

天线波束指向控制对 TOPSAR 成像质量的影响

吴 越, 李春升, 王鹏波, 陈 杰

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要:星载 TOPSAR 模式天线波束指向控制对其成像质量有重要影响。基于成对回波原理, 分析了星载 TOPSAR 模式波束指向控制对方位向信号的调制规律, 建立了星载 TOPSAR 模式方位向波束指向步进控制的数学模型, 并利用傅里叶级数展开给出了波束步进控制下的天线方向图表达式, 最终推导出了方位向成对回波的幅度和位置的表达式, 定量描述了波束指向步进控制与成对回波幅度和位置之间的联系, 为星载 TOPSAR 模式波束指向步进控制指标的合理设计奠定了基础。最后, 计算机仿真表明了理论分析结果的正确性。

关键词:合成孔径雷达; TOPSAR 模式; 波束指向控制; 成对回波

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2012)04-0487-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2012.04.011

Effects of Antenna Beam Steering on TOPSAR Imaging Quality

WU Yue, LI Chun-sheng, WANG Peng-bo, CHEN Jie

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The step-by-step steering of antenna beam for spaceborne TOPSAR (Terrain Observation by Progressive Scan SAR) mode has significant impacts on image quality. The modulation law of spaceborne TOPSAR mode beam steering for azimuth signal is analyzed, and a mathematical model of azimuth beam step-by-step steering is implemented. Besides, based on the theory of paired echoes, the formulas of the amplitude and position of azimuth paired echoes are derived. The relationship between beam stepped steering and both amplitude and position of paired echoes is quantitatively described. Finally, the computer simulation is used to verify the validity of theoretical analysis.

Key words: Synthetic aperture radar (SAR); TOPSAR mode; Beam steering; Paired echoes

0 引 言

星载 TOPSAR (Terrain Observation by Progressive Scan SAR) 工作模式是近几年提出的一种新的宽测绘带成像模式^[1]。TOPSAR 工作模式的概念最早由 Zan 提出, 它通过方位向波束扫描, 处于方位向不同位置的目标受到相同的方位向天线方向图调制, 因此与传统宽测绘带扫描成像模式相比, TOPSAR 工作模式在相同测绘带条件下, 缓解了模糊度、等效噪声系数方位向空变现象。通过 TerraSAR-X 实际处理数据对比可知, TOPSAR 模式下获取的图像辐射质量明显提高, 基本没有 Scalloping 效应, 不需要校

正处理。此外, 欧空局 (ESA) 新一代星载 SAR 系统 Sentinel-1 将把 TOPSAR 模式作为主要宽测绘干涉模式^[1-3]。

星载 TOPSAR 模式的实现依赖于方位向波束的扫描, 但实际中方位向波束不可能连续控制, 通常都采用步进控制的方式实现^[4]。这种步进控制的方式改变了方位向天线方向图对目标的调制方式, 导致成对回波出现。文献[4]对这种现象进行了分析, 但仅限于指出这种现象可能会引入成对回波, 并未深入定量分析成对回波幅度和位置与步进控制规律的关系。文献[5]对星载聚束模式的天线指向步进控制模型进行了分析, 但是 TOPSAR 模式和聚束

模式有很大的差异,建模分析非常不同。

本文深入分析了星载 TOPSAR 模式下方位向波束控制的规律,建立了波束步进控制规律的数学模型,定量地描述方位向步进控制与成对回波幅度和位置的关系,并通过计算机仿真表明了分析的正确性,为星载 TOPSAR 模式总体设计中波束指向步进控制指标的合理设计提供了理论依据。

1 天线波束指向控制的数学模型

星载 TOPSAR 模式近似于有一个位于卫星上方的等效旋转点,雷达波束以这个等效旋转点为旋转中心,进行转动照射。考虑到发射接收的双程效应,实际中天线方向图采用 sinc^2 函数进行方位向天线加权^[1-5]:

$$G_a(\Psi(\tau)) \approx G_0 \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda} \Psi\right) = G_0 \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda} \frac{v_s \tau}{R_0}\right) \quad (1)$$

式中 G_0 为常量, Ψ 为方位向天线转动角度, λ 为波长, L 为方位向天线长度, v_s 为卫星等效速度的大小, τ 为方位向时间, R_0 为卫星与地面目标的斜距。

