

文章编号 1005-0388(2008)06-1139-06

机载天线辐射特性的并行 FDTD 分析^{*}

雷继兆[☆] 梁昌洪 丁伟 张玉

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,陕西 西安 710071)

摘要 利用基于 MPI 的并行 FDTD 全波数值分析方法对机载天线辐射问题进行准确快速地分析。通过消息传递 MPI 平台和区域分割技术进行并行计算,实现了计算资源的扩展,可以对飞机和天线进行精确建模分析。根据网络法提出了 FDTD 应用于天线间隔度的分析计算方法,避免了天线间隔度扫频计算的复杂性。数值结果表明该方法的正确性和有效性。以伊尔 76 飞机为例分析了机载超短波天线的方向图和隔离度。所用方法和分析结果可以作为飞机电磁兼容性设计的手段和依据。

关键词 机载天线;并行 FDTD 算法;方向图;隔离度

中图分类号 TN820.1 **文献标志码** A

Analysis of radiation characters of airborne antennas with parallel FDTD

LEI Ji-zhao LIANG Chang-hong DING Wei ZHANG Yu

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology,
Xidian Univ., Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract A scheme is presented by applying parallel FDTD method based on MPI to analyze the radiation problems of the airborne antennas accurately and quickly, which is a full-wave numerical method. The computation space is divided into some sub-domains, then the computation resource is expanded by MPI parallel platform and a divide-and-conquer approach. The isolation between antennas based on FDTD is computed for avoiding the complexity of sweeping frequency. Numerical results for the radiation patterns and isolation of the ultrashort wave airborne antennas of Eel 76 show that the method is correct and efficient, and may be useful for the EMC analysis and design of the airplane.

Key words airborne antenna; parallel FDTD algorithm; radiation pattern; isolation

引言

在电子通信技术飞速发展的今天,由于通信、导航等需要,机载平台上天线林立,电磁环境复杂。飞机本身是一个复杂的电磁散射体,机身、机翼、起落架等都会引起天线方向图的改变。同时,天线作为通信电子设备中电磁能量的发射和接收端口,最有

可能形成相互的辐射干扰。因此,如何从天线方向图受机体散射的变化和收发隔离度的角度去研究天线在飞机上的最优化布局已经成为机载 EMC 技术研究的主要内容。由于通过实验测量的方法分析机载天线非常困难,理论分析和计算就成为预测机载天线辐射特性的重要手段。

对于机载天线的分析一般可以分为低频方法和

* 收稿日期:2008-03-03.

基金项目:武器装备预研基金项目(No: 9140A07040106DZ01)

☆ E-mail: xdljz2000@163.com
万方数据

高频方法,以及在此基础上出现的高低频混合算法。MoM是分析天线问题一种通用可靠的低频方法,但支撑天线的载体或周围环境复杂时,MoM的效能将显著下降;高频方法有GO(几何光学法)、PO(物理光学法)、GTD(几何绕射理论)和UTD(一致性几何绕射理论),这些方法对于约1GHz以上的高频区是适用和较为准确的,但对短波、超短波波段这样的低频范围显得不够准确,而且它们不适用于分析天线的近场耦合特性;MoM和各种高频混合算法(例如MoM-UTD,MoM-PO)一般存储量较大,求解较为困难,而且是点频计算,计算工作量较大^[1]。

为了解决以上问题,提出基于MPI的并行FDTD方法分析机载天线的辐射特性。FDTD方法^[2~4]1966由Yee提出以来,近年来已在天线、散射与逆散射、电磁兼容、生物电磁等领域获得广泛应用。FDTD的优势在于,其一是一种全波分析方法,对机载天线辐射、机体遮挡绕射等全部物理过程隐含于计算之中,结果准确;其二是在时域上进行计算,通过傅立叶变换可得到一个全频域上的特性,避免扫频所出现的大工作量。但是传统的FDTD方法在分析电大尺寸问题时会遇到困难,主要是计算资源不够造成网格划分不能足够密,影响计算精度。并行FDTD方法^[5]可以扩展计算内存,是分析复杂电大尺寸平台的天线问题的一个很好的选择。在网络并行计算方面,已有的文献多关注电磁散射问题的研究^[6~8],该文将MPI应用于FDTD实现并行计算,将程序运行于本文组建的高性能PC集群系统,准确快速地解决了机载天线的辐射特性分析。

