

基线特征对天基双天线 InSAR 性能的影响分析

孙造宇，董臻

(国防科学技术大学电子科学与工程学院,长沙 410073)

摘要 天基双天线 InSAR 以空间站等为平台, 其基线特征对系统干涉测高性能有重要影响。针对姿态变化、振动和基线测量误差三个影响干涉测高性能的主要因素开展分析, 可以得出姿态变化和天线杆振动引起的基线变化会造成干涉相干性的变化、图像相位变化等, 进而影响干涉测高, 图像相位变化引起的干涉相位变化是其中主要影响因素, 为了对其进行补偿, 需要高精度的基线测量。仿真结果验证了理论上的分析。

关键词 基线; 姿态; 振动; 测量; InSAR; 影响分析

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825 (2012) 06-0007-06

1 引言

天基干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, SAR, InSAR) 能够获取全球的数字高程模型, 同传统光学测绘系统相比, 天基 InSAR 系统具有全天候、全天时、大范围对地观测获取数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的优点。自 1974 年 InSAR 技术被提出以来, 它就获得了极大的发展。现有的天基 InSAR 包括多航过体制、编队体制和双天线体制。双天线体制采用单平台, 基线固定, 因此能快速获取 DEM。2000 年美国首次实现了天基双天线 InSAR 任务, 即航天飞机雷达地形测绘使命 (Shuttle Rader Topography Mission, SRTM)^[1], 在“奋进”号航天飞机上装载一根长约 60m 的天线杆构成 InSAR 基线伸展臂, 位于基线臂两端的雷达构成 InSAR 传感器。2000 年 2 月 SRTM 历经 11d 获取 80% 的地球陆地观测数据, 成功完成使命, 是 InSAR 发展历史上的里程碑。SRTM 采用的天基双天线体制是一种有较高实用价值的天基 InSAR 体制, 这种体制的系统由平台内主天线、平台外辅天线以及支撑天线杆构成, 这种体制要求维持平台姿态稳定, 因此

适合的平台为空间站、航天飞机以及大型卫星等。

由于空间站、航天飞机等平台所处的轨道较低, 存在较大的空气动力干扰阻力, 会对平台的姿态稳定造成较大的影响, 进而影响基线姿态稳定度。姿态的变化会影响干涉测高的性能。为了保持平台的姿态稳定, 需要周期性地对平台进行调姿, 姿态的突变会造成支撑天线杆的振动, 引起测高误差。本文将对这两种基线误差影响进行分析。另外, 进行干涉测高需要精确的基线长度及姿态信息, 因此需要姿态及基线长度的测量系统, SRTM 即采用了姿态与轨道确定系统 (Attitude and Orbit Determination Avionics, AODA)。基线信息测量的精度也会影响测高性能, 这也是本文的一项分析内容。

2 天基双天线 InSAR 模型

天基双天线 InSAR 进行干涉测高是利用在交轨向分开的两部天线获取两幅 SAR 图像, 图像具有相干性, 能够进行干涉处理, 干涉得到的相位图包含高程信息, 提取高程信息可以构建 DEM。双天线在交轨向分开的距离即为基线, 基线是干涉测高中的关键因素, 合适的干涉基线可以保证图像的相干性并

尽量降低误差传递。因此天基双天线 InSAR 中,利用基线需求来确定天线杆的长度。天线杆连接主、辅天线,构成测绘系统,其观测几何如下:

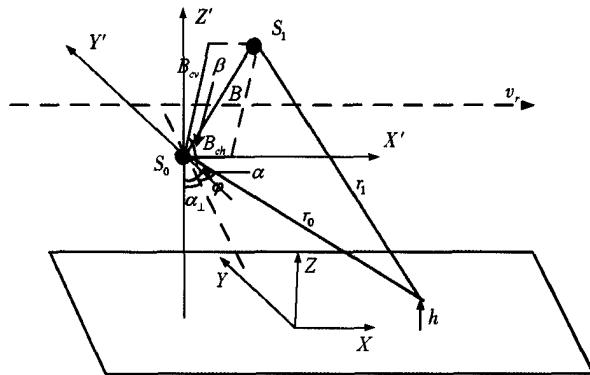


图 1 双天线 InSAR 观测几何

上图中, S_0, S_1 分别为主、辅天线。观测几何中各角度在场景坐标系 XYZ 中定义,场景坐标系定义为 X 轴指向为平台相对于地面速度方向,此相对速度是卫星速度与地球自转速度的合成, Y 轴指向切于地面, Z 轴与 X, Y 轴满足右手系。图中 $X'Y'Z'$ 平行于 XYZ 。 B 为总基线长, B_{ch}, B_{cv} 分别为水平、垂直基线长, β 为基线与 XY 平面的夹角在 YZ 平面的投影。 v_r 为平台速度, φ 为波束中心斜视角, α_\perp 为波束中心下视角 α 在正侧面的投影, r_0, r_1 分别为主、辅天线至地面点的波束中心斜距。

