

基于数字多波束天线的多星测控系统

蔚保国^{1,2} 姚奇松²

(1. 北京理工大学电子工程系·北京·100081)

(2. 中国电子科技集团公司第54研究所·河北石家庄·050081)

摘要 针对多星测控存在的问题和技术解决途径，提出采用数字波束形成技术实现单站多星测控的方案，简要说明了系统的体系结构和工作原理，指出了系统的技术特点和技术难点。基于数字多波束天线的多星测控系统具有良好的技术基础和应用前景。

关键词 数字多波束；多星测控

1 引言

随着卫星星座系统的出现和发展，多星测控日益成为航天测控领域的一个突出问题。对卫星星座测控来说，概括起来有如下特点：①同时测控管理多颗卫星；②测控站数量多、分布广，可能需要全球布站或数据中继卫星中继；③对卫星的数据注入量较大而且比较频繁；④同时接收多颗卫星数据量大，且要求数据处理及时；⑤可能出现各卫星任务对测控资源争用，引起测控冲突等。

解决多星测控问题并避免测控冲突的技术途径包括：提高卫星自主能力；增加地面测控站资源；缩短设备换星时间，提高设备利用率；提高中心多任务信息处理能力等。虽然通过合理有效地调度测控资源可完成更多的任务以减少冲突，但当需要同一地面站同时进行多星测控时，就必须增加地面测控资源来支持多星并发任务。因此，单个地面站设备必须具有多星测控能力才能使星座测控管理需求更好地得到满足。具体实现措施包括：多天线方式和多波束天线两种体制。前者是传统单地面测控站的组合，采用的是多套面天线和机械伺服系统。后者是多目标跟踪测控的技术发展方向，其中数字多波束技术具有优异的性能，是解决多星测控的一种较为理想的体制。

采用数字多波束技术可以支持测控系统实现“空分多址”，使多个波束动态“电扫描”，彻底摆脱传统机械伺服系统的缺点，缩短设备的状态切换时间，提高测控设备的可靠性和自动化水平，能够满足单站多星同时测控的任务需求。因此，研究基于数字多波束天线的地面测控站系统技术，实现单站多星测控，具有重要的意义和良好的应用前景。

2 系统体系结构

基于数字多波束天线的多星测控地面站具有“软件无线电测控”的技术特征，它的系统体系结构研究在某种程度上决定地面测控站的整体性能。下面将围绕接收和发射数字多波束形成和多星测控信号处理需求，从系统的硬件组成、功能结构等方面予以说明。

2.1 设备组成图

如图 1 所示，系统的设备组成包括：收发天线阵列、多通道射频前端、变频 T/R 组件、A/D 和 D/A、发送终端、接收终端、收发信道阵列校正设备、时频终端等。

收发天线阵列和信号通道在满足性能指标的前提下，应研究其阵列划分形式和信号通道的配置，以降低信道的数量，从而减少后续阵列信号处理器的 I/O 带宽。考虑到宽带信号采样、多通道不同信号的并行处理以及便于工程实现，A/D 和 D/A 通道设计立足于分布式网络形式，同时进行固定时钟采样和可变时钟采样两种方式的研究，以便最大限度地满足系统大容量数据传输的要求，且相对降低单路处理的数据吞吐量。从有利于系统校正出发，尽量采用一致性好的线性化收发信道，可以减少系统的校正工作量；采用中频数字化和软件无线电相结合的方法，可以减少硬件环节，同时也容易保证数字中频通道的一致性；接收终端或发射终端作为数字波束形成的信号处理平台，同时完成收发测控信号的扩频解扩、调制解调、编码译码、基带信号形成等。数据处理和监控设备完成全系统的数据处理和设备配置管理，并与外部设备进行数据交换。时频终端为各收发通道和终端统一提供系统所需的参考频率信号、脉冲信号和时间信号。所有的终端设备立足于采用基于开放式总线的并行硬件体系结构，可最大限度保证终端设备的处理能力、可配置性和可扩充性。

