

具有介质覆盖层的微带贴片天线方向性研究

李彦霏, 逯贵祯

(中国传媒大学信息工程学院通信工程系, 北京 100024)

摘要: 对增加放置在法布里-珀罗谐振腔内的微带贴片天线方向性系数进行了系统的研究。仿真表明, 采用介质覆盖层后天线的方向性增加了近 11 dB。在此基础上, 分析了天线电场分布, 提出了在覆盖层的不同位置采用不同的介电常数能够使相位分布曲线更加均匀的理论, 从而使方向性又增加 1 dB。分析并给出了采用平面的介质覆盖层(dielectric superstrata, DS)和渐变介电常数覆盖层的贴片天线方向性系数的仿真结果, 并分析了天线口面的辐射效率。

关键词: 微带贴片天线; 法布里-珀罗谐振腔; 方向性; 介质覆盖层; 渐变介电常数

中图分类号: TN 822

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j. issn. 1001-506X. 2010. 10. 23

Methods for directivity enhancement of micro-patch antenna by using dielectric superstrata

LI Yan-fei, LU Gui-zhen

(Information Engineering School, Communication Univ. of China, Beijing 100024, China)

Abstract: A systematic design methodology for enhancing the directivity of microstrip patch antennas (MPA) is presented, in which MPA is used as an exciter of a Fabry-Perot (FP) resonant cavity. Simulation results show that after using dielectric superstrata as covers for the MPA, the directivity can be enhanced by almost 11 dB over that one without the superstrata, and directivity can be further enhanced 1 dB using graded superstrata compared with that using the uniform dielectric superstrata. Finally, the aperture efficiency of the superstrata is analyzed.

Keywords: microstrip patch antenna (MPA); Fabry-Perot cavity; directivity; dielectric superstrate; graded-index dielectric constant

0 引言

法布里-帕罗(Fabry-Perot, FP)谐振天线增强小型天线方向性是由 Von Trentini 在 1956 年首先提出^[1]。光学中 FP 谐振腔结构由两片平行对置的全反射镜面组成^[2], 当两反射面之间的光程为 $\lambda g / 2$ 的倍数时, 由于历次穿出一片镜面上所开辐射孔径的相干光波同相叠加, 可明显提高其辐射增益。近些年来, 很多学者对 FP 谐振原理增加小型天线方向性的研究表现了极大的兴趣[1, 3-11]。文献[3]分析了采用电磁能量带隙材料作为覆盖层的微带贴片天线的方向性, 也有一部分学者采用了部分反射表面作为覆盖层, 对天线方向性增益的影响[1, 3-7, 12]。文献[8]从理论上给出了 FP 谐振天线取得最大方向性系数和最小半功率角与频率的关系的表达式。

尽管对 FP 谐振天线的研究相当广泛^[13], 但是以前的

许多工作都是针对电大尺寸的结构进行研究, 很少有文章处理关于小尺寸的 FP 腔体天线, 从而忽略了考虑天线口面辐射效率的问题。本文从增强方向性的理论出发——均匀的场分布能够得到高方向性, 分析了观察面上场分布曲线, 从物理机制出发, 改变结构参数使得观察面的电场分布趋于均匀, 从而进一步提高了天线方向性系数和辐射效率。

本文的研究方法分成三个步骤: 首先, 在接收工作状态下, 确定空的(没有微带贴片天线)FP 腔体的谐振频率, 谐振腔的接收工作状态结构包括地面、介质基板和介质覆盖层, 在接收工作状态下场强最大值出现的频率点即为腔体的谐振频率点, 通过这一步工作可确定腔体的高度; 第二步, 设计工作在此频率点的微带天线, 使其工作在 FP 腔体谐振频率; 第三步, 将贴片天线作为激励放置在 FP 腔体内, 分析天线方向性随频率的变化曲线。

本文使用的覆盖层尺寸为 $3\lambda_0 \times 3\lambda_0$, λ_0 为谐振时的自由

收稿日期: 2009-04-07; 修回日期: 2010-05-24。

基金项目: 中国传媒大学舞台灯光电磁兼容标准研究项目(HG0915)资助课题

作者简介: 李彦霏(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为电磁兼容、人工电磁材料。E-mail: liyanfei@cuc.edu.cn

