数字高程图(DEM)的有力工具。星载 INSAR 系统要装配两部间隔较大的天线，技术难度大，而利用重复轨道实现干涉又存在时间相关问题。利用分布式卫星进行干涉测量是一种新型技术，分布式卫星对测绘区域信息的同时获取，避免了干涉信号间的时间相关性，分布式卫星间形成的大基线又可以提高测高灵敏度。

分布式卫星是由若干颗小卫星以编队的形式构成一个“虚拟卫星”，共同执行一项或多项任务。文献[1~4]对分布式卫星 INSAR 系统的测高误差分析只局限于原理上的分析，没有考虑系统实现过程中引入的测高误差。本文在 SRTM 干涉系统测高误差分析的基础上^[5]，结合分布式卫星 INSAR 系统的特点，分析了天线指向误差对测高误差的影响，为该系统的设计和性能分析提供参考。

为了实现干涉测量，参与干涉的雷达天线波束必须能同时覆盖同一照射区，实现空间同步。但是在各种干扰力矩作用下，天线指向会产生误差，使天线波束指向产生偏离。引起天线指向误差的因素很多，本文主要分析由于卫星姿态误差引起的天线指向误差。卫星姿态误差常用刚体转动的欧拉角表示，分为滚动误差、俯仰误差和偏航误差，由此引起的天线指向误差也可以用这 3 种误差来表示。为了达到宽测绘带测试，一般天线波束在距离向很宽，天线的微小滚动引起的波束距离向的偏离可以忽略，所以这里只考虑天线的偏航和俯仰对系统性能带来的影响。

* 收稿日期：2003-10-16

作者简介：张秋玲(1970—)，女，讲师，博士生，主要从事干涉合成孔径雷达系统设计和信号处理研究。

本文首先分析天线指向误差对天线方向图的影响,然后分析由此引起的测高误差,并做定量分析.

1 天线指向误差对天线方向图的影响

分布式卫星 INSAR 系统干涉测量的几何关系如图 1 所示.

图 1 中分布式卫星速度矢量之间的夹角为 β ; A_1, A_2 为两个天线所在的位置, A_2 在垂直于航迹的平面投影为 A'_2 ; A_1, A_2 的连线为基线 B , 基线与水平面的夹角为 α , 基线 B 沿航迹的分量为 B_x , 在垂直于航迹的平面投影为 B_{yz} ; θ 为天线视角; r_1, r_2 为天线 A_1, A_2 至地面目标 P 的距离; H, h 分别为平台高度和地形高程.

假设: ① 参与干涉的两个天线采用一发双收的工作方式,即进行干涉测量的两个天线一个为收发方式,另一个只有接收作用; ② 雷达 1 为正侧视,为了实现空间同步,雷达 2 为斜视,斜视角为 Ψ , $\Psi = \arcsin(B_x/r_2) - \beta$; ③ 天线口面电场均匀分布,且收发天线波束等宽.

定义两个天线坐标系中高度方向对准的任意两个矢量 D_1 和 D_2

$$D_1 = \{0, L_1 \sin \theta_{el}, L_1 \cos \theta_{el}\}; \quad D_2 = \{0, L_2 \sin \theta_{el}, L_2 \cos \theta_{el}\}, \quad (1)$$

式中: L_1, L_2 为矢量长度; θ_{el} 为天线沿高度方向机械视轴与电子视轴的夹角.

