

动中通多子阵天线自适应 PID 滑模稳定控制

赵 鹏， 姚敏立， 胡友涛， 范金锁
(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘要：动中通在载体运动中进行卫星通信时, 天线受到各类扰动的影响而不能准确对准卫星, 降低了通信质量。为了解决此问题, 设计了一种自适应滑模天线姿态稳定控制器。首先建立了动中通天线系统的动力学模型; 基于此模型, 采用 PID 滑模面设计了天线的滑模姿态控制器; 通过对扰动的自适应估计, 在扰动上界未知情况下获得了平滑的滑模控制输入; 将 PID 方法引入控制器设计, 提高了系统的动态响应速度。仿真结果表明, 所设计控制器具有良好的动态响应特性和控制精度, 且控制电压输出无抖振。

关键词：动中通天线; 稳定控制; PID 滑模面; 自适应滑模

中图分类号: V271.4; TP273 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2012)03-0056-04

Stabilization Control for SOTM Antenna Based on Adaptive PID Sliding Mode

ZHAO Peng, YAO Minli, HU Youtao, FAN Jinsuo
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: During the satellite communication process, the attitude of Satcom On-The-Move (SOTM) antenna is seriously affected by disturbances with unknown bound, which may cause degradation of communication. In order to enhance the antenna performance, an adaptive sliding mode stabilization controller for SOTM antenna attitude was proposed. First, a dynamical model of SOTM antenna system was established. Then, an antenna attitude controller was designed based on the PID sliding mode surface. The adaptive estimator of disturbances was introduced into the controller to overcome the chattering of control outputs, and the PID method was also adopted to improve the dynamical characters of the control system. Simulation results show that, the proposed controller has fine performances on both the dynamical responses and control accuracy, and the control voltage is obtained smoothly.

Key words: SOTM antenna; stabilization control; PID sliding mode surface; adaptive sliding mode

0 引言

动中通(Satcom On-The-Move, SOTM)是一种新兴的移动卫星通信终端设备^[1-2], 集成于汽车、舰船或飞机等移动载体上, 以地球同步卫星作为通信中继, 实现载体在运动过程中与地面或空中某指定位置的双向宽带卫星通信, 是未来军事斗争的重要通信手段之一^[3]。

为了保证通信链路畅通, SOTM 天线需要实时跟踪和对准卫星。但是, 当载体运动时(特别是在山地、戈壁等复杂恶劣路况行驶时), SOTM 天线系统受到载

体角速度、系统内部摩擦和传动滞后等引起的严重扰动, 使得天线无法对准卫星。这类扰动无法用模型精确描述, 具有不确定、非线性和不匹配的特点。为了隔离扰动对通信的影响, 必须对 SOTM 天线进行姿态稳定控制。目前, SOTM 天线姿态控制主要采用 PID 方法^[4-5]。PID 控制器具有结构简单、易于设计和动态响应好的优点, 但是由于其抗扰动能力较差, 且不具有参数鲁棒性, 难以满足高性能控制要求, 严重制约了 SOTM 的推广应用。

作为一类非线性控制方法, 滑模控制对系统的不确定扰动具有强鲁棒性^[6], 因此被广泛应用于解决飞行器^[7-8]、导弹^[9]等各类控制问题。但是, 滑模控制器的设计需要已知系统的扰动上界^[6], 而实际情况下扰动的上界难以准确获知, 给控制器的工程应用带来困

收稿日期: 2011-07-29 修回日期: 2011-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61179004, 61179005)

作者简介: 赵 鹏(1983—), 男, 山西平遥人, 博士生, 研究方向为非线性系统与控制、移动卫星通信的测控技术。

难。另外,为了确保滑模鲁棒性,扰动上界参数取值一般比较保守,这使得滑模切换控制输入产生剧烈抖振,因而系统执行机构的损耗严重^[10]。为了同时克服上述两个问题,实现 SOTM 天线系统在复杂扰动下的姿态稳定控制,本文提出了一种基于 PID 滑模面的自适应滑模天线姿态复合控制方法。通过在控制系统中引入 PID 控制律提升了控制过程的动态响应特性;通过在滑模控制器中引入系统扰动的自适应估计和补偿,达到了去除控制输入抖振的目的。