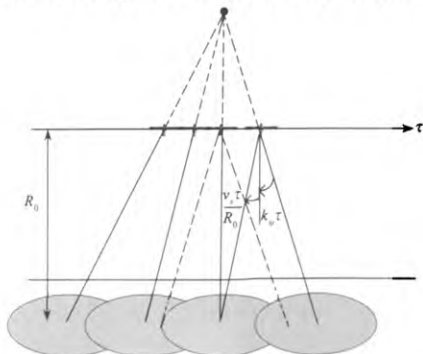


图 1 理想连续波控状态下的 TOPSAR 扫描模式图

Fig. 1 TOPSAR acquisition geometry with ideal continuous beam steering

由图 1 的扫描过程可以看出,在 TOPSAR 中,由扫描带来的角度变化为:

$$\psi_{dc} = |k_\psi| \tau \quad (2)$$

式中 k_ψ 为波束旋转角速度,则该工作模式下的天线方向图表达式为:

$$\begin{aligned} W_0(\tau) &\approx G_0 \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda} \left(\frac{v_s \tau}{R_0} + |k_\psi| \tau\right)\right) \\ &= G_0 \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda} \frac{v_s \tau}{R_0} \left(1 + \frac{R_0 |k_\psi|}{v_s}\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

星载 TOPSAR 模式实际工作中,采用步进的波束控制方式实现方位向天线波束变化,如图 2 所示。则实际 TOPSAR 的天线方向图表达式为:

$$\begin{aligned} W(\tau) &\approx \sum_{m=0}^{M-1} G_0 \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda} \left(\frac{v_s \tau}{R_0} + |k_\psi| (mT_N)\right)\right) \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} G_0 \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda} \left(\frac{v_s}{R_0} + |k_\psi|\right) \left(\tau + \frac{|k_\psi| (mT_N - \tau)}{\frac{v_s}{R_0} + |k_\psi|}\right)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 M 为角度量化后存储角度值的阶数, T_N 为量化时长, $T_N = \frac{T_s}{M-1}$, T_s 为平台积累时间。

和聚束模式波束步进控制状态下天线方向图不同,由于 $mT_N - \tau$ 项的影响,式(4)不是周期性函数,而是非周期不连续的分段函数。函数 $f(\tau) = mT_N - \tau$ 相当于把周期为 T_N 的函数 $f'(\tau) = \begin{cases} -\tau, \tau \in (0, T_N] \\ -T_N, \tau = 0 \end{cases}$ 进行傅立叶级数展开,如图 2 所示,可得:

$$\begin{aligned} f(\tau) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2\pi n \tau}{T_N} + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n \tau}{T_N} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_0 &= -T_N \\ a_n &= 0 \\ b_n &= \frac{T_N}{n\pi} \end{aligned}$$

则实现波束量化后的 TOPSAR 天线方向图表达式为:

$$\begin{aligned} W(\tau) &= G_0 \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda} \left(\frac{v_s}{R_0} + |k_\psi|\right) \left(\tau + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. p \cdot \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n \tau}{T_N}\right)\right)\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $p = \frac{|k_\psi|}{\frac{v_s}{R_0} + |k_\psi|}$ 。

2 天线波束指向控制对成像的影响

TOPSAR 模式的回波信号在方位向具有线性调频特性,将多普勒频谱进行多普勒中心频率平移后,理想情况下(即天线波束角连续平滑变化)点目标

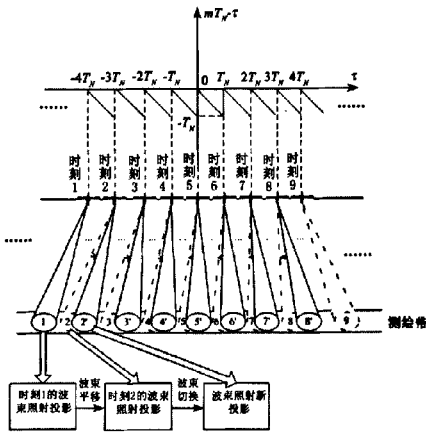


图2 步进波束状态下的 TOPSAR 扫描模式图

Fig.2 TOPSAR acquisition geometry with beam stepped steering

方位向回波信号可简化为^[5,7-10]:

$$s_i(t) = W_0(t) e^{-j\pi f_r t^2} \quad (7)$$

其中 f_r 为多普勒调频率, 通过匹配滤波器 $h(t) = e^{-j\pi f_r t^2}$, 输出为:

$$s_o(t) = e^{j\pi f_r t^2} \int_{-\infty}^{\infty} W_0(\tau) e^{-j2\pi f_r \tau t} d\tau \quad (8)$$