假设由于卫星姿态误差使第二个天线相对于它的轨道坐标系发生了绕动,其中偏航角为 θ_Y ,俯仰角为 θ_P .为了得到两个天线波束的斜视角之差,将矢量 D_2 投影到第二个卫星轨道坐标系,得 D_{2o}

$$D_{2o} = T_P T_Y T_\Psi D_2, \quad (2)$$

式中: T_P 和 T_Y 为偏航和俯仰转换矩阵; T_Ψ 为由于斜视角引起的第二个天线坐标系和轨道坐标系之间的转换矩阵,它们分别为

$$T_P = \begin{bmatrix} \cos \theta_P & 0 & -\sin \theta_P \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_P & 0 & \cos \theta_P \end{bmatrix}; \quad T_Y = \begin{bmatrix} \cos \theta_Y & -\sin \theta_Y & 0 \\ \sin \theta_Y & \cos \theta_Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_\Psi = \begin{bmatrix} \cos \Psi & 0 & \sin \Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Psi & 0 & \cos \Psi \end{bmatrix}.$$

经过一些转换,并假设绕动角很小,可以得到近似关系式

$$D_{2o} \approx L_2 \begin{bmatrix} \Psi \cos \theta_{el} - \theta_Y \sin \theta_{el} - \theta_P \cos \theta_{el} \\ \sin \theta_{el} \\ \cos \theta_{el} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

一般 θ_{el} 较小,两个天线波束的斜视角之差 $\Delta\varphi$ 近似为

$$\sin \Delta\varphi \approx \Psi - \theta_Y \theta_{el} - \theta_P, \quad (4)$$

式中: Ψ 为系统本身引起的斜视角, $(-\theta_Y \theta_{el} - \theta_P)$ 为天线指向误差引起的波束斜视角之差,定义为 $\Delta\varphi_{err}$.由于第一个天线坐标系绕轴旋转一个角度就得到轨道坐标系,所以 $\Delta\varphi$ 也就是编队卫星 INSAR 系统的波束斜视角之差.

影响干涉信号多普勒中心损失的是 $\Delta\varphi$,而只有其中的 $\Delta\varphi_{err}$ 是天线指向误差引起的,它影响接收信号的信噪比和方位模糊比. 经过推导可以证明,天线指向误差引起的天线波束斜视角之差 $\Delta\varphi_{err}$ 和由此引起的方向角之差 $\Delta\theta_{az}$ 近似相等.

上述讨论的天线波束指向偏离指的是天线指向的机械偏离,实际天线方向图指向,即天线的有效指向并不等于这个机械指向. 当天线口面电场均匀分布^[6],且收发天线等宽时,可以推出天线机械指向偏离 $\Delta\varphi_{err}$ 与有效指向偏离 $\Delta\varphi_{eff}$ 之间的关系近似为一个线性关系

$$\Delta\varphi_{eff} = 0.5 \Delta\varphi_{err}. \quad (5)$$

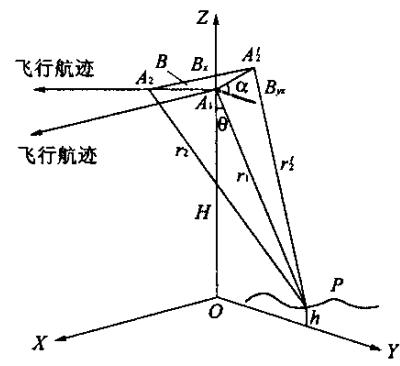


图 1 分布式卫星 INSAR 系统几何关系图

Fig. 1 Distributed satellites INSAR system geometry

式(4)中的机械斜视角之差应该修正为有效天线方向图等效的斜视角之差,经修正后得

$$\Delta\varphi \approx \Psi + 0.5 \times \{-\theta_Y\theta_{el} - \theta_P\}. \quad (6)$$

2 天线指向误差对测高误差的影响

由第1节分析可知,天线指向误差引起的天线波束偏离会影响干涉信号的多普勒中心、接收信号的信噪比和方位模糊比,这些因素会影响干涉信号的相关性。

由多普勒中心引起的相关系数为

$$\rho_{dop} = 1 - \frac{\Delta f_{DC}}{f_d}, \quad (7)$$

式中: f_d 为多普勒带宽; Δf_{DC} 为多普勒中心之差^[5]

$$\Delta f_{DC} = \frac{v_a}{\lambda}(\Psi + \{-\theta_Y\theta_{el} - \theta_P\}). \quad (8)$$

