

星载 SAR 卫星天线扰动对波束中心指向的影响

张卫杰¹, 董涛¹, 温俊峰²

(1. 北京理工大学信息科学技术学院电子工程系 北京 100081 2. 广州 76321 部队 广东 广州 510500)

摘要 天线波束中心指向稳定度是星载合成孔径雷达(SAR)天线的一个重要指标。影响天线波束中心指向稳定度的因素很多。该文以星载合成孔径雷达等间距均匀分布平面相控阵天线为分析对象,通过建立天线振动模型,分成多个阵元位移、天线阵面偏移、天线阵面振动等三种典型情况,对卫星天线在外力扰动情况下的天线方向图和回波相位变化情况进行分析,推导卫星天线稳定性对天线波束中心指向稳定度的影响,并进行了仿真,简要讨论了天线波束中心指向变化对SAR成像的影响。

关键词 星载合成孔径雷达 天线波束中心指向 天线波束中心指向稳定度

中图分类号 TN820.13 文献标识码 A

Study on SAR Satellite Beam Directivity of Antenna Jitter

ZHANG Wei-jie¹, DONG Tao¹, WEN Jun-feng²

(1. Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 China; 2. Army 76321, Guangzhou Guangdong 510500 China)

ABSTRACT As an important parameter of spaceborne SAR antenna, the antenna beam directivity stability is affected by many factors. The purpose of this paper is to build the antenna vibration models of the equal-step, uniform-distribution planar phased array antenna, and analyze the changes of the antenna pattern and echo phase based on three typical jitters: multi-elements displacement, antenna array slopping, antenna array vibration. At the same time, the movement of the antenna beam directivity, caused by satellite antenna stability, is researched and simulated. And the influence of the antenna beam directivity on SAR image qualities is discussed briefly.

KEYWORDS Spaceborne SAR; Antenna beam directivity; Beam directivity stability

1 引言

天线波束中心指向是星载合成孔径雷达天线的一个重要概念,是指卫星天线波束的电轴与规定方向之间的夹角。影响天线波束中心指向稳定度的因素很多,包括:卫星平台的稳定性,卫星天线稳定性,以及天线通道的幅相一致性、互耦等。其中,文献[1]从姿态指向稳定度出发分析了卫星平台稳定性对天线波束中心指向稳定度的影响。此外,影响卫星天线稳定性的主要因素还有:天线机械振动,由于引力场变化、温差等原因引起天线阵列变形,阵列天线单元安装位置误差,飞行不稳定等。所有外部因素的影响都通过天线方向图的变化反映到回波信号中。本文以SAR等间距均匀分布平面相控阵天线为分析对象,建立天线形变的几种典型模型,从天线方向图和回波相位分析了卫星天线稳定性对天线波束中心指向稳定度的影响,并进行了仿真,并简要分析了天线扰动对成像的影响。

2 SAR 平面相控阵天线阵面振动模型的建立

2.1 SAR 平面相控阵天线模型的建立^{[2][3]}

对于平面相控阵天线,当天线单元在矩形平面内等间距均匀分布,共有 $(2M+1) \times (2N+1)$ 个天线单元,单元之间的间距沿x轴方向为 dx ,沿y轴方向为 dy ,天线阵列的主波束扫描方向为 (θ_0, φ_0) ,选择天线坐标系如图1所示,阵面位于 xy 平面内,其中x指向卫星飞行方向。设第 (m, n) 个天线单元的位置矢量为

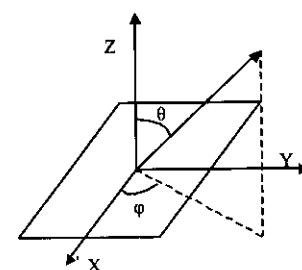


图1 天线坐标系

则该单元的相位激励为

$$\begin{aligned} \Phi_{mn} = -\frac{2\pi}{\lambda} (\vec{r}_{mn} \cdot \hat{R}_0) &= -\frac{2\pi}{\lambda} (mdx \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \\ &+ ndy \sin\theta_0 \sin\varphi_0) \end{aligned} \quad (1)$$

那么 理想等间距均匀分布平面相控阵天线的辐射方向图表示为 :

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [mdx(\sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0) + ndy(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0)]\right\} \quad (2)$$

