

文章编号 1005-0388(2003)04-0413-05

介电杆天线的时域特性分析*

叶红霞 蒋延生 汪文秉 师振盛

(西安交通大学微波工程与光通信研究所, charming_ye@163.com, 陕西 西安 710049)

摘要 超宽带技术在通信、雷达等众多领域获得广泛应用,时域天线是其关键技术。对介电杆天线用作时域天线的可行性进行了分析,并给出选择介电杆参数的依据。同时还使用FD-TD(时域有限差分法)数值计算方法分析了在超宽带情况下介电杆的直径、激励方式及终端渐变方式对天线的传播特性及辐射特性的影响。分析表明这种天线适宜用作时域天线。

关键词 超宽带天线,介电天线,辐射,波形畸变

中图分类号 TN826 文献标识码 A

Analysis of ultra-wide band rod dielectric antenna in time-domain

YE Hong-xia JIANG Yan-sheng WANG Wen-bing SHI Zhen-sheng

(Institute of Microwave Engineering and Optical Communication Techniques of
Xi'an Jiaotong University, charming_ye@163.com, Xi'an Shanxi 710049, China)

Abstract Ultra-wide band (UWB) technology is widely used in many fields such as communication and radar. Time-domain antenna is important for UWB technology. This paper analyzes the feasibility of the use of rod dielectric antenna in time-domain and presents how to choose the design parameters. The affection of antenna parameters, such as diameter, stimulation and taper, on propagation and radiation characteristics are analyzed by using the FDTD method. The results demonstrate that rod dielectric antenna can be used for time-domain antenna.

Key words ultra-wide band antenna, media antenna, radiation, wave form distortion

1 引言

现代通信技术有了飞速发展,雷达、声纳、地质勘探等众多领域越来越多地采用超宽带技术,以获得大的信息量和高的分辨率。超宽带技术的关键之一是超宽带天线。超宽带天线从时域来说又称为时域天线,它与时谐系统中的天线相比,除同样需要使能量在空间的辐射集中在人们要求的方向外,还对辐射场的波形有要求,例如,与馈源的波形相比没有过多的展宽。

目前常用的时域天线有两大类:一类是由金属

导线做成的线天线,其辐射波形展宽的原因有二:一是天线始端与终端的反射引起波形展宽;二是辐射过程中各电流元的时延不同,波形叠加引起波形失真。为使波形经辐射后不过分展宽,力求线上电流为行波电流,常采用加载的方法(集总加载或均匀加载)^{[1][2][3]}。加载的线天线效率低,方向性差。另一类是TEM喇叭天线或以TEM喇叭为馈源的反射面天线^{[4][5]}。这类天线的设计常按阻抗变换器的思想来设计TEM喇叭,并力求获得天线的均匀同相口径,从频域的观点看,这样可达到阻抗及辐射特性的宽带。但超宽带情况下口径绕射的辐射波形与口

径面的几何形状和激励脉冲的脉宽有关。TEM喇叭有一侧是开放的,泄漏大。因此,有必要寻求其它形式的天线。

时谐场中应用的介质杆天线属于行波天线的一种,因为是慢波系统,波在其中传播时必然会产生色散。因此在超宽带情况下,即使为纯行波,也会因波速不同而引起波形展宽。因而过去没有用这种天线作为时域天线。然而由于介质杆的基模(HE_{11})的相速在很宽的频带内变化不大,在允许一定波形畸变时可能用作时域天线。由于在其传输过程中波被束缚在介质杆内部,有望获得较小的侧向辐射。因而研究介质杆天线作时域天线是很有意义的。

本文首先依据介质杆中波的传播特性分析这种天线用作时域天线的可行性,并给出了根据信号特性选择介质杆参数的依据;其次分析了介质杆的直径和激励方式对天线传播特性的影响,以及终端渐变方式对天线辐射特性的影响。分析表明这种天线适宜用作时域天线。

2 时域介质天线的理论分析

介质杆天线通常由一段介质杆构成,如图1所示, ϵ_1 、 ϵ_2 分别表示介质杆内外的媒质特性, l 为渐变终端的长度。信号从其一端馈入,经介质杆导引,由另一端辐射。若终端采用逐渐变小的结构保证介质杆中传播的波为纯行波,就形成了介质杆行波天线。时谐情况下介质天线的设计通常会考虑天线的辐射能量和方向性,为此须合适选择激励模式、介质杆的直径和长度等。时域介质天线的设计还须使辐射脉冲的波形畸变尽可能小,信号幅度尽可能大。这一要求反映在频域中,是要求介质杆中传播的波在信号的带宽内为行波,且色散很小。