由信噪比引起的相关系数为

$$\rho_{SNR} = \frac{1}{\sqrt{(1 + SNR_1^{-1})(1 + SNR_2^{-1})}}, \quad (9)$$

式中: SNR_1 , SNR_2 为两个干涉信道的信噪比。

方位模糊对于干涉信号来说可以看成是加性噪声^[4],由此引起的相关系数与热噪声引起的相关系数计算方法相同。方位模糊比可以表示为

$$AASR = \frac{\sum_{m=-\infty(m \neq 0)}^{+\infty} \int_{-f_d/2}^{f_d/2} G^2(f + m \cdot PRF) df}{\int_{-f_d/2}^{f_d/2} G^2(f) df}, \quad (10)$$

式中: m 为整数; PRF 为脉冲重复频率; $G(f)$ 为天线方位向方向图。

根据相关系数与相位误差的对应关系^[7],可以求出各相关系数引起的相位误差,它们共同引起的相位误差为

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\sigma_{dop}^2 + \sigma_{SNR}^2 + \sigma_{AASR}^2}, \quad (11)$$

式中: σ_{dop} 为多普勒中心相关系数引起的相位误差; σ_{SNR} 为信噪比相关系数引起的相位误差; σ_{AASR} 为方位模糊引起的相位误差。

由相位误差产生的测高误差为^[3]

$$\sigma_h = \frac{\lambda r \sin \theta}{2\pi B_\perp} \sigma_\varphi, \quad (12)$$

式中: λ 为雷达波长; r 为雷达作用距离; B_\perp 为基线在垂直于视线方向的投影,即干涉有效基线。

第3节将定量分析当天线指向误差引起的天线机械指向偏离在 $\pm 0.2^\circ$ 范围内时,由多普勒中心之差、信噪比和方位模糊比引起的测高误差。

3 测高误差定量分析

以相对轨迹为圆形的均匀分布的3颗小卫星组成的干涉系统为例,在不同时刻选择干涉有效基线最大的两个卫星进行干涉测量。假设圆形轨迹半径 $R=2a$, a 为相对轨迹在轨道平面 xoz 平面投影的半短轴,当从中心卫星到编队小卫星的矢径在轨道坐标系中的分量 x , y , z 的初始状态 (x_0, y_0, z_0) 和初始速度 $(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$ 满足 $z_0=R/2$, $\dot{z}_0=0$ m/s时,3颗小卫星在相对轨道上的位置和时间的关系可以表示为^[8]

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= R \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad y_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} R \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad z_1 = \frac{R}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \\ x_2 &= R \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2}{3}\pi\right), \quad y_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} R \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2}{3}\pi\right), \quad z_2 = \frac{R}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2}{3}\pi\right) \\ x_3 &= R \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{4}{3}\pi\right), \quad y_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} R \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{4}{3}\pi\right), \quad z_3 = \frac{R}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

式中: T 为轨道周期; t 为从初始时刻开始的时间.

假设两个干涉卫星速度矢量之间的夹角 $\beta=0^\circ$, 分布式卫星 INSAR 系统的有关参数如表 1 所示. 在整个轨道周期内由分布式卫星 INSAR 系统引起的多普勒中心之差如图 2(a) 所示, 由天线指向误差引起的多普勒中心之差如图 2(b) 所示.

2(a) 所示, 由天线指向误差引起的多普勒中心之差如图 2(b) 所示. 由这两个多普勒中心之差引起的测高误差如图 2(c) 所示.