2.2 SAR 平面相控阵天线扰动模型的建立^[4 15]

当平面相控阵天线发生扰动时 , 单元位置变化 , 则第 (m, n) 个天线单元的位置矢量叠加一个微小的位移

$$\vec{r}_{mn} = \hat{x}(mdx + \Delta x_{mn}) + \hat{y}(ndy + \Delta y_{mn}) + \hat{z}\Delta z_{mn}$$

天线单元电流的相位激励 Φ_i 保持不变 , 若天线阵的远场区

观测点 $P(R, \theta, \varphi)$ 的位置单位矢量用 R 表示

$$R = \hat{x}\sin\theta\cos\varphi + \hat{y}\sin\theta\sin\varphi + \hat{z}\cos\theta$$

则 $\vec{r}_i \cdot R = (mdx + \Delta x_{mn})\sin\theta\cos\varphi + (ndy + \Delta y_{mn})\sin\theta\sin\varphi + \Delta z_{mn}\cos\theta$

天线辐射方向图变为 :

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [(mdx + \Delta x_{mn})\sin\theta\cos\varphi + (ndy + \Delta y_{mn})\sin\theta\sin\varphi - mdx\sin\theta_0\cos\varphi_0 + (ndy + \Delta y_{mn})\sin\theta\sin\varphi - ndy\sin\theta_0\sin\varphi_0 + \Delta z_{mn}\cos\theta]\right\} = \vec{E}_0 + \Delta\vec{E} \quad (3)$$

其中

$$\vec{E}_0 = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [mdx(\sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0) + ndy(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0)]\right\} \quad (4)$$

$$\Delta\vec{E} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta x_{mn}\sin\theta\cos\varphi + \Delta y_{mn}\sin\theta\sin\varphi + \Delta z_{mn}\cos\theta]\right\} \quad (5)$$

\vec{E} 是原天线方向图 $\Delta\vec{E}$ 是各个单元位置变化引起的方向图增量 , 由式(3)可知 : 振动天线的方向图可以分解为理想方向图与天线单元位置变化引起的方向图增量之和 , 天线方向图的变化会导致回波相位变化。这里将平面相控阵天线扰动模型分为多个阵元位移、天线阵面偏移和平面正弦振动三种情况进行讨论。

3 SAR 平面相控阵阵面振动对天线方向图的影响

3.1 多个阵元位移对天线波束中心指向的影响

卫星飞行过程中 , 平面相控阵天线的多个单元都存在一定的随机位置偏差 , 则多个单元位置偏差对天线相位和方向图的影响可以综合为每个天线单元影响的合成。利用式(3)的结论 , 天线的辐射方向图变为 :

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \vec{E}_0 + \Delta\vec{E}$$

其中

$$\vec{E}_0 = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [mdx(\sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0) + ndy(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0)]\right\} \quad (6)$$

$$\Delta\vec{E} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta x_{mn}\sin\theta\cos\varphi + \Delta y_{mn}\sin\theta\sin\varphi + \Delta z_{mn}\cos\theta]\right\} \quad (7)$$

\vec{E}_0 是原来的方向图 $\Delta\vec{E}$ 是多个单元位置变化引起的方向图增量的合成。仿真结果如图 2 所示 , 多个单元位置偏差将引起天线波束中心指向的偏差 , 旁瓣升高 (实线为理想天线方向图 , 虚线为单元位置偏差的天线方向图)。

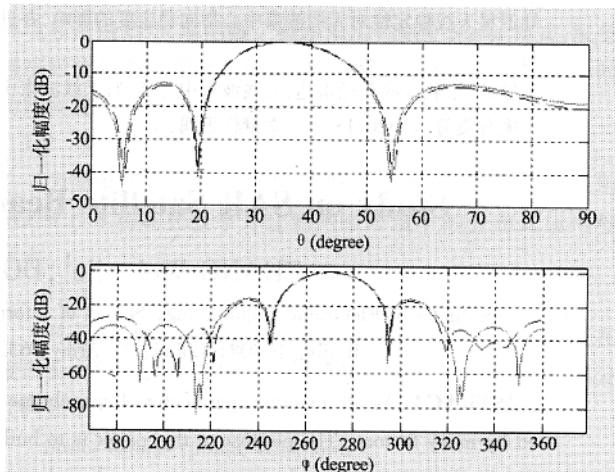


图 2 多个阵元 (7×7) 仿移对天线方向图的影响

假设天线单元均匀激励 , 各向辐射同性 , 则各个阵元相位变化为

$$\Delta\Phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta x_{mn}\sin\theta\cos\varphi + \Delta y_{mn}\sin\theta\sin\varphi + \Delta z_{mn}\cos\theta) \quad (8)$$