空间的波长。首先,论文给出了 FP 谐振天线的方向性的仿真结果,并与没有覆盖层时进行比较,发现在工作频率 15 GHz 处,有覆盖层的天线的方向性系数增加了近 11 dB。然后,研究了距离覆盖层 $0.25\lambda_0$ 处电场的幅度和相位分布,为了使相位分布更加均匀,论文提出了采用渐变介电常数的覆盖层。通过仿真结果,可以看出采用渐变介电常数覆盖层的天线,在观察面上的相位均匀分布程度明显改善,同时幅度分布均匀度也略有改善,从而有效增加了天线辐射方向性。

1 接收工作状态

本文设计的微带天线工作在 15 GHz,并希望在此频率得到最大方向性系数。为此,本文采用接收工作状态去精确确定 FP 天线的高度。接收工作状态的几何结构如图 1 所示,结构参数如表 1 所示。采用均匀平面波照射接收工作状态结构,在腔体的中心设置一个观察点,计算该点的归一化电场的幅度,其随频率变化的曲线如图 2 所示,在 15 GHz 频率点,电场的幅度达到最大值。当工作在接收工作状态下的电场达到最大值的频率点时,工作在传输模式的天线与覆盖层的复合结构在该频率点可获得最大方向性,这个仿真规律,为确定设计天线/覆盖层的复合结构高度提供依据。

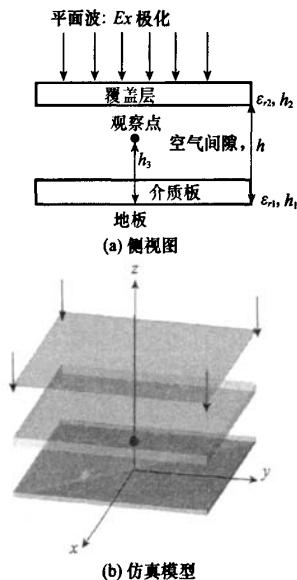


图 1 接收工作状态结构示意图

表 1 接收工作状态结构参数($f_0 = 15$ GHz)

参数	参数值
覆盖层	$\epsilon_{r2} = 9.8, h_2 = 1.6$ mm, $3\lambda_0 \times 3\lambda_0$
空气间隙	$h = 10.3$ mm($0.515\lambda_0$)
观察点	位于腔体中心, $h_3 = 0.5h$
介质基板	$\epsilon_{r1} = 4.4, h_1 = 0.5$ mm, $3\lambda_0 \times 3\lambda_0$
地板	PEC, $3\lambda_0 \times 3\lambda_0$
λ_0	自由空间波长(15 GHz)

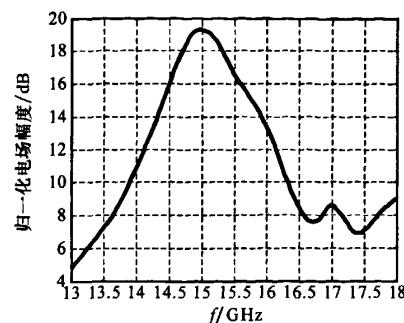


图 2 接收工作状态归一化电场幅度分布曲线

2 采用介质覆盖层增加微带贴片天线方向性

由接收工作状态确定了高度为 10.3 mm($0.515\lambda_0$), 谐振在 15 GHz 的 FP 天线, 微带贴片天线参数 $W = 6$ mm, $L = 4.19$ mm, 天线采用探针馈电, 俯视图如图 3 所示, 天线的反射系数 S_{11} 的幅度和相位仿真结果, 如图 4 所示。

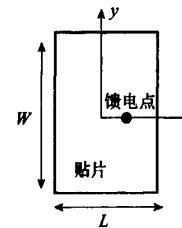


图 3 贴片天线结构示意图

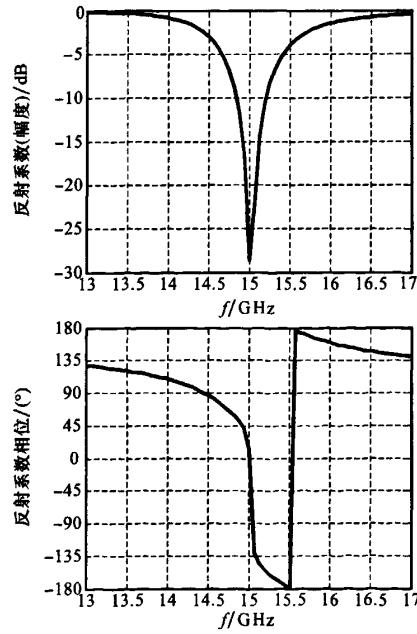


图 4 贴片天线的反射系数

将设计的天线置于 FP 腔体内,使得 FP 谐振腔工作在传输模式。为了获得高增益,采用覆盖层的厚度约为 $\lambda_s/4$ ^[14](在接收工作状态就已经采用该数值), λ_s 为在覆盖层介质中传播时的波长。天线与覆盖层的复合结构如图 5 所示,参数值与接受模式所列相同。采用时域有限差分方法(finite difference time domain, FDTD)^[15]对该结构进行仿真,图 6 给出了微带贴片天线本身和天线/覆盖层复合结构方向性系数随频率变化的仿真结果。通过对比,天线/覆盖层复合结构方向性系数在谐振频率 15 GHz 处增大近 11 dB。

