

基于 FDTD 算法的车载多天线系统仿真研究

杨荣强, 周 嫻

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:采用时域有限差分法对某通信车载天线系统的电磁兼容特性进行了模拟仿真分析。分别讨论了车载天线整个系统的建模、线天线系统的建模、天线的馈电。仿真分析了车载天线系统各个天线之间的天线间耦合度, 分析了其中天线的方向图。仿真结果为实际工程中车载天线系统的优化设计提供了一定指导意义。

关键词:时域有限差分法; 线天线; 耦合度; 方向图

在车载通信系统中, 线天线应用广泛。随着通讯系统的复杂化, 同一载体上多个天线间的相互干扰问题严重影响到系统工作的可靠性。因此, 研究天线间的耦合干扰机制对改进通信系统的设计、提高通信质量和可靠性有重要意义。现有的最主要的电磁学算法有矩量法、有限元法和时域有限差分法, 其中时域有限差分法是进行天线间相互干扰分析的一种有效方法, 它是一种全波分析法, 能较好地反映电磁波的传播情况。

一般情况下, 体现车载天线系统电磁兼容特性的因素较多, 主要有天线或通信设备的安装位置、天线间距离以及工作频段等。因此对车载多天线系统进行电磁兼容分析, 应着重对上装天线进行特征分析。考虑以下几个方面: 天线的近场特性, 包括近场场强, 车体电流等; 天线的远场特性, 主要体现在天线的方向图; 天线的耦合特性, 即天线的耦合度计算。

本文用时域有限差分法(FDTD)对某通信车载天线系统进行了计算研究, 分析了天线的远场方向图, 天线间的耦合度随距离的变化以及天线间的耦合度随频率的变化。计算结果和矩量法进行了比较, 得到了较好的仿真结果。

1 仿真结构及模型描述

建立计算网格空间是用 FDTD 算法处理所有问题需要首先解决的, 其出发点主要依据需要处理对象的特点和所要达到的目的来决定, 主要的问题是采用何种网格结构。当前, 时域有限差分法的网格形式已有很多种。一般来讲, 如果直角坐标中的立方体网格能够满足要求, 则应尽量采用, 因为用它处理很多问题最为简单直观, 而且容易和各种相关技术衔接。

天线及车体结构的模拟是在网格空间中给一些网格赋予适当的介电常数和电导率, 以便使这些网格组成的整体在几何形状、物理尺度和电磁特性等方面都与被模拟的物体最大限度地接近, 这个网格整体就称作物体的网格模型, 这个过程在 FDTD 中被称作建模。对于车载天线系统的建模主要包括车体的几何建模和天线的建模。

本文是基于车体几何面片组成的封闭体模型, 对网格进行介质填充。图 1 所示即为某车体的原始简化模型。该车上装有 4 根天线, 车体由有限个平面封闭而成, 这些平面一般为四边形或三角形, 每一个四边形和三角形的坐标点是已知的, 这些几何数据将用来完成介质参数的填充, 实现 FDTD 的车体建模过程。

1.1 FDTD 计算区域的划分

对于自由空间问题, 电磁场分布于全空间。但是使用 FDTD 模拟计算时只能截取空间有限区域, 该空间有限区域便称为 FDTD 计算区域。对于 FDTD 区域的划分一般分以下两种情况: 散射问题和辐射问题。这两种情况是根据激励源所处位置来区分的。当激励源位于研究目标内部时, 即电磁波是由研究目标本身产生的, 则称为辐射问题; 反之, 若激励源位于研究目标外部, 外界电磁波对研究目标进行电磁作用时, 则称为散射问题。

对于辐射问题, 由于激励源直接加到辐射天线上, 整个 FDTD 计算区域为辐射场, 如图 2 所示。输出边界和吸收边界的作用体现在: (1) 可在吸收边界处设置吸收边界条件, 利用有限计算区域模拟开域的电磁辐射过程; (2) 可根据等效原理, 应用输出边界处的近区场结果实现近—远场外推, 得到远场结果。

