

· 天馈伺系统 ·

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2014)03-0053-04

机载低剖面卫通天线的发展与未来

邹火儿, 韩国栋

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 机载平台上的卫星通信天线是机载航电设备中的重要组成部分, 文中对机载低剖面卫通天线进行了分类, 指出了不同天线形式的优缺点; 回顾了国外典型产品的研究现状, 并结合国内在机载低剖面卫通天线的研究方面进行了总结; 提出了未来机载低剖面卫通天线亟待突破的先进技术; 最后对机载低剖面卫通天线的发展进行了展望。

关键词: 机载平台; 低剖面; 卫星通信; 天线技术

Development and Future of Low Profiled Airborne Antenna for Satellite Communication

ZOU Huoer, HAN Guodong

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Antenna for satellite communication on aircraft plat is an important part of airborne avionics. Low profiled airborne antenna (LPAA) with different characteristics is classified. The studied status of overseas and domestic typical products are reviewed and concluded. The advanced techniques which need to realize on airborne low profiled antenna for satellite communication are proposed. Moreover, the developing trend of LPAA is prospected.

Key words: airborne plat; low profiled; satellite communication; antenna technique

0 引言

随着电子信息技术的发展, 卫星通信终端的天线技术也有了长足的进步。针对机载的高机动平台, 卫星通信设备可在飞机运动中实现宽带卫星通信, 传输视频信息、音频信息、数字信息等功能, 这也对天线提出了更高的要求。实现机载卫星通信的天线技术有多种形式, 如: 抛物面天线、平板阵列天线和相控阵天线等^[1-5]。

本文首先针对机载平台的卫星通信天线进行了分类梳理, 并指出了不同天线形式的优缺点; 随后对国内外在机载低剖面卫星通信天线方面的研究现状进行了回顾, 并着重介绍了国内在这一方面开展的研究工作; 最后, 针对未来机载卫通天线的发展趋势进行了展望, 提出了将来要突破的关键技术。

1 机载卫通天线的分类

20多年来, 机载卫通天线已经从抛物面天线发展到低轮廓天线。目前, 从技术层面看, 机载卫星通信天线主要有以下几种基本类型, 分别是: 反射面天线、介质透镜天线、阵列天线、相控阵天线等, 这也是动中通天线技术发展的基本历程。这几种天线各有自己的特点, 都有自己的应用范围, 用户可根据卫星天线的使用

环境、承载的方式、地理位置、主要业务和预算等情况, 综合来进行选择。

机载卫星通信天线常用的形式有小口径反射面天线、介质透镜阵列天线、平面阵列天线或多组阵列天线以及相控阵天线。各种形式天线在性能上各有优劣, 根据载体的安装要求和卫星系统的使用要求, 选用不同的天线形式。

1) 传统口径反射面和赋形反射面天线

传统抛物面天线用作动中通天线时, 需要将轮廓降低, 才能更好地发挥其优良的作用, 如大轴比椭圆波束天线等。在工作时, 其姿态调整采用机械式, 这类天线的典型代表是美国的 TracStar 天线等。其特点表现在:

优点: 增益高、带宽高。

弱点: 普通反射面体积和重量大, 安装不方便。

2) 介质透镜以及阵列天线

介质透镜天线采用馈源机械扫描的方式, 具有良好的电气性能, 并且可以实现多波束、多频段共用等性能。其关键技术有: 介质材料特性的控制, 馈源的收发共用、极化调整等功能的实现, 天线跟踪的实现, 该天线可方便形成多波束。

其特点主要在于:

优点: 易实现多频段、宽频带、多波束。

弱点: 插损大, 阵列控制实现较难。

3) 平面阵列天线

平面阵列天线分为一片与多片形式, 采用机械扫描方式, 其特点表现在:

优点:安装相对简单,搜索、锁星时间短。

弱点:天线口径效率低,增益不高,带宽也不高(比同口径抛物面天线要低得多)。

4) 相控阵天线

相控阵天线以一维有源体制为主,在卫通领域,二维阵列的使用范围相对较小,其姿态调整采用电调式,其特点表现在:

优点:体积小、重量轻、安装简单。

弱点:天线有效口径低,增益低,带宽窄,成本高。

从保障通信的高可靠性和高可用度出发,在选择动中通天线类型时,首先考虑采用高增益、高性能的天线形式,而不能拘泥于其外形结构。如果对于特殊应用平台,如机载、舰载等需要与载体共形时,则要考虑采用相控阵体制。

2 机载卫通天线的研究现状

2.1 国外机载卫通天线的研究现状

国外对机载卫星通信天线的研究取得了非常大的进展,一些新颖、高性能的产品也得以应用。主要的产品包括反射面天线、介质透镜天线、平面阵列天线(单片或多组片天线)以及相控阵天线(包括一维、二维以及共形阵等)。而研制该系列产品的公司也相当多,其中,以色列、欧洲、美国、日本以及韩国等较为出色^[6-7]。

以美国 TracStar 公司的等效口径 0.45 m 的 IMVS450M 产品为代表(如图 1 所示),是专为车载或者车载卫通系统而设计的宽带、高速率卫星通信产品。该产品具备俯仰波束扫描、低高度特点。但其馈源结构复杂。增益接收 ≥ 31.5 dBi,发射 EIRP >44.5 dBW,重量 <75 kg。

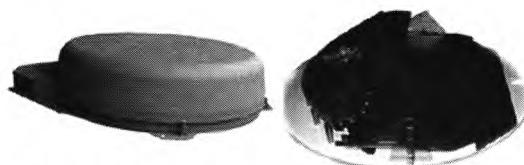


图 1 美国 TracStar 公司的 IMVS450M 天线系统

在 2004 年,美国空军实验室研制的介质透镜阵列,如图 2 所示,工作在 Ka 和 EHF 频段,双圆极化。在频率为 20 GHz 时,增益为 35 dBi;在频率为 44 GHz 时,增益为 41 dBi,扫描范围为 80°。

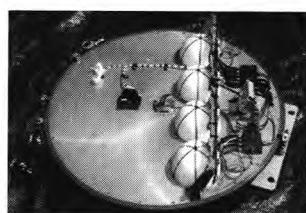


图 2 介质透镜阵列

Mijet 系列天线是以色列公司 Starling-com 的产品

(如图 3 所示),是 Ku 频段平板动中通天线。Starling-com 公司最初生产的空载动中通卫星通信天线,具有轮廓低、增益高、性能好等特点。该系统采用宽带天线单元,多天线子阵合成技术,极化自动实时跟踪,代表了合成天线的最高水平。



图 3 Mijet 天线在机身上的位置与内部结构

近年来,Starling-com 推出两款飞机上使用的 Ku 频段平板动中通天线 StarCar,分别为 MijetLite 和 MiniMijet,其外形及内部结构如图 4 所示。



图 4 StarCar 机载平板天线-MijetLite

EL/K 1891 机载动中通天线是以色列航空工业集团公司的产品,被使用在阿帕奇直升机上,提供 X/Ku 频段动中通卫星通信,天线采用波导缝隙结构,收发单元为 70 个~80 个。提供低速率数据传输。内部结构如图 5 所示,天线为二维机扫。

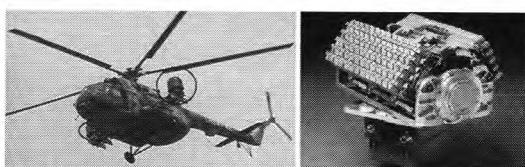


图 5 EL/K1891 机载相控阵动中通天线

EMS 公司主要从事军事陆航卫星通信方面天线以及系统的研发工作,其产品类型多为平板缝隙阵列、波导缝隙阵列等,如图 6 所示,其高增益天线产品主要有 AMT-3800 和 AMT-3500,以及部分无源相控阵产品。