1 基本算法和理论

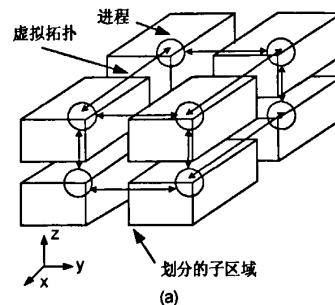
1.1 并行FDTD算法

FDTD方法的并行计算,是将整个FDTD计算区域划分为若干个子区域,每个进程计算其中的一个或者多个子区域,各个进程之间通过传递界面上的电磁场量以确保FDTD方法的场值求解能够进行下去。要搭建网络并行系统,一个可移植的、基于消息传递的并行编程平台必不可少。MPI(Message Passing Interface)和PVM(Parallel Virtual Machine)是两种应用广泛的消息传递软件包^[9],MPI环境中并行算法的实现是国际上并行电磁计算研究的热点和主流^[10],所以本研究工作将基于MPI并行环境进行。

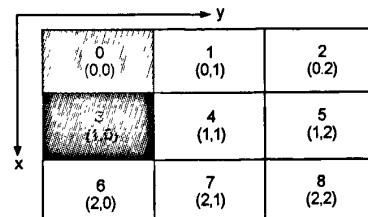
在并行应用程序中,进程的线性排列不能充分地反映进程间在逻辑上的通信模型,所以各进程经

常被排列成二维或三维网格形式的拓扑模型,而且,通常用一个图来描述逻辑进程排列,这种逻辑进程排列被称为虚拟拓扑。应用问题中较为常见、也是较为简单的一类进程拓扑结构具有网格形式,这类结构中进程可以用笛卡尔坐标来标识,MPI中称这类拓扑结构为笛卡尔(Cartesian)拓扑结构,并且专门提供了一组函数对它们进行操作^[9]。通过虚拟拓扑,可以非常方便地控制节点的上下、前后以及左右关系。

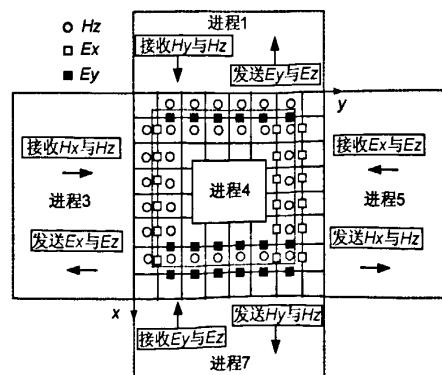
如图1(a)所示,进程虚拟拓扑沿着三个方向建立,沿三维方向分割计算区域时,会在不同的方向上出现子域交界面,子域之间所需的场值通信可以分解为若干二维情形来理解。



(a) 三维划分计算区域与虚拟拓扑



(b) 三维计算区域的xoy面二维划分



(c) xoy面上进程的场值通信

图1

以 xoy 面上的二维场值通信为例,用中间进程 4(图 1(b))来描述所需要的场值数据通信。如图 1(c)所示,在一个具有笛卡尔拓扑结构的通信器中经常在一个指定方向上在处理器间进行数据平移,比如用 MPI_SENDRECV 将一块场值数据发送给该维“上方”的一个进程,同时接收从该维“下方”的一个进程发送来的场值数据。这种情况下,MPI 库函数中提供了一个函数 MPI_CART_SHIFT(COMM,DIRECTION,DISP,RANK_SOURCE,RANK_DEST,IERR),可方便地对目的地址和源地址进行计算,这个函数使得并行 FDTD 方法的场值通信变得非常直观。只要依照图 1(b),先利用 MPI_CART_SHIFT 获得进程间的关系,然后根据图 1(c)所示进行上、下、左、右的发送与接收就可以非常方便地实现场值通信了。其它面上场值通信同理。

三维并行 FDTD 算法的计算流程如下

1) 初始化:

(a) MPI 初始化;(b) 从输入文件读入模型参数并创建网格需要的信息;(c) 创建三维笛卡尔拓扑结构;(d) 为数据传递定义数据类型;(e) 开始计时;(f) 各个进程划分内存;(g) 设置电磁场量初值为零;

2) 在每一时间步:

(a) 计算每个进程上的磁场分量;(b) 进程之间磁场分量互相通信;(c) 计算每个进程上的电场分量;(d) 在包含激励面的进程上(可能是多个)产生激励;(e) 进程之间电场分量互相通信;(f) 将所需要的进程上的计算数据收集起来;

3) 将 S 参数或者其他所需的值传递到某一个固定进程中,写入文件;