介质杆内传播的主模为 HE_{11} ,其截止频率为零^[6],

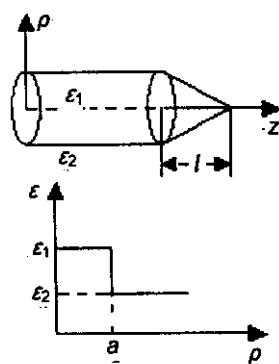


图1 介质天线模型

沿杆传播有以下两个规律:(1)传播的相速度: HE_{11} 波在临界状态的相速等于真空中的光速 c ,随着波长的缩短,相速逐渐减小,并趋于充满介电常数 ϵ_1 的无界媒质中的相速 $c/\sqrt{\epsilon_1}$ 。在 ϵ_1 取不同值时 ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0, \epsilon_2 = \epsilon_0$) v_ϕ/c 与 a/λ 的关系如图2(a);(2)内外空间的能量分布: HE_{11} 波沿介质杆传播时,其能量一部分在外部空间,另一部分在内部空间,这两部分能量的比可以用内部空间一个周期的平均能流 P_i 和外部空间一个周期的平均能流 P_e 的比值表示,在 ϵ_1 取不同值时 ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0, \epsilon_2 = \epsilon_0$) P_i/P_e 与 a/λ 的关系如图2(b)^[7]。

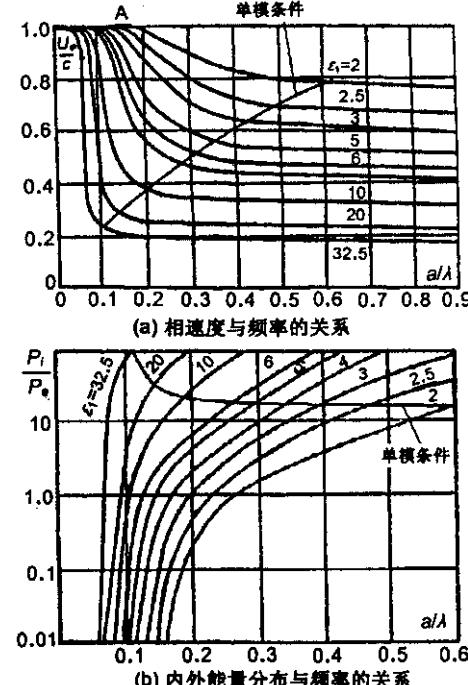


图2 介质波导的传输特性

为保证不激起其他波型,须适当选择截面直径,使它们工作在截止状态。通常的激励方法一般不会在介质杆中产生较强的对称波^[8],故只须避免产生非对称波 HE_{12} 和 EH_{12} 。设直径 $d=2a$,则

$$d = 2a < \frac{1.22}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \lambda \quad (1)$$

上式须对任何频率都成立。因此 a/λ 在图2(a)中必须位于单模条件曲线的左边,即处于相速从光速 c 逐步衰减到 $c/\sqrt{\epsilon_r}$ 的区域,并且介电常数 ϵ_r 越大,曲线变化越快;另外, a/λ 在图2(b)中位于单模条件曲线下方,该区域内 P_i/P_e 一般变化很快,并且 ϵ_r 越大,变化越快。对超宽带信号而言,为保证波形不展宽,信号不同频率分量的相速不能相差太大,同

时,能量须尽量束缚在介质杆内部,所以介电常数 ϵ_r 不能选得太大。

取 $\epsilon_r=2.5$ 为例,对于超宽带信号,为满足单模传输,信号的最短波长必须满足

$$a/\lambda_{\min} \leq 0.5 \quad (2)$$

理论上讲,HE₁₁ 模式的截止频率为零。但图 2 表明,当信号频率很低时波的相速等于光速,此时波不再沿杆传播,而沿径向传播,能量向外部空间扩散。因此,信号的最大波长不能过大, $\epsilon_r=2.5$ 时最大波长取图 2(a) 中 A 点,则应有

$$a/\lambda_{\max} > 0.17 \quad (3)$$

所以,

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{0.5}{0.17} \quad (4)$$

$$u = \frac{\Delta f}{f_0} = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \approx 1 \quad (5)$$

