

# 基于 xPC 的挠性天线跟踪指向系统半物理仿真

原劲鹏<sup>1</sup>, 杨 涂<sup>1</sup>, 翟 坤<sup>1</sup>, 朱庆华<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
2. 上海航天控制工程研究所, 上海 200233)

**摘要:** 为了实时验证具有星间链路天线的多体结构卫星星体姿态稳定和天线跟踪指向复合控制算法的有效性, 借助 xPC 实时目标环境对某型多体结构卫星的半物理仿真(hardware-in-the-loop simulation, HILS)系统进行了开发, 用 xPC 目标机模拟星载计算机的外部实时仿真环境, 与产品级的复合控制器、天线框架驱动机构(antenna gimbal drive assembly, GDA)实物组成实时仿真环路。采用 Simulink 和 Stateflow 混合建模的方法实现了天线不同模式之间的切换, 并用 S 函数对 PCI 总线类型的串行接口通信在 xPC 目标下进行了二次开发。实验结果证明了接口模型建立的正确性、复合控制系统设计的合理性以及该仿真方法的有效性。

**关键词:** 多体结构卫星; 半物理仿真; xPC 目标; 天线框架驱动机构

中图分类号:TP13

文献标识码: A

## xPC-based hardware-in-the-loop simulation for flexible antenna tracking and pointing system

YUAN Jin-peng<sup>1</sup>, YANG Di<sup>1</sup>, ZHAI Kun<sup>1</sup>, ZHU Qing-hua<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;  
2. Shanghai Aerospace Control Engineering Inst., Shanghai 200233, China)

**Abstract:** To test the complex control algorithm for attitude stabilization of multi-body structure satellite with inter-satellite link antennae and antenna tracking and pointing in real-time condition, hardware-in-the-loop simulation (HILS) system of certain large flexible multi-body structure satellite is set up based on xPC target. The xPC target computer used for imitating external real-time condition of space-borne computer, complex controller, and antenna gimbal drive assembly (GDA) are constructed together into a closed simulation loop. To switch different antenna working mode, hybrid modeling with simulink and stateflow is put forward, and for serial interface communication of PCI bus under xPC target, the corresponding S-function program is developed. Simulation results validate the effectiveness of the presented simulation method. The results show that the modeling of interface communication is correct and the designed complex control strategy is feasible.

**Key words:** multi-body structure satellite; hardware-in-the-loop simulation; xPC target; antenna GDA

## 0 引言

跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)<sup>[1]</sup>是世界各国将要开发的天基测控网的重要组成部分, 对中继卫星系统的研究是当前的一个热点问题。用户卫星在轨运行期间, 由于自身的载荷需要高精度高稳定度的对地定向, 星上天线同时要对高轨道中继卫星进行回扫、捕获、自动跟踪等运动, 这是一个建立在星体平台上的动态跟踪问题, 显然星体平台与天线跟踪指向系统之间存在着紧密的耦合作用。多体卫星控制系统必须考虑天线运动与星体之间的相互影响,

实现对卫星本体和挠性天线两级控制同时并举的复合控制。根据跟踪指向控制技术的要求, 为验证星体姿态与天线运动相互耦合的多体非线性动力学特性, 验证多体动力学环境下天线程序跟踪、自动或极值跟踪指向控制方案的可行性, 本文基于 xPC 开发了多体卫星复合控制半物理仿真系统, 实现了挠性天线跟踪指向系统的实物仿真验证。本实验中, 天线以及复合控制器实物形成之前, 首先在 Matlab/Simulink 环境下进行了数学建模, 并在此基础上进行了一系列数学仿真和实时仿真(包括软件在回路中的仿真<sup>[2]</sup>以及快速控制原型化仿真), 然后逐步将模型中对应的

部分用相应的实物取代,从而形成最终的试验系统。Matlab/Simulink/RTW/xPC 多功能一体化开发环境下建模与仿真是本试验的支撑技术。

## 1 实验系统的功能与主要技术途径

挠性天线跟踪指向复合控制系统的半物理仿真实验需要考虑复杂的航天背景。挠性天线拥有自己的执行机构(GDA)、姿态敏感器(射频敏感器),因此是一个相对独立的系统。由于天线的支撑臂与星本体相连,天线的转动运动会影响星体的姿态,而星体的姿态势必会影响天线的指向精度,所以二者的控制不可分割。实验系统需要考虑对星体三个通道的控制及天线两个通道(俯仰/方位)的控制。因为天线工作在卫星正常轨道控制模式,实验系统需要进行星体两个模式(对地定向和磁卸载)和天线三个模式(回扫、扫描捕获与自动跟踪)的控制,另外还需考虑中继卫星的轨道预报误差、地球遮挡等因素。

