

文章编号: 1001-4322(2001)04-0493-05

# 超宽带 TEM 天线的数值模拟<sup>①</sup>

王建国<sup>1</sup>, 田春明<sup>2</sup>, 刘小龙<sup>1</sup>, 葛德彪<sup>2</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 西安电子科技大学 物理系, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 用数值方法研究了超宽带电磁脉冲源经同轴型传输线输出到 TEM 天线上的发射问题。TEM 喇叭天线的前端是平行板传输线。用时域有限差分方法模拟了超宽带电磁脉冲在平行板传输线和 TEM 波喇叭中的传输, 给出了天线的输入阻抗和电压驻波比随频率的变化关系、天线的辐射场分布以及天线辐射的能量方向图等。

**关键词:** 超宽带; TEM 天线; 输入阻抗; 时域有限差分; 方向图

中图分类号: TN822.8; TN813

文献标识码: A

超宽带<sup>[1]</sup>(UWB, ultrawide band) 电磁脉冲技术发展很快, 它在目标的探测和识别方面得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。随着单次 UWB 功率和重复频率的不断提高, 其潜在的军事用途愈来愈明显。UWB 的关键技术是源(开关)技术和发射天线技术。许多高功率射频源都采用同轴结构输出<sup>[3]</sup>, 这是因为同轴传输线具有以下优点: 1. 圆柱结构耐高压; 2. 易于控制结构的阻抗; 3. 设计参数易于放大或缩小; 4. 机械加工便宜等等。因此, 本文研究同轴传输线馈电的 UWB 发射天线。

对于 UWB 的发射天线, 由于其宽带特性, 目前还没有成熟的设计理论。对某些天线, 例如双锥天线<sup>[4]</sup>或 TEM 喇叭天线<sup>[5]</sup>, 尽管可以用无限长近似等效后得到一些近似公式, 但这些公式不能用来精确描述天线特性。所以, 通常用数值方法研究超宽带天线设计问题。本文用时域有限差分(FDTD, finite-difference time-domain)方法<sup>[6]</sup>结合传输线算法模拟 UWB TEM 天线的发射问题。

## 1 TEM 天线

TEM 喇叭天线的基本结构是由相互间有一张角的两个三角形金属板组成。图 1 表示这种三角板之一, 其中一个边长为  $s$ , 顶角为  $\alpha$ 。图 2 表示同轴传输线馈电的 TEM 天线, 两个金属板之间的夹角为  $2\beta$ , 同轴线的特性阻抗为  $Z_a=50\Omega$ 。同轴线通过平行板传输线给 TEM 天线馈电。平行板的宽度为  $w$ , 间距为  $d$ 。本文用 FDTD 方法研究这种天线的辐射过程。

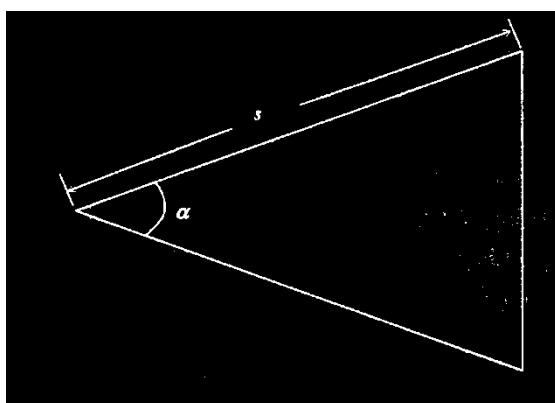


Fig. 1 Triangular plate used in the TEM antenna.

图 1 TEM 天线的三角形金属板

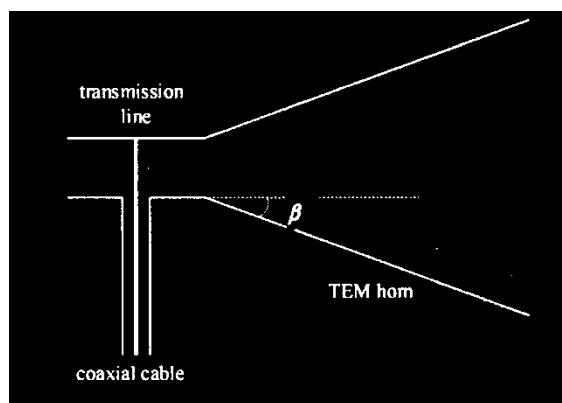


Fig. 2 Cross section of the TEM antenna fed by a coaxial line.