2.2 功能结构图

根据卫星业务测控需求，为适应面向 GEO/MEO/LEO 卫星的动态目标跟踪、多星上行遥控信息的同时或分时注入、多星下行遥测信息的同时接收等功能要求。收发天线阵列分开，接收信道与接收天线阵列并行匹配，发射信道与发射天线阵列并行匹配。接收部分与发射部分相互独立，接收波束数字形成与发射波束数字形成同时并行完成。其中，接收通道的预处理完成多路中频信号的 A/D 采样和处理，得到数字信息进行数字波束形成处理和测角处理，然后在数字多波束基础上同时进行多星遥测信号和测距信号并行接收处理。发送通道的匹配合成完成多路遥控、测距基带信号和发射数字多波束的合成、D/A 转换以及与发送信道接口。唯一联系接收和发送两部分的是空间目标信号的 DOA（信号到达方向）估计。基于接收信号的 DOA 估计可以确定空间卫星信

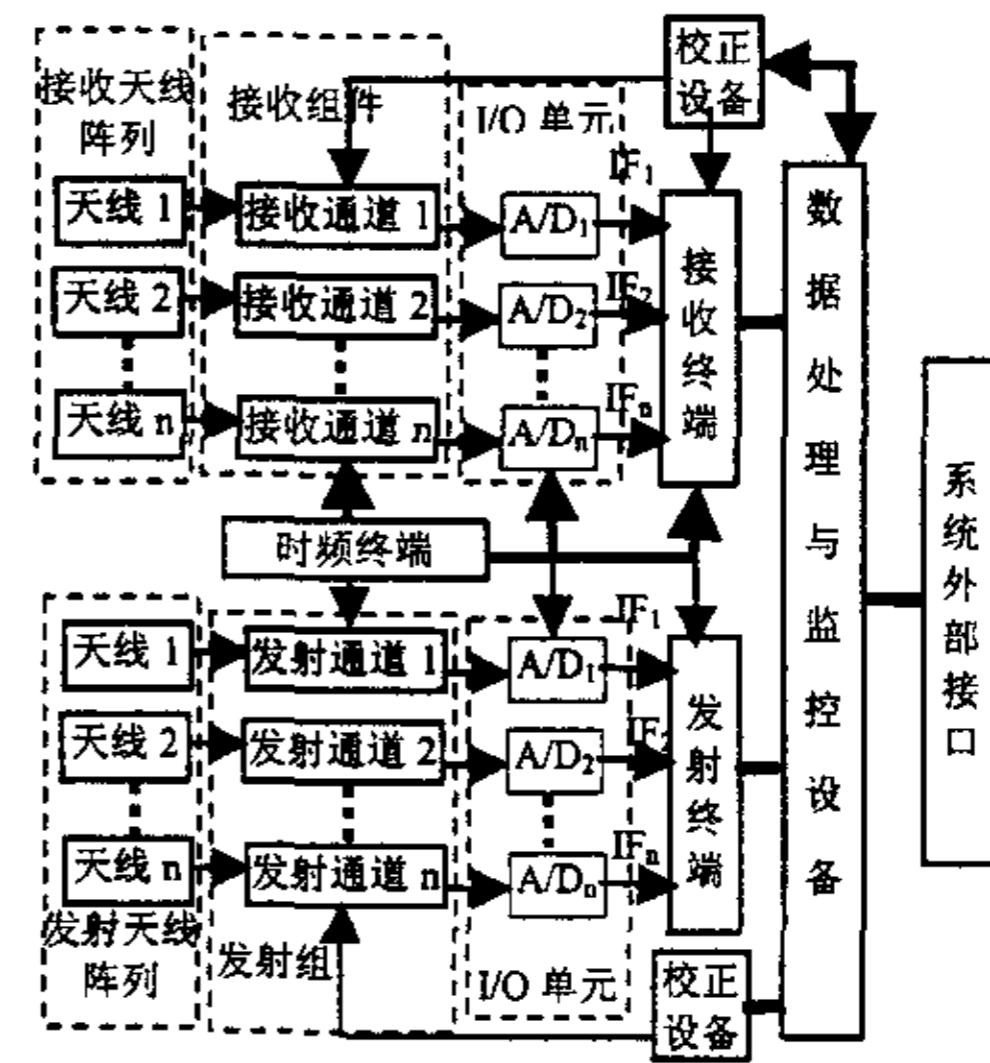


图 1 基于软件无线电系统框架的硬件体系结

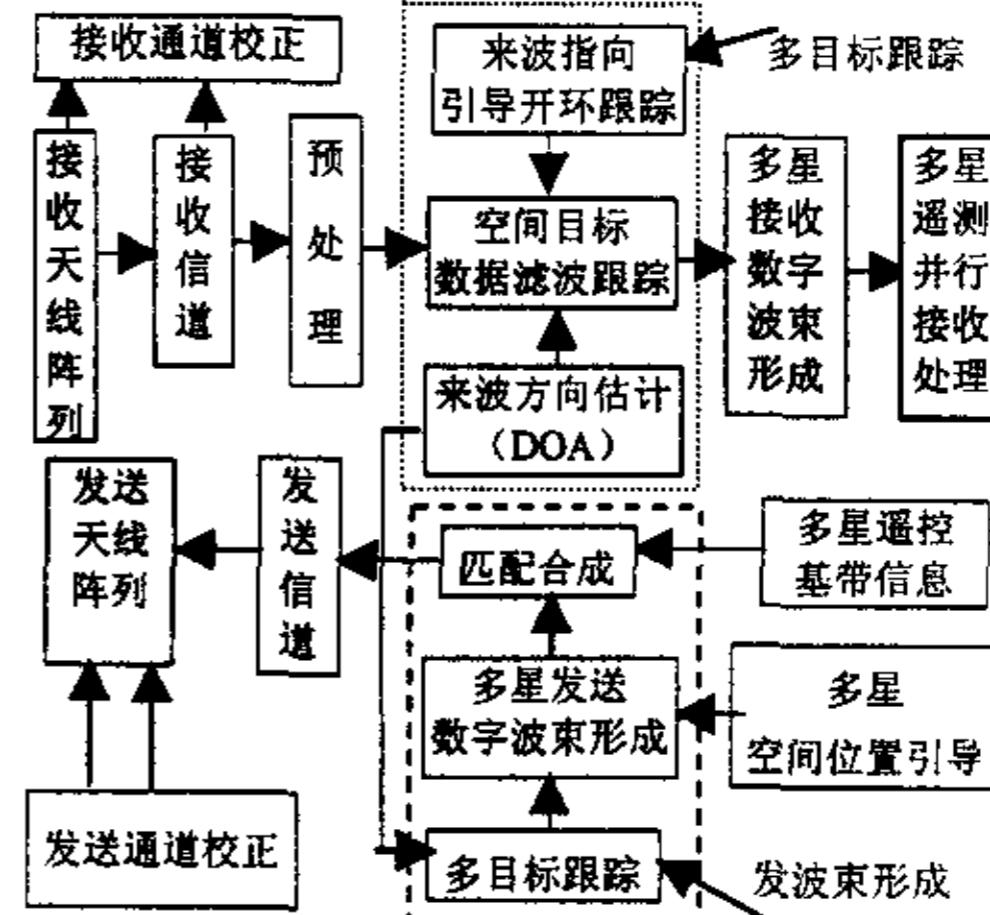


图 2 数字波束形成系统功能体
唯一联系接收和发送两部分的是空间目标信号的 DOA（信号到达方向）估计。基于接收信号的 DOA 估计可以确定空间卫星信

号的来波方向，可作为发射信号空间多波束形成和自跟踪算法的输入条件。

3 系统工作原理

3.1 概述