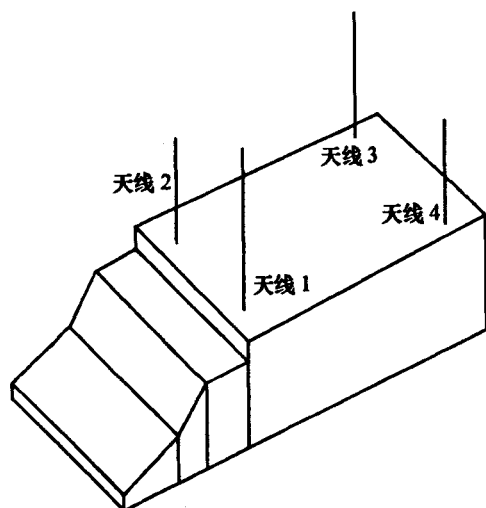


图 1 某车体原始模型

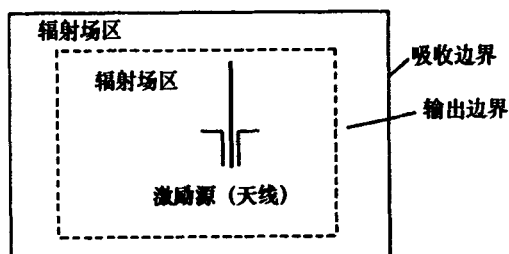


图 2 辐射计算是 FDTD 区域的划分

1.2 车载线天线建模

本文分析的车载天线系统的天线为线天线,截面尺寸较小,不到一个 FDTD 网格。常规 FDTD 法是将网格细化,所划分的网格大小需小于天线的直径,而线天线的直径远小于车体的大小,故对模型采用传统的划分方法会使整个计算空间的网格数过大,增加计算量,计算效率不高,为此对线天线采用细导线模型。采用半解析数值方法,可有效模拟细导线附近场的变化。而与细导线相邻元胞中的 E_x , E_y , E_z 时域推进计算不需要特别处理,应用常规 FDTD 差分公式即可。另外,离开导线一个网格以外的单元中各个场量仍用普通 FDTD 格式。

2 天线的馈电和激励

FDTD 方法分析天线问题的重要技术之一是馈电方法的模拟。就目前的研究一般有三种馈电模拟方法:同轴线馈电法、缝隙馈电法 (Gap Feed)、周边馈电 (Frill Feed) 法。通过计算表明,两种激励方式均可满足计算模拟的准确性和精度要求。本文采用较为简单的缝隙激励方式,示意图如图 3 所示。

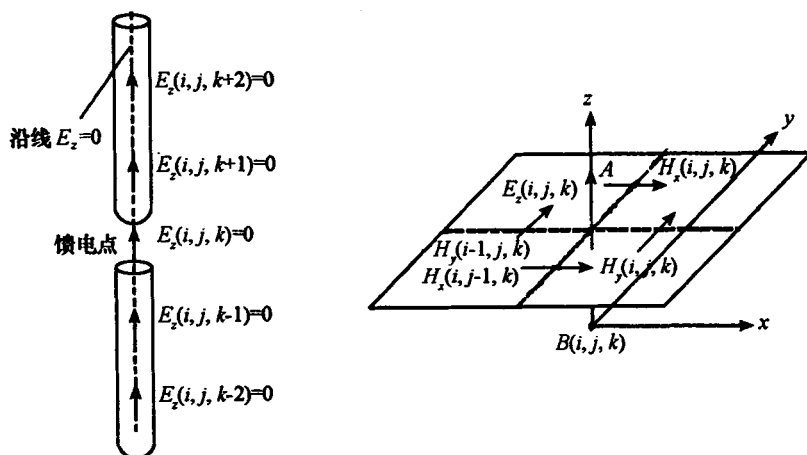


图 3 天线缝隙馈电示意图

3 车载天线电磁特性分析

3.1 天线耦合特性分析模型

对于车载多天线系统,天线耦合特性是通过天线间的耦合度来体现的,它是衡量共址天线工作性能和特性的重要参量。耦合度越小,接收天线对功率的响应越小。实际工程中经常通过天线的耦合度大小来间接评估收发机间的电磁干扰。

根据电磁场传播理论,可将多天线问题在电气上可等效为广义多端口网络。每副天线对应广义网络的一个端口,天线的馈线为端口传输线。因此,天线的耦合度可以用多端口网络的 S 参数来表征,具体分析模型如下所述。