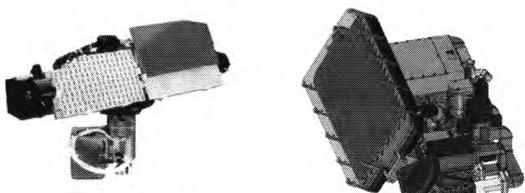


图 6 K/Ka 平板裂缝天线

美国的 Kymeta 公司与国际海事卫星组织合作于 2013 年 4 月新推出了一款基于超材料的 Ka 频段相控阵天线,如图 7 和图 8 所示。天线剖面极低,其中应用的超材料可以实现无移相器的电子波束扫描,因此,

可以与机身共形,高度低于 50 mm。在该天线中采用了可重构结合超材料表面的天线技术 (MSA-T),能够实现宽波束扫描。设计的天线具备相控阵天线的波束扫描性能,但无需移相器以及相关的放大器及其他元器件。

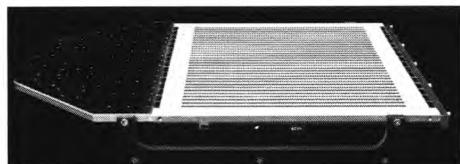


图 7 基于超材料的天线 Ka 频段相控阵天线



图 8 在机背上安装 Kymeta 天线的示意图

2007 年 1 月,美国诺斯罗普·格鲁门公司为首颗先进 EHF 频段军事卫星通信载荷开发的上行链路和下行链路相控阵天线已经安装到了首个飞行结构上,天线性能(与其他基本载荷组件一道)通过检验,如图 9 所示。2013 年 5 月 23 日,诺·格公司成功完成了一次 EHF 卫星通信天线的实际通信验证,证实了为 B-2 隐身轰炸机研制的这种新型有源相控阵 (AESA) 共形 EHF 卫星通信天线能够与美国空军在轨的先进极高频通信卫星进行通信。该新型天线能支持战略和战术任务,其创新的无透波罩设计使之能够在不影响 B-2 飞机主要作战性能的情况下,为该机带来新的通信能力。

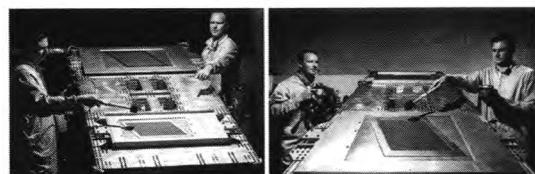


图 9 新型先进 EHF 天线发射阵列的测试

2.2 国内机载卫通天线的研究现状

目前,国内对机载低轮廓动中通天线的研究取得了长足进展,一些新颖、高性能的产品也得以推广。

模仿 TracStar 公司 IMVS450M 型天线研制了一款柱面动中通天线,高度为 30 cm,重量为 75 kg,等效口径为 0.45 m,采用 INS 惯导模块、GPS 和 AGC 电平进行跟踪。

2010 年至今,国内形成了多种等效口径的卫星通信平板阵列系列产品,拥有多项自主知识产权。

其中,Ku 频段平板动中通天线 CM60,如图 10 所示,实现天馈一体化设计,收发增益 ≥ 36 dB, G/T 值 ≥ 13 dB/K,采用二维机扫,方位 $0^\circ \sim 360^\circ$ 无限位,俯

仰扫描 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。双线极化,电子自动极化调整技术,交叉极化 ≥ 30 dB,其综合指标在国内属于领先地位。