观测几何需要在场景坐标系考虑,而为了考虑基线特征,还需要引入平台本体坐标系和平台轨道坐标系,它们之间的相互变换需要利用地心固连坐标系。后三个坐标系采用标准定义。

根据上述的观测几何,得到的图像的信号模型可表示为:

$$\begin{aligned} s_i(x, t) = & \int_D V_d(\mathbf{P}) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_0 + r_i)\right] \\ & \exp\left[j 2\pi \frac{f_{dei}}{v_r} (x - x_0)\right] \operatorname{sinc}\left\{\frac{1}{\rho_a}(x - x_0)\right\} \\ & \operatorname{sinc}\left\{k \tau_p \left[t - \frac{r_0 + r_i}{c}\right]\right\} d\mathbf{P} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, V_d 为散射系数, \mathbf{P} 为散射点的坐标矢量, $x_0 = v_r t_c$ 为无误差时的方位成像位置, t_c 为波束中心通过目标的时刻, x_0 与 r_i 是与 \mathbf{P} 相关的量, k 为调频率, ρ_a 为方位向分辨率, τ_p 为脉宽, 下标 i 取 0, 1 时分别表示主、辅图像, f_{dei} 为分别对应的多普勒中心。

3 姿态引起的基线变化对测高的影响

由于外部的干扰,平台姿态会发生变化,姿态的变化是一个缓变过程,因此在一幅图像测绘的时间内用下述的线性模型表示:

$$\theta_i = \theta_{0i} + k_i t, \quad i=1, 2, 3 \quad (2)$$

其中,下标 i 为 1, 2, 3 时分别表示滚动角、俯仰角、偏航角, θ_{0i} 为初始姿态, k_i 为姿态稳定度。

姿态的变化会造成基线矢量的变化,基线矢量指平台内主天线指向平台外辅天线的矢量,在平台本体坐标系下,此矢量固定,设为 \mathbf{B}_b 。此矢量在场景坐标系下表示为:

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{A}_{dc} \mathbf{A}_{gd} \mathbf{A}_{bg} \mathbf{B}_b \quad (3)$$

其中, \mathbf{A}_{dc} 表示地心固连坐标系到场景坐标系的转换矩阵, \mathbf{A}_{gd} 表示平台轨道坐标系到地心固连坐标系的转换矩阵, \mathbf{A}_{bg} 表示平台本体坐标系到平台轨道坐标系的转换矩阵,它与姿态相关^[2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \\ 0 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

转换矩阵中, \mathbf{A}_{dc} 是固定的, \mathbf{A}_{gd} 和 \mathbf{A}_{bg} 是随时间变化的,但 \mathbf{A}_{gd} 可看做短时间不变化。而 \mathbf{A}_{bg} 的变化会对干涉性能造成影响,主要是造成主、辅天线的轨迹不平行。轨迹不平行时,即使在基线长度相同的情况下,也会引入新的去相干项,降低干涉相干系数。下面进行分析。

分析相干系数最重要的是分析主、辅图像对应的波程差,波程差可以表示为:

$$\Delta r = B_{ch} \sin\varphi + B_{cv} \cos\varphi \sin(\alpha_\perp - \beta) \quad (5)$$

其中,姿态的变化会引起 B_{ch}, B_{cv} 和 β 的变化,造成波程差的改变,进而降低干涉相干系数,对应的去相干系数表示为:

$$\gamma = \left| \frac{1}{\lambda b_t} \cdot \frac{\partial \Delta r}{\partial t} \right| = \left| \frac{1}{\lambda b_t} \mathbf{V}_1^T \mathbf{V}_2 \right|$$

$$\mathbf{V}_1 = [\sin\varphi, \cos\varphi\sin(\alpha_{\perp}-\beta), -B_{ch}\cos\varphi\cos(\alpha_{\perp}-\beta)]^T$$

$$\mathbf{V}_2 = [\partial B_{ch}/\partial t, \partial B_{cv}/\partial t, \partial\beta/\partial t]^T \quad (6)$$