当位置偏移量相对固定和波束指向固定时 , 式(8)表示一个固定的相位变化 , 相当于对回波幅度调制。

3.2 天线阵面偏移对天线波束中心指向的影响

当卫星保持正常运动 , 天线阵面由于安装误差、运载火箭振动或者天线展开产生一个固定的定位误差 , 使平面以支撑点为中心产生一个固定的微小的偏角 , 这种情况将直接导致天线方向图发生偏离。

当天线阵面存在 $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ 的微小偏角 , 天线方向图不会发生改变 , 但是天线波束中心会指向 $(\theta_0 + \Delta\theta, \varphi_0 + \Delta\varphi)$, 即需要对理想天线方向图的波束中心做一个角度旋转 , 乘上一个旋转矩阵。

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \vec{E}_0 \cdot M$$

\vec{E}_0 为理想天线方向图 , M 为旋转矩阵。文献 [3] 对此作了详细论述。仿真结果参见图 3。

3.3 天线阵面振动对天线波束中心指向的影响

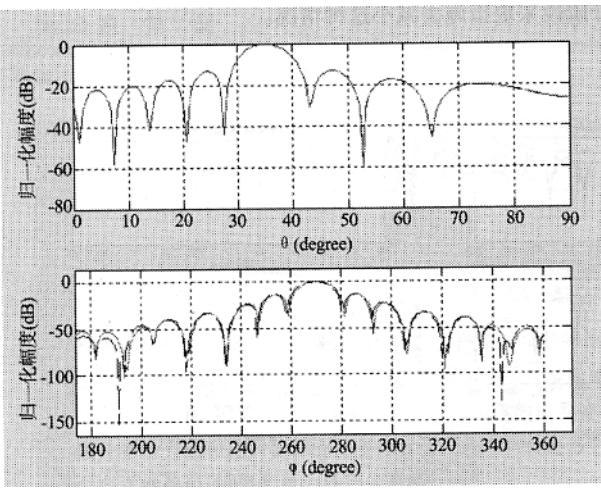


图3 阵面倾斜对天线方向图的影响(7×7)

卫星飞行过程中,由于热效应以及引力场等因素的影响或者卫星平台振动,天线阵面围绕天线坐标系三个轴产生振动。假设振动满足正弦规律,振动角度为 $\Delta\theta = \theta_m \sin(2\pi ft + \varphi_0)$,其中f为振动频率, θ_m 为振动幅度, φ_0 为振动初始相位角。按照天线绕X轴、Y轴和Z轴三种不同的情况进行分析。

1) 天线绕X轴振动。天线阵面各个单元的位移为:

$$\vec{r}_{mn} = \hat{x} \cdot mx + \hat{y} \cdot ny + \hat{z} \cdot mz \cdot \cos\Delta\theta$$

天线单元的相位激励不变,则

$$\vec{r}_i \cdot \vec{R} = mx \cdot \sin\theta \cos\varphi + ny \cdot \cos\Delta\theta \cdot \sin\theta \sin\varphi + mz \cdot \sin\Delta\theta \cdot \cos\theta$$

由此该天线的辐射方向图变为:

$$\vec{E} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} [mx \cdot \sin\theta \cos\varphi - mz \cdot \sin\theta \cos\varphi_0 + ny \cdot \cos\Delta\theta \cdot \sin\theta \sin\varphi + mz \cdot \sin\Delta\theta \cdot \cos\theta] \right\} \quad (9)$$

假设天线单元均匀激励,各向辐射同性,则各个阵元相位为

$$\Phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} [mx \cdot \sin\theta \cos\varphi - mz \cdot \sin\theta \cos\varphi_0 + ny \cdot \cos\Delta\theta \cdot \sin\theta \sin\varphi]$$

对上式进行分析可以得出,由于 $\Delta\theta = \theta_m \sin(2\pi ft + \varphi_0)$,第二项对天线方向图的相位进行了调制,直接影响水平方向的波束,而第三项则对幅度进行了调制,改变阵元辐射的能量。

2) 天线绕Y轴振动。天线阵面各个单元的位移为:

$$\vec{r}_{mn} = \hat{x} \cdot mx + \hat{y} \cdot ny + \hat{z} \cdot mz \cdot \sin\Delta\theta$$