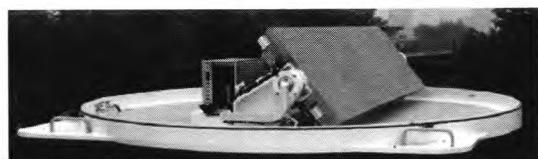


图 10 Ku 频段平板动中通天线 CM60

此外,机载波导平板阵列天线在各个平台上得到了广泛应用,如图 11 所示。

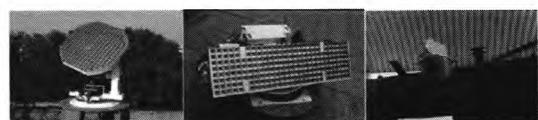


图 11 机载波导阵列天线

Ku 频段动中通天线为多组片双极化波导缝隙阵,片间采用相位补偿,电子极化调整,二维机扫,增益为接收 36.4 dB,发射 37.7 dB, G/T 值为 14 dB/K,重量为 50 kg,功耗为 450 W。



图 12 Ku 频段动中通天线产品

准确地说,以上这些天线都是平板阵列天线,未实现波束电子扫描。基于电子波束扫描的一维或者二维动中通天线技术,国内还没有较为成熟的产品出现。

3 机载卫通天线的发展方向

通过对各种形式用于移动载体的卫星移动通信低轮廓天线分析研究可知,反射面天线、平面阵列及相控阵天线等,都各具优缺点,可根据性能指标和载体的要求,选用合适的天线形式。对此,美国通用动力卫星通信技术公司的首席技术官汤姆·施罗耶认为,在未来市场的一段时间内,反射面天线仍将是高速率传输动中通产品的主流。该公司曾经研发过相控阵天线,并进行过内部测试,在天线波束扫描时,增益下降较为严重,在低仰角内只能支持较低的数据率,对于军事用户来讲有可能达不到他们的需求。

目前,开发多用途天线、增加天线带宽、缩小天线直径、使用新材料、向已有截面集成天线以及减少目标特征等已成为业界发展的目标,并且国内外许多学者也已经着手在这些方面开展了研究^[8-9]。所以,动中

通天线未来应该朝着高性能(相控扫描跟踪)、易共形(低轮廓)、模块化、集成化等方向发展,如图 13 所示。

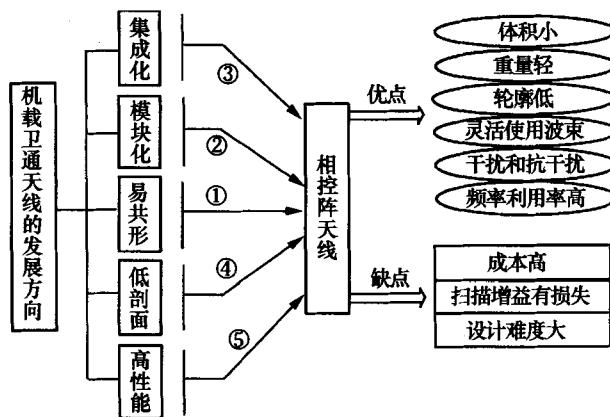


图 13 机载卫通天线的发展方向

从天线技术角度出发,动中通天线的发展趋势主要有以下几个方面:

1) 研制更宽频段天线。随着机载平台的要求越来越高,机体上要求安装的天线形式越来越多,如雷达、遥控、电子战、导航、通信等多频段多天线的布局形式,必须要求工作频率范围越来越宽,以减少天线种类,为此,必须研制更宽频段的天线,即超宽带天线。

2) 向 Ka、EHF 等高频段天线发展。伴随着 Ka 频段同步卫星的发射,今后卫星地面移动通信业务将逐步向 Ka 频段推进。由于 Ka 频段频率与目前普遍使用的动中通频率相比高出了许多。大量现有的成熟技术无法应用到 Ka 频段的天线上。因此,需要进行大量的研究工作,主要集中在天线形式和微波网络器件的研究。同时,随着国内卫星技术的发展,对 AEHF 星的发射,利用其进行军事通信提高数据传输能力和信息保密能力,也是未来技术发展的重点之一。

