

文章编号:1006-2467(2007)11-1830-04

遥测胶囊微带天线的设计

黄标，颜国正，昝鹏，李倩如

(上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240)

摘要: 针对遥测胶囊工作在人体消化道中的特点,为遥测胶囊设计了一种新型的微带天线,用于和外部数据接收存储器通信,工作频率为915 MHz波段(ISM波段)。为了模拟天线在人体消化道内的工作环境,计算模型采用了真实的三维人体数字模型。基于时域有限差分算法,讨论了天线的设计参数,分析比较了天线在自由空间中和人体消化道内的谐振频率、方向图等特性,计算了天线在人体消化道内的比吸收率,求出了最大允许输入功率。结果表明,该天线完全满足遥测胶囊的实际应用要求。

关键词: 遥测胶囊; 微带天线; 时域有限差分算法; 比吸收率

中图分类号: TN 82 文献标识码: A

Design of the Microstrip Antenna for Radiotelemetry Capsule

HUANG Biao, YAN Guo-zheng, ZAN Peng, LI Qian-ru

(School of Electronic, Information and Electrical Eng., Shanghai Jiaotong Univ.,
Shanghai 200240, China)

Abstract: According to the feature of radiotelemetry capsule operating in the digestive tract, a novel microstrip antenna was designed for radiotelemetry capsule communicating with external data recorder at 915 MHz located in ISM (Industry, Science, and Medical) bands. A calculation model was constructed by using real three dimension digital model of the human body to simulate the work environment of radiotelemetry capsule. Based on the finite difference time domain method, the design parameters were discussed in detail. Moreover, the characteristics in free space and human digestive tract, such as resonance frequency and radiation patterns, were evaluated. Specific absorption rate computations were also performed to attain the maximum delivered power for the designed antenna. The results indicate that the designed antenna is satisfactory and adequate for radiotelemetry capsule practical use.

Key words: radiotelemetry capsule; microstrip antenna; finite difference time domain (FDTD) method; specific absorption rate

天线负责把电子遥测胶囊采集的数据辐射到体外,其性能的好坏关系到整个系统能否正常工作。电子遥测胶囊在人体消化道内工作,空间较为狭小,需

要一个小尺寸的天线;而且,人体生物组织器官较多,构成复杂,故研究天线在人体内的辐射效率、辐射特性等是非常困难的。因此,设计电子遥测胶囊的

收稿日期:2006-11-27

基金项目:国家高技术研究发展规划(863)项目(2006AA04Z368)

作者简介:黄标(1979-),男,安徽省砀山县人,博士生,主要研究方向为生物遥测技术等。颜国正(联系人),男,教授,博士生导师,电话(Tel.),021-34204434;E-mail:gzyan@sjtu.edu.cn.

天线,需要综合考虑人体组织器官引起的多径损失、人体生物组织对天线辐射的影响、天线尺寸较小等因素^[1-4].从电子遥测胶囊出现开始,大部分工作是研究提高胶囊的系统性能,包括提高传输速率、延长工作时间、减小胶囊尺寸、提高采样精度等,但有关天线在真实人体模型中的辐射特性研究较为少见。直到最近,Scanlon 等^[5]分析了一个植入式辐射源在部分真实人体模型内的辐射传输特性;Chirwa 等^[6]探索了螺旋天线在整个人体模型中不同频段的辐射特性。结果发现,当遥测胶囊天线的通信频率高于 1 GHz 时,辐射强度将快速下降,这意味着通信频率高于 1 GHz 时,天线的辐射效率较低,不适合作为体内遥测的通信频率。但是,Scanlon 等研究只用了部分人体模型,而 Chirwa 等只研究了螺旋天线在人体消化道内的辐射特性。本文根据遥测胶囊的结构特点,为其设计一种工作于 915 MHz 波段(ISM 波段)的小尺寸微带天线,并分析该天线在人体模型及自由空间中的特性。

1 天线设计

由于微带天线具有结构紧凑、体积小、重量轻、易加工等优点^[7],结合电子胶囊本身的结构特点,一般选择微带天线作为遥测胶囊的天线。微带天线小型化技术通常包括采用高介电常数的基板、增加短路带(销)、利用曲流技术增加电流路径的长度等。本文将综合应用天线小型化技术设计遥测胶囊微带天线。所设计天线基板的介电常数 $\epsilon_r = 9.2$, 基板厚度 $h = 1 \text{ mm}$ 。图 1 所示为设计的遥测胶囊新型微带天线。