则该天线的辐射方向图变为:

$$\vec{E} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} [mx \cdot \cos\Delta\theta \cdot \sin\theta \cos\varphi - mz \cdot \sin\Delta\theta \cdot \sin\theta \cos\varphi_0 + ny \cdot \sin\theta \sin\varphi] \right\} \quad (10)$$

分析式(10)可知,第一项对天线方向图的相位进行了调制,直接影响垂直方向的波束,第三项对幅度进行了调制,使每个阵元辐射的能量发生变化。

3) 天线绕Z轴振动。天线阵面各个单元的位移为:

$$\vec{r}_{mn} = \hat{x} \cdot r \cdot \cos\Delta\theta + \hat{y} \cdot r \cdot \sin\Delta\theta$$

其中 $\Delta\theta$ 为振动天线的X轴方向与理想天线X轴方向的夹角 $r = \sqrt{(mx)^2 + (ny)^2}$ 则该天线的辐射方向图变为:

$$\vec{E} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N I_{mn} \vec{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} [r \cdot \cos\Delta\theta \cdot \sin\theta \cos\varphi - mx \sin\theta \cos\varphi_0 + (r \cdot \sin\Delta\theta \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi - ny \sin\theta \sin\varphi_0)] \right\} \quad (11)$$

对式(11)的相位分析,振动只对天线方向图的相位进行了调制,直接影响垂直和水平方向的波束,而没有影响幅度,因此阵元辐射能量不变。

在图4中仿真了同一时刻($t = 0.01s$)振动频率为6Hz、60Hz和110Hz时的天线方向图,可以看出阵面振动频率直接影响天线波束指向、能量以及旁瓣在空间的分布。

4 天线扰动对成像质量的影响

在星载SAR平台运动中,天线的扰动直接导致天线方向图的变化,使波束中心指向偏离理想方向,同时影响副瓣的空间分布,造成副瓣的升高,降低系统输入的信杂比。

当阵元发生缓慢位移或者天线阵面存在固定的偏移角时,由此带来固定的相位变化,波束中心偏离一个固定偏角。引用文献[7]的结论,当偏角和相位变化比较小的时候,不会影响成像质量,但是影响定位和回波增益。对于星载SAR系统,把该误差作为固定的系统误差,可以通过辐射定标测定波束中心偏角和电流激励相位补偿,或者采用数字波束形成技术减小或者消除。

当天线阵面发生振动时,天线方向图的相位受到振动频率的调制,使回波幅度和相位畸变。利用成对回波理论分析,假设SAR信号处理器为理想系统,当畸变信号通过时,系统输出除了无畸变的主波之外,还将产生一对形状与主波相似,幅度与主波成线性关系,且位置关于主波中心对称的成对回波,对于SAR成像处理,将造成假目标,需要提高星载SAR平台控制的精度和稳定性,并优化天线材料和结构设计。

5 结论

当天线多个阵元偏离理想位置且位移较小时,基本不会干扰波束中心指向,但是影响天线功率和副瓣位置,以及主瓣宽度。天线阵面发生倾斜时,将导致波束指向偏离理想方向,同时影响副瓣的空间分布。上述两种情况使回波幅度引入一个相对固定的相位误差,直接影响SAR成像的能量分布,可以通过测量并作为系统误差进行补偿和消除。而天线阵面的振动除了影响主瓣宽度和副瓣位置之外,还使波束中

