

文章编号:1005-0388(2000)02-0134-05

# 近地面平面蝶形偶极天线模拟及应用\*

詹毅<sup>1,2</sup>, 梁昌洪<sup>1</sup>, 方广有<sup>2</sup>, 苑洪伟<sup>2</sup>

(1 西安电子科技大学, 西安, 710071; 2 中国电波传播研究所, 河南 新乡, 453003)

**摘要:**文中利用 FDTD 方法及一种新的馈源设置方法研究了近地面平面蝶形偶极天线模拟问题, 从而给出一种简单, 高效的模拟手段。与已有结果比较验证了这种方法的合理性并应用于探地雷达系统仿真。

**关键词:** 蝶形偶极天线; FDTD 方法; 探地雷达

中图分类号: TN959.7

文献标识码: A

## Simulation of Bow-tie antennas above ground and its applications

ZHAN Yi<sup>1,2</sup>, LIANG Chang-hong<sup>1</sup>, FANG Guang-you<sup>2</sup>, YUAN Hong-wei<sup>2</sup>

(1 Xidian University, Xian, 710071; 2 China Research Institute of Radio Wave Propagation, Henan, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** A simple and effective approach is presented in this paper for the simulation of bow-tie antenna placed above the ground by a combination of the FDTD methods and a novel method for feeding the bow-tie antenna. Numerical verification is conducted to check the accuracy of the method. Finally, it is applied to generate radargrams for ground penetrating radar data simulation.

**Key words:** Bow-tie antenna; The FDTD method; Ground penetrating radar (GPR)

## 1 引言

蝶形偶极天线具有工作频带宽, 制作简单等优点, 在脉冲探地雷达系统中获得了广泛的应用。从理论上模拟近地面工作的蝶形偶极天线对于脉冲探地雷达的系统设计和仿真具有重要的理论和应用意义。由于实际天线邻近地面放置, 天线是近场工作的, 因而必须考虑天线、馈源、不均匀地下媒质等复杂因素的相互作用。这些特点使得 FDTD 方法成为最适当的研究方法。

根据 FDTD 方法, 对背景媒质, 天线体的模拟按网格划分, 电磁场边界条件可在网格空间中附加条件实现。由于激励源在计算区域内, 所以馈电方法是实现成功模拟的关键。Bourgeois 等<sup>[1]</sup>应用简化的

平行线传输线方法实现电场和激励电压的耦合, Roberts 等<sup>[2]</sup>用两个同轴线模型对天线馈电。他们的方法需要附加程序代码, 增加了复杂度。利用 Schneider 等<sup>[3]</sup>提出的透射式电场源 (Transparent source) 概念, 可以得到新的馈电模拟方法。这种方法物理概念清晰, 符合实际雷达系统情况, 编程简洁, 高效。本文对其进行研究并应用于雷达系统仿真。

## 2 天线及馈电点的 FDTD 模拟方法

### 2.1 天线体及背景的 FDTD 模拟

图 1 是近地面蝶形偶极天线模拟计算区域示意图, 其中包含蝶形偶极天线, 不均匀土壤。根据 FDTD 方法, 离散可采用立方网格。图 2(a)显示了

一个典型的探地雷达平板电阻加载蝶形偶极天线。由于受计算条件限制本文作了一定简化,其中把园弧形天线屏蔽罩简化为长方形。图 2(b)显示了含有天线的网格划分方法,注意应使金属面放置在网格的某一电场节点处。假设金属面无限薄,占网格的一面,则一次迭代过程如下:(1)计算电场,(2)设金属面上的切向电场分量为零,(3)吸收边界条件计算,(4)磁场计算,(5)回到(1)。由于计算条件限制,我们假设土壤介电参数为常数,虽然这和土壤的色散特性不符和,但对含水量少的、低衰减的土壤,其介电特性随频率变化在本文涉及的频率范围不明显<sup>[4]</sup>,因而色散的影响可以忽略。由此,本文采用 Mur2 阶