图 2 同轴线馈电 TEM 天线的截面图

① 收稿日期: 2001-03-15; 修订日期: 2001-05-21

基金项目: 国家 863 高功率微波技术领域资助项目(863-410-7)

作者简介: 王建国(1965-), 男, 江苏人, 博士后, 副研, 主要从事电磁理论、瞬态电磁场数值模拟方法和等离子体物理方面的研究工作; 西安市 69 信箱 15 分箱。

## 2 数值方法

如图 3 所示,同轴线沿正  $z$  方向给平行板馈电。假设同轴线中传输的是 TEM 模,则其中的电压  $V$  和电流  $I$  的关系由传输线方程给出<sup>[2]</sup>

$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = -\frac{Z_a}{c} \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -\frac{1}{c Z_a} \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $c$  表示光速,负号表示电流和电压沿正  $z$  方向传输。

用标准的 Yee 网格离散传输线方程<sup>[6]</sup>,为满足波动方程的稳定性条件,本文取  $c\Delta t = 0.5\Delta z$ ( $\Delta t$  表示时间步长,  $\Delta z$  表示  $z$  方向空间步长),得到差分方程

$$V^{n+1}(k) = I^{n-1}(k) - \frac{Z_a}{2} [I^{n+0.5}(k + 0.5) - I^{n+0.5}(k - 0.5)] \quad (3)$$

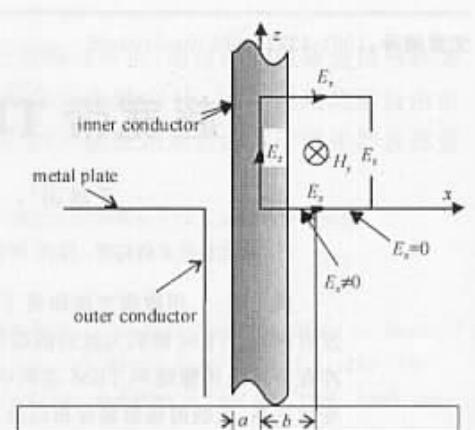


Fig. 3 Diagram to demonstrate the field coupling between the coaxial line and plate

图 3 同轴线与平行板间场分量耦合的示意图

$$I^{n+0.5}(k + 0.5) = I^{n-0.5}(k + 0.5) - \frac{1}{2Z_a} [V^n(k + 1) - V^n(k)] \quad (4)$$

在同轴线的下端点处采用吸收边界条件<sup>[8]</sup>。为了将传输线中的信号耦合进 Maxwell 方程,考虑图 3 所示的一个网格回路。应用 Faraday 电磁感应定律和细线算法,得到

$$\begin{aligned} H_y^{n+0.5}(i_a + 0.5, j_a, k_a + 0.5) &= H_y^{n-0.5}(i_a + 0.5, j_a, k_a + 0.5) - \\ &\quad \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} \left[ E_x^n(i_a + 0.5, j_a, k_a + 1) - \left( \frac{2}{\ln(\Delta x/a)} \right) \frac{V^n(k_a)}{\Delta x} \right] + \\ &\quad \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \frac{2}{\ln(\Delta x/a)} E_z^n(i_a + 1, j_a, k_a + 0.5) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $a$  和  $b$  分别表示传输线内、外导体的半径; $i_a, j_a, k_a$  为同轴线与平行板连接处的坐标。同样可以给出接头处其它  $y$  和  $x$  方向磁场分量方程。

用完全匹配层方法截断无限大的外空间<sup>[9]</sup>,用方程(3)~(5),结合离散形式的 Maxwell 方程组,我们可以模拟瞬态天线的辐射问题。

## 3 天线参数的计算

假设同轴线输入的电压为  $V_{in}(t)$ ,模拟计算出的反射电压为  $V_{ref}(t)$ ,通过快速傅立叶变换,可以得到反射系数

$$\Gamma(f) = V_{ref}(f)/V_{in}(f) \quad (6)$$

从而得到电压驻波比( $R_{vsw}$ )

$$R_{vsw}(f) = 1 + \Gamma(f)/1 - \Gamma(f) \quad (7)$$

假设计算得到的天线输入口的电压和电流分别为  $V_p(t)$  和  $I_p(t)$ ,则天线的输入阻抗为

$$Z_{in}(f) = V_p(f)/I_p(f) \quad (8)$$

天线输入的总能量为

$$W_t = \int_0^t V_{in}^2(t)/Z_a dt \quad (9)$$

用外推法将 FDTD 方法模拟出的近场投影为远区场<sup>[7]</sup>。用  $E(r, \theta, \varphi, t)$  表示距离为  $r$ ,方向角为  $(\theta, \varphi)$  的远区辐射电场,则在远区的辐射能量密度为

$$\omega_{rad}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\eta_0} \int_0^t E^2(r, \theta, \varphi, t) dt \quad (10)$$

