

基于OPNET的卫星多波束天线仿真建模研究

张晓东,马东堂,李树锋,丁丁

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 湖南长沙 410073)

摘要:多波束天线技术是卫星移动通信系统中的关键技术之一。研究卫星多波束天线的几何模型,推导卫星多波束天线方位角和俯仰角的计算公式,分析卫星多波束天线的辐射特性;总结了利用OPNET生成卫星多波束天线模型的方法,并建模实现了OPNET多波束天线模型,通过构建网络仿真场景仿真分析了卫星多波束天线覆盖区内用户SNR的分布特性,仿真结果表明OPNET多波束天线模型较好地模拟卫星多波束天线的辐射特性。

关键词:多波束天线;仿真建模;卫星移动通信系统;OPNET

中图分类号:TN828.5

文献标识码:A

文章编号:1004-373X(2009)03-046-04

Research of Satellite Multi-beam Antenna Simulation Modeling Based on OPNET

ZHANG Xiaodong, MA Dongtang, LI Shufeng, DING Ding

(College of Electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: Multi-beam antenna is a key technology in the satellite mobile communication system. The geometry model of satellite multi-beam antenna is researched, the calculating formula of azimuth angle and pitching angle for satellite multi-beam antenna is deduced, the radiation characteristic of satellite multi-beam antenna is analyzed, the creating methods of multi-beam antenna based on OPNET is summarized, and multi-beam antenna model is implemented. The SNR distributing characteristic of users in the covering region is simulated by setting network simulation scenario. Simulation results indicate that the proposed model is appropriate to the radiation characteristic of satellite multi-beam antenna.

Keywords: multi-beam antenna; modeling and simulation; satellite mobile communication system; OPNET

0 引言

卫星移动通信系统具有损耗小,延迟短,可实现全球无缝覆盖,抗毁性和抗干扰性强等突出优点,是未来移动通信的重要组成部分。多波束天线技术是卫星通信系统中的关键技术,具有如下优点:可以使波束空间隔离和极化隔离,实现多重频率复用,加大可用带宽,增加通信容量;大大地提高卫星向地球的辐射通量密度(EIRP),使地面用户可以采用较小口径的接收天线,从而大大降低系统成本和通信成本;根据需要可灵活快捷地进行波束扫描和波束重构,从而增强系统的抗干扰性和在轨生存能力。

目前,多波束天线技术是卫星移动通信系统中的研究热点之一。文献[1]等研究了波束成形算法;文献[2]提出了点波束确定算法,文献[3-5]讨论了点波束的设计问题,为多波束天线的仿真建模提供了一定的参考。但是,目前在卫星多波束天线的OPNET仿真建模方面,

还没有较为全面深入的研究。本文旨在研究基于OPNET的卫星多波束天线的仿真建模方法,为进一步建立基于OPNET的卫星移动通信系统仿真平台奠定基础。

1 卫星多波束天线几何模型

1.1 卫星多波束天线类型

通常,卫星多波束天线根据其辐射特点可分为等波束宽度和等波束面积两种。等波束宽度多波束天线是指各点波束的半功率波束宽度(点波束的天线视角)相等,其优点是各点波束天线的结构、参数等完全相同,只用生成一个点波束天线模型,分别设置不同点波束的指向即可,这有利于星载天线的简化;等波束面积多波束天线是指各点波束小区面积相等,其优点是等小区面积的覆盖,有利于系统为整个地面服务区提供均匀覆盖的系统容量^[3]。

1.2 卫星多波束天线小区结构

假设卫星多波束天线在地面形成M层的蜂窝小区,每层蜂窝有 K_M 个蜂窝中心绕星下点对称分布,以y轴为参考轴,则第m层中的第n个蜂窝中心距星下点的距离和与参考轴所成的方位角为(如图1所示):

收稿日期:2008-07-29

基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目

(51435050105KG0102)

$$L_{mn} = d_1 \sqrt{m^2 + n^2 - mn} \quad (1)$$

$$\alpha_{mn} = \cos^{-1} \left(\frac{2m - n}{2 \sqrt{m^2 + n^2 - mn}} \right) \quad (2)$$