吸收边界条件。

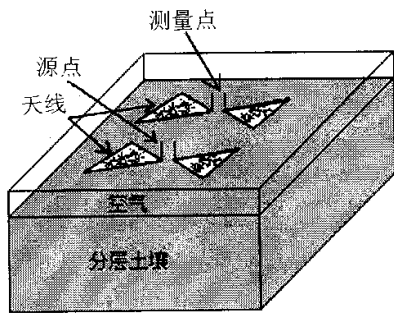


图 1 FDTD 计算空间示意图

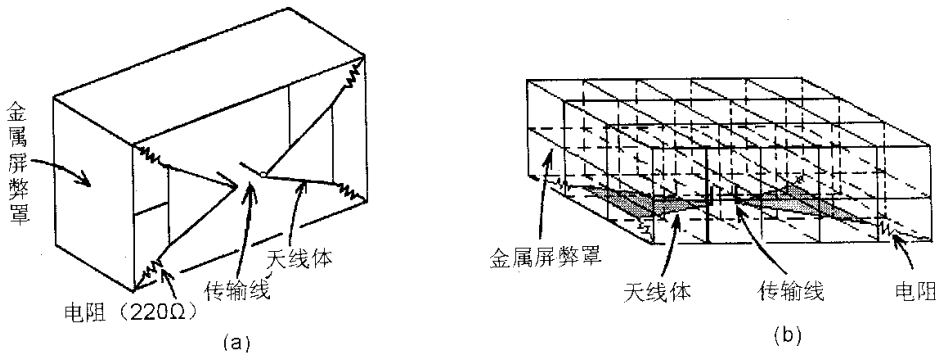


图 2 (a)探地雷达平板加载蝶形偶极天线;(b) 网格划分方法。

2.2 透入式电场源馈电方法

用 FDTD 方法分析天线,微带电路性能时,激励源处在计算空间内,必须用合理的方法进行馈电。常用的比较简便的激励方法包括硬电场源或电流源,硬电场源是在激励场点处给定电场强度的值。以一维 FDTD 为例,自由空间的 Maxwell 方程可简化为

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial x} \tag{1}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial x} \tag{2}$$

其 FDTD 差分格式为

$$E_z^{n+1}(i) = E_z^n(i) + \eta_s (H_y^{n+1/2}(i) - H_y^{n+1/2}(i-1)) \tag{3}$$

$$H_y^{n+1/2}(i) = H_y^{n-1/2}(i) + \frac{s}{\eta} (E_z^n(i+1) - E_z^n(i)) \tag{4}$$

其中  $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  是真空中波阻抗,  $s = c\Delta t/\Delta x$  是 Courant 数。

设激励函数为  $f^n = f(n\Delta t)$ ,激励点为  $i_s$ ,则硬电场源设

$$E_z^n(i_s) = f^n \tag{5}$$

电流源为

$$E_z^{n+1}(i_s) = E_z^n(i_s) + \eta_s (H_y^{n+1/2}(i_s) - H_y^{n+1/2}(i_s-1)) + f^n \tag{6}$$

通过简单的计算得,对硬电场源激励的第  $i$  个网格点有

$$E_z^n(i) = f^{n-|i-i_s|} \tag{7}$$

对电流源激励的第  $i$  个网格点有

$$E_z^n(i) = \sum_{m=0}^{n-|i-i_s|} (-1)^{m+n-|i-i_s|} f^m \tag{8}$$

可见硬电场源反映了所施加的外部激励波形,但由于在源点处没有应用 FDTD 迭代公式,所以完全反射了其它方向的来波,因而,它不适合于对需要考虑多种因素相互作用时的模拟问题。电流型激励源虽然不存在反射现象,但由于实际雷达系统中馈源和取样接受电路距天线体很近,可以近似认为施加在馈电点上的入射波是由脉冲源产生的电压波形而产

生的,由电流源激励出的波形和实际情况差别很大,所以也不能用于对探地雷达的蝶形偶极天线进行馈电。

通过对电流源进行修改,Schneider 等<sup>[3]</sup>提出了透入式电场源(Transparent source)的概念。透入式电场源指在馈电点即能保持入射源的波形且不反射计算空间中其它来波的电场源。为完整起见,我们简述其推导过程。

设  $E_z^n(i_s) = \delta[n]$ , 定义网格冲击响应为

$$I^n = E_z^{n-1}(i_s) + Zs[H_y^{n-1/2}(i_s) - H_y^{n-1/2}(i_s - 1)] \quad (9)$$

其中,  $H_y^{n-1/2}(i_s)$ ,  $H_y^{n-1/2}(i_s - 1)$  是按硬电场源的 FDTD 迭代公式(5)求出。公式(9)反映了 FDTD 网格对单位冲击入射场的反射。如果设等效“净”入射电压为  $E_z^n$ , 则它和实际入射波  $f^n$  的关系为:

$$E_z^n = f^n + \sum_{m=0}^{n-1} E_z^m I^{n-m} \quad (10)$$

$$E_z^0 = f^0 \quad (11)$$

所以,令

$$E_z^{n+1}(i_s) = E_z^n(i_s) + Zs[H_y^{n+1/2}(i_s) - H_y^{n+1/2}(i_s - 1)]$$

$$+ f_z^{n+1} - \sum_{m=0}^n f_m I^{n+1-m} \quad (12)$$

则保证了输入的源电场为  $f^n$ , 且不存在反射。

对 2 维或 3 维情况,类似于(12)式的关系仍然成立,可以修改为

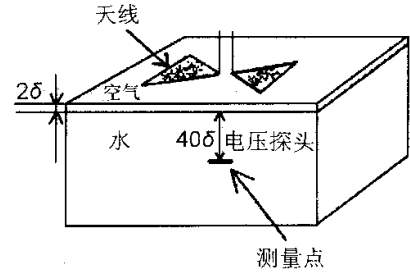
$$E_z^{n+1}(i_s) = [N - D \text{ update equation}] + f_z^{n+1} - \sum_{m=0}^n f_m I^{n+1-m} \quad (13)$$

应用以上方法时,需要先在自由空间中求解网格冲击响应  $I^n$ 。由(9)式可知,  $I^n$  仅和  $s$  及维数有关,因而只需求解一次。通过在馈电点加入透入式电场源,可以简化模拟的复杂程度。

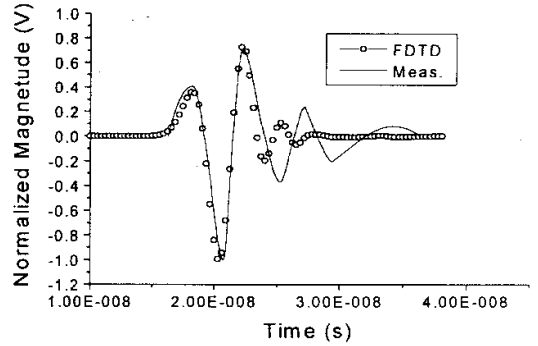
### 3 数值验证

我们执行了以下数值实验来验证以上算法的正确性和数值精度。首先,设背景媒质为水,电参数取  $\epsilon_r = 80.0$ ,  $\sigma = 0.063\text{S/m}$ 。取网格尺寸为  $0.0125\text{m}$ , 发射天线长为  $0.5\text{m}$ ,张角为  $60^\circ$ ,放在分界面上方  $0.025\text{m}$  处。入射电压源为底宽为  $5\text{ns}$ 、单位幅度的高斯脉冲。通过在天线中心正下方水下  $0.5\text{m}$  处放置的小电压探头测量辐射电压。按计算值的最大幅度归一化电压波形见图 3,其中,实线是 Wensink 等<sup>[5]</sup>的测量结果,虚线是应用本文方法的结果,可见

在辐射脉冲的前半部分( $15 \sim 25\text{ns}$  左右)具有较好的一致性。注意辐射脉冲的后沿尚有不同之处,这反映了理论模型和实际天线仍有差别,尽管如此,这种差别对目标雷达回波的模拟影响不大。例 2 计算了天线沿  $X$  轴方向在水下半径为  $0.5\text{m}$  的辐射电场  $E_\theta$  的幅值分布,  $E_\theta$  的方向及实验设置见图 4(a),图 4(b)是计算结果,其中实线是本文的计算结果,点化线是测量结果,虚线是文献[2]的计算结果,其中的单位以文献[2]为标准,可见基本是一致的。

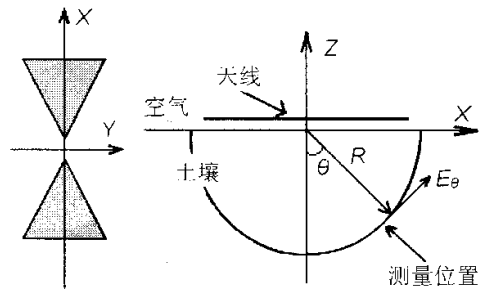


(a) 实验设置



(b) 测量结果(实线), FDTD 模拟结果(空心圆圈)