式中: $\eta_0$  为自由空间的波阻抗。用(10)式可以计算出远区辐射方向图,用(9)和(10)两式可以计算出天线的增益。

## 4 结果及讨论

我们用第2节中描述的数值方法模拟了TEM天线的辐射问题。天线尺寸为 $s=15\text{cm}$ ,  $\alpha=67^\circ$ ,  $\beta=16^\circ$ 。平行板间的间距 $d=0.3\text{cm}$ , 宽度 $w=1.05\text{cm}$ 。

入射电压为高斯脉冲的时间导数(即 Neuman 函数)

$$V_{\text{in}}(t) = -1.65 \frac{t - t_0}{t_p} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2t_p^2}\right] \quad (11)$$

式中: $t_p=3.25\times 10^{-11}\text{s}$ ;  $t_0=1.625\times 10^{-10}\text{s}$ 。在这样的电压源激励下, 模拟出的结果如图4~10所示。

图4给出了不同时刻天线近场在经过 $z$ 轴的 $E$ 面内的分布, 它清晰地表示了天线中电磁波的传播过程。从这组图中可以看出, 馈源产生的电磁波主要向TEM喇叭口传输, 其波形近似为球面波。电磁波在喇叭口处的反射最强。从目标识别的角度看, 为了保证辐射波波形的畸变较小, 通常在喇叭口处加载。这样, 负载吸收了部分电磁波, 使得反射减小。但对用于辐射能量的天线而言, 这种加载的意义不大。