半物理仿真实验系统结构如图1所示。通过投影仪在靶屏上产生的像点模拟中继卫星,终端天线跟踪靶屏上的像点和跟踪中继卫星运动一样。挠性天线为实物,射频敏感器部分用CCD相机代替,其波瓣宽度可由CCD相机的视场大小来调整,抛物面天线上的激光发生器投射在靶屏上的光斑代表挠性天线的指向,该光斑与中继星像点的距离代表天线跟踪误差,高速CCD光学测量系统可测出该误差,测出的信号反馈给实时仿真计算机,并由天线指向控制算法产生有效的控制,使天线指向驱动机构(GDA)产生相应的动作,从而实现天线指向控制系统的半物理仿真。

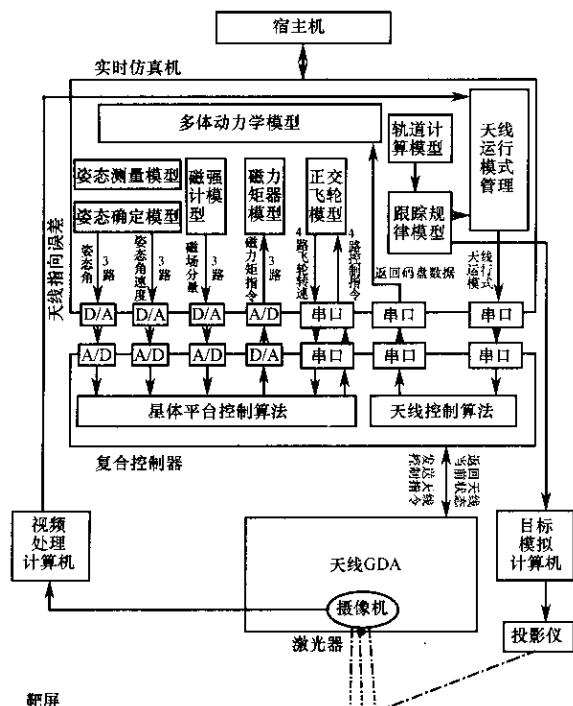


图1 半实物仿真系统结构示意图

## 2 实验系统的硬件组成

### 2.1 xPC 系统

xPC系统采用典型的双机模式<sup>[3]</sup>,宿主计算机为普通的PC机,目标机采用研华的工业控制机,宿主机和目标机用串口或以太网进行通讯。目标机上配备接口卡为Maxon公司的CP114(4路RS232/422)两块,Adlink公司的ACL6126(6路D/A)两块、ACL8111(6路A/D)一块。xPC目标计算机为实时仿真计算机,通过xPC实时内核实现实时时钟,其上运行的实时程序由宿主计算机上的Simulink模型自动下载生成,不仅包含具体的仿真任务,还包括接口卡的驱动程序。在实验中用来模拟星载计算机外部实时仿真环境,可在宿主计算机的Matlab命令行下进行程序运行控制、在线调整仿真参数及观测数据等。

### 2.2 复合控制器

在地面半物理仿真实验中,复合控制器是星载计算机的替代品(即星上的软件系统),是半物理仿真系统的核心。本实验中主要包含三大块算法,即星体三轴稳定控制、飞轮磁卸载与用户星终端天线对中继卫星的跟踪捕获控制算法,负责卫星星体平台与天线指向的复合控制。

复合控制器的硬件组成可分为三部分:星体控制板、天线驱动控制板以及接口设备(包含通用接口板和特殊接口板)。星体控制板采用DSP芯片TMS320VC33。天线驱动控制板采用AT89C55WD单片机作为中央处理单元,LM629作为高精度运动控制器的控制单元,LMD18200作为功率放大单元。每块板之间通过内总线连接。复合控制器单机重不足2kg,功耗小于5W。