图 3 水下  $0.5\text{m}$  处辐射电场波形测量结果和 FDTD 模拟结果的比较



(a) 实验设置

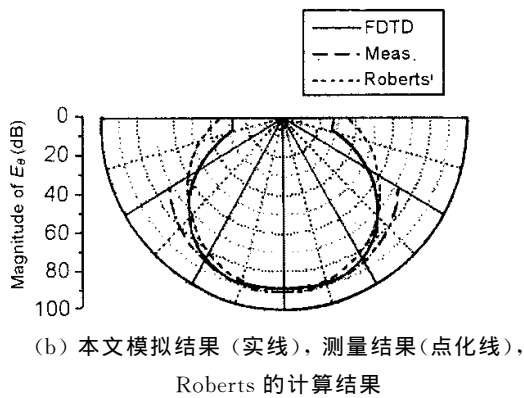


图 4 水下 0.5m 半径的近场辐射模

4 应用

平面蝶形偶极天线的成功模拟可以应用到超宽带天线近场性能分析,探地雷达的全三维仿真,瞬态电磁散射性能分析等重要方面。下面我们给出两个例子,例 1 计算了地下 0.6m 处半径 0.3m 厚 0.4m 金属圆柱和空气圆柱在接收天线处幅度归一化电压的瞬态波形。土壤电参数取  $\epsilon_r=7.0, \sigma=0.012\text{S/m}$ , 离散网格尺寸  $\Delta=0.02\text{cm}$ 。发射天线和接收天线平

行放置,距离地面高 0.06m,两天线 Y 轴中心距为  $20\Delta$ 。图 5 显示了计算结果,(a)为实验示意图,(b)为无目标时背景回波或直达波,(c)为减去直达波后的导体圆柱回波,(d)为减去直达波后的空洞圆柱回波。可见在衰减和色散不强的土壤条件下,目标散射波形形状和直达波近似,因而可采用匹配滤波增加信噪比。其次,金属目标回波的幅度大于空洞目标回波的幅度,两者相位相反,这些现象和文献[6]及实际雷达测量结果[7]是符合的。最后,我们观察到空洞目标的回波波形和直达波导数相近似,这是由于当介质物理尺寸约为入射脉冲中心波长的  $1/4$  时薄层的上面和下面或侧面反射波形叠加产生的特殊现象[6],这种特征对目标尺寸估计非常重要。例 2 给出了 2 层分层不均匀地质结构的模拟结果,图 6(a)为地下结构图,其中土壤参数为  $\epsilon_{r1}=7.0, \sigma_1=0.012\text{S/m}, \epsilon_{r2}=12.0, \sigma_2=0.02\text{S/m}$ , (b)是雷达的伪彩色波形堆积显示,其中已减去直达波。图中清晰的反映了分界面的位置,在两个斜坡交界处(中心处)存在绕射波,和雷达实际探测结果一致。

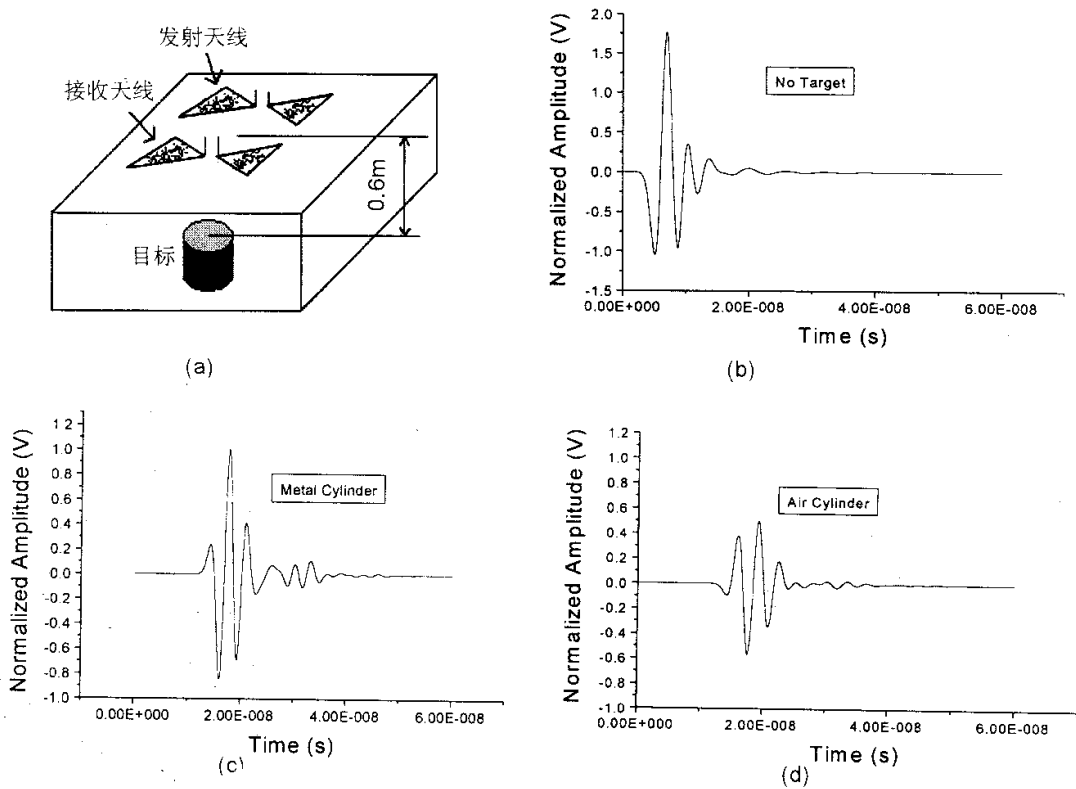
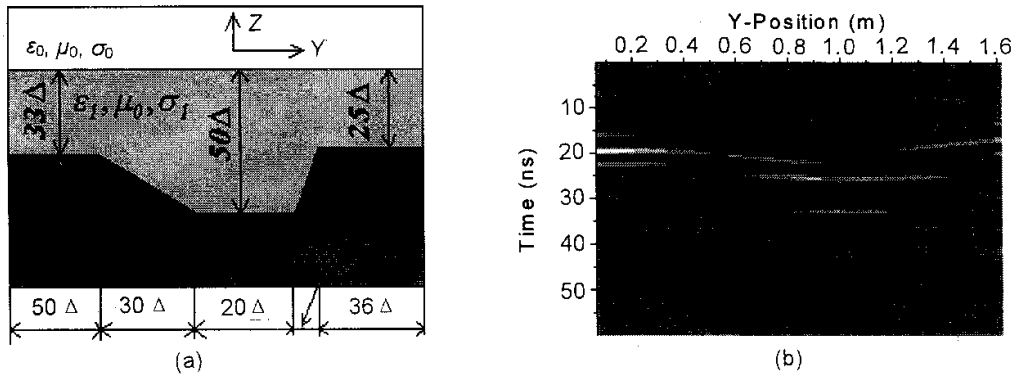