心指向产生波动,回波的幅度和相位受到调制,造成 SAR 处理系统输出的成对回波,使成像出现假目标,需要在系统设计阶段采取措施去减小这种情况。

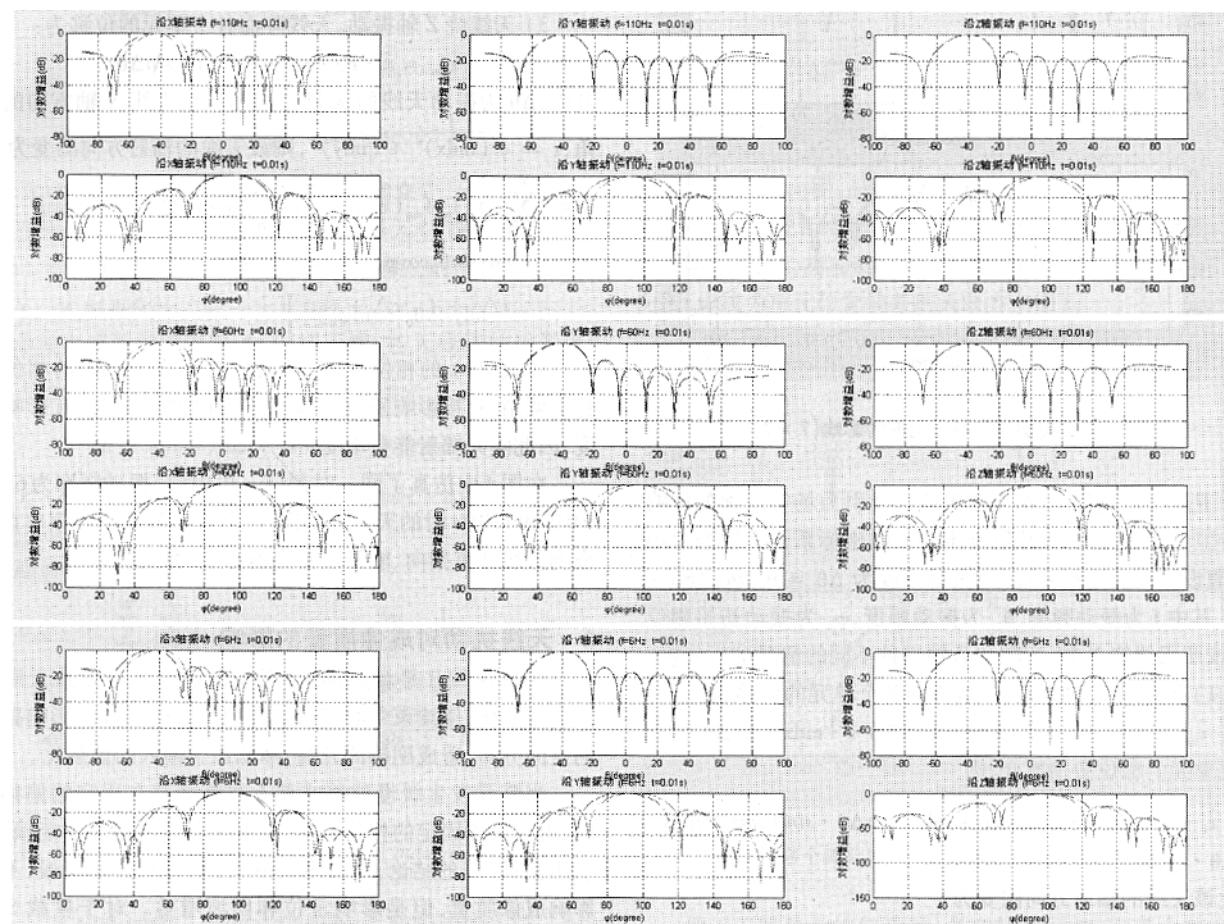


图 4 7×7 阵元阵面振动对天线方向图影响($dx = dy = 0.6\lambda$)

参考文献 :

- [1] 陈杰,周荫清等.合成孔径雷达卫星姿态指向稳定度与图像质量关系的研究[J].电子学报,2001,29(12A):1785—1789.
- [2] R C Hansen. Microwave scanning antennas[M]. Los Altos : Peninsula Pub. 1985.
- [3] 汪茂光,吕善伟,刘瑞祥.阵列天线分析与综合[M].电子科技大学出版社,1989.
- [4] Zhu Huan. 超低副瓣天线技术研究[D].北京:北京理工大学电子工程系,2000.
- [5] 汪一心.超低副瓣天线误差理论与分析[D].北京:北京理工大学电子工程系,1999.
- [6] 张澄波.综合孔径雷达—原理、系统分析与应用[M].北京:科学出版社,1989.

[7] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

【作者简介】



张卫杰(1971.8—),男(汉族),河北人,博士研究生,主要研究方向为星载合成孔径雷达回波信号实时成像处理,快视成像算法以及SAR图像后处理。

董涛(1975.11—),男(汉族),陕西人,博士研究生,主要研究方向为反射面天线的毁伤效应、超低副瓣相控阵天线以及遗传算法在天线阵优化设计中的应用。

温俊峰(1971.10—),男(汉族),广东人,技术工程师,主要研究方向为战术导弹、雷达检测与维修。

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>