### 2.3 用户星终端天线系统

用户星终端天线系统主要包括三部分:CCD摄像机(模拟射频敏感器)、天线框架(包含底座、支撑杆、支架,摄像头支撑板,模拟负载反射面)以及天线驱动机构(包含Maxon 118747 直流电机两台、Maxon 114515 齿轮减速器两台、Maxon 110512 光电编码器两台)。

### 2.4 其它相关设备

除了上述三大块实验系统重要的组成硬件外,另外还有视频处理计算机、视频模拟器(一台笔记本和一台投影仪)等相关设备。

## 3 实时仿真环境的软件实现

### 3.1 系统的模型结构

实时仿真计算机对应的Simulink模型如图2所示。

可以将模型分为五大块阐述:用户星动力学及单机模型子系统,即图中最大的模块“model”,这部分执行实时仿真机的仿真任务,主要包括用户星的动力学模型、运动学模型、敏感器模型、执行机构模型、轨道计算模型和跟踪规律模型;初始化模块,即图中“模式选择”模块,双击该模块会弹出对话框,选择相应的选项来初始化模型;时序管理模块,即图中“同步”模块,目的是做到和复合控制器时序匹配;模拟目标生成模块,即图中“模拟目标生成”模块,

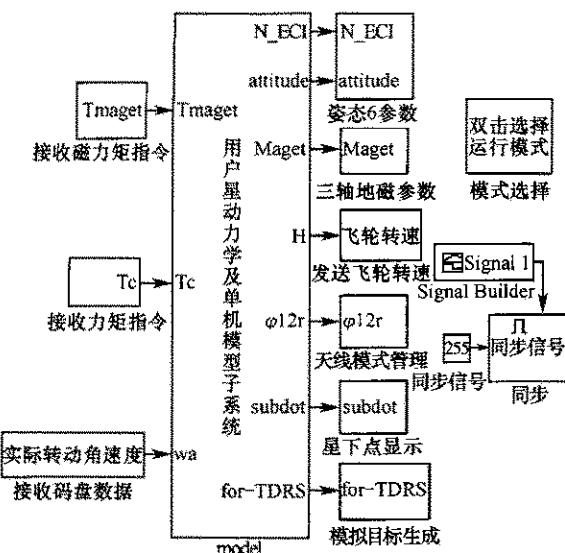


图 2 实时仿真计算机对应的 Simulink 框图

用来发送数据给目标模拟计算机;复合控制器通讯模块,即除了上述模块外的其它模块,用来和复合控制器交换数据。

需要指出的是,图 2 中的 Simulink 模型是从整个仿真回路中逐渐独立出来的一部分,之前与复合控制器模型、天线模型是一个仿真模型,是通过数学仿真,无硬件接口的实时仿真、包含全部接口的实时仿真、天线实物化和将复合控制器分离出去一步一步形成的,其积分算法、积分步长以及接口模型更接近于工程实践。图 2 中的 Simulink 模型可自动下载到实时仿真机,以进行地面半物理仿真实验。

### 3.2 天线模式管理模型

实验系统定义的天线模式如图 3 所示,其中扫描模式又给出水平横扫和螺旋扫描两种方式。

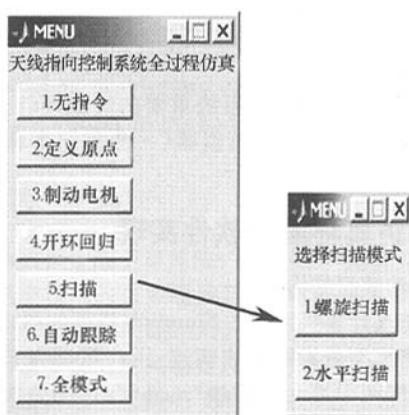


图 3 Simulink 下的天线模式选择菜单

天线的 8 种控制指令的具体发送情况是什么样?某种指令该什么时候发送?该发送多长时间?图 4 中的“Chart1”模块就是用来安排 8 种控制指令的。如图 4 所示,该模块有三个输入,mode 模块对应着初始化时具体选