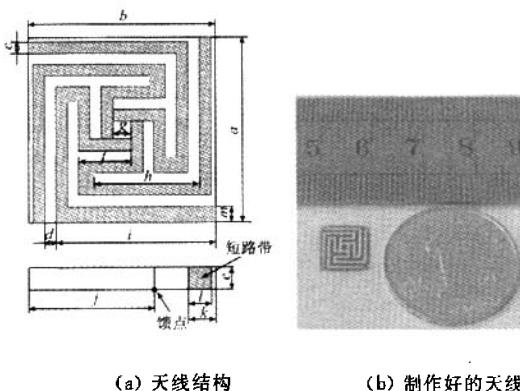


图 1 遥测胶囊新型微带天线

Fig. 1 The novel Microstrip antenna for radiotelemetry capsule

由图可见,天线共 3 层,第 1 层为 4 个臂组成的贴片层,第 2 层为基板层,第 3 层为地面层,其中贴

片层的微带宽度为 0.5 mm。贴片层通过短路带同地面层相连,用特性阻抗为 50Ω 同轴线馈电探针馈电。为了方便地把天线安装到遥测胶囊中,其尺寸被限制在 $8.25 \text{ mm} \times 8.25 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 之内(见图 1(b)),天线的设计参数如下(单位:mm): $a=8.25$, $b=8.25$, $c=0.5$, $d=0.5$, $e=1$, $f=2.75$, $g=0.75$, $h=4.75$, $i=7$, $j=5.5$, $k=1.25$, $l=1$ 。

2 计算方法及 FDTD 建模

本文采用时域有限差分算法(FDTD),计算用 FDTD 模型由人体数字模型及天线组成。

2.1 计算方法

麦克斯韦时域场旋度方程为

$$\nabla \times \mathbf{E} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{D}(t) = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}(t) \quad (3)$$

式中: ϵ 为介电常数; ϵ_0 为真空中的介电常数; μ_0 为真空中的磁导系数; \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{D} 为电通量密度。本文所设计的微带天线外形较不规则、结构复杂,因此,传统的传输线模型、空腔模型等方法不适于分析。本文选择 FDTD 算法来分析其特性^[8],FDTD 算法是直接用有限差分式代替麦克斯韦时域场旋度方程中的微分式,得到关于场分量的有限差分式,用具有相同电参量的空间网格去模拟被研究体,选取合适的场初始值和计算空间的边界条件,就可得到包括时间变量的麦克斯韦方程的四维数值解,通过傅里叶变换还可求得三维空间的频域解。FDTD 算法已经成为计算射频频段生物电磁效应的最好方法,尤其对计算人体损耗介质内部的电磁场。

2.2 人体模型

本文所采用的人体数字模型来自美国国家医学图书馆的可视人体项目(Visible Human Project, VHP)^[9],采用每隔 1 mm 的断层彩色照片重构精度较高的人体数字模型。该模型为男性,身高 1.84 m,体重 106 kg。为了减少计算量,处理后 FDTD 人体模型由 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的网格组成。根据人体的组织器官的电介质特性,把具有相似电介质特性的组织器官归为一组,共分成 25 组,从而人体模型中的每一个网格的电介质特性被定义为 25 组中的一种。

2.3 计算参数和条件

采用频率为 915 MHz 的正弦信号激励天线,计

算远场辐射方向图、场强和比吸收率(SAR);采用高斯脉冲激励天线,计算较宽的频率范围内天线的输入阻抗和回波损耗。把完全匹配层(Perfect Matched Layer, PML)作为边界吸收条件,电磁波可以毫无反射地进入PML,在行进中衰减,因此可以把整个人体的FDTD模型浸入PML中。

由于微带天线的尺寸远远小于人体模型的大小,故整个FDTD模型无法采用统一的 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的网格。本文采用自适应网格技术,即对贴片天线所在平面的网格细分,其他部分的网格大小保持不变。本文中,微带天线所在平面内的网格大小为 $0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,然后采用线性插值的方法逐步过渡到 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ (人体模型)的网格。