表 1 INSAR 系统模拟参数

Tab. 1 Main INSAR system parameters for simulation

轨道高度	500 km	中心频率	9.6 GHz
视角	35°	脉冲重复频率	4 000 Hz
天线长度	4.7 m	相对轨迹半径	500 m

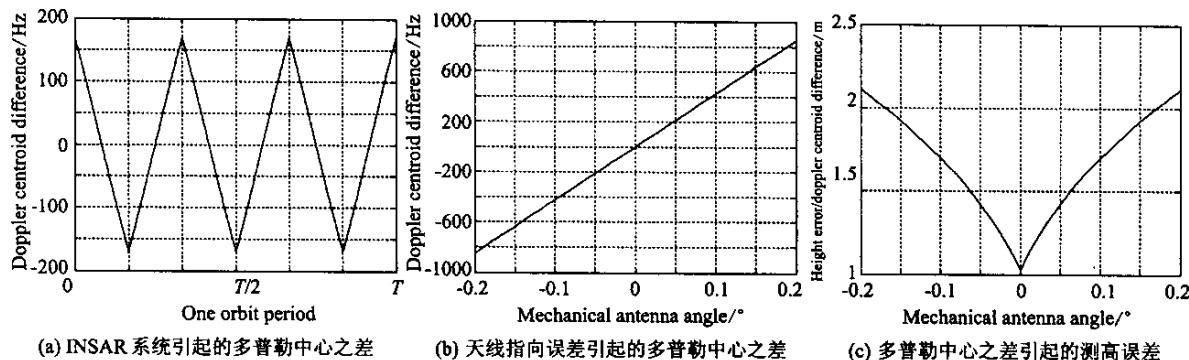


图 2 由干涉系统和天线指向误差引起的多普勒中心之差以及测高误差

Fig. 2 Height error and doppler centroid difference resulting from INSAR system and antenna pointing error

假设 INSAR 系统的信噪比 $SNR=10$ dB, 由天线指向误差引起的接收天线增益损失和由此引起的测高误差如图 3 所示. 由天线指向误差引起的接收天线方位模糊比和由此引起的测高误差如图 4 所示. 由天线指向误差引起的误差因素共同决定的测高误差如图 5 所示.

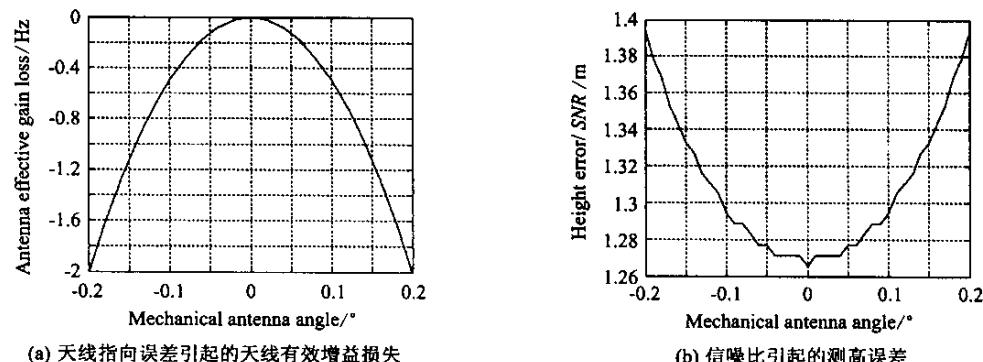


图 3 由干涉系统和天线指向误差引起的信噪比以及测高误差

Fig. 3 Height error and signal-to-noise ratio resulting from INSAR system and antenna pointing error

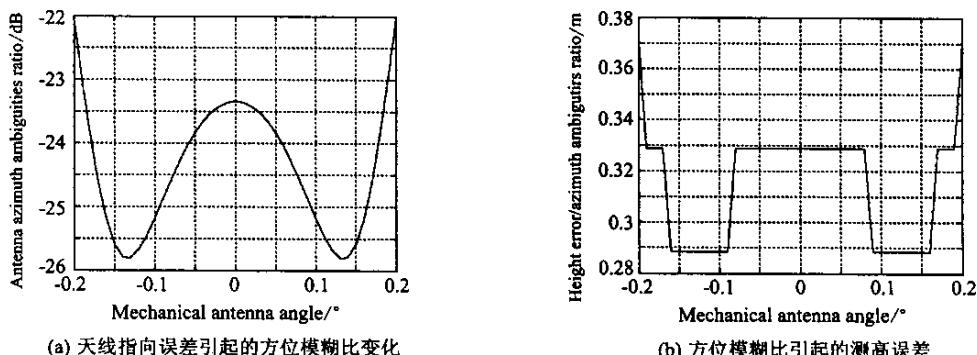


图 4 由干涉系统和天线指向误差引起的方位模糊比以及测高误差

Fig. 4 Height error and azimuth ambiguities ratio resulting from INSAR system and antenna pointing error