考虑波束步进控制的影响, 对回波信号 $s_i(t)$ 仍用匹配滤波器 $h(t)$ 进行处理, 点目标冲激响应 $s'_o(t)$ 为

$$s'_o(t) = e^{j\pi f_r t^2} \int_{-\infty}^{\infty} W(\tau) e^{-j2\pi f_r \tau t} d\tau \quad (9)$$

因为 $\tau + q \gg p(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n \tau}{T_N})$, 令 $q = p \cdot \frac{a_0}{2}$,

则对 $W(\tau)$ 进行 1 阶泰勒级数展开得:

$$W(\tau) = W_0(\tau + q) + W'_0(\tau + q) \cdot p(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n \tau}{T_N}) \quad (10)$$

可以得到 $s'_o(t)$ 的近似解析表达式为:

$$\begin{aligned} s'_o(t) &= e^{j\pi f_r t^2} \int_{-\infty}^{\infty} [W_0(\tau + q) + W'_0(\tau + q) \cdot p(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n \tau}{T_N})] \cdot e^{-j2\pi f_r \tau t} d\tau \\ &= s_o(t) \cdot e^{j2\pi f_r q t} - [(p - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_r T_N t p}{n}) s_o(t - \frac{n}{f_r T_N}) \cdot e^{-j\frac{2\pi n}{T_N}} \cdot e^{j2\pi f_r q t} \cdot e^{-j\pi f_r (\frac{n^2}{f_r^2 T_N^2} - \frac{2n}{f_r T_N})} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(p + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_r T_N t p}{n}) s_o(t + \frac{n}{f_r T_N}) \cdot e^{\frac{2\pi n}{T_N}} \cdot e^{j2\pi f_r q t} \cdot e^{-j\pi f_r (\frac{n^2}{f_r^2 T_N^2} - \frac{2n}{f_r T_N})} \end{aligned} \quad (11)$$

其中成对回波表达式为:

$$\begin{aligned} s_{\omega_0}(t) &= (p - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_r T_N t p}{n}) s_o(t - \frac{n}{f_r T_N}) \cdot e^{-j\frac{2\pi n}{T_N}} \cdot e^{j2\pi f_r q t} \cdot e^{-j\pi f_r (\frac{n^2}{f_r^2 T_N^2} - \frac{2n}{f_r T_N})} + \\ &(p + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_r T_N t p}{n}) s_o(t + \frac{n}{f_r T_N}) \cdot e^{\frac{2\pi n}{T_N}} \cdot e^{j2\pi f_r q t} \cdot e^{-j\pi f_r (\frac{n^2}{f_r^2 T_N^2} - \frac{2n}{f_r T_N})} \end{aligned} \quad (12)$$

由于天线波束指向步进控制, 无穷多对成对回

波出现在主回波的两侧, 在 $t = \pm \frac{n}{f_r T_N}$ 附近, 成对回

波幅度为 $(p - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_r T_N t p}{n}) s_o(t - \frac{n}{f_r T_N})$ 和 $(p + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_r T_N t p}{n}) s_o(t + \frac{n}{f_r T_N})$ 。由式(10)可知, 主回波两旁的

成对回波为双峰波, $s_{\omega_0}(t)$ 的峰值出现在 t_0 处:

$$t_0 = \pm \frac{1}{f_r T_N} \pm \frac{L}{2\lambda f_r} (\frac{v_i}{R_0} + |k_\psi|) \quad (13)$$

$s_{\omega_0}(t)$ 峰值与 $s_o(t)$ 的峰值的幅度比值为

$$K_{mr} = \frac{L p T_N}{4\lambda} (\frac{v_i}{R_0} + |k_\psi|) \quad (14)$$

与文献[7]中成对回波的位置和幅度的表达式相比, 式(13)、(14)反映出波束旋转角速度对位置和幅度的影响。同时由式(13)、(14)可知, T_N 影响成对回波的位置和峰值幅度, T_N 越大, 成对回波越靠近主回波, 且幅度越大。

$s_{\omega_0}(t)$ 对 $s'_o(t)$ 的影响比较复杂, t_0 不同, $s_{\omega_0}(t)$ 的峰值位置不同, 当 $|t_0|$ 小于 $s_o(t)$ 主瓣宽度时, $s_{\omega_0}(t)$ 的峰值落在 $s_o(t)$ 的主瓣内, 会减小积分旁瓣比并有可能影响分辨率。当 $|t_0|$ 大于 $s_o(t)$ 主瓣宽度时, $s_{\omega_0}(t)$ 的峰值落在 $s_o(t)$ 的旁瓣内, 不仅增加积分旁瓣比, 而且当 K_{mr} 高于 $s_o(t)$ 的峰值旁瓣, 或 t_0 与 $s_o(t)$ 的峰值旁瓣位置重合时, 会增加峰值旁瓣比。一般要求成对回波最大峰值 K_{mr} 满足^[7]:

$$K_{mr} < 10^{\frac{\text{PSLR}'}{20}} - 10^{\frac{\text{PSLR}}{20}} \quad (15)$$