1 系统建模和问题提出

如图 1 所示,多子阵天线动中通系统总体为密闭式结构,各功能模块内置于天线罩内,系统通过底部的减震垫与安装载体的外顶部水平贴合。动中通的天线系统分为多子阵天线和驱动子系统两部分。多子阵天线由顺序排列于方位转盘上的 4 个阶梯状天线子阵组成。采用多子阵天线能够有效降低系统高度,提高载体在限高路段的可通过性。驱动子系统由电机、减速器和连杆等部件组成:方位电机通过驱动方位转盘调整 4 个子阵方位角度,实现天线方位姿态的调节;俯仰电机通过连杆将俯仰驱动力矩分别传递至各天线子阵,实现天线俯仰姿态的调节。

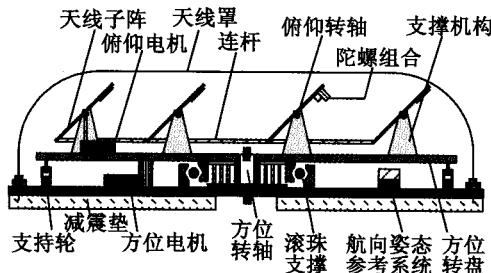


图 1 多子阵天线动中通结构图

Fig. 1 The structure of SOTM with multi-subarray antenna

假设天线质量绕旋转轴对称分布。根据动量矩定理,可得天线系统的力矩平衡方程组为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{M}} = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ \mathbf{M}_{\text{out}} = \mathbf{M} + \mathbf{M}_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M} = [M_F, M_A]^T$ 为驱动子系统的负载力矩,元素下标 F 和 A 分别代表俯仰自由度和方位自由度;天线旋转轴的转动惯量矩阵 $\mathbf{J} = \text{diag}(J_F, J_A)$, J_F 为俯仰转动惯量, J_A 为耦合后的方位转动惯量; $\boldsymbol{\omega} = [\omega_F, \omega_A]^T$ 为天线惯性角速度; $\mathbf{M}_{\text{out}} = [M_{\text{out}F}, M_{\text{out}A}]^T$ 为驱动子系统输出力矩; $\mathbf{M}_d = [M_{df}, M_{da}]^T$ 为天线系统受到的非线性内扰力矩,来源于系统的内部摩擦和传动滞后等,一般连续但不满足匹配条件。

驱动电机电枢回路满足电压平衡条件^[11]。根据减速器调速原理,将驱动子系统的输出力矩折合至电

机输出轴,得到电枢回路电压平衡方程为

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}_M^{-1} \mathbf{M}_{\text{out}} + \mathbf{L}^{-1} \mathbf{C}_M^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{\text{out}} + \mathbf{C}_e(\boldsymbol{\omega} - \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\omega}_B) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U} = [U_F, U_A]^T$ 为电机输入电压; $\mathbf{R} = \text{diag}(R_F, R_A)$ 为电机电枢电阻系数矩阵; $\mathbf{L} = \text{diag}(L_F, L_A)$ 为电机电枢电感系数矩阵; $\mathbf{C}_M = \text{diag}(\mathbf{C}_{MA}, \mathbf{C}_{MF})$ 为电机电磁力矩系数矩阵; $\mathbf{C}_e = \text{diag}(C_{eF}, C_{eA})$ 为电机反电势系数矩阵; $\mathbf{i} = \text{diag}(i_F, i_A)$ 为减速器减速比矩阵; $\boldsymbol{\theta} = [\theta_F, \theta_A]^T$ 为天线角位移; $\boldsymbol{\omega}_B = [\omega_{BX}, \omega_{BY}, \omega_{BZ}]^T$ 为载体惯性角速度。 $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})$ 为载体坐标系到天线坐标系的不完整转换矩阵^[12],表达式为

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \cos \theta_A & \sin \theta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将式(1)带入式(2),整理后得

$$\ddot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{B} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{U} + \mathbf{f} + \mathbf{F} \quad (3)$$

式中:系数矩阵 $\mathbf{B} = \text{diag}(i_F C_{MF} / L_F, i_A C_{MA} / L_A)$; 已知的系统非线性部分 \mathbf{f} 的表达式为 $\mathbf{f} = -\mathbf{L}^{-1} \mathbf{R} \dot{\boldsymbol{\omega}} - \mathbf{L}^{-1} \mathbf{i} \mathbf{C}_M \mathbf{C}_e \cdot \mathbf{J}^{-1} \boldsymbol{\omega}$; 系统不确定部分 \mathbf{F} 的表达式为 $\mathbf{F} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{i} \mathbf{C}_M \mathbf{C}_e \cdot \mathbf{J}^{-1} \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\omega}_B - \mathbf{L}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{M}_d - \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{M}}_d$ 。