其中: $d_1 = r_0 \sqrt{3}$, r_0 表示中心蜂窝半径; 则第 m 层中的第 n 个蜂窝的中心坐标为:

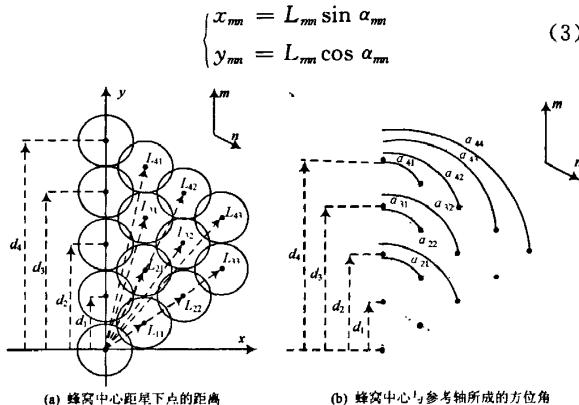


图1 多层蜂窝小区分布示意图

1.3 卫星多波束天线俯仰角和方位角计算

给定天线辐射特性, 天线增益值由方位角和俯仰角两个角度坐标确定。设卫星、用户位置关系如图2所示, $oxyz$ 表示地心坐标系; $Sx'y'z'$ 表示星上坐标系(如图3所示), 其中 o 表示地心, 在地心坐标系中: $S(s_x, s_y, s_z)$ 表示卫星所在位置; $U(u_x, u_y, u_z)$ 表示用户所在位置; $R(r_x, r_y, r_z)$ 表示参考点所在位置。设 A 点为星上坐标系 z' 轴上一点, 在 $Sx'y'z'$ 坐标系中坐标为 $(0, 0, h)$, A 点坐标需要经过两次坐标旋转从 $Sx'y'z'$ 坐标系下的坐标 $(0, 0, h)$ 转换到 $oxyz$ 坐标系下的坐标 (x_A, y_A, z_A) , 转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_b \cos \theta_b & \sin \theta_b & -\sin \varphi_b \cos \theta_b \\ -\cos \varphi_b \sin \theta_b & \cos \theta_b & \sin \varphi_b \sin \theta_b \\ \sin \varphi_b & 0 & \cos \varphi_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi_b \cos \theta_b & \sin \theta_b & -\sin \varphi_b \cos \theta_b \\ -\cos \varphi_b \sin \theta_b & \cos \theta_b & \sin \varphi_b \sin \theta_b \\ \sin \varphi_b & 0 & \cos \varphi_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: (φ_b, θ_b) 表示 boresight 角度坐标, (φ_p, θ_p) 表示指向角度坐标。

俯仰角 φ 是矢量 SU 与 SA 的夹角:

$$\varphi = \cos^{-1} [(\mathbf{SU} \cdot \mathbf{SA}) / (|\mathbf{SU}| \cdot |\mathbf{SA}|)] \quad (5)$$

其中: $\mathbf{SA} = \{s_x - x_A, s_y - y_A, s_z - z_A\}$, $\mathbf{SU} = \{u_x - s_x, u_y - s_y, u_z - s_z\}$ 。

方位角 θ 是平面 SAU 与平面 SAR 的夹角, 设 SAU 平面方程为: $A_1x + B_1y + C_1z = 0$, 法矢量 $\mathbf{n}_1 = \{A_1, B_1, C_1\}$; SAR 平面方程为: $A_2x + B_2y + C_2z = 0$, 法矢量 $\mathbf{n}_2 = \{A_2, B_2, C_2\}$; 平面 SAU 和 SAR 的平面方程可根据 S, A, U, R 四点的坐标求得, 则有方位角 θ 为:

$$\theta = \cos^{-1} [(\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2) / (|\mathbf{n}_1| \cdot |\mathbf{n}_2|)] \quad (6)$$