本文选择回肠作为遥测胶囊工作的典型位置计算天线的特性,网格化后的人体FDTD模型以及天线在消化道内的位置如图2所示。根据文献[6]的研究成果,胶囊的外壳及其电路对天线的辐射特性的影响较小,可以在FDTD模型中忽略。

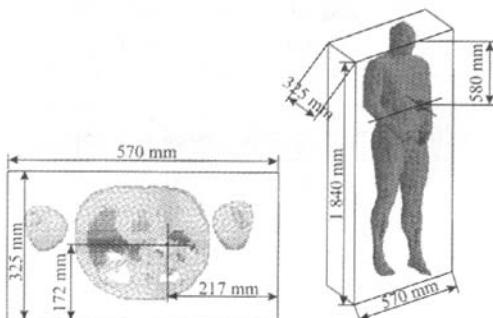


图2 人体FDTD模型以及天线在消化道内的位置

Fig. 2 Body FDTD model and the antenna location in the digestive tract

3 结果和讨论

3.1 饲电位置的影响

天线的馈电位置靠近一个臂的末端。固定短路带位置($k=1.25\text{ mm}$),调整馈电探针位置来改变天线的输入阻抗,使天线达到谐振状态。3个不同位置时的回波损耗($|S_{11}|$)随频率变化关系如图3所示。由图可见,当 $k=1.25\text{ mm}$, $j=5.5\text{ mm}$ 时, $|S_{11}|$ 的最小值为 -18.34 dB ,天线最大输入阻抗带宽($|S_{11}| \leq -10\text{ dB}$ 时)为 9 MHz 。由于遥测胶囊通常是单信道通信, 9 MHz 的带宽能完全满足遥测胶囊的实际应用要求。而且,当改变天线馈电探针位置时,仅影响天线馈点输入阻抗,天线的谐振频率基本

不变,稳定在 915 MHz 左右。

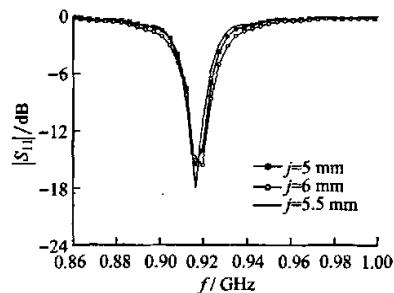


图3 人体模型中不同馈电点位置的回波损耗($|S_{11}|$)

Fig. 3 Comparison between the return loss ($|S_{11}|$) of the designed antenna as a function of feed point location inside the human body

3.2 人体对谐振频率的影响

当微带天线在人体消化道工作时,受人体生物组织的影响,天线的谐振频率将变低。同时,由于天线距离小肠的内壁非常近,一部分电磁波将会被反射回天线,天线的回波损耗将增加。本文所设计天线当 $j=5.5\text{ mm}$ 时,在自由空间和人体消化道中的谐振频率如图4所示。由图可见,天线在人体消化道内的谐振频率为 915 MHz 左右,在自由空间中的谐振频率为 932 MHz 左右,两者相差 17 MHz ,因此,在设计遥测胶囊天线时,必须考虑体内外天线谐振频率的差别。

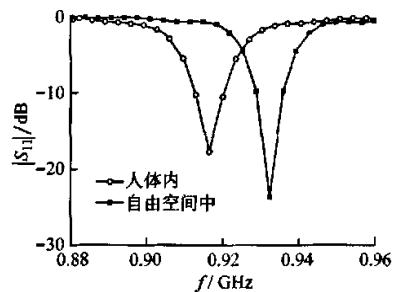


图4 天线在自由空间和人体中的谐振频率比较图

Fig. 4 Comparison between the resonate frequencies of the designed antenna in free space and inside the human body model

3.3 人体生物组织对远场方向图的影响

如前所述,本文采用固定频率的正弦信号(体内频率为 915 MHz ,自由空间中为 932 MHz)作为激励源,计算 $j=5.5\text{ mm}$ 时,天线在自由空间和人体内消化道中的辐射方向图和电场强度。天线的水平极化 E_θ 和垂直极化 E_ϕ 的远场辐射方向和电场强度如图5所示。由图可见,天线在自由空间和在人体内