这种频率范围能满足超宽带信号的条件^[9]。因而,这种天线有望应用于超宽带情况。

对于给定的信号,可依据其带宽及图 2 来选择介质杆的介电常数及尺寸,而 λ_{\max} 的值可依据允许的波形失真要求选择允许的相速偏差值加以确定。

3 介质杆天线的数值模拟

用三维 FD-TD 模拟分析介质杆的传输和辐射特性,时间步长和空间步长分别为

$$\Delta s = 0.005 \text{ m} \quad (6)$$

$$\Delta t = 8.33 \times 10^{-12} \text{ s}$$

3.1 介质杆直径的影响

首先分析无限长介质波导的传输特性。如前所述,适合介质杆传输的信号频谱在 $\epsilon_r=2.5$ 时须满足(4)式。考虑如图 3 所示的超宽带信号,若取介质杆的半径分别为 30mm、50mm、60mm,则满足(4)式条件的频率范围分别为 1.7~5GHz、1~3GHz、0.8~2.4 GHz,其它频率成分会影响沿杆传输的信号波形。比较其轴向 E_y 的波形和侧向辐射,分别如图 4 和图 5(横轴表示网格数,纵轴表示 E_y 分量的峰峰值)所示。

可见,当介质杆的直径较小时,信号的绝大部分频率成分都满足单模传输条件,波形畸变小,但信号中的低频成分产生较强的侧向辐射,因而沿杆传输的信号较弱;当介质杆的直径较大时,信号能量基本束缚在介质杆内部,侧向辐射较小,但信号中的高频成分产生了高次模式,造成信号沿杆传输时的波形畸变。这正验证了图 2 的结论。因此,在选择介质

杆尺寸的时候,应依据信号频谱,兼顾这两方面的要求。

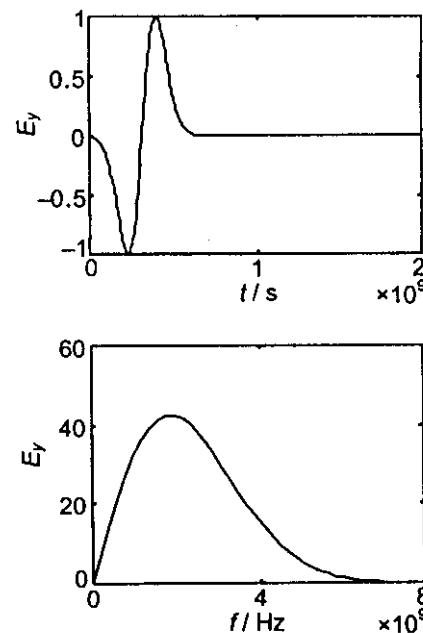


图 3 信号源波形和频谱

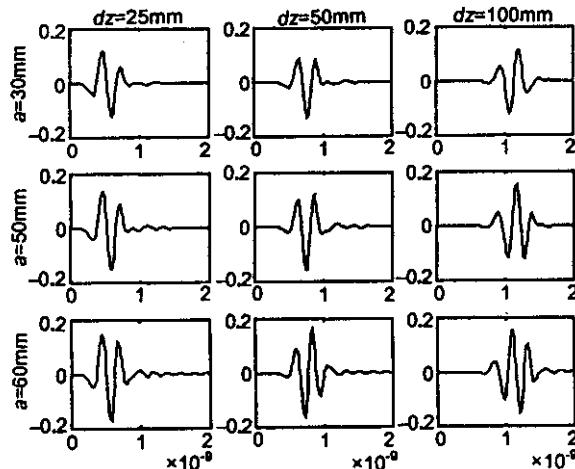


图 4 不同直径的介质杆的轴向波形

3.2 激励方式的影响

为在介质杆中激起 HE₁₁ 波,须获得一定极化的横向电场分量,可在 FDTD 计算中强加电场分量 E_y 。假设介质杆的半径 $a=50 \text{ mm}$,激励场的分布可取如图 6 所示的两种方式,前者模拟波导激励,后者模拟探针激励。其侧向辐射和轴向 E_y 的波形分别如图 7(横轴表示网格数,纵轴表示 E_y 分量的峰峰值)和图 8 所示。