式(3)即为动中通天线系统的稳定环路数学模型。本文的控制目标:在存在载体扰动角速度 $\boldsymbol{\omega}_B$ 、内扰力矩 \mathbf{M}_d 和转动惯量耦合的情况下,设计滑模控制器 \mathbf{U} ,实现天线姿态对参考指令的快速跟踪,且控制输入 \mathbf{U} 无抖振。

2 自适应滑模姿态稳定控制器设计

基于上节建立的天线稳定环路数学模型,采用滑模控制方法,设计 SOTM 天线姿态稳定控制器。

定义速度跟踪误差

$$\mathbf{e} = \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_c \quad (4)$$

式中 $\boldsymbol{\omega}_c$ 为跟踪参考信号。

采用如下的 PID 型滑模面^[13]

$$\mathbf{s} = (\frac{d}{dt} + \mathbf{A})^2 (\int_0^t \mathbf{e} dt) = \dot{\mathbf{e}} + 2\mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{A}^2 \int_0^t \mathbf{e} dt \quad (5)$$

式中,系数矩阵 $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$ 为正定矩阵。控制器的设计步骤如下所述。

1) 根据式(3)给出的系统动态来设计等效控制输入 \mathbf{U}_{eq} 。当系统状态满足滑动条件,在滑模面 \mathbf{s} 上滑动时,系统满足 $\dot{\mathbf{s}} = 0$ 。对式(5)求导,并将式(4)代入,得

$$\ddot{\boldsymbol{\omega}} - \ddot{\boldsymbol{\omega}}_0 = 0 \quad (6)$$

其中: $\ddot{\boldsymbol{\omega}}_0 = \ddot{\boldsymbol{\omega}}_c - 2\mathbf{A}\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{A}^2 \mathbf{e}$ 。不考虑式(3)的不确定部分 \mathbf{F} ,将式(3)带入式(6),可得 $\mathbf{B} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{U}_{\text{eq}} - \ddot{\boldsymbol{\omega}}_0 + \mathbf{f} = 0$ 。由此可得等效控制输入 \mathbf{U}_{eq} 为

$$\mathbf{U}_{\text{eq}} = \mathbf{J} \mathbf{B}^{-1} (\ddot{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{f}) \quad (7)$$

2) 设计 PID 控制输入 U_{pid} 。为了提高系统的动态响应速度, 在控制器中引入 PID 控制量。利用滑模面式(5)的 PID 形式, 设计 PID 控制输入 U_{pid} 为

$$U_{pid} = -JB^{-1}Ks = -JB^{-1}K(\dot{e} + 2\Lambda e + \Lambda^2 \int_0^t e dt) \quad (8)$$

式中, 系数矩阵 $K = \text{diag}(k_1, k_2)$, k_1 和 k_2 均为正数。

3) 设计自适应控制输入 U_d , 用来取代经典滑模控制中的切换控制律, 对式(3)中的不确定部分 F 进行自适应连续估计和补偿, 消除控制输入抖振。取 F 的自适应估计律如下^[10]

$$\dot{\hat{F}} = \gamma s \quad (9)$$

式中, \hat{F} 为 F 的估计值, 系数矩阵 $\gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2)$ 。设计自适应控制输入 U_d 为

$$U_d = -JB^{-1}\hat{F} \quad (10)$$

定理 1 对于系统(3), 基于滑模面(5), 可以选取控制律

$$U = U_{eq} + U_{pid} + U_d \quad (11)$$

式中: U_{eq} , U_{pid} , U_d 分别如式(7), 式(8), 式(10)所示, 则可保证速度跟踪误差 e 渐近收敛于零。

证明 定义不确定扰动的估计误差 $\tilde{F} = \hat{F} - F$, 因此 $\dot{\tilde{F}} = \dot{\hat{F}}$ 。构造 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}s^T s + \frac{1}{2}\tilde{F}^T \gamma^{-1} \tilde{F} \quad (12)$$

对式(12)求导, 并将式(7)~式(11)代入, 得

$$\dot{V} = s^T \dot{s} + \tilde{F}^T \gamma^{-1} \dot{\tilde{F}} = s^T (-Ks - \tilde{F}) + \tilde{F}^T s = -s^T Ks \leq 0 \quad (13)$$