首先明确耦合度的定义。天线间的耦合度 CP 定义为:

$$CP = 10\lg(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}) = 10(P_j/P_i) \quad (1)$$

其中 P_{in} 为发射天线的净输入功率, P_{out} 为接收天线的净输出功率, $P_j = U_j I_j$, 为 j 端口匹配时其参考面上的功率; $P_i = U_i I_i$, 为 i 端口的输入功率(不包括反射功率)。

实际工程中模拟计算时,可通过端口网络中的 S 参数来表示耦合度:

$$CP = 20\lg |s_{ij}| \quad (2)$$

其中, s_{ij} 代表 i 端口入射信号时, j 端口输出信号的传输系数。由 FDTD 法得出的是时域参数,使用式(2)时,需将时域参量经 DFT 变换为频域参量。

由于馈电方式的原因不能直接将天线的端口设置成匹配状态,因而不能直接得到代表天线耦合度的 S 参数。为了得到 S 参数,首先计算端口网络的导纳矩阵 Y 。当激励某一端口时,其余端口设置成短路,并记录每个端口的电流响应,经过傅里叶变换到频域响应后,用电流除以激励端口的电压,分别得到相对于激励端的导纳

$$Y_{ij}(\omega) = \frac{F(I_i(t))}{F(V_j(t))} \quad (3)$$

式中 F 表示傅里叶变换。得到导纳矩阵后,根据端口网络理论中散射矩阵 S 与导纳矩阵 Y 的换算关系可以得到 S 的每一项参数:

$$\begin{cases} S_{11}(\omega) = \frac{(Y_0 - Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}} \\ S_{12}(\omega) = \frac{-2Y_0Y_{12}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}} \\ S_{21}(\omega) = \frac{-2Y_0Y_{21}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}} \\ S_{22}(\omega) = \frac{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, Y_0 是天线的特征导纳。

3.2 天线的方向特性

车载多天线系统中,天线朝空间各个方向辐射电磁波或敏感设备接收各个方向传来的电磁波的能力是不相同的。描述这种定向辐射或定向接收能力的参数称为天线的方向特性,它包括方向图、主瓣宽度、增益等指标。其中方向图最能直观地体现车载天线系统的远场特性,它是天线的主要电参数之一,是指在离天线一定距离处,辐射场的相对场强(即归一化模值)随方向变化的曲线(面)图。它的好坏直接影响无线电通讯系统的收发效果和通讯距离。天线上装到车体后,由于车体表面的遮挡、散射及其他辐射源的互耦影响,天线方向图将会发生畸变,这意味着天线在某些方向上的信号传输功率将受到影响。天线方向图有平面方向图和立体方向图两种表示形式,通常采用平面方向图表示形式。对于垂直于 z 轴放置的电基本振子而言,这两个平面分别为 E 面(与电场平行的面)和 H 面(与磁场平行的面)。任何实际天线的辐射都具有方向性。方向性函数是方向图的数学表达式,描述了电磁场强度在空间的相对分布情况。定义场强的归一化方向性函数为

$$F(\theta, \phi) = \frac{|E(\theta, \phi)|}{|E_{\max}|} \quad (5)$$

式中: $|E_{\max}|$ 为 $|E(\theta, \phi)|$ 的最大值。

本文根据本项目研究的车体特征采用图 4 所示车体几何建模及电磁场分析的坐标系。其中,坐标原点与车厢顶面中心在地面上的投影重合;俯视坐标系时, X 轴正向水平朝右, Y 轴正向竖直朝上, Z 轴按右手系确定。生成的方向图是在高度为 $Z = H$ 的平面上且离 Z 轴 $r = R$ 处的辐射场的相对场强随方向变化的曲线图。

由惠更斯等效原理求得输出边界的等效电流和等效磁流,再由自由空间格林公式求得图 4 坐标系中圆周上任意点的场强值,然后结合式(5)便可得到归一化场强值 $F(\theta, \phi)$,绘制方向图。实际绘制方向图并不需要大量的点,本文考虑到远场计算精度的需要,在 θ 的取值范围 $0 \sim 360^\circ$ 内,按 θ 角每隔 1° 采样计算点的场强。