可见,图 6(a) 方式激励产生的侧向辐射较小,波形畸变小,但信号幅度较小。图 6(b) 方式激励时

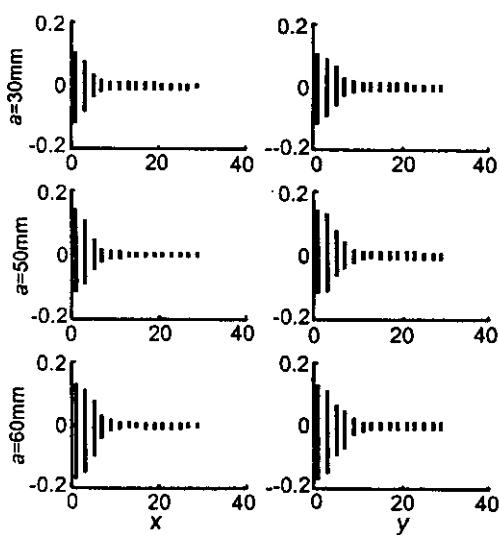


图5 不同直径的介质杆的测向辐射

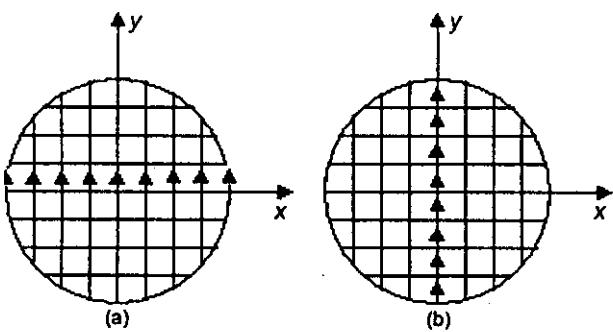


图6 两种激励方式

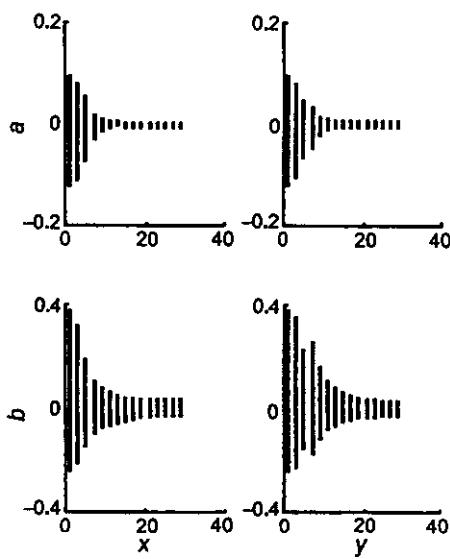


图7 不同馈电方式的侧向辐射

信号幅度较大,但侧向辐射也很大,信号拖尾很严

重。因此,在超宽带情况下采用图6(a)方式激励,能较好的保持波形,并使能量集中在介质杆内部,但激励的效率比较低。

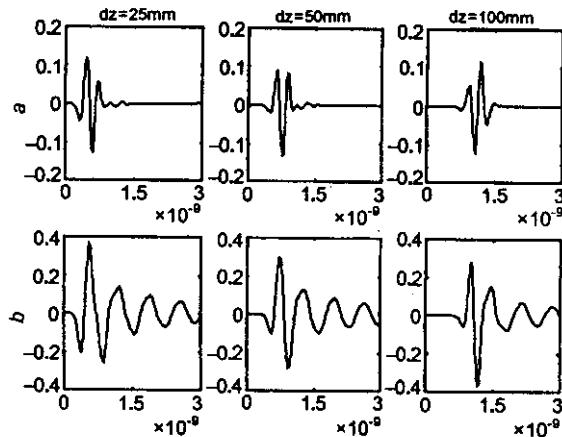


图8 不同馈电方式的轴向波形

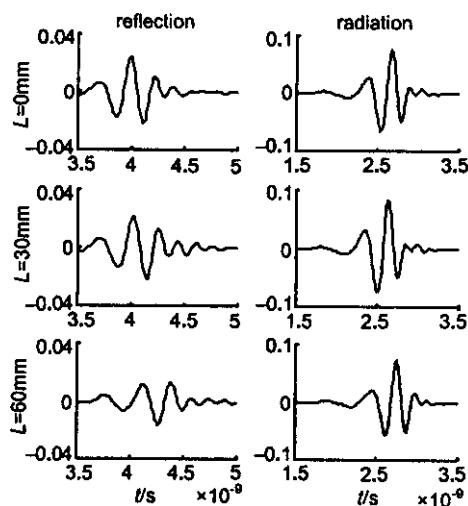


图9 反射和辐射信号波形

3.3 辐射终端的设计

介质杆天线由一段介质杆构成,沿杆传输的信号在其终端辐射,终端截断时应使天线上传播的波近似为行波,以保证反射小辐射大。采用尺寸渐变的方法减小终端反射。本文分析了渐变终端长度 l 分别为0,30mm,60mm的三种天线,其反射和辐射信号 E_y 的波形如图9,离终端30mm的平面上沿 x 和 y 两个方向上辐射信号 E_y 的包络如图10(横轴表示网格数)。