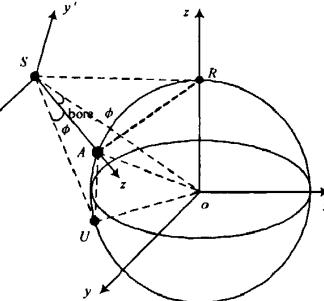


图2 卫星用户几何关系图

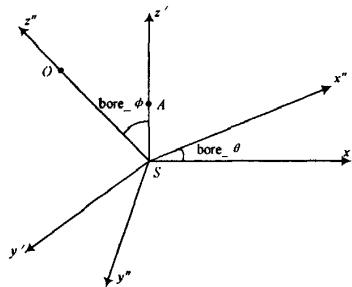


图3 星上坐标图

2 构建基于OPNET的卫星多波束天线模型

2.1 点波束的辐射特性

点波束的辐射特性建模是建立OPNET多波束天线模型的基础。点波束的辐射特性建模的目标概括起来有两个: 波束覆盖区内实现无缝覆盖; 波束覆盖区外天线增益迅速跌落, 旁瓣辐射最小化。

点波束的辐射特性建模既可采用函数来模拟天线的辐射特性, 也可以采用Matlab实现波束成形算法, 获得天线的辐射特性。这里采用第一种方法, 构造如下形式的波束天线增益函数模型:

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_m - 3(\varphi/\varphi_b)^2, & 0 < \varphi < \varphi_1 \\ L_F, & \varphi_1 < \varphi < 180^\circ \end{cases} \quad (7)$$

其中: G_m 表示天线主瓣增益的最大值(dBi); L_F 为旁瓣包络值; φ_b 为表示半功率点宽度; $\varphi_b = \sqrt{7442/10^{0.1G_m}}$ 。

设 $G_m = 20$ dB, $L_F = -100$ dB, $\varphi_1 = 15^\circ$, 则点波束的辐射特性如图4所示。

2.2 多波束天线建模

卫星多波束天线建模的主要工作在于生成具有特定辐射特性的若干个点波束。OPNET中天线建模可以通过天线编辑器生成, 也可以通过修改EMA模版中

表示天线增益的数组元素值来生成。前者生成方式比较简单快捷,但是精确性差;后者精确性高,但是需要逐一设置天线模型中的每个 (φ, θ) 值所对应的天线增益值,比较繁琐。

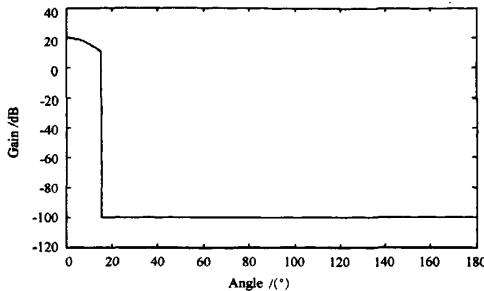


图 4 点波束的辐射特性

为了更加方便快捷地生成具有一定拓扑排列结构的由若干个波束形状相同的点波束构成的多波束天线,本文设计了一个多波束天线生成程序。程序流程如图 5 所示,首先根据点波束的拓扑排列结构确定各点波束中心位置,参考式(3);然后计算波束内的点与波束主轴的夹角 φ' (中心波束时按与天线主轴间的夹角 φ),如图 6 所示;再根据 φ' (或 φ)是否满足边界条件,设置天线增益值;最后通过 OPNET 中的 EMA 机制生成 OPNET 天线模型。

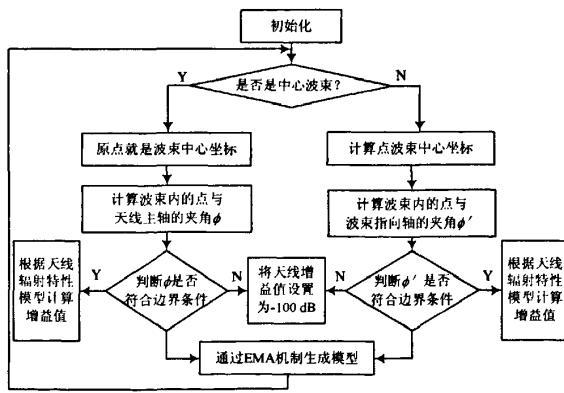


图 5 程序流程图

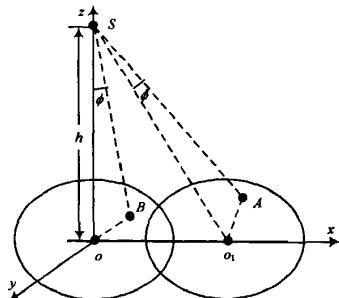


图 6 波束内的点与波束主轴的夹角

按照上述方法,采用式(7)所描述的点波束的辐射特性模型,波束排列形状如图 7 所示,中心 1 个,外围均匀分布 6 个圆形点波束,点波束模型的类型为等波束宽度,各个点波束的天线视角都是 30° ,所生成的中心圆和外围圆的点波束天线模型分别如图 8 所示。