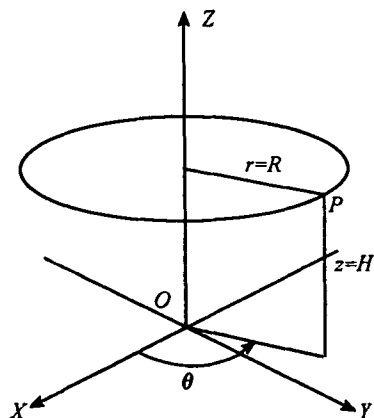


图 4 坐标系与场强的计算空间图

4 计算结果及其分析

为了说明本文中 FDTD 分析方法和模型的可行性和准确性,以下通过一个实际算例具体说明。主要从三个方面分析:近场时域特性分析、耦合度求解和方向图分析。

车体模型采用图 5 所示模型,该车上装 4 部超短波电台(收、发),车身尺寸为:长 6.5m,宽 2.9m,高 2.5m。电台具体参数如下:发射功率(大功率):65W;4 副天线的长度分别为 2m,1.5m,2.8m,2.8m;底部馈电,全向。天线半径均取为 $r = 0.02\text{m}$,具体安装位置如图 5 所示。

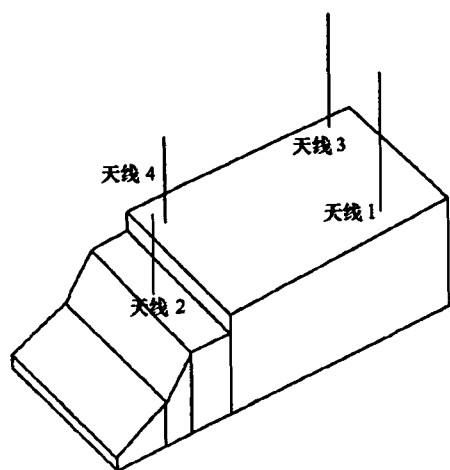


图 5 某车原始模型

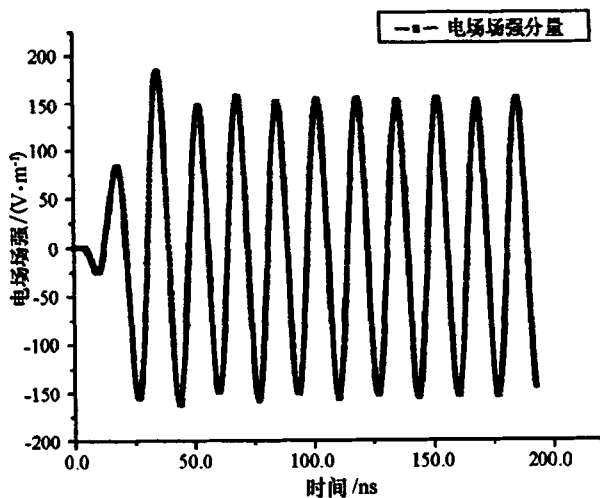


图 6 60MHz 正弦激励下的 A 点电场时域变化

4.1 近场场强计算

FDTD 仿真计算的直接结果是近区电磁场场强值,因此近场结果的正确性是保证后续计算的前提。计算某点 A 处的电场场强沿 z 轴方向分量 E_z 的幅值随时间的变化情况。其中 A 点是距离车顶高度 0.5m 且距离车体两侧的距离相等的车外点。FDTD 算法的参数设置如下:取计算空间网格为 $170 \times 100 \times 150$,设置 PML 吸收边界为 10 层。空间步长取 $\delta = 0.05\text{m}$,时间步长取 $\Delta t = 5 \times 10^{-11}\text{s}$ 。采用正弦激励,幅值取 1000V,计算天线 2 工作频率为 60MHz 发射时 A 点的电场值 E_z ,其结果如图 6 和图 7 所示。将激励改为高斯脉冲激励,脉冲宽度 $\tau = 32\Delta t$,其他条件均不变,得到 A 点沿 z 方向电场分量时域变化。由图 6 和图 7 的计算结果可以看出,在正弦波激励下,电场达到稳态,得到标准的正弦波时域分布形式,高斯脉冲激励下,计算结果收敛为零。由此