3) 向共形相控阵天线方向发展。需在以下关键技术方面有所突破和发展。主要包括:共形相控阵天线单元,用以克服平面相控阵低仰角增益变差的不足;移相器技术,RF-MEMS 技术、压控电介质技术和光电子技术的发展为实现高性能的相控阵天线奠定基础;数字化电路技术,用全数字的 T/R 模块代替模拟 T/R 模块,既可以方便地产生各种波束,又可灵活对天线阵列进行幅相加权,从而简化了系统结构,实现天线的小型化。

4) 新材料和新工艺技术。随着共形天线技术的发展,对天线的隐身效果要求越来越高,传统的制作工艺技术已不能满足通信性能、隐身性能、机械结构强度和小型化等多个指标的要求,而以石墨烯为代表的轻型、高传导率的新型材料的崛起为共形天线的发展带来了曙光,同时也为与有源相控阵天线技术有关的小型化射频电路、高速场效应管的发展提供了契机。与

新材料的崛起相对应的新工艺技术也随之发展。先进的微波集成工艺可大幅度地降低共形相控阵的体积和质量,加速发展天线系统微组装及微波集成工艺,这不仅可以推动共形相控阵的发展,对于推动整个卫通设备的微小型化、轻量化及集成化均有重大的作用。为从根本上提高相控阵的效率,需突破磷化铟、氮化镓、石墨烯等器件的工艺难关,以填补这一技术空白。

4 结束语

现阶段,机载卫通天线主要以赋形反射面天线和平板阵列天线为主。结合机械扫描方式对卫星进行跟踪,能满足大部分的技术需求。总的来说,共形相控阵是目前以及未来研究的热点之一,有着诱人的前景,其优越性在于体积小、重量轻、轮廓低,灵活、优化地使用波束,减少干扰和被干扰的机会,提高了频率的利用率,改善了系统性能。随着技术水平的不断提高,成本不断降低,应用面也会大大提高。

参 考 文 献

- [1] 林 敏,杨绿溪,龚铮权. 卫星移动通信地球站天线发展综述[J]. 电信科学,2006,22(3): 8-13.
Lin Min, Yang Lüxi, Gong Zhengquan. Survey of earth station antennas for mobile satellite communications[J]. Telecommunications Science, 2006,22(3): 8-13.
- [2] Miura A, Yamamoto S, Li H B, et al. Ka-band aeronautical satellite communications experiments using COMETS [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(5): 1153-1164.
- [3] Azadegan R. A Ku-band planar antenna array for mobile satellite TV reception with linear polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010,58(6): 2097-2101.
- [4] 牛传峰,杜 彪,韩国栋,等. 低轮廓动中通天线[J]. 中国电子科学院学报,2013,8(2): 150-155.
Niu Chuanfeng, Du Biao, Han Guodong, et al. Low profile antennas of sat-corn on the move[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2013,8(2): 150-155.
- [5] 韩国栋,杜 彪,陈如山. 卫星移动通信相控阵天线的研究现状与技术展望[J]. 无线电通信技术,2013,39(4): 1-6.
Han Guodong, Du Biao, Chen Rushan. Research status and technical prospect of phased array antenna for satellite communication on the move[J]. Radio Communications Technology, 2013, 39(4): 1-6.
- [6] Jung Y B, Eom S Y, Jeon S I. Experimental design of mobile satellite antenna system for commercial use[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010,56(2): 429-435.