由式(12)可知, 整个闭环系统渐近稳定, 系统状态将到达滑模面 $s = 0$, 并沿滑模面运动到达平衡点。因此跟踪误差将渐近收敛到零。定理 1 证毕。

3 算法仿真

为验证所提出的天线姿态稳定控制器的有效性, 对其进行仿真。动中通多子阵天线系统的物理参数设置如下:

$$i = \begin{bmatrix} 320 & 0 \\ 0 & 260 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 2.49 & 0 \\ 0 & 2.00 \end{bmatrix} \Omega,$$

$$L = \begin{bmatrix} 2.63 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 4.00 \times 10^{-3} \end{bmatrix} H,$$

$$C_m = \begin{bmatrix} 0.045 & 0 \\ 0 & 0.09 \end{bmatrix} N \cdot m/A,$$

$$C_e = \begin{bmatrix} 0.029 & 0 \\ 0 & 0.089 \end{bmatrix} N \cdot s/rad,$$

$$J = \begin{bmatrix} 0.09 & 0 \\ 0 & 10.00 \end{bmatrix} N \cdot m \cdot s^2.$$

以三级公路为例, 取载体干扰角速度^[5] $\omega_B = [44.1 \cos 8\pi t \quad 12.6 \cos 4\pi t \quad 60 \cos 6\pi t]^T (\text{°}/\text{s})$ (14)

天线系统的内扰力矩取

$$M_d = \begin{bmatrix} 12 \cos(5t + \pi/3) + 9 \cos(8t + \pi/2) \\ 11 \cos(5t + \pi/4) + 7 \cos(12t + \pi/7) \end{bmatrix} N \cdot m \quad (15)$$

多子阵天线的初始姿态取 $\omega = [10 \quad 15]^T (\text{°}/\text{s})$ 。跟踪参考信号为

$$\omega_c = \begin{bmatrix} 50 \cos(5t + \pi/2) \\ 25 \cos(5t + \pi/2) \end{bmatrix} (\text{°}/\text{s}) \quad (16)$$

令滑模面参数 $\Lambda = \text{diag}(10, 10)$ 。为了加快系统的动态响应速度和对不确定部分 F 的跟踪速度, 控制器参数矩阵 K 和 γ 可取较大值。本文中取 $K = \text{diag}(5000, 5000)$, $\gamma = \text{diag}(35000, 350)$ 。仿真结果如图 2~图 5 所示。

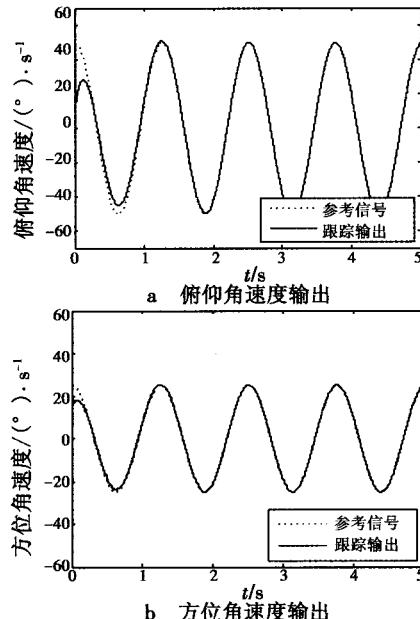


图 2 天线角速度输出曲线

Fig. 2 Antenna angular velocity output curve

图 2 为动中通天线的角速度输出对参考信号的跟踪曲线。由图 2 可知, 动中通天线在方位自由度和俯仰自由度的角速度输出均在 1.5 s 内快速实现了对参考信号的准确跟踪。角速度输出误差曲线如图 3 所示, 控制系统输出稳定之后, 俯仰和方位自由度的跟踪误差分别在 $-0.1 \sim 0.1 (\text{°}/\text{s})$ 和 $-0.05 \sim 0.05 (\text{°}/\text{s})$ 之内。

图 4 为俯仰和方位自由度驱动电机的电压控制输入曲线。由图 4 可以看出, 采用自适应 PID 滑模控制器产生的控制电压输入平滑, 有效消除了一般滑模控制的控制输入的严重抖振现象。

图 5 为天线稳定控制器的滑模面曲线。可以看出, 俯仰和方位滑模面在开始阶段均迅速收敛至零。

因不确定扰动的影响而在平衡位置附近滑动,但总体偏差控制在极小范围之内,能够满足对天线姿态精确控制的要求。

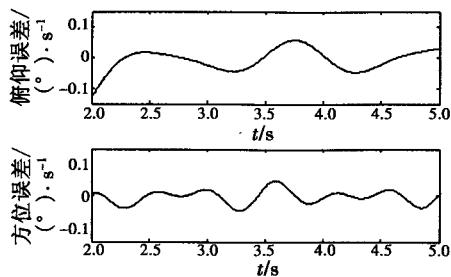


图 3 角速度输出误差曲线(局部)