用哪种模式,如果初始化时选择无指令,则 mode 模块对应的变量 modeIn=1,同样,选择其它模式时 modeIn 有对应的标志值。threshold 模块是误差阈值,当天线的指向和目标点之间的误差小于阈值时,进入自动跟踪模式。errorIN 输入的是天线的指向和目标点之间的误差。flagin 是用来接收复合控制器发送的控制指令请求信号,实时仿真机接收到后再发控制指令。输出分别对应着 8 种控制模式的驱动信号以及水平横扫的输入。

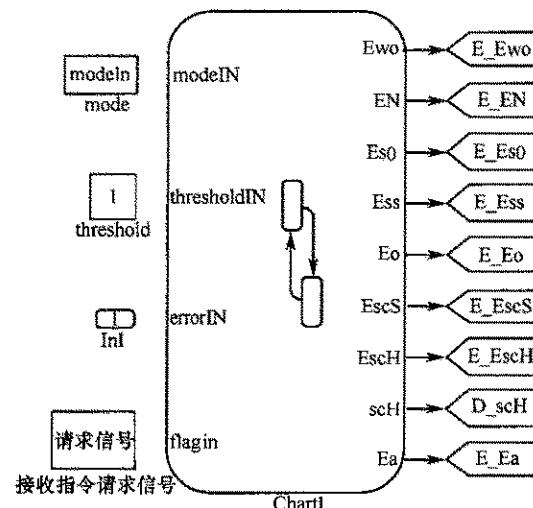


图 4 天线模式管理 Simulink 框图

双击“Chart1”得到如图 5 所示的状态转移图。可以看出,第一次进入 Chart1 模块,先进行判断:如果 modeIN=7,则选择了全模式,进入 autonomy 状态,如果 modeIN !=7,则进入 telemetry 状态。进入 autonomy 状态后,如图 6 所示,首先进入 Wopen 状态,即进行开环回扫,回扫的角度是由跟踪规律模块输出的。50 个 tick (tick 为采样时间,这里为 0.001 s,50 tick=0.05 s) 后进入无指令状态,由于针对复合控制器来说,开环回扫指令只能发送一次,但是复合控制器的串口没有中断,所以为了保障指令不丢失,考虑到复合控制器的运行周期为 0.1 s,实时仿真机的更新周期为 0.001 s,经过实验得出,采用 0.05 s 的多次发送,能很好地保障指令不丢失。在无指令状态,经过 5 000 tick,即 5 s 后,如果天线指向和目标点间的误差小于设定的阈值,即进入自动跟踪状态。如果天线回扫结束后,天线指向和目标点间的误差依然大于阈值,则进入螺旋扫描状态进行扫描,直到找到目标。

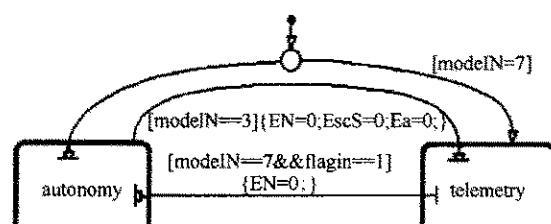


图 5 Chart1 对应的状态转移图

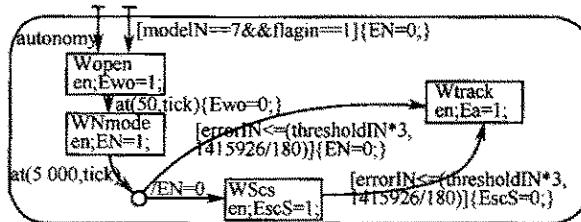


图6 autonomy 状态图

### 3.3 接口驱动模型

A/D、D/A 通讯相对简单,采用 xPC 模块库中提供的驱动程序即可,重点介绍 PCI 总线的串行口驱动。

CP114 的串口驱动模块有两个,CP114 Binary Receive 和 CP114 Binary Send,即串口接收模块和串口发送模块,图 7 即为封装得到的模块。

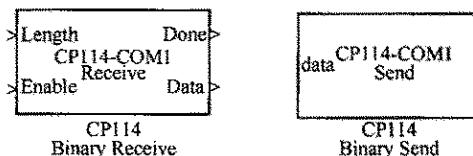


图7 CP114 的串口驱动模块

串口接收模块有两个输入和两个输出。输入 Length 是要接收的实际数据长度(几个字节),Enable 是一个使能输入口,输入为正数时,可以进行接收,否则关闭接口,不接收。输出 Done 是 function call 信号,输出 Data 是接收到的数据。使用 CP114 的某一个 COM 接收数据时,首先要进行相关参数设置,双击该模块,得到图 8 所示的对话框。