基于数字多波束天线的地面测控站实现多星测控的体制是“SDMA+CDMA”。首先，收发阵列天线利用数字波束形成技术同时形成多个空间收发波束实现空分多址（SDMA），保证了多星测控必需的空间通道；同时，利用码分多址（CDMA）技术在同一波束上（统一载波频率）实现多个独立的码分信道，这对于多卫星星座系统具有特别的意义，容易解决频分制带来的一系列难于解决的电磁兼容问题。扩频统一测控体制可利用扩频码本身携带测距用的时间标志，而本身形成的码分信道可以携带多路不同的上行遥控和下行遥测信息，以实现对空间多个卫星的测距、测角、数传和遥控、遥测。

考虑到卫星星座的不同特点和测控任务需求，数字多波束天线应具有三种工作模式：自适应同时多波束、预多波束切换、动态单波束电扫描。此三种模式对应不同星座（GEO/MEO/LEO）以及星座运行的不同阶段的多星测控状态。在每一种工作模式下，发送部分是把多路遥控扩频基带信息（含测距信息）通过与数字发射波束合成处理后分发到发射天线阵列的各个阵元上，从而定向辐射到空间多颗卫星；接收部分是从接收天线阵列各个阵元上接收信号，经多路并行接收信道和接收数字波束形成，得到空间不同方向的多颗卫星的数字化信道，并在此基础上进行多路遥测信息和测距信息的并行接收处理；多星的跟踪采用“数字波束移动”方式，即通过卫星空间轨道引导数据，或根据接收信号的来波方向估计（DOA）获得多个卫星的空间位置参数，实时形成多个数字波束，从而以“波束电扫描”方式实现空间卫星的动态跟踪。