其中, λ 为波长, b_i 为多普勒带宽。 B_{ch} 和 B_{cv} 可以从矢量 \mathbf{B}_c 得到, 这样可以得到 \mathbf{V}_2 与姿态变化的关系:

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{A}_j \mathbf{A}_{dc} \mathbf{A}_{gd} \mathbf{A}'_{bg} \mathbf{B}_b,$$

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & B_{cy}/\sqrt{B_{cy}^2+B_{cz}^2} & B_{cz}/\sqrt{B_{cy}^2+B_{cz}^2} \\ 0 & B_{cz}/B_{cy}^2+B_{cz}^2 & -B_{cy}/B_{cy}^2+B_{cz}^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}'_{bg} = \mathbf{R}'_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1 k_3 + \mathbf{R}_3 \mathbf{R}'_2 \mathbf{R}_1 k_2 + \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}'_1 k_1$$

$$\mathbf{R}'_3 = \begin{bmatrix} \sin\theta_3 & -\cos\theta_3 & 0 \\ \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}'_2 = \begin{bmatrix} \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}'_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \\ 0 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, B_{cx} 、 B_{cy} 、 B_{cz} 为 \mathbf{B}_c 的三个分量。

针对一 X 波段双天线 SAR 进行仿真, 取中心频率 9.6GHz, 天线杆长 120m, 下视角 28°, 多普勒带宽 1560Hz, 三个姿态角的稳定度都设为相同, 作出去相干系数随姿态稳定度的变化:

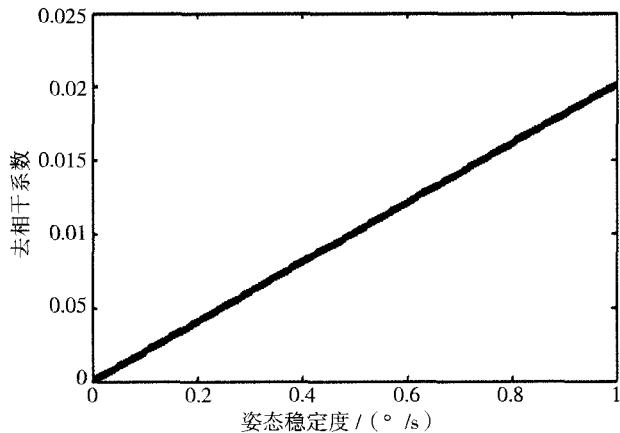


图 2 去相干系数随姿态稳定度的变化

由于姿态稳定度一般远小于 1°/s, 因此去相干系数不会很大, 对干涉性能的影响不会太大。

姿态变化导致基线不平行的情况下, 另一影响是基线方向会改变, 进而影响垂直基线的长度, 垂直基线是关系测高性能的主要基线分量。在上述仿真

的条件下, 考虑测绘时长为 20s, 中间时刻的基线状态与无姿态变化时一致, 姿态稳定度取为 0.1°/s, 可得边缘处垂直基线的变化率在 2% 以下。垂直基线的长度与信号相干性直接相关, 由于基线变化不大, 其对干涉性能的影响也较小。

姿态变化对干涉测高性能影响的另一来源是从成像传递而来的一些影响因素。其分析方式和下节介绍的振动分析类似。

4 振动引起的基线变化对测高的影响

空间站等平台载的双天线 InSAR 受调姿的影响, 天线杆会发生振动, 进而影响干涉性能。天线杆的振动主要对平台外的辅天线造成影响, 引起辅天线位置的变化, 进而引起目标至辅天线距离历程的变化, 最终导致成像性能的恶化和干涉精度的下降^[3]。

在场景坐标系下考虑, 天线杆振动引起的基线变化可以表示为 $\mathbf{B}_{ca}(x)=\mathbf{B}_c(x)+\Delta\mathbf{B}_c(x)$ 。辅天线在一个合成孔径时间内的距离历程的误差通过推导取一阶可近似表示为:

$$\Delta R_1(x) \approx \mathbf{V}_R^T \Delta \mathbf{B}_c(x),$$

$$\mathbf{V}_R = \left[\frac{x+B_{ch}-x_0}{r_1}, \frac{r_0-B_r}{r_1} \cos\alpha, \frac{r_0-B_r}{r_1} \sin\alpha \right]^T \quad (8)$$