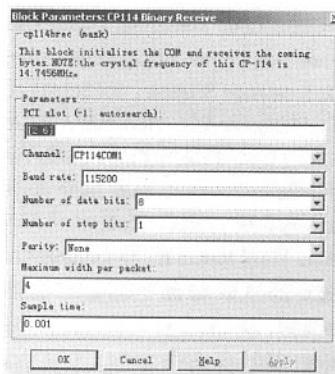


图8 CP114 串口接收模块的设置窗口

在设置窗口中,有 8 个地方要设置。PCI slot 是要指出当前的 CP-114 在实时仿真计算机中的总线号和插槽号,可通过在宿主机的 Matlab 命令行下键入 `getxpcpci('all')` 来获得相关信息,往下依次设置通道号、波特率、数据位、停止位、奇偶校验位、一次传送的字节数以及采样时间。

串口发送模块的参数设置与接收模块类似。因为 xPC 模块库中没有给出 PCI 总线串口的驱动,上述模块是用 C mex S-function 编写,然后封装得到的。S 函数主要程序片断如下。

```

    .....
    if ((int_T)mxGetPr(SLOT_ARG)[0]<0) {
        if (rl32eGetPCIInfo ((unsigned short) 0x1393, (unsigned short)0x1141, &pciinfo)) {
            ssSetErrorStatus(S,msg);
            return;
        }
    } else {
        int_T bus, slot;
        if (mxGetN(SLOT_ARG) == 1) {
            bus = 0;
            slot = (int_T)mxGetPr(SLOT_ARG)[0];
        } else {
            bus = (int_T)mxGetPr(SLOT_ARG)[0];
            slot = (int_T)mxGetPr(SLOT_ARG)[1];
        }
        if(rl32eGetPCIInfoAtSlot ((unsigned short) 0x1393, (unsigned short)0x1141, (slot & 0xff) | ((bus & 0xff)<<8),&pciinfo)){
            ssSetErrorStatus(S,msg);
            return;
        }
    }
    address=pciinfo.BaseAddress[2]+8*((int_T)mxGetPr(PORT_ARG)[0]-1)

```

上述程序中的两个 16 进制数 0x1393 和 0x1141 分别是 VendorID 和 DeviceID,即生产商为 CP114 设定的两个标识,得到这两个数后,联合给定的 bus 和 slot 就可找到相应的串口,从而得到串口的基地址 address,这是 PCI 总线与 ISA 总线在 xPC 环境下的主要区别之一。另外,CP114 的晶振频率是 14.745 6 MHz,而计算机自带串口芯片的晶振频率一般是 1.843 2 MHz。

## 4 实验分析

在地面半物理试验中,根据实验室条件,我们将靶屏大小设定为  $2 \times 1.5$  m,考虑到地球遮挡等因素,我们选择用户星跟踪中继星比较长的一个时间段进行仿真。

图 9 是实时仿真 1 000 s xPC 目标示波器的截屏图,是天线在全模式状态(由开环扫瞄、扫瞄捕获到自动跟踪)下转过的角度。对于设计的目标模拟器,根据用户星对中继星的跟踪规律<sup>[5]</sup>可求得由天线初始指向点到目标点,方位轴转动 10.97°,俯仰轴转动 0.17°;由进入自动跟踪时刻到仿真结束,方位轴转动 -6.77°,俯仰轴转动 7.54°。实时仿真基本与数学仿真吻合。需要指出的是,由于实验采用的码盘为相对式的,实验时需将预先设定的天线初始指向设为零点。

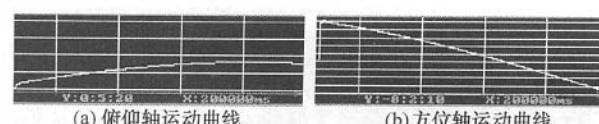


图9 天线全模式控制下的运动曲线

图 10 为天线运行的同时,运行 1 000 s 星体的姿态误差曲线和姿态稳定度曲线,与数学仿真相比效果较差,这主要是由于实时仿真系统的延迟、随机干扰等造成的。并没有因为天线实物的引入而变得发散,也说明了复合控制器软硬件集成的合理性。