式中 PSLR' 为 $s'_o(t)$ 要求的峰值旁瓣比, PSLR 为 $s_o(t)$ 的峰值旁瓣比。

归一化的成对回波均方值 K_r 可以近似看作是

主回波的积分旁瓣比,考虑到主回波旁瓣的影响, K_i 应满足^[5]:

$$K_i < 10^{\frac{\text{ISLR}'}{20}} - 10^{\frac{\text{ISLR}}{20}} \quad (16)$$

其中,ISLR'为 $s_0(t)$ 要求的积分旁瓣比,ISLR为 $s_0(t)$ 的积分旁瓣比。

3 计算机仿真

为了验证本文算法的正确性,进行了星载 TOPSAR 模式点目标仿真,具体仿真参数见表 1。

表 1 仿真设定参数

Table 1 Simulation parameters

参数	参数值
波长/m	0.056
方位向天线长度/m	10
点目标与卫星距离/km	700
中心视角/(°)	30
信号带宽/MHz	10
信号采样率/MHz	13
PRF/Hz	2000
方位分辨率/m	20
旋转角速度/(°/s)	1.71

图 3 为点目标在理想连续波控状态下和波控时间间隔为 $T_N = 0.015\text{s}$ 和 $T_N = 0.03\text{s}$ 的步进控制状态下的天线方向图对比图,可以看出在波束步进控制条件下天线方向图开始弯曲变形,而且随着步进控制时间间隔的增大,天线方向图变形程度也越厉害。

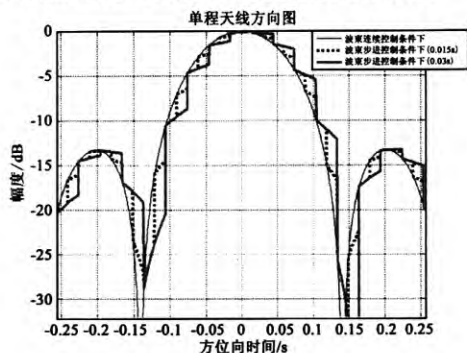


图 3 波束步进控制对 TOPSAR 模式方位向天线图的影响

Fig. 3 The relationship between beam stepped steering and azimuth signal envelope of TOPSAR mode

图 4 为在波控时间间隔为 $T_N = 0.015\text{s}$ 和 $T_N = 0.03\text{s}$ 时的步进控制状态下的脉冲压缩结果,图中出

现了明显的成对回波现象,成对回波出现在主回波两边 $\pm n/(f_r T_N)$ 处,可以看出压缩结果中的成对回波的位置和波控时间间隔长度成反比,随着波控时间的增加而更靠近主回波,并且幅度也随之增大。

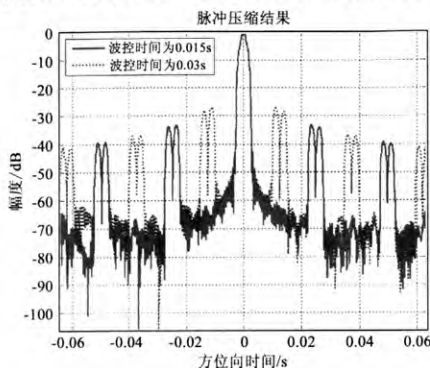


图 4 不同波控时间下的脉冲压缩结果

Fig. 4 The pulse compression results with different stepped steering time

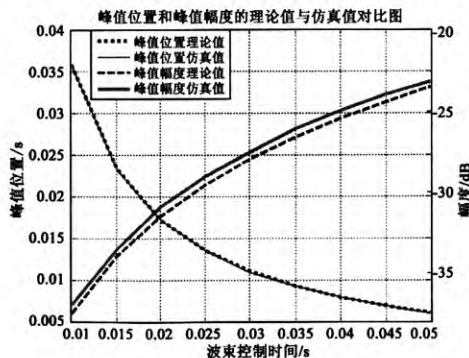


图 5 理论与仿真值的对比图

Fig. 5 The comparison between simulation values and theoretical values

图 5 给出了依据本文算法得到的成对回波峰值位置及幅度的理论值和由仿真得到的仿真值的对比曲线图,可以看出理论值与仿真值可以很好地吻合。其中峰值幅度理论值和仿真值有较小偏差,这和前面泰勒级数展开中高次项的忽略有关。理论值与仿真值的对比表明了本文算法的有效性。图 6 为不同波束指向控制时间间隔 T_N 的条件下峰值旁瓣比和积分旁瓣比的变化图。可以看出由成对回波造成的峰值旁瓣比和积分旁瓣比随 T_N 的增大而增大,即波束指向控制时间间隔越长,系统越容易实现,但成