其中, $B_r=B_{cv}\sin(\alpha-\beta)$, α 为下视角, 这里对应的是波束正侧视的情况, 这种情况性能较好, 也是一般会采用的方案。 \mathbf{V}_R 中第一分量相对于后两分量小很多, 可近似为 0。以余弦规律来表示天线杆的振动, 故 $\Delta R_1(x)$ 也为余弦规律, 将其进行泰勒展开, 由于主要振动周期大于合成孔径时间, 所以合成孔径时间内二阶项以后对成像影响较小, 故只保留至一阶项^[3]:

$$\Delta R_1(x) = \Delta r_0 + b(x-x_0), \Delta r_0 = \mathbf{V}_R^T \Delta \mathbf{B}_{c0},$$

$$b = \pm \omega \sqrt{\Delta r_m^2 - \Delta r_0^2} / v_r \quad (9)$$

其中, $\Delta \mathbf{B}_{c0}$ 为时刻基线误差, Δr_m 为振动最大值, ω 为振动角频率, b 的符号由距离历程变化的一阶导的符号决定。

上述模型代入辅天线的信号模型, 成像后得到辅天线对应图像近似为:

$$s_1(x, t) = \int_D V_d(\mathbf{P}) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(r_0 + \sqrt{(r_0 - B_r)^2 + B_{ch}^2} + \Delta r_0 \right) \right]$$

通过上述的分析及仿真可见,姿态变化和振动造成的轨道不平行进而引起的相干性变化对测高的影响较小,在现有技术水平下误差可以忽略。姿态变化和振动对干涉测高的影响主要在于位置偏移和相位变化,位置偏移会加大配准误差,相位变化会影响高程重建的精度。相位变化又是这两种误差因素中的主要因素,从第四节的仿真结果可见,不大的振动就会造成较大的测高误差。

为了缓解姿态变化和振动对测高的影响,需要对基线变化进行测量,这是由于姿态和振动测量精度高于其控制精度。对于位置偏移,通过基线精确测量得到偏移量进行补偿,对于相位变化,只要在重建时取对应的精确基线即能保证高精度测高。因此通过高精度的基线测量能对姿态变化和振动的影响进行补偿。但两者的测量方法有所不同,姿态变化直接对平台姿态进行测量,而振动对天线杆姿态进行测量。这种测量还要求能测出基线的变化,因此不但对测量精度有要求,而且对测量频率有要求,需要测量频率足够以适应基线的变化。

针对第三节仿真采用的参数进行仿真分析。做出姿态测量精度和振动测量精度对测高精度的影响:

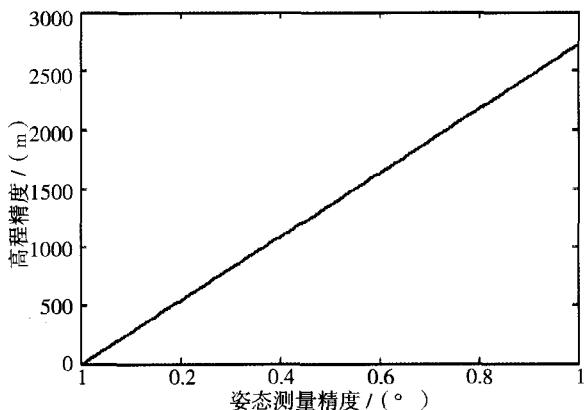


图 6 姿态测量精度对测高影响

从仿真可见,要达到 5m 的绝对测高精度,需要姿态测量精度优于 0.002° , 振动测量精度达到毫米级。由于不在采样点上的姿态和振动测量值由采样值插值而来,因此这里的测量精度不仅与采样点测量精度有关,而且与采样率有关。这种精度是很难达到的,特别是姿态测量精度,因此还需要结合地面控