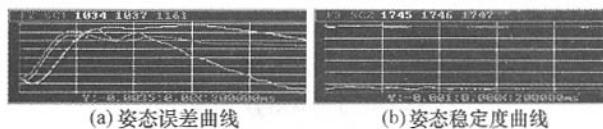


图 10 用户星体平台姿态曲线

## 5 结 论

本文对星间链路天线指向控制系统进行了半物理仿真实验,得出如下结论。

(1) xPC 系统能很方便地将复杂的实时仿真任务用普通的 PC 机实现,既缩短了开发周期,同时大大缩减了仿真费用。

(2) 验证了天线 GDA 的性能、复合控制器软硬件集成

(上接第 1257 页)

- [2] Barni M, Podilchuk C I, Bartolini F, et al. Watermark embedding: hiding a signal within a cover image[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(8): 102–108.
- [3] Chang Chin-Chen, Hsiao Ju-Yuan, Chan Chi-Shiang. Finding optimal least significant bit substitution in image hiding by dynamic programming strategy[J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(7): 1583–1595.
- [4] Spaulding Jermiah, Noda Hideki, Shiraz Mahdad N, et al. BPCS steganography using EZW lossy compressed images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(13): 1579–1587.
- [5] Bender W, Gruhl D, Morimoto N, et al. Techniques for data hiding[J]. *IBM Systems Journal*, 1996, 35(3–4): 313–336.
- [6] Anderson R, Petitcolas F. On the limits of steganography[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(4): 471–478.
- [7] Cox Ingemar J, Kilian Joe, Thomson Leighton F, et al. Secure spread spectrum watermarking for Multimedia[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 6(12): 1673–1687.
- [8] Lu Chun-shien, Huang Shih-Kun, Chewen-jye, et al. Cocktail watermarking for digital image protection[J]. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2000, 2(4): 209–224.
- [9] Tewfik A H, Swanson M. Data hiding for multimedia personalization, interaction, and protection[J]. *IEEE Signal Processing Mag.*, 1997(7): 41–44.
- [10] Pennebaker W B, Mitchell J L. JPEG: still image data compression standard[M]. *Van Nostrand Reinhold*, New York, 1993.
- [11] Langelaar G, Setyawan I, Lagendijk R L. Watermarking digital and video data[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2000, 17(4): 46.
- [12] Hernandez J R, Amado M, PereGonzale F. DCT domain watermarking techniques for still images: detector performance analysis and a new structure[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(1): 55–68.
- [13] Meerwald P, Uhl A. A Survey of wavelet-domain watermarking algorithms[C]// *Proc. SPIE. Int. Soc. Opt. Eng.*, 2001(4314): 505–516.
- [14] Upham D. Jpeg-Jsteg[DB/OL], <http://www.tiac.net/users/korejwa>.
- [15] Chang Chin-Chen, Chen Tun-Shou, Chung Lou-Zo. A steganographic method based upon JPEG and quantization table modification[J]. *Information Sciences*, 2002(141): 123–138.
- [16] Bergum G E, Philippou A N, Horadam A F. Applications of fibonacci numbers[C]// *Proc. of the Fourth International Conference on Fibonacci Numbers and Their Applications*, Wake Forest University, NC, USA, 1990.
- [17] Zou Jiancheng, Ward Rabab K, Qi Dongxu. A New digital image scrabbling method based on Fibonacci Numbers[J]. *Circuits and Systems 2004. ISCAS'04. Proc. of the 2004 International Symposium on*, 2004, 3: 965–968.
- [18] Shohdohji T, Hoshino Y, Kutsuwada N. Optimization of quantization table based on visual characteristics in DCT image coding[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 1999(37): 225–232.
- [19] Lee Gwang-Yeon, Kim Jin-Soo. The linear algebra of the k-Fibonacci matrix[J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 2003(373): 75–87.
- [20] Huang Jiwu, Shi Yun Q, Shi Yi. Embedding image watermarking in DC components[J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2000, 10(6): 974–979.

## 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](http://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](http://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](http://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>