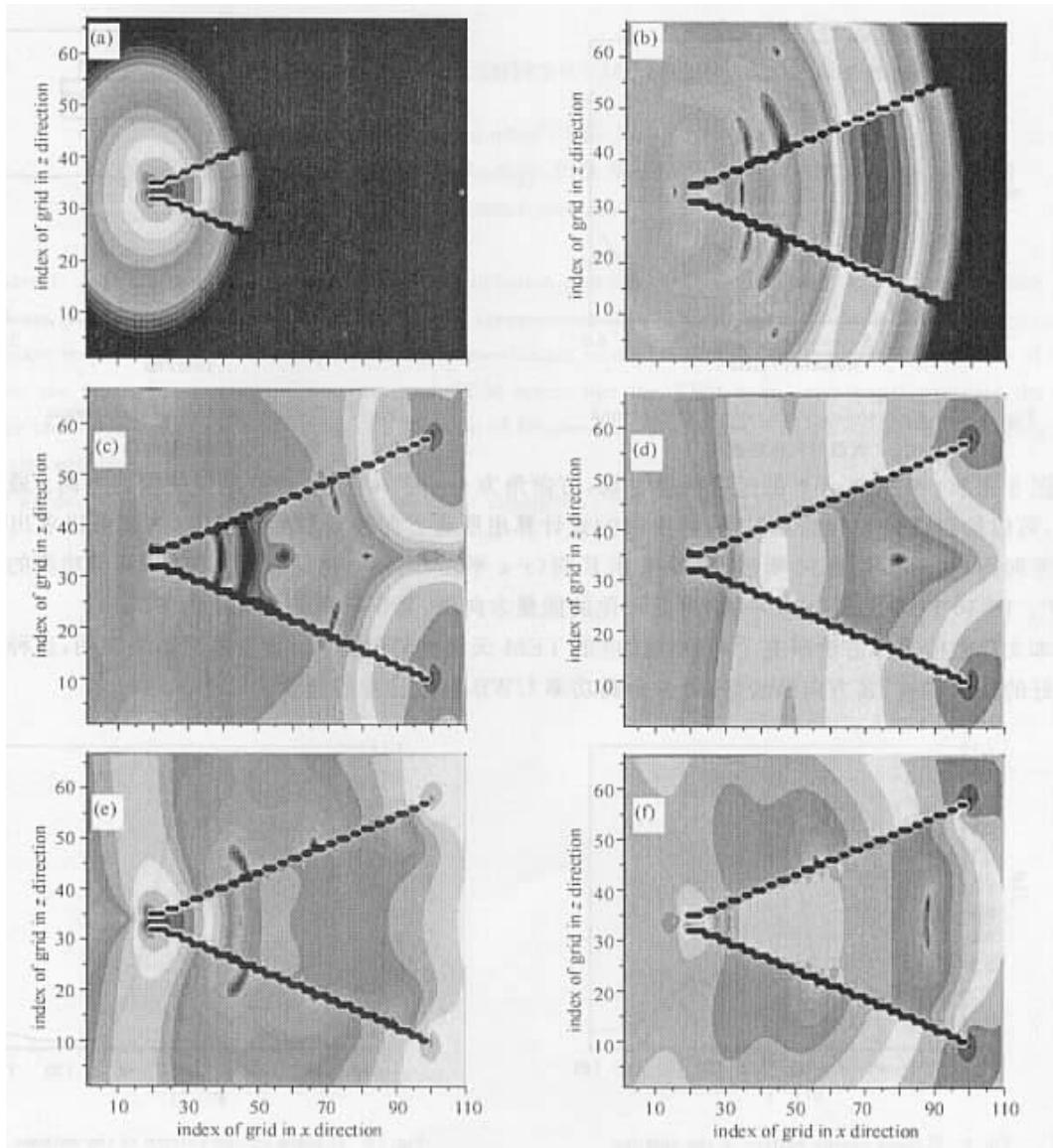


Fig. 4 Near field distributions at different time steps: (a) 100; (b) 200; (c) 300; (d) 400; (e) 500; and (f) 700

图4 不同时刻天线近场分布。(a)100时间步;(b)200时间步;(c)300时间步;(d)400时间步;(e)500时间步;(f)700时间步

图5至图7给出了天线随频率变化的特性参数。图5表示由(8)式计算出的天线输入阻抗随频率的变化, 可以看出, 除低频部分外, 天线输入阻抗随频率变化不大。图6和图7分别表示由(6)和(7)式计算出的反射系数和电压驻波比, 它们随频率的变化不大, 具有宽带特性。

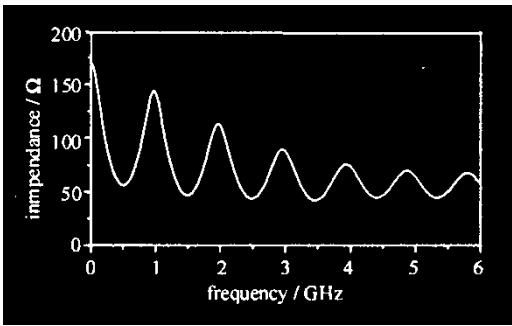


Fig. 5 Antenna impedance vs frequency

图 5 天线的阻抗随频率分布

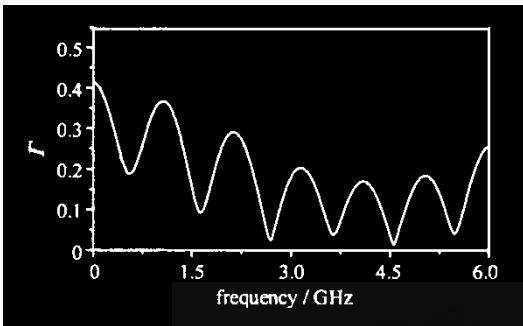


Fig. 6 Reflection coefficient of the antenna

图 6 天线的反射系数

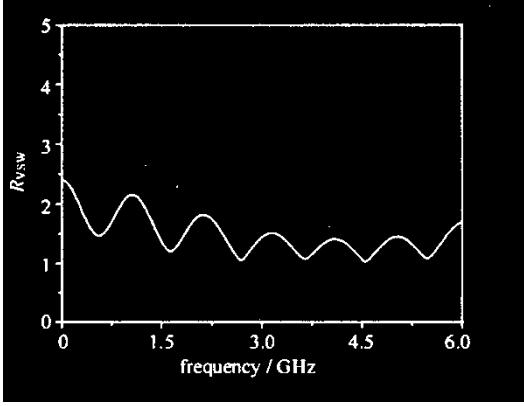


Fig. 7 Voltage standing-wave ratio of the antenna

图 7 天线的电压驻波比

图 8 表示  $r=1000\text{m}$  处的远区辐射电场, 方向角为  $\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$ 。这是最强的辐射方向。通过数值模拟, 可以给出任意方向的辐射场, 再由(10)式计算出所有方向的辐射能量密度, 从而可以求出天线的辐射方向图, 如图 9 和图 10 所示。图 9 表示 E 面( $x-z$  平面)内归一化的能量方向图, 其半功率的全宽度为  $33^\circ$ 。图 10 表示 H 面( $x-y$  平面)内归一化的能量方向图, 其半功率的全宽度为  $67^\circ$ 。