Fig. 3 Antenna angular velocity output error curve (partial)

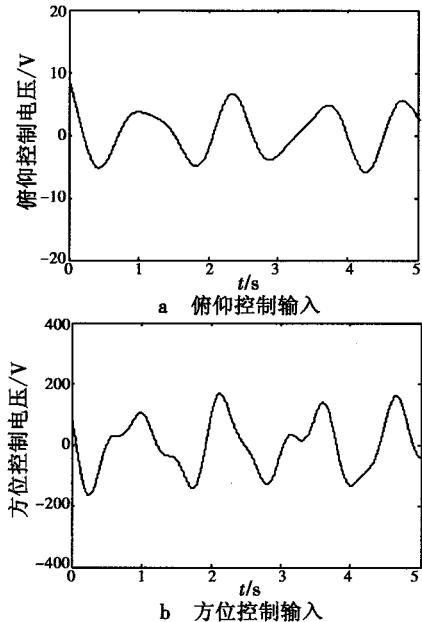


图 4 控制输入曲线

Fig. 4 Control input curve

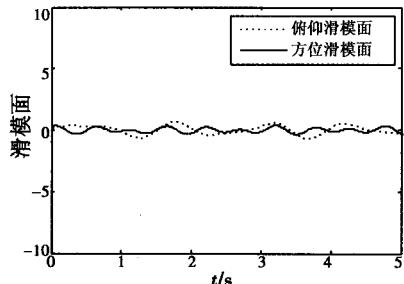


图 5 滑模面曲线

Fig. 5 Sliding mode surface

由以上仿真结果和分析可知,自适应 PID 滑模天线姿态稳定控制器具有动态响应速度快、控制精度高的优点,且控制器产生的控制输入平滑无抖振,这对控制器的实际应用具有积极的工程价值。

4 结论

为了在不知扰动上界的情况下,隔离各类扰动

对动中通天线姿态的影响,保证通信链路畅通,根据动量矩定理和电机电压平衡原理建立了动中通天线系统的动力学模型。在此基础上,设计了一种基于 PID 滑模面的自适应滑模姿态稳定控制器,通过对扰动的自适应估计实现了扰动上界情况下的滑模控制量的无抖振输出;通过将 PID 方法引入控制器设计提高了系统的动态响应速度。仿真结果表明,所设计控制器有效去除了控制电压输入抖振,具有良好的动态响应特性和稳定控制精度。

参 考 文 献

- [1] CHINI P, GIAMBRENE G, KOTA S. A survey on mobile satellite systems [J]. International Journal of Satellite Communications, 2010, 28(1): 29-57.
- [2] JUNG Y, EOM S, JEON S. Novel antenna system design for satellite mobile multimedia service [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9): 4237-4247.
- [3] 郝路瑶, 姚敏立. 一种改进的动中通步进跟踪算法 [J]. 电光与控制, 2010, 17(12): 64-67.
- [4] 郝路瑶. 基于同时扰动随机逼近的动中通测控关键问题研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2011.
- [5] 余伟平. 动中通伺服控制关键技术研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2009.
- [6] HA Q P, RYE D C, DURRANT-WHYTE H F. Robust sliding mode control with application [J]. International Journal of Control, 1999, 72 (12): 1087-1096.
- [7] 王明建, 刘国辉, 魏峰. 滑模变结构控制在平流层飞艇姿态控制中的应用 [J]. 电光与控制, 2010, 17(6): 65-68.
- [8] 李九人, 李海阳, 唐国金. 对无控旋转目标逼近的自适应滑模控制 [J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 815-822.
- [9] 米文鹏, 李冰, 黄华, 等. 模糊指数型终端滑模控制在导弹姿态控制系统中的应用研究 [J]. 电光与控制, 2010, 17(5): 92-96.
- [10] MEYSAR Z, LEILA N. Adaptive sliding mode control with uncertainty estimator for robot manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010 (45): 80-90.
- [11] 夏福梯. 防空导弹制导雷达伺服系统 [M]. 北京: 宇航出版社, 1996: 103-104.
- [12] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 6-8.
- [13] IIYAS E. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant [J]. ISA Transactions, 2006, 45(1): 109-118.

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>