3.2 上行多路遥控信号发送

针对多星的遥控信息分别形成特定的信号格式，然后进行直接序列扩频处理。同码分多址通信一样，PN 码的选取考虑具有良好的自相关特性和尽可能小的互相关性，如 m 序列和 GOLD 序列等，不同卫星分配的码结构和码参数不同。每颗卫星的扩频基带信号经过发射波束形成的幅相加权处理得到波束基带信号，各路波束基带信号合成后经 D/A 变换送射频调制器。图 3 给出多星上行扩频遥控信号发送的原理框图。它表明发射天线阵元激励信号生成方法，可以在多颗卫星方向上形成主波束，并且指向不同卫星的主波束载有不同信息，所以可有效地解决数字多波束天线系统的下行选择性发送问题。

发射数字波束形成算法包括预多波束、自适应波束形成算法、分时单波束/多波束扫描算法等，它可适应多星遥控参数的同时或分时上行注入等要求。不同的是同时形成多个发射波束难度较大，要通过阵列天线接收和发送多个目标信号而不发生相互干扰，这不但要求天线阵产生多个波束来分别指向不同目标，而且要求每个波束传输不同的信息。必须考虑多个波束之间的隔离度等问题，为了降低难度可以采用分时发射多波束方法，但必须满足具体应用条件。