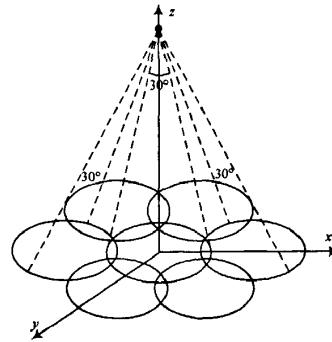


图 7 波束形状分布图

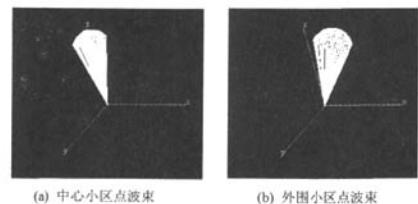


图 8 点波束模型

3 卫星多波束天线辐射特性仿真分析

3.1 卫星链路预算

设卫星多波束天线的发射功率 $P_T = 20 \text{ dBW}$, 波束中心天线的增益为 $G_T = 20 \text{ dB}$; 用户采用全向天线的接收功率近似 $P_R = 0 \text{ dBW}$, 天线增益 $G_R = 1 \text{ dBi}$; 波尔兹曼常量 $k = -228.60 \text{ dB/K} \cdot \text{Hz}$; 噪声带宽 $B_N = 70 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$, 噪声温度 $T_s = 18 \text{ dBK}$; 卫星高度 $d = 1450 \text{ km}$; 有效带宽为 1250 kHz , 基频为 2 GHz , 则波长为:

$$\lambda = c/f = 3.0 \times 10^8 / 2.0 \times 10^9 = 0.15 \text{ m}$$

自由空间传输损耗:

$$L_p = 10 \log(4\pi d/\lambda)^2 = \\ 10 \log\left(\frac{4\pi \times 1450000}{0.15}\right)^2 = 161.68 \text{ dB}$$

由卫星链路预算计算公式,可得卫星波束中心载噪比为:

$$C/N = P_T + G_T + G_R - L_p + k - T_s - B_N = \\ 20 + 20 + 1 - 161.68 + 228.60 - \\ 18 - 70 = 20 \text{ dB} \quad (8)$$

3.2 卫星多波束天线模型仿真分析

卫星多波束天线的辐射特性主要通过用户信噪比

(SNR)的分布情况来体现。为了仿真分析用户 SNR 的分布特性,构建简单的 OPNET 网络仿真场景,设置卫星和用户两类节点模型:

(1) 卫星节点:1 个,高 1 450 km,采用上节所生成的多波束天线模型,波束小区半径为 350 km,相邻波束小区中心间的距离为 600 km,小区之间有一定的重叠区域,节点模型如图 9 所示。

(2) 用户节点:10 000 个,均匀分布在以卫星为中心的长为 20°经度,宽为 20°纬度的一个正方形区域内,用户采用全向天线。

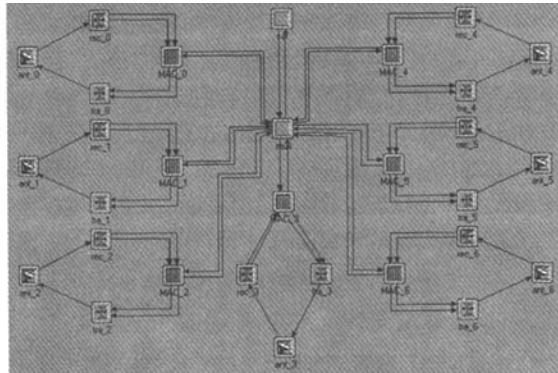


图 9 卫星节点模型

仿真中以波束覆盖区内每个用户的位置(经度)和信噪比(SNR)作为统计量,将所收集的统计量用 Matlab 画图可得图 10 和图 11。图 10 给出了用户 SNR 的三维立体分布图,直观地表明了波束覆盖区内用户的 SNR 分布情况,图中明显地出现 7 个 SNR 峰值,这些峰值就是 7 个蜂窝小区的中心,表明各小区中心信号最强,SNR 最高,而小区边缘信号较弱,SNR 较低,小区内用户的 SNR 从小区中心向小区边缘平滑下降。