本文用数值模拟方法研究了同轴线馈电的 TEM 天线的辐射特性。数值模拟结果表明, 这种天线具有较好的宽带特性, 其方向性较好, 可作为高功率 UWB 电磁脉冲的能量辐射器。

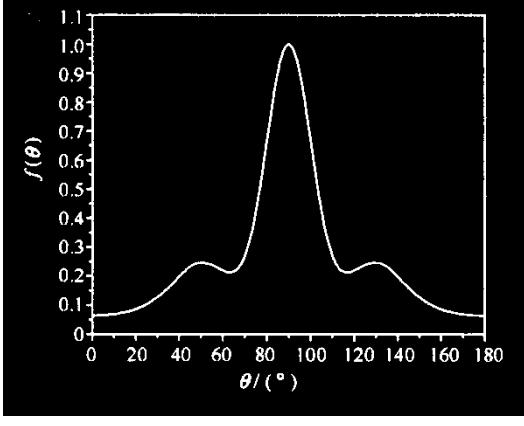


Fig. 9 E-plane energy pattern of the antenna

图 9 天线的 E 面能量方向图

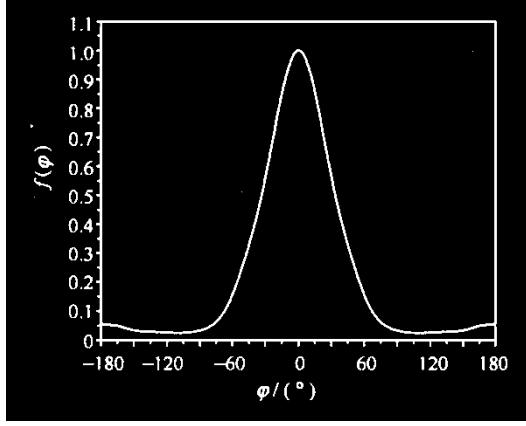


Fig. 10 H-plane energy pattern of the antenna

图 10 天线的 H 面能量方向图

## 参考文献:

- [1] Baum C E. From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics[A]. Proc IEEE[C]. 1992, **80**:789—817.
- [2] Maloney J G, Shlager K L, Smith G S. A simple FDTD model for transient excitation of antennas by transmission lines[J]. IEEE Trans, 磁场数据, 1998, 38(7):1059—1068.
- [3] Agee F J, Baum C E, Prather W D, et al. Ultra-wideband transmitter research[J]. IEEE Trans, 1998, **PS-26**(3):860—873.

- [4] Maloney J G, Smith G S. Optimization of a conical antenna for pulse radiation: an efficient design using resistive loading[J]. *IEEE Trans*, 1993, **AP-41**(7): 940—947.
- [5] Kanda M. The effects of resistive loading of TEM horns[J]. *IEEE Trans*, 1982, **EMC-24**: 245—255.
- [6] Yee K S, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans*, 1966, **AP14**(3): 302—307.
- [7] Yee K S, Ingham D, Shlager K. Time-domain extrapolation to the far field based on FDTD calculations[J]. *IEEE Trans*, 1991, **AP-39**(3): 410—413.
- [8] Mur G. Absorbing boundary condition for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations [J]. *IEEE Trans*, 1981, **EMC-23**(4): 1073—1077.
- [9] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *J Comput Phys*, 1994, **114**(2): 185—200.

## Numerical simulations of ultrawide band TEM antennas

WANG Jian-guo<sup>1</sup>, TIAN Chun-ming<sup>2</sup>, LIU Xiao-long<sup>1</sup>, GE De-biao<sup>2</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, P.O. Box 69-15, Xi'an 710024, China;  
2. Department of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** This paper presents numerically the radiation processes of the ultrawide band electromagnetic pulse emitted from the TEM antenna fed through the coaxial transmission line. The front end of the TEM horn antenna is a parallel-plate transmission line. The finite-difference time-domain method is adopted to simulate the processes of transmission in the parallel-plate transmission line and TEM horn. For the TEM horn, this paper presents the input impedance and voltage standing wave ratio as a function of frequencies. The radiated field distribution and energy pattern are also provided.

**Key words:** ultrawide band; TEM antenna; input impedance; finite-difference time-domain; pattern

## 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](http://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](http://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](http://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>