从图 2~图 5 可以看出: ① 随着天线指向偏离的增大, 干涉信号间的多普勒中心之差增大, 信噪比减小, 方位模糊比增大, 由此引起的测高误差增大; ② 由天线指向误差引起的对测高误差的影响因素中, 多普勒中心之差引起的测高误差最大, 其次是信噪比和方位模糊比; ③ 根据系统设计对测高误差的分配, 可以提出对天线指向误差的限制, 再根据式 (4) 就可以提出对天线俯仰和偏航的限制, 例如当要求天线指向误差引起的测高误差在 0.3 m 以内时, 天线指向误差引起的波束偏离应该控制在 0.05° 以内; ④ 各误差因素对测高误差的共同作用不是线性关系, 所以系统参数可影响天线指向误差引起的测高误差的大小.

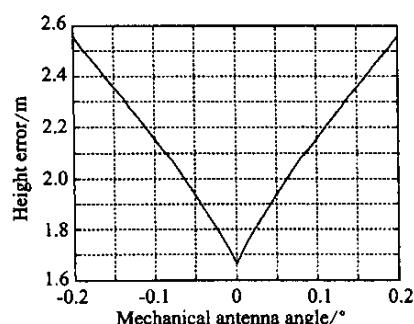


图 5 天线指向误差引起的测高误差

Fig. 5 Height error due to antenna pointing error

4 结 论

本文基于分布式卫星 INSAR 系统的特点, 分析了天线偏航和俯仰对系统测高误差的影响, 为系统设计时对天线指向精度的要求提供参考. 天线的偏航和俯仰引起天线指向偏离, 天线波束的机械指向偏离与有效指向偏离近似为一个线性关系, 天线指向偏离会引起干涉信号多普勒中心之差, 信噪比损失和方位模糊比增大, 从而导致干涉信号的相关性下降, 影响干涉系统的测高精度. 从分析结果可知: 由天线指向误差引起的多普勒中心之差所引起的测高误差最大, 其次是信噪比损失和方位模糊比引起的测高误差; 由它们共同引起的测高误差大小与系统参数有关. 根据分析结果, 结合干涉系统的测高精度要求可以提出对天线指向误差的限制.

参 考 文 献:

- [1] Krieger G, Wendler M, Fiedler H, et al. Performance analysis for bistatic interferometric SAR configurations[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Toronto, Canada, 2002. 650—652.
- [2] Amiot T, Douchin F, Thouvenot E, et al. The interferometric cartwheel: a multi-purpose formation of passive radar microsatellites[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Toronto, Canada, 2002. 435—437.
- [3] Mittermayer J, Krieger G, Moreira A, et al. Interferometric performance estimation for the interferometric cartwheel in combination with a transmitting SAR-satellite[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Sydney, Australia, 2001. 2955—2957.
- [4] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2001, 39(3): 506—520.
- [5] Geudtner D, Zink M, Gierull C, et al. Interferometric alignment of the X-SAR antenna system on the space shuttle radar topography mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2002, 40(5): 995—1005.
- [6] 蔡希尧. 雷达系统概论[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 196—203.
- [7] Just D, Bamler R. Phase statistics of interferograms with application to synthetic aperture radar[J]. Applied Optics, 1994, 33(20): 4361—4368.
- [8] 林来兴. 微小卫星编队飞行组成虚拟卫星研究[A]. 微小卫星编队飞行及应用论文集[C]. 北京: 国家高技术航天领域专家委员会微小卫星技术组, 2000. 1—35.

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>