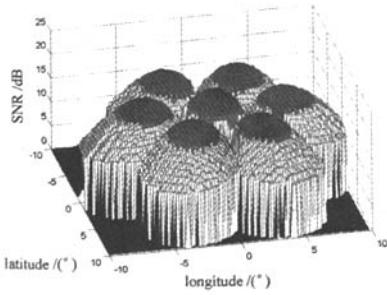


图 10 三维波束分布图

图 11 给出了 SNR 的等位线分布图,可以看到:

(1) 用户 SNR 的分布形成 7 个明显的小区,小区排列形状与图 7 理想波束分布图中波束排列形状相一致,波束中心 SNR 达到 20 dB,波束边缘 SNR 下降到

12 dB,这符合 3.1 节对卫星链路预算的设计;

(2) 相邻两小区之间有一定的重叠区域,重叠区域的存在使得小区边缘的 SNR 不至于过低,保证在小区边缘用户依然可以进行正常的通信,同时重叠区的存在也满足了用户在进行越区软切换时对波束覆盖特性的需求。

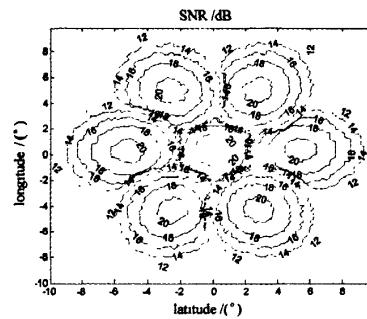


图 11 波束等位线分布图

综合以上两图可知这种用户 SNR 分布图符合仿真前对波束小区分布和天线辐射特性模型的设计,也符合实际中运用多波束天线形成的蜂窝小区的分布和天线增益的衰减情况。

4 结语

本文研究了卫星多波束天线仿真建模相关的基本理论,总结了卫星多波束天线仿真建模的方法,建立了基于 OPNET 的卫星多波束天线模型,并仿真分析了采用该多波束天线模型时用户 SNR 的分布情况。由仿真结果看出,该多波束模型较好地模拟了卫星多波束天线的辐射特性,这为进一步开发基于 OPNET 的卫星移动通信系统仿真平台奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 王志华,曹多礼,钟鹰.多波束天线波束设计[J].空间电子技术,2007(4):37~41,79.
- [2] 刘严静,刘刚,吴诗其.低轨卫星移动系统的点波束确定算法[J].中国空间科学技术,2006,6(3):59~66.
- [3] 刘刚,吴诗其.卫星蜂窝通信系统中的点波束设计[J].系统工程与电子技术,2004,26(2):157~159,173.
- [4] Arun K Bhattacharyya. Optimum Design Consideration For Multiple Spot Beam Array Antennas[A]. 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit[C]. Monterey, California, 2004.
- [5] Angeles Vazquez Castro M, Gonzalo Seco Granados. Cross-Layer Packet Scheduler Design of a Multi-beam Broadband Satellite System with Adaptive Coding and Modulation[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2007, 6(1):248~258.

(下转第 53 页)

顶层设计打好体系结构框架。

3.2 走军民通信建设相结合之路,提高我军通信基础设施建设能力

与美军相比,我军的通信基础设施建设比较薄弱,各种专用网络之间不能实现有效的互联、互通,作战指挥平台、传感器平台、射手平台还不能实现无缝连接,因此,必须加快推进我军的通信基础设施建设。而要想多快好省的搞好通信基础设施建设,必须走军民通信结合之路,将军民通信力量和通信设施各个部分彼此连接成有机的整体,形成军用通信和民用通信协调发展的机制。降低成本、高效能地提高军事通信能力,不仅能战时迅速建立覆盖全球、立体部署的军事通信网络,平时也可以有效地利用军事通信网络资源支持国家经济建设,达到民用通信和军事通信整体优化的目的。