证明本文中采用的算法和关键技术能够正常达到稳态和收敛,时谐激励和瞬态激励均适用。

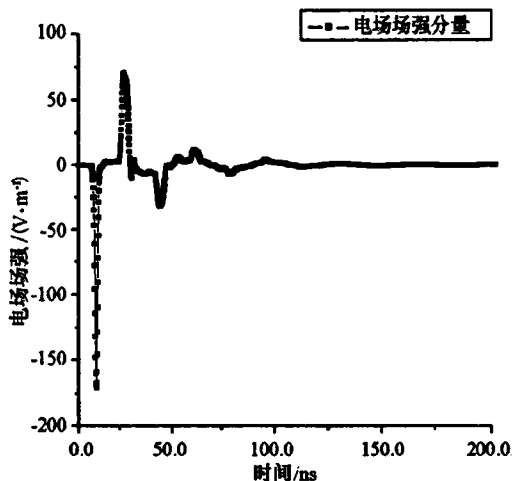


图7 高斯脉冲激励下A点电场时域变化

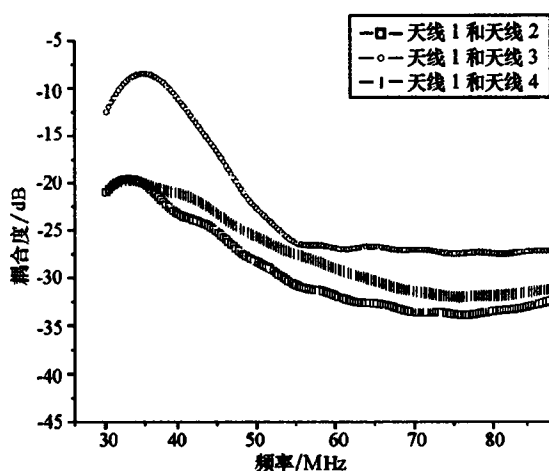


图8 FDTD 计算天线间的耦合度

4.2 耦合度计算

由于 FDTD 方法的一个优点是:可以采用脉冲激励通过傅立叶变换一次性得到宽频特性。本例采用高斯脉冲激励天线1,脉冲宽度 $\tau = 32\Delta t$,其余天线设置为匹配状态。其余设置如4.1所述。计算天线1与天线2、天线1与天线3、天线1与天线4的耦合度,结果如图8所示。

结果表明,FDTD 通过使用脉冲激励,可以一次性得到宽频带内的耦合度值。通过提取相同频点与矩量法对比,结果基本相同(如图9)。虽然在个别点有所差异,但总体趋势保持一致,且这些差异均是在允许范围内的。由此说明,本文中使用 FDTD 方法进行天线耦合分析较为准确,同时能够一次性得到宽频带信息,体现了 FDTD 方法的优越性。

4.3 方向图计算

根据文中所述的方向图模型,利用本文中的近远场外推算法,计算天线1在60MHz发射状态时的远场场强分布。采用正弦激励,其他所有参数设置与4.1相同,建模时作了如下近似:(1)天线均竖直安装于车顶,天线上的分布电流看成沿轴向分布的无数细小电流元的叠加;(2)忽略与波长相比很小的金属体,整个车体为封闭导体。得到的方向图结果如图10所示,同时与项目组基于矩量法的软件计算结果进行对比。

从图10中可以看出,FDTD方法与矩量法计算得到的天线1在60MHz的方向图,虽然有些差异,但是主瓣和旁瓣分布较为接近,总体辐射特性基本一致。由此证明,FDTD算法可用来分析车载多天线系统的天线辐射特性,从而说明了本文中所述时谐场激励近远场外推算法的可行性。