(下转第 61 页)

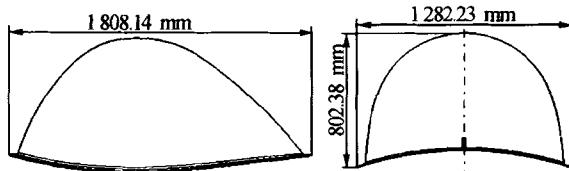


图 6 卫通天线罩外形尺寸

以上两个实例,无论是机头罩还是卫通罩,都进行了雷电鉴定试验。机头罩进行了 A 波和 D 波附着点试验、电流 A 分量和 B 分量试验,试验均顺利通过。卫通罩通过了扫掠通道附着点试验和电流 B、C、D 分量试验。

3 结束语

天线罩的雷电防护涉及飞机飞行安全、飞行任务完成和天线罩电性能等方面,是一个复杂的问题。需要综合考虑各方面因素,确定天线罩是否需要采取雷电防护措施。在天线罩雷电防护设计过程中,分流条的布局设计非常重要,无论是采用经验公式法还是比较不同路径的击穿电压,都有一定的不确定性,都需要借助雷电模拟试验加以检查和验证。

参 考 文 献

- [1] 虞昊,臧庚媛,罗福山. 电静电雷电防护 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1993.
Yu Hao, Zang Gengyuan, Luo Fushan. Electricity, static electricity, lightning protection [M]. Beijing: China Metrology Press, 1993.
- [2] 中华人民共和国航空工业部. 飞机雷电防护要求及试验方法 [R]. HB6129-1987. 北京: 航空工业出版社, 1987.
Ministry of Aviation Industry of the PRC. Lightning protection requirements and test methods for aircraft [R]. HB6129-1987. Beijing: Aviation Industry Press, 1987.
- [3] 蔡良元,王清海,温磊,等. 某飞机气象雷达天线罩雷电防护技术的研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(5): 66-70.
Cai Liangyuan, Wang Qinghai, Wen Lei, et al. Study on the lightning protection of the aircraft weather radome [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(5): 66-70.
- [4] 张先华,刘圣义,夏宏炳. 直 11 型机雷电防护设计及试验研究 [J]. 直升机技术, 2005(1): 31-37.
Zhang Xianhua, Liu Shengyi, Xia Hongbing. The lightning protection structure design and test research of the Z11 [J]. Helicopter Technique, 2005(1): 31-37.
- [5] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机雷电防护 [R]. GJB2639-1996. 北京: 总装备部军标出版发行部, 1996.
The General Armament Department of PLA. Lightning protection of military aircraft [R]. GJB2639-1996. Beijing: Military Standard Press of the General Armament Department, 1996.
- [6] Lars Josefsson, Patrik Persson. 共形阵列天线理论与应用 [M]. 肖绍球, 刘天柱, 宋银锁, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
Lars Josefsson, Patrik Persson. Conformal array antenna theory and design [M]. Xiao Shaoqiu, Liu Yuanzhu, Song Yinsuo, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [7] 王天顺,雷虹,李峰,等. 飞机雷电防护设计与鉴定试验 [J]. 飞机设计, 2009, 29(5): 54-59.
Wang Tianshun, Lei Hong, Li Feng, et al. Design of lightning protection and certification test for aircraft [J]. Aircraft Design, 2009, 29(5): 54-59.
- [8] 李振兴. 天线罩介质损耗的精确测量 [J]. 现代雷达, 2002, 24(1): 81-83.
Li Zhenxing. Accurate measurement of radome dielectric loss [J]. Modern Radar, 2002, 24(1): 81-83.
- [9] 王旭苗,甄蜀春. 遗传算法对天线罩结构的优化 [J]. 现代雷达, 2003, 25(3): 50-53.
Wang Xuzhao, Zhen Shuchun. Analysis and optimal of transmission properties of radome on GA [J]. Modern Radar, 2003, 25(3): 50-53.

许 群 男, 1966 年生, 研究员。研究方向为雷达罩设计与研究。

王云香 女, 1962 年生, 硕士, 研究员。研究方向为雷达罩质量控制。

cost phased array for mobile Ku - band satellite terminal [C]// 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona: IEEE Press, 2010: 1-5.

邹火儿 男, 1976 年生, 硕士, 高级工程师。研究方向为卫星通信天线设计。

韩国栋 男, 1980 年生, 博士, 高级工程师。研究方向为天线理论设计。

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>