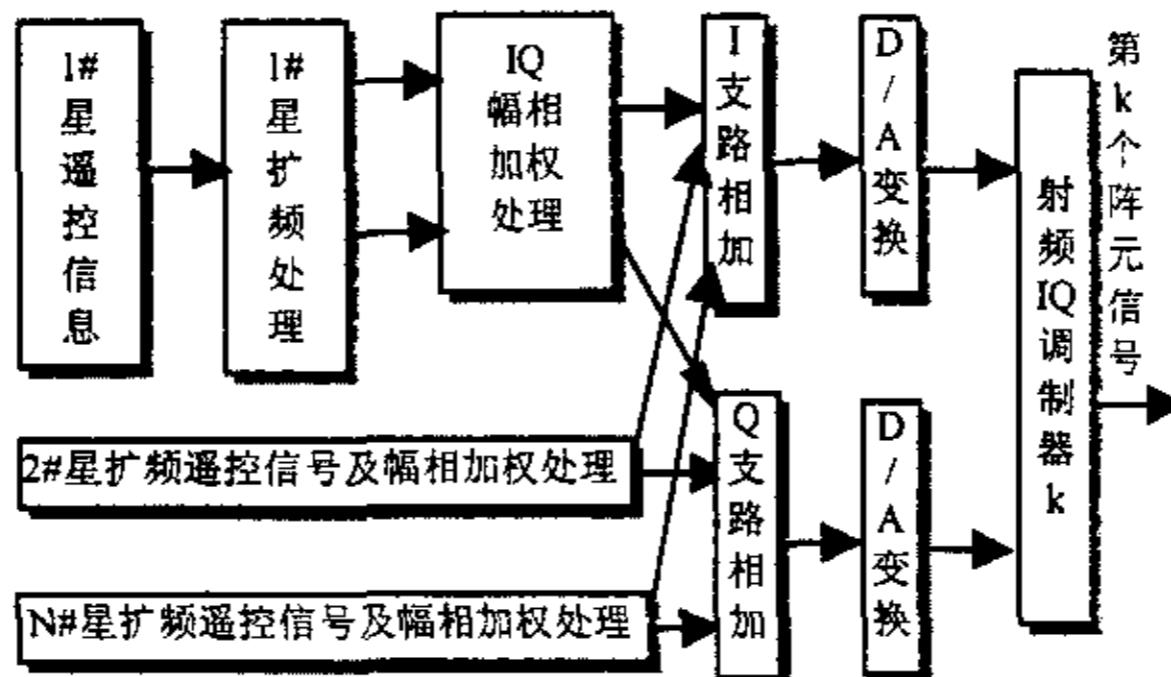


图 3 多星上行扩频遥控信号发送原理框

3.3 下行多路遥测信号接收

根据接收天线阵列的工作模式，接收数字波束形成算法包括预多波束算法和自适应波束形成算法。预多波束算法用于完成针对 GEO 静止卫星的接收波束形成；或针对 MEO 卫星轨道的预多波束切换覆盖。自适应波束形成算法用于完成针对 MEO 卫星的同时多波束动态跟踪和信号检测，具体算法分为盲和非盲算法两类。不同算法适应卫星星座的不同种类和工作状态。

站在多星遥测信号接收处理的角度，数字波束形成的结果应是进行空域滤波后的多个方向的空间卫星信号中频样本数据。它集中反映了某个方向卫星信号的全部特征。很显然，数字波束形成提供给后续遥测信号处理的是一种不同载噪比条件下的扩频信号样本数据。针对空间每颗卫星形成相应的数字波束，进行多星的并行遥测信号处理。遥测信号处理内容包括：捕获跟踪、解扩解调、译码解帧等，它旨在获取动态环境低信噪比情况下的多星遥测信息传输的优良性能。

3.4 多星跟踪方式

多星跟踪方式一般包括：数字引导、程序引导、自跟踪等三种方式。其中，对于数字引导、程序引导跟踪方式的研究可转化为指向性数字波束形成研究，即研究数字多波束形成的快速权值产生方法。阵列天线的波束形成仅依赖于对各阵元赋予的权值，这就为波束指向的快速改变提供了条件。只需要对阵元赋予不同的权值，就可以使波束的指向和性能满足需求，不必象普通面天线那样，通过机械转动来达到目的，大大提高天线系统的实时处理能力，缩短响应时间。

对于自跟踪技术研究，根据 GEO 卫星“相对静止”的特点，需要研究基于预多波束的反馈控制技术实现自跟踪，即在预先设定位置参数的预多波束形成的基础上，根据下行接收信号电平以及相应的最优准则，反馈调节修正权值，从而动态调整波束指向。根据 MEO 卫星移动的特点，需要研究基于来波方向估计的自跟踪技术。

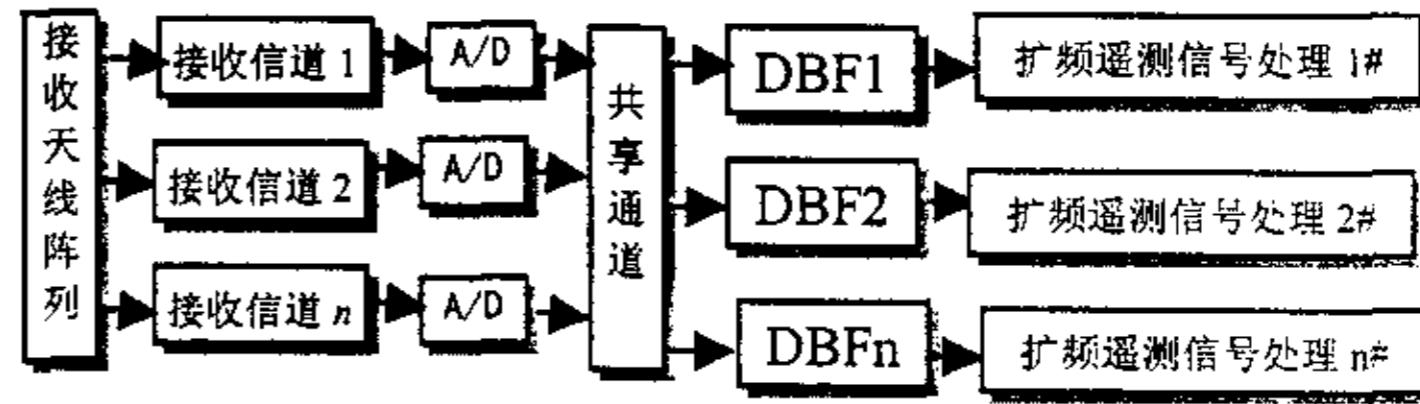


图 4 多星下行扩频遥测信号接收原理框图

因此，空间目标位置估计算法分为两大类：轨道引导算法和自跟踪算法。前者是根据外部系统给出的引导数据（如轨道根数、卫星空间座标数据等）计算出对应的空间数字波束形成的参数；采用卡尔曼滤波方法可进一步提高轨道跟踪精度。后者依赖空间接收信号处理进行目标跟踪，最基本的有预波束方法和空间二维 DFT 方法，此外还有时空 DOA 方法和基于高阶累积量的空间谱估计方法。对于卫星星座系统而言，空间信号为扩频宽带信号，因而需要研究基于扩频宽带信号 DOA 估计的自跟踪算法。