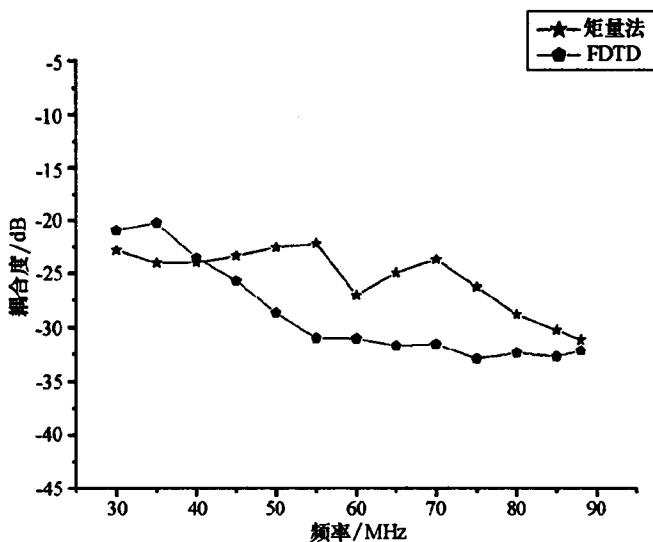


图9 提取天线1和天线4部分频率的耦合度结果

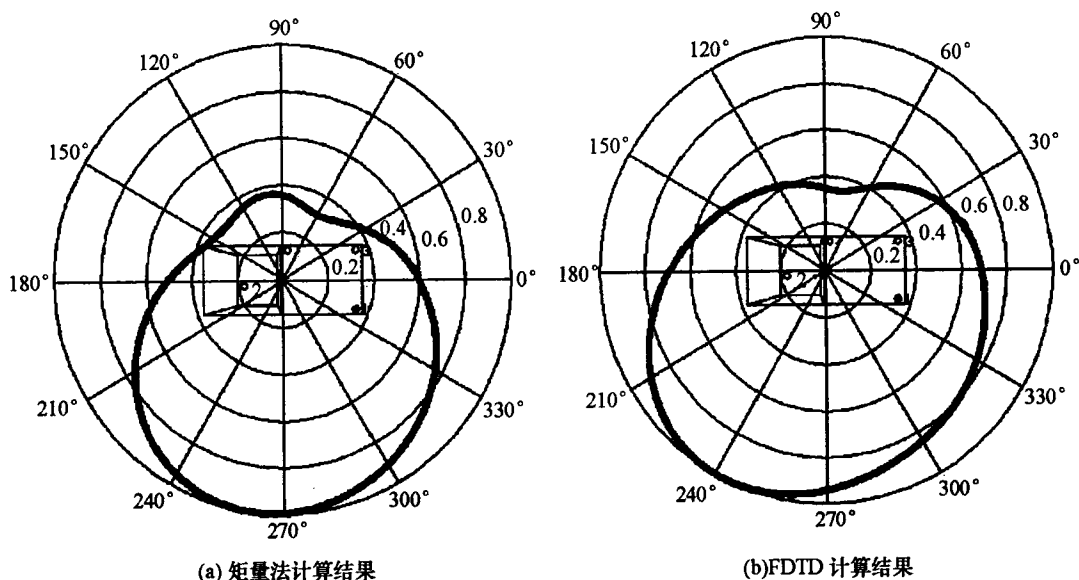


图 10 天线 1 在 60MHz 工作时的方向图

5 总结

由上述算例可知, FDTD 算法用于分析车载天线的耦合特性和辐射特性结果较为准确, 并且由于其一次计算可得到宽频带耦合结果, 大大提高了计算效率。另外, 对于频率较高的情况, 可适当设置高斯脉冲的脉宽, 得到高频率的耦合度计算结果, 所能计算的最高频率受车体大小及网格划分的因素制约。更关键的是, 由于计算机内存和 CPU 的限制, 其计算规模和仿真速度有限, 因此如果能将 FDTD 与频域算法相结合, 扬长避短, 进行时频外推是未来计算电磁学发展的一大趋势。

参考文献

- [1] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 第一版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [2] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992.
- [3] 葛德彪. 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] 王家礼, 朱满座, 路宏敏. 电磁场与电磁波[M]. 第一版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [5] Maloney J G, Shlager K L, Smith G S. A Simple FDTD Model for Transient Excitation of Antennas by Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(2): 289 - 292.
- [6] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 第四版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [7] Jensen M A, Rahmat - Samii Y. Performance Analysis of Antennas for Hand-held Transceivers Using FDTD[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagat, 1994, 42(8).

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，一直致力和专注于微波、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>