图 5 模拟埋地导体和空气圆柱的反射回波,圆柱半径 0.3m, 深度 0.6m  
(a) 计算空间示意图; (b) 背景回波; (c) 导体圆柱反射波; (d) 空气圆柱反射波



(a)模型图,其中  $\epsilon_{r1}=7.0, \sigma_1=0.012\text{S/m}, \epsilon_{r2}=12.0, \sigma_2=0.02\text{S/m}$ . (b) 雷达伪彩色二维波形堆积图

图 6 不均匀地质结构的伪彩色 2 维波形堆积图

5 结束语

本文应用 FDTD 方法结合硬电场源的激励源设置方法研究了探地雷达的平面蝶形偶极天线模拟问题。这种方法具有编程简单,物理意义明确等优点。通过本文的数值计算和已知测量结果相比较表明两者吻合较好。我们计算了一种典型目标的雷达反射回波及假设地质模型的雷达二维波形堆积图,其结果完全符合瞬态电磁散射的物理规律。本文的结果表明利用这种方法可以方便、快速的实现探地雷达系统的仿真,从而为研究地下目标瞬态电磁波相互作用,地下目标的超宽带雷达信息处理提供了可靠的保证。此外,本文的方法可经推广用于研究机载超宽带雷达系统仿真。

致谢:本文内容曾得到李清亮博士和吴健博士的有益讨论,特此表示感谢!

参考文献

[1] Bourgeois, J. M., and Smith, G. S. A Fully Three-Dimensional Simulation of a Ground-Penetrating Radar: FDTD Theory Compared with Experiment

[J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1996, 34 (1): 36~44.  
[2] Roberts, R., and Daniels, J. J. Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method [J]. Geophysics, 1997, 62(4): 1114~1126.  
[3] Chneider, J. B., Wagner, C. L., and Ramahi, O. M. Implementation of Transient Sources in FDTD Simulations[J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1998, 46(8): 1159~1168.  
[4] Hipp, J. E.. Soil Electromagnetic Parameters as Functions of Frequency, Soil Density, and Soil Moisture [J]. Proc. of IEEE, 1974, 62(1): 98~103.  
[5] Wensink, W. A., Hoffman, J., and Van Deen, J. K.. Measured underwater near-field E-patterns of a pused horizontal dipole antenna in air: Comparison with the theory of the continuous wave, infinitesimal electric dipole[J]. Geophys. Prosp., 1990, 38:805~830.  
[6] 李大心. 探地雷达方法与应用. 地质出版社,1994.  
[7] 方广有. 无载频脉冲探地雷达的模拟计算与应用. 博士论文. 西安交通大学,1996.

## 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](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>