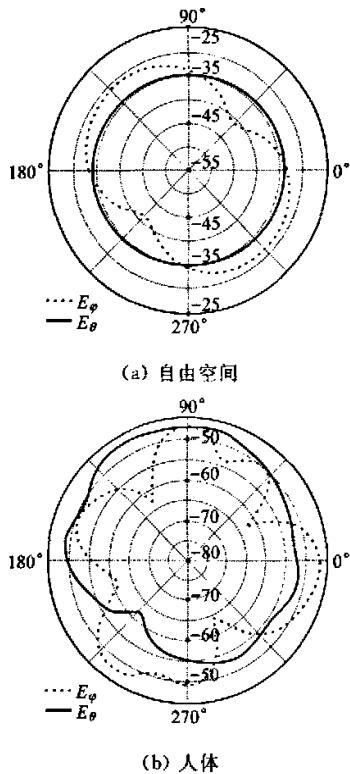


图 5 天线的远场方向图和电场强度

Fig. 5 The far-field patterns and electric field intensity of the proposed antenna

的辐射方向图有明显区别。图 5(a)表明,当 $j = 5.5$ mm 时,天线在自由空间中 E_θ 和 E_ϕ 辐射方向图基本对称;图 5(b)表明,当 $j = 5.5$ mm 时,天线在人体消化道内由于电磁波要穿透复杂的人体生物组织以及生物组织对电磁波的吸收,引起天线在人体内的辐射方向图变较不规则。图中,圆周上的电场强度(归一化)的单位为 dB。

3.4 SAR 计算

由于遥测胶囊是通过射频把检测数据发射到体外,所产生的电磁辐射是否会对人体产生危害,是否符合国际安全标准是一个值得探讨的问题,通常用 SAR 来衡量电磁辐射对人体作用的基本剂量。SAR 定义为:生物体单位时间、单位质量所吸收的电磁辐射能量,单位为 W/kg,即

$$\text{SAR} = \frac{\sigma |E_i|^2}{2\rho} \quad (4)$$

式中: σ 为生物组织电导率; ρ 为生物组织密度; E_i 为生物组织中的电场强度。ANSI 的标准规定^[10],任意 1 g 肌体中最大 SAR 应小于 1.6 W/kg,任意 10 g 肌体中最大 SAR 应小于 4 W/kg。

本文首先假设遥测胶囊天线的输入功率为

1 W,计算整个 FDTD 模型中的 SAR。天线贴片层所在平面的 1 g 和 10 g 的 SAR 分布如图 6 所示。由图可见,遥测胶囊对人体的辐射主要集中在小肠上,1 g 和 10 g 的 SAR 峰值出现在微带天线附近,其值分别为 64.41 W/kg 和 22.64 W/kg,远高于 ANSI 标准。因此,须降低天线的输入功率。经计算,为满足 ANSI 标准,最大发射功率须小于 24.84 mW。

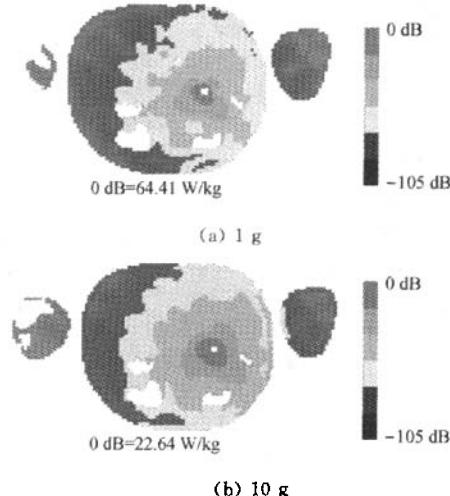


图 6 天线贴片层所在平面的 SAR 分布

Fig. 6 The SAR distributions over the first layer of the antenna

4 结语

本文为无线遥测胶囊设计了一种结构简单、易于制作的新型微带天线。对该天线的设计进行了详细阐述,采用 FDTD 算法分析了其在自由空间和真实人体数字模型中的特性。通过改变馈点的位置,调整天线的输入阻抗,使其与同轴馈电探针相匹配。比较了天线在自由空间和人体消化道内的谐振频率、方向图等特性,求出了天线的最大允许输入功率。结果表明,该天线的性能和尺寸能完全满足遥测胶囊的实际应用要求,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Lin J C. Microwave properties of fresh mammalian brain tissues at body temperature [J]. IEEE Transaction Biomedical Engineering, 1975, 22(1):74-76.
- [2] Schwan H P. Electrical properties of tissues and cell suspension [J]. Advances in Biological and Medical Physics, 1957, 5:147-209.