4) 存储计算结果;5) 释放内存;6) 停止计时;7) 终止程序。

1.2 隔离度理论

隔离度用来定量表征天线间耦合程度。把收发天线等效为微波网络,隔离度定义为 1 端口接信号源,2 端口接负载时,信号源耗用功率 P_s 与负载吸收功率 P_r 比值的 10 倍对数值。我们这里研究任意天线间隔离度。指的是天线不附加任何匹配网络直接和发射机、接收机相连。等效网络如图 2 所示。

隔离度定义为

$$I = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_r} \right) \quad (1)$$

经过推导可得

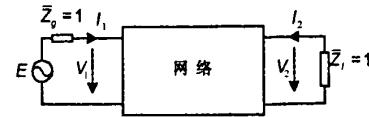


图 2 等效网络

$$I = 10 \log \frac{\operatorname{Re}\left(\bar{Z}_{11} - \frac{\bar{Z}_{12}^2}{\bar{Z}_{22} + 1}\right)}{\left| \frac{\bar{Z}_{12}}{\bar{Z}_{22} + 1} \right|^2} \quad (2)$$

由式(2)可以发现,求解隔离度的关键是获得互阻抗与互导抗。

就二端口网络而言,对天线 1 和天线 2 进行中心馈电,激励电压分别为 V_1 和 V_2 ,令 $V_2=0$ 就满足了二端口短路的条件,自导纳和互导纳可由下式计算

$$\begin{cases} Y_{11} = \frac{I_1}{V_1} \Big|_{V_2=0} \\ Y_{21} = \frac{I_2}{V_1} \Big|_{V_2=0} \end{cases} \quad (3)$$

对于并行 FDTD 方法,具体的求解步骤为:

1) 根据研究问题的频率范围,选取 FDTD 网格剖分尺寸,然后对天线及整个电磁环境建立 FDTD 模型,设立激励端口,采用 δ 电压源激励;

2) 记录天线馈电点处每一时刻的时域电压 $U_1(t)$ 和时域电流 $I_1(t), I_2(t)$;

3) 通过傅立叶变换得到频域电压 $U_1(f)$ 和频域电流 $I_1(f), I_2(f)$;

4) 根据式(3)可得两天线间的自导纳和互导纳,进一步根据式(2)可得天线间隔离度 I 。

2 数值结果和分析

计算所使用的 PC 集群配置:8 台计算机,CPU 2.8GHz, RAM 1.0GB, 1000Mb/s 网卡。

2.1 验证算例

模型如图 3 所示,中心频率均为 300 MHz 的单极子天线 1 和 2 垂直于圆柱表面分别沿 x, y 正轴放置,圆柱半径为 0.5 m、高度为 4.0 m,计算隔离度时扫频范围为 150~450 MHz, FDTD 采用的网格剖分为 $dx=dy=dz=0.0125$ m, 使用 5 层 UPML, 网格总量取为 $140 \times 140 \times 360$ 。图 4 给出了隔离度曲线,图 5 给出了天线工作于中心频率处时 xoz 面和 xoy 面的归一化方向图,可以看出并行 FDTD 方法与 MoM 吻合良好,表明了该算法的准确性。

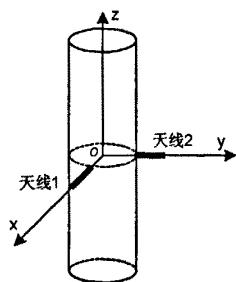


图3 圆柱上两单极天线

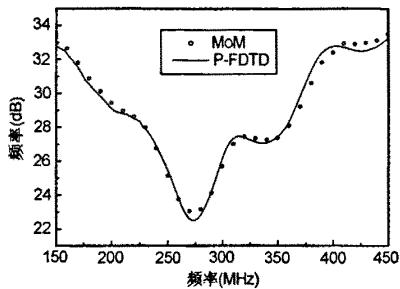
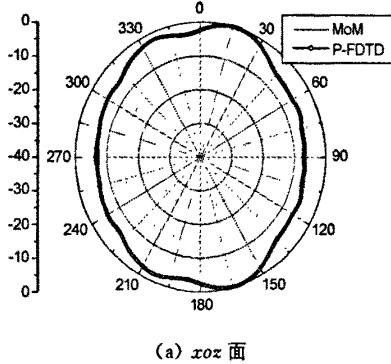
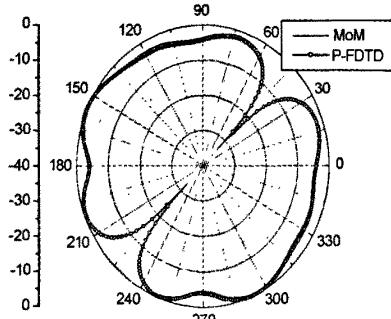