3.5 系统校正与测试

基于阵列相干接收的原则，自适应阵列数字波束形成系统要求信号通道之间必须保持严格的一致性。但实际系统中各通道的特性很难实现一致，这就给算法处理带来了很大的困难，有时甚至会导致算法失效而使自适应阵列天线性能急剧下降。所以必须采用必要的校正措施。收发通道校正测试部分是通过采集所有接收通道间和所有发射通道间的不一致性，完成对数字基带信号的校正处理，以克服通道不一致对数字波束形成带来的影响。包括阵列天线阵元间互耦效应的补偿算法和收发通道不一致的校正算法。前者用于克服天线互耦对空域波束形成和信号检测带来的影响；后者用于克服接收通道间及发射通道间不一致对收发数字波束形成带来的影响。

阵列天线阵元间互耦效应的补偿算法要求具有实时补偿性能，以适应天线互耦效应的时变性；同时，该算法要与 DOA 估计和自适应波束形成算法接口，相互配合完成校正功能。收发通道不一致的校正算法按接收通道和发射通道分类，因为两者之间存在较大差异。接收通道校正算法包括盲自适应校正方法、分部件的校正方法、无线信标方式校正等。盲自适应校正方法比较复杂，需要与数字波束形成算法结合，即立足于数字波束形成算法对通道不一致不敏感；分部件的校正方法与真实工作状态不同；无线信标方式的校正最接近实际工作状态，校正精度高，可实时校正。发射通道校正算法比较困难有待进一步研究。

4 系统技术特点和难点

4.1 系统特点

数字多波束阵列天线技术应用于卫星星座测控系统，将会改善系统的多星测控性能，与传统多天线方法比较，具有以下几个方面的技术优势：①高度自适应下行多波束形成功能分离和上行多波束指向性发送；②任意控制的空间多星检测和跟踪能力；③灵活快速的波束扫描和不同功能的并行处理；④实时自适应零点控制和天线方向图优化性能；⑤系统高可用性和良好的监控能力。

4.2 技术难点

收发天线阵列的校正、宽带信号 DOA 估计和收发数字波束自适应形成算法是系统算法体系的关键和难点。对于接收和发送数字波束形成，相应的阵列数字信号处理都要进行大量的向量和矩阵运算。这是由阵列天线自身所具备的多维特性所决定的。特别是决定最优权值的时候，一般都要涉及到相关矩阵的求逆和特征分解等操作；而在做数字波束合成时，矩阵和向量的乘法运算又是不可避免的，这就对算法性能、计算复杂度、实时性能、硬件环境等提出较高要求。因此，采用并行处理的基本结构，将空间信道参数估计、下行

接收多波束产生和分离、上行发射多波束形成、收发信道校正等方面计算处理采用并行方式进行，深入研究其中的并行算法是系统实现的关键。

5 结束语

数字多波束天线技术在国内雷达和第三代移动通信领域是研究热点，在国外则成功应用于很多雷达和军事通信装备。就数字多波束天线系统的设备组成而言，阵列天线、T/R组件、多 DSP 信号处理系统、A/D 和 D/A、可编程器件技术、数据处理平台等均为成熟的工程技术。DBF 信号处理在理论上也已形成完整的体系，各种算法有许多成功的应用。因此，就卫星星座系统测控需求而言，需要研究针对性的适合工程实现的算法改进和移植。

参考文献

- 1 夏南银. 航天测控系统. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 2 Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport. Smart Antennas for Wireless Communications. IS-95 and Third Generation CDMA Applications Pearson Education, Inc. 1999
- 3 刘蕴才 主编. 遥测遥控系统(上下册). 北京: 国防工业出版社, 2000
- 4 林来兴. 发展我国小卫星星座和测控技术. 飞行器测控学报, 2000(3)

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>