对回波的影响也同时增大;反之, T_N 越小,成对回波的影响也越小,但对系统复杂度提出更高要求。

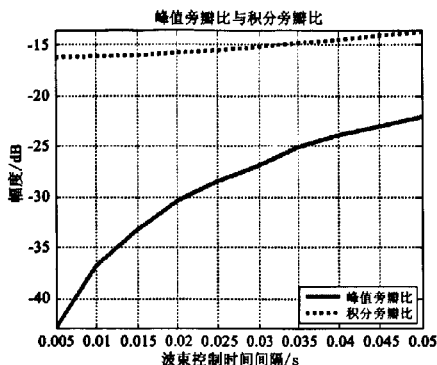


图6 波束控制时间与峰值旁瓣比和积分旁瓣比的关系

Fig. 6 The relationship between stepped steering time peak sidelobe ratio and integral sidelobe ratio

4 结 论

本文基于 TOPSAR 模式波束指向步进控制数学模型和成对回波理论,提出了一种可定量描述 TOPSAR 模式波束步进控制和成对回波的位置和幅度之间关系的新算法。算法的创新在于首次给出 TOPSAR 模式波束指向步进控制数学模型,并将傅里叶级数展开方法应用于该模型,该应用将 TOPSAR 模式在波束步进控制条件下的方位向天线图由非周期的分段函数近似为由三角函数表示的周期函数,为后面匹配滤波做好准备。这种算法思想同样适用于滑动聚焦模式下波束指向建模。最后计算机仿真试验表明了本文算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Zan F D, Guarnieri A M. TOPSAR: terrain observation by progressive scans[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2352-2360.
- [2] Moore R K, Claassen J P, Lin Y H. Scanning spaceborne synthetic aperture radar with integrated radiometer[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981, 17(3): 410-420.
- [3] Bai X, Sun J P, Hong W, et al. On the TOPS mode spaceborne SAR[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2010, 50(2): 367-378.
- [4] Meta A, Mittermayer J, Prats P, et al. TOPS imaging with terraSAR-X: mode design and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 759-769.
- [5] 王国栋,周荫清,李春升. 星载聚束式 SAR 天线波束指向控制分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(6): 484-488. [Wang Guo-dong, Zhou Yin-qing, Li Chun-sheng. Analysis of spaceborne spotlight SAR antenna beam point steering[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(6): 484-488.]
- [6] Meta A, Prats P, Steinbrecher U, et al. TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison[C]. The 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, June 2-5, 2008.
- [7] 黄岩,李春升,陈杰,等. 星载 SAR 天线指向稳定度对成像质量的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(3): 282-285. [Huang Yan, Li Chun-sheng, Chen Jie, et al. Effects of stability of antenna pointing on spaceborne SAR imaging quality[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(3): 282-285.]
- [8] 王鹏波,周荫清,陈杰,等. 天线指向抖动对聚束 SAR 成像质量的影响[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(5): 293-296. [Wang Peng-bo, Zhou Yin-qing, Chen Jie, et al. Effect of satellite attitude jitter on spotlight SAR imaging quality[J]. Radar Science and Technology, 2006, 4(5): 293-296.]
- [9] 陈杰,周荫清,李春升. 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(12): 1785-1789. [Chen Jie, Zhou Yin-qing, Li Chun-sheng. On the relationship between satellite attitude stability and spaceborne SAR imaging qualities[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1785-1789.]
- [10] 陈杰,周荫清,李春升,等. 卫星姿态指向抖动与 SAR 成像质量关系研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 518-521. [Chen Jie, Zhou Yin-qing, Li Chun-sheng, et al. Relationship between satellite attitude jitter and SAR imaging quality[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(5): 518-521.]

作者简介:吴越(1988-),女,硕士,主要从事信号与信息处理方向的课题研究。

通信地址:北京航空航天大学电子信息工程学院 201 教研室 (100191)

电话:(010)82338154

E-mail:wuyue003@yahoo.com.cn

(编辑:余 未)

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)，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>