(下转第 1838 页)

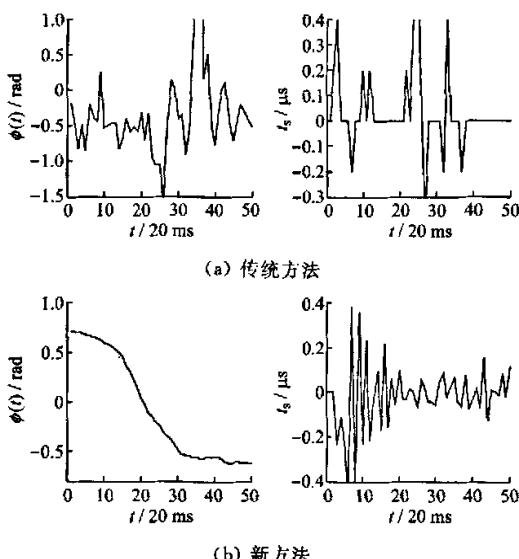


图4 跟踪载噪比为27 dB-Hz信号的码相位与载波相位曲线

Fig. 4 Code phase and carrier phase when signal tracking with $C/N_0=27$ dB-Hz

的效果。显然,采用平淡卡尔曼滤波器的新方法在跟踪效果上有了明显的改善。

4 结语

本文介绍了一种新型的基于平淡卡尔曼滤波器的GPS微弱信号的跟踪方法,并从原理和仿真结果上与传统的环路跟踪方法进行了比较。本文研究的

重点是微弱信号的跟踪,因此这里假设捕获部分采用批式捕获的方法,并以达到良好捕获效果为前提。构造了UKF中微弱信号跟踪的状态模型和测量模型,并对不同载噪比的数字信号进行了跟踪。仿真结果表明,新的跟踪方法已经能成功跟踪载噪比低至27 dB-Hz的微弱信号,具有较高的精度和灵敏度。

参考文献:

- [1] Johansson F, Mollaei R, Thor J. GPS satellite signal acquisition and tracking [R]. Sweden: Lulea University of Technology, Division of Signal Processing Undergraduate Projects, 1998:17—21.
- [2] Kaplan E D. Understanding GPS, principles and applications [M]. Boston: Artech House, Inc, 1996:120—149.
- [3] Jee G, Kim H S, Lee Y J. A GPS C/A code tracking loop based on extended Kalman filter with multipath mitigation [C]// ION GPS 2002. Portland, USA: The Institute of Navigation, 2002: 446—451.
- [4] Psiaki M L, Jung H. Extended Kalman filter methods for tracking weak GPS signals [C]// ION GPS 2002. Portland, USA: The Institute of Navigation, 2002: 2539—2553.
- [5] Julier S J, Ulman J K. A new extension of Kalman filter to nonlinear system [C]// The 11th International Symp on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Control. Orlando, USA: The International Society for Optical Engineering, 1997: 182—193.

(上接第1833页)

- [3] Gabriel C, Gabriel S. Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies [EB/OL]. (2004-11-1) [2007-8-20]. <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/reports/dielectric/home.html>.
- [4] Gandhi O P, Lazzi G, Furse C M. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1996, 44:1884—1897.
- [5] Scanlon W G, Evans N E. Radiowave propagation from a tissue implanted source at 418 MHz and 916.5 MHz [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2000, 47:527—534.
- [6] Chirwa L C, Hammond P A, Roy S, et al. Electromagnetic radiation from ingested sources in the human intestine between 150 MHz and 1.2 GHz [J]. IEEE Trans On Biomed Eng, 2003, 50(4):484—492.
- [7] Gupta K C. Microstrip antenna design [M]. Norwood: Artech House, 1988.
- [8] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1966, 14:302—307.
- [9] Banvard R A. The national library of medicine's visible human project [EB/OL]. (2007-7-24) [2007-8-20]. http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.
- [10] IEEE Standard C95.1-1999, Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz [S].

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>