图4 天线的隔离度曲线



(a) xoz 面



(b) xoy 面

图5 天线的归一化辐射方向图

需要指出的是,采用MoM分析隔离度时在150~450 MHz之间选择31个频点,计算用时约22.32 h,而采用并行FDTD方法分析隔离度时大约运行

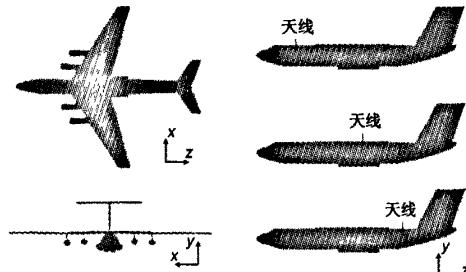
3000次迭代天线馈电点处的电流就可以收敛,计算用时约为1.05 h,由此可见并行FDTD的优越性。

2.2 伊尔76机载天线算例

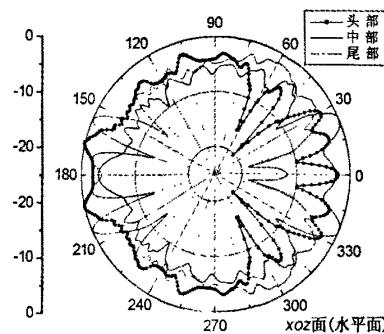
2.2.1 单根机载天线在飞机不同位置的方向图

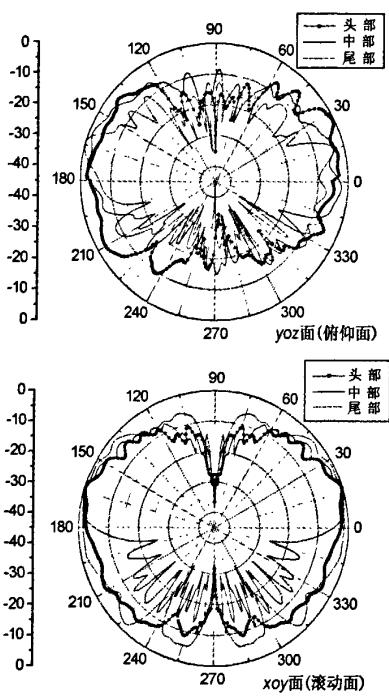
伊尔飞机模型如图6(a)所示,飞机实际尺寸(机长×机宽×机高)为46.59×50.5×14.76 m。本例研究的是机载超短波单极子天线的问题,天线工作频率为50 MHz,并行FDTD剖分网格的尺寸选为 $dx=dy=dz=0.15$ m,使用5层UPML,网格总量取为 $400\times150\times380$,总的计算内存约3G,并行时每台计算机内存约为0.4G,单极子天线分别放置在机身头部、中部和尾部三个位置。位置坐标分别是(0,2.4,8.55)m,(0,2.4,23.55)m和(0,2.4,32.55)m,其中坐标原点在FDTD计算区域的中心。并行FDTD运行1500次,迭代大约耗时1.12个小时,得到三个正面的归一化辐射方向图如图6(b)所示。

综合对比三种情况下的方向图可知:由于天线位于机身中轴线上,所以三种情况下的水平面和滚动面的方向图都是对称的;俯仰面的方向图受机身影响较大,对比第一种和第三种情况可以发现,远离天线的机身部分遮挡效果明显,导致了那部分机身下侧的场值比靠近天线附近的机身下侧场值要小;而滚动面的方向图除受机身影响外,主要受机翼影响较大,尤其第二种情况,当天线位于飞机机身的中



(a) 安装单根天线的飞机 FDTD 建模三视图





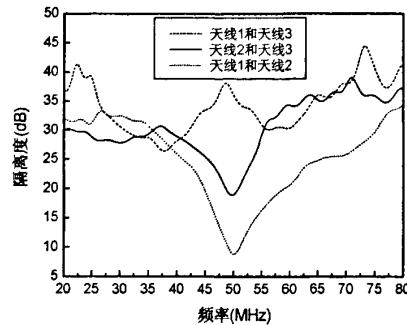
(b) 机载单极子天线方向图

图 6

间距离相对较远且相互处在不可见区,故天线 1—天线 3,天线 2—天线 3 之间的隔离度较好。



(a) 安装三根天线的飞机侧视图



(b) 机载三根天线间隔度曲线

图 7

部时,机翼的影响比其他两种情况的影响都要大,导致飞机下侧的场振荡明显,其值也明显小于上侧的场值。

2.2.2 三根天线间的隔离度

三根单极子天线位置如图 7(a)所示,天线 1 的位置为(0,2.4,8.55)m,指向垂直于机身;天线 2 的位置为(0,1.35,2.55)m,指向垂直于机头驾驶舱;天线 3 的位置为(0,-2.4,8.55)m,指向垂直于机身,扫频范围为 20~80 MHz,网格尺寸同上,计算时间约为 3.6 h。三根天线间的隔离度曲线如图 7(b)所示。