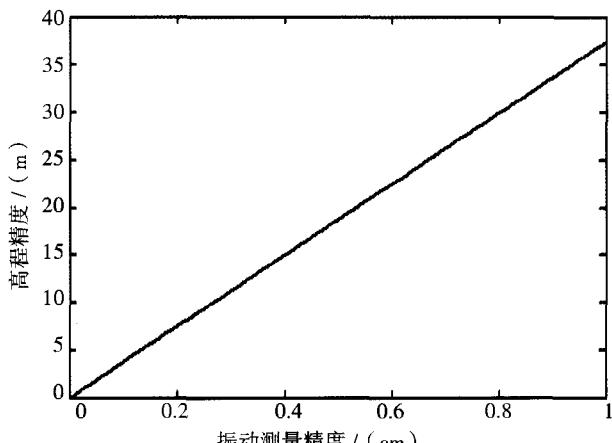


图 7 振动测量精度对测高影响

制点等技术。

7 结 论

本文针对天基双天线 InSAR 的基线特征对干涉测高的影响进行了研究。通过姿态变化和振动的影响分析,轨道不平行和基线值变化对相干系数影响不大。姿态变化和振动还会造成图像变化,包括图像相位变化、方位/距离向偏移、多普勒中心频率变化等。进而造成干涉相位变化、配准误差变大以及相干系数降低,从而产生测高误差。这些因素中最主要的又是干涉相位变化,必须进行补偿。补偿依赖于高精度的基线测量,在不采用其它措施的情况下,需要基线测量达到毫米级精度。 ◇

参 考 文 献

- [1] Yuhsyen Shen, Scott J. Shaffer, and Rolando L. Jordan, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Flight System Design and Operations Overview, Proceedings of SPIE, Vol. 4152, 2000, pp. 167–178.
- [2] 杨大明.空间飞行器姿态控制系统.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000.
- [3] G. Franceschetti, A. Iodice, S. Maddaluno, and D. Riccio, Effect of Antenna Mast Motion on X-SAR/SRTM Performance, IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, Vol. 38, No. 5, 2000, pp. 2361–2372.
- [4] R. Bamler, and P. Hart, Synthetic aperture radar interferometry, Inverse Problems, vol. 14, 1998, pp. R1–R54.
- [5] 王超,张红,刘智.星载合成孔径雷达干涉测量.北京:科学出版社,2002.

Influence Analysis of Baseline Characteristics on Space Bi-antenna InSAR Performance

SUN Zaoyu, DONG Zhen

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Shangsha 410073, China)

Abstract: The platform of space bi-antenna InSAR includes space station, space shuttle, etc. The baseline characteristics of the space bi-antenna InSAR can seriously influence the interferometric performance. Three main factors which can influence the interferometric baseline are analyzed, namely, attitude variety, oscillation and measurement error. Analysis shows that the baseline variety caused by attitude variety and mast oscillation may result in coherence variety and image phase variety, which will consequently affect the interferometric performance. Interferometric phase variety caused by image phase variety is the main factor, and precise baseline measurement is needed for compensation. Theoretic analysis is verified through simulation.

Keywords: Baseline; Attitude; Oscillation; Measurement; InSAR; Influence Analysis

(上接封二)

赵宇棋作《我国空间交会对接任务实施概述》专题报告，介绍了交会对接任务目标与主要规划、总体技术方案要点、任务实施情况及重点考核验证内容，总结概述了交会对接任务的主要成就。郑敏作《载人登月任务分析及初步方案要点》专题报告，介绍了美国、俄罗斯、日本和欧洲有关载人登月的近期初步规划及任务启动情况，探讨分析了我国实施载人登月的必要性和可行性，以及未来发展的基本思路。于登云作《我国探月工程实施进展》专题报告，重点围绕“绕、落、回”三期规划，回顾了嫦娥一号、二号卫星研制历程，介绍了正在实施的探月二期和三期工程进展情况。

刘洋在《神九任务执行情况及主要感受》报告中介绍了飞行期间在太空的工作和生活情况，讲述了飞行总体感受、操作感受、生理与心理感受，并对工程研制及飞行任务管理提出建议。中国卫星导航系统管理办公室蔡兰波副主任专题报告了全球卫星导航系统概况，以及我国北斗卫星导航系统建设及应用基本情况。国防科技大学科研部刘波副校长就国防科技大学重点科研情况进行了专题报告。

会议按总体技术，控制与推进，航天员、环境控制与空间应用，测控与通信，材料与结构，电子与电气等 6 个专题，进行了约 100 篇入选论文的学术交流。

中国科学院空间应用工程与技术中心，中国航天员科研训练中心，中国运载火箭技术研究院，中国空间技术研究院，中原电子技术研究所参与协办本届大会。会议共收到征文 266 篇，入选论文集文章 150 篇，部分入选论文将在《载人航天》期刊陆续发表。

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>