可见,天线正下方的辐射信号最强,故为端射天线。渐变终端越短,反射越强;越长则侧向泄漏越强,天线的方向性越差。模拟分析表明,当渐变终端

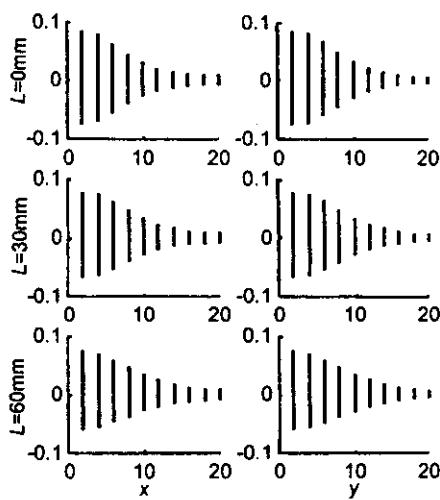


图 10 辐射信号包络

的长度和介质杆的直径相当时,辐射信号最强,方向性最好。如何使渐变段短且反射小,可考虑加载的方法,即像时谐场那样,一开始就采取渐变,但这种情况是否会引起辐射波形的严重失真,还须进一步研究。

由介质材料引起的介质损耗可能会造成介质杆中波的衰减,在我们讨论的波段,介质损耗通常很小,可以忽略不计^[7]。本文假设介质材料无耗,即 $\sigma=0$,且介质的介电常数为实数。因此,理论上天线的效率为1,但天线的激励效率较低。

4 结论

介质杆天线作为行波天线,虽然波在传播过程中会因色散而引起波形失真,但只要参数和尺寸选择适当,可以用作时域天线。在参数选择上,介质杆的介电常数和直径是很重要的参数,它们与沿杆传输信号的相速和能量有关。较大的介电常数会使脉冲波形严重畸变。对于宽带信号,若介质杆直径较大,信号中的高频成分产生高次模式,造成波形畸变,若直径较小,信号中低频成分向介质杆外部扩散,产生较强的侧向辐射。这些参数的选择可根据所使用的信号带宽范围,由图2出发进行折衷。介质杆天线的终端对信号辐射有很重要的影响,如何使终端短而反射小,须进一步深入研究,模拟计算结果将另文发表。

参考文献

- [1] Boag A Michielssen, E Mittra R. Design of electrically loaded wire antennas using genetic algorithms [J].

IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1996, 44(5):687~695.

- [2] E E Altshuler. The traveling-wave linear antenna[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1961, 9(4):324~329.
- [3] 高飞,陈益邻,刘其中. 加载宽带天线分析[J]. 电子学报, 1999, 27(12):124~125.
- [4] 王刚,刘刚,金亚秋. 螺旋—圆锥喇叭天线的理论分析[J]. 电波科学学报, 1996, 11(4):36~44.
- [5] 石守元,阎玉波,葛德彪. 三维 TEM 喇叭天线瞬态辐射的 FDTD 模拟[J]. 通信学报, 1999, 20(2):14~20.
- [6] 傅君眉,冯恩信. 高等电磁理论[M]. 西安交通大学出版社, 2000, 163~174.
- [7] [苏]F. 3. 爱金堡著, 汪茂光译. 超高频天线(上)[M]. 北京:人民邮电出版社, 1981, 81~88.
- [8] [苏]F. 3. 爱金堡著, 汪茂光译. 超高频天线(下)[M]. 北京:人民邮电出版社, 1981, 223~225.
- [9] L Y Astanin, A A Kostylev. Ultrawideband radar measurements analysis and processing[C]. Translated by L. N. Smirnova, The Institution of Electrical Engineers, pp. 3~11.



叶红霞 (1976-), 女, 江苏人, 2003年3月获西安交通大学硕士学位, 现于复旦大学波散射与遥感中心攻读博士学位。主要从事波散射、计算电磁学方面的研究。



蒋延生 (1957-), 男, 教授, 1982年毕业于西安交通大学无线电技术专业, 毕业后留校任教, 1989年获电磁场与微波技术专业硕士学位。主要从事天线和瞬态电磁场理论及其应用方面的研究。

汪文秉 (1929-), 男, 教授, 1952年毕业于同济大学, 现为西安交通大学博士生导师, 长期从事电磁散射、天线和瞬态电磁场理论及其应用方面的研究, 发表学术论文二百多篇及一些学术专著。

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>