由隔离度曲线可以看出,由于机身结构的复杂性,天线间的隔离度不仅随频率变化而且随位置强烈变化。总体而言,隔离度的趋势是随着频率的增加而增加的,究其原因是由于天线安装位置固定,随频率的提高,天线间的电距离加大,由空间衰减效应造成隔离提高;同时,随着频率的提高,天线辐射波逐渐从以爬行传播分量为主向以直线传播分量为主过渡,也造成接收天线接收能量减少,隔离度提高。另外,间隔距离大的天线间隔度较高,由于天线 1 和天线 2 距离相对较近且互相处在可见区因而隔离度较差(30 dB 以下),而天线 3 和天线 1、天线 2 之

3 结论

针对机载平台天线辐射特性分析这一工程难题,利用基于 MPI 的并行 FDTD 方法进行全波分析,提出了 FDTD 中天线收发隔离度的计算。数值结果表明,该方法可以准确快速地分析机载平台天线特性。最后分析了伊尔 76 飞机平台对机载天线辐射方向图的影响和机载天线间的隔离度,得到了一些有用的结论。这种方法做进一步扩展,可以为分析机载平台天线最优布局分析软件打下良好基础。

参考文献

- [1] 薛正辉,高本庆. 机载短波天线间隔度的全波分析[J]. 电波科学学报,2000,15(4):477-481.
Xue Z H, Gao B Q. The isolation analysis between airborne short-wave antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(4): 477-481.
- [2] A Taflove. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method, 2nd ed [M]. MA: ARTECH HOUSE, INC, 2000.
- [3] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [4] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

(下转第 1182 页)

tions[J]. Journal on Communications, 2005, 10(1): 60-64.

- [12] 同 岩,王 薇,杜正伟. 复杂室内环境超宽带信号信道模型及仿真结果分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(4): 567-570.

Yan Y, Wang Q, Du Z W. UWB channel model and simulation for complex indoor environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(4): 567-570.



吴常国 (1977—), 男, 四川人。南京邮电大学通信与信息工程学院博士生。1999年本科毕业于南京邮电学院通信工程系。2002年硕士研究生毕业于南京邮电学院计算机科学与技术系。目前研究方向为无线通信与电磁兼容。

(上接第 1143 页)

- [5] Gui aut C, K Mahdjoubi. A parallel FDTD algorithm using the MPI library[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43 (2): 94-103.
- [6] 郑奎松, 葛德彪, 葛 宁. 三维电磁散射的网络并行 FDTD 计算和加速比分析[J]. 电波科学学报, 2004, 19 (6): 767-771.
Zheng K S, Ge D B, Ge N. Parallel FDTD computing for 3D EM scattering problem and its speedup-factor analysis[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6): 767-771.
- [7] 同玉波, 葛 宁, 郑美艳, 等. 网络并行 FDTD 方法分析电大目标电磁散射[J]. 电子学报, 2003, 31(6): 821-824.
- [8] 薛正辉, 杨仕明, 高本庆, 等. FDTD 算法的网络并行运算实现[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1839-1843.
- [9] 都志辉, 高性能计算并行编程技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [10] 张 玉. 电磁场并行计算[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.



朱洪波 (1956—), 男, 江苏人, 南京邮电大学副校长兼通信与信息工程学院院长, 教授, 博士生导师, 目前研究方向无线通信与电磁兼容, 移动通信与宽带无线技术。



雷继兆 (1983—), 男, 陕西人, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生。目前主要从事电磁数值计算, 电磁兼容等方向的研究。



梁昌洪 (1943—), 男, 上海人, 西安电子科技大学电子工程学院教授, 博士生导师, 曾任西安电子科技大学校长、中国电子学会会士、IEEE Senior member。研究方向包括计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面。

- 丁 伟 (1980—), 男, 安徽人, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生。主要从事电磁场数值计算等方面的研究工作。

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>