3.3 提高信息安全意识,加强我军通信网络安全建设

传统的军事通信网络较简单,互连较少,因此多集中在信息保密技术的研究。未来军用通信网络要复杂的多,并且战争对信息系统的依赖性越强,通信网络安全问题变得越重要。通过对美军 GIG 系统关于通信网络安全信息的认识和研究,结合实际情况加强我军通信网络安全建设。

4 结语

未来的战争必然是信息化、网络化的战争,战场信息瞬息万变,谁能及时掌握信息谁就能掌握战争的主动权,GIG 正是在实现网络中心战的基础上提出来的,它是赢得未来信息化战争关键所在。该文通过对全球信息栅格通信能力建设进行深入的研究,希望对我军军事

信息化建设由平台中心站向网络中心站转变提供一定的参考和帮助。

参 考 文 献

- [1] DoD Information Officer Guidance and Policy Memorandum No. 4D8460: Department of Defense Global Information Grid Networks[R]. Washington: DoD, 2000; 5 - 9.
- [2] Unclassified Capstone Requirements Document(CRD)[M]. Global Information Grid(GIG), 2001.
- [3] 总装电子信息基础部.“全球信息栅格”的发展现状及前景[R]. 2002 年世界武器装备与军事技术发展报告, 2003.
- [4] 刘晓明. 美军面向服务的全球信息栅格体系结构浅析[J]. 指挥自动化, 2006(2): 70 - 72.
- [5] 李英. 美军国防部体系结构框架的发展及其与 GIG 体系结构关系研究[J]. 指挥自动化, 2006(3): 72 - 73.
- [6] 方程. 关于全球信息栅格体系结构研究的几点思考[J]. 重庆邮电大学学报, 2007, 19(2): 249 - 252.
- [7] 康质彬, 赵新国, 黄程林. 全球信息栅格中的通信体系结构研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006, 19(2): 97 - 101.
- [8] 陈华, 孟宗杰. 网络基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [9] 丁雪丽. 美军转型通信体系结构(TCA)的发展[J]. 计算机与网络, 2005(9): 57 - 59.
- [10] 李大光. 全球信息栅格-信息化战争的支撑技术[J]. 国防技术基础, 2006, 13(6): 28 - 31.
- [11] 程远国, 赵厚奎. 全球信息栅格与带宽扩展[J]. 舰船电子工程, 2008, 13(6): 27 - 29.
- [12] 吴巍. 我军新一代通信网络发展设想[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 12(5): 445 - 449.
- [13] 赵厚奎, 程远国. 全球信息栅格的安全标准[J]. 网络安全, 2008(2): 34 - 36.

作者简介 贾秀权 男, 1978 年出生, 黑龙江庆安人, 中国电子科学研究院助理工程师。研究方向为军事通信系统。

王玉宝 男, 1974 年出生, 吉林人, 中国电子科学研究院工程师。研究方向为军事通信系统。

(上接第 49 页)

- [6] 张亦希, 傅君眉, 汪文秉. 卫星多波束天线赋形波束的最优化计算[J]. 中国空间科学技术, 2001, 1(3): 23 - 28, 41.
- [7] Christophe Donny, Stephane May, Valerie Foix. Statistical Link Budget Computation Method for Multi - beam Telecommunication Satellite System [A]. 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit [C]. 2003.
- [8] Javier Romero - Garcia, Riccardo De Gaudenzi. On Antenna

Design and Capacity Analysis for the Forward Link of a Multibeam Power Controlled Satellite CDMA Network[J]. IEEE Journal On Selected Areas In Communications, 2000, 18(7): 1 230 - 1 244.

- [9] Victor Santos, Jose Neves. Link Quality Assessment in Mobile Satellite Communication Svstems[A]. The 14th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings[C]. 2003, 1: 405 - 409.

作者简介 张晓东 男, 1984 年出生, 硕士生。主要研究方向为通信信号处理与通信网络。

马东堂 男, 1969 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为通信信号处理与通信网络。

李树锋 男, 1982 年出生, 博士生。主要研究方向为通信信号处理与通信网络。

丁 丁 女, 1982 年出生, 博士生。主要研究方向为通信信号处理与通信网络。

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>