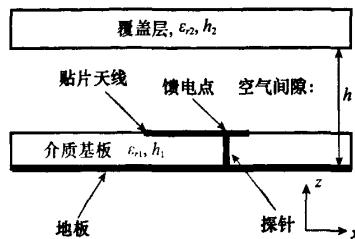


图 5 天线/覆盖层复合结构示意图

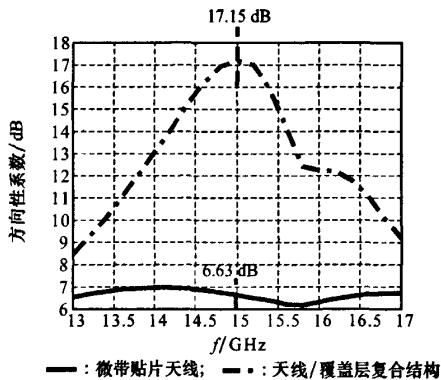


图 6 方向性系数随频率变化曲线对比

为了在上述尺寸的基础上进一步增大天线的方向性系数,分析了距离覆盖层上表面约 $\lambda_0/4$ 处观察面上的电场分布,图 7 和图 8 分别给出观察面的位置和在该面电场的幅度与相位的分布。从图 8 可以看出,无论是幅度还是相位分布都不够均匀,幅度的分布是中心大于边缘,相位分布是中心相位超前边缘相位。为此,采用渐变介电常数的介质覆盖层来调整相位,使其分布更加均匀。渐变覆盖层如图 9 所示。在相同厚度基础上,对电磁波传播相位来说,增加介电常数,相当于增加传输距离。对于介电常数的渐变选择,首先是分析图 5 所示结构在观察面上沿曲线①和曲线②的相位变化,为了避免重复,本文将采用渐变介电常数前后相位变化的对比曲线同时画在图 10 和图 11 中。为了使该结构在 15 GHz 处方向性系数最大,在采用渐变介电常数后,对 FP 腔体高度做了微调,由原来的 0.515 λ_0 调整为 0.5 λ_0 。采用渐变覆盖层后的幅度和相位沿曲线①和曲线②的变化如图 10 和图 11 所示。首先,看到相位分布均

匀程度有明显改善,同时归一化电场的幅度分布也有略微改善(归一化电场是对在该曲线上电场最大值进行归一化)。图 12 给出了采用渐变介电常数前后的方向性系数的对比曲线,可以看到在 15 GHz 处,有 1 dB 的增加。

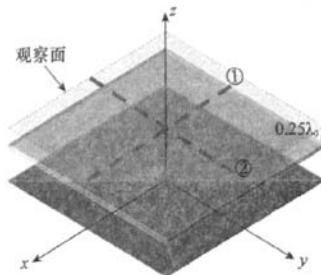


图 7 观察面与结构相对位置示意图

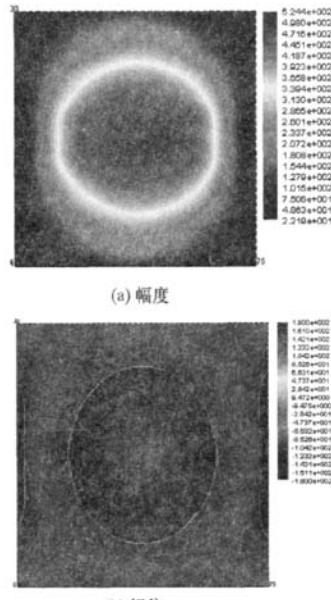


图 8 观察面上电场分布

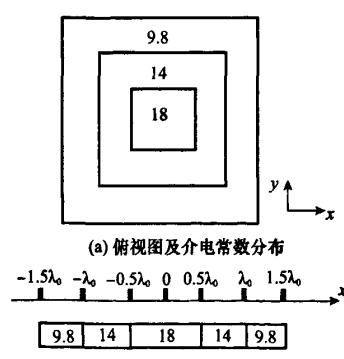


图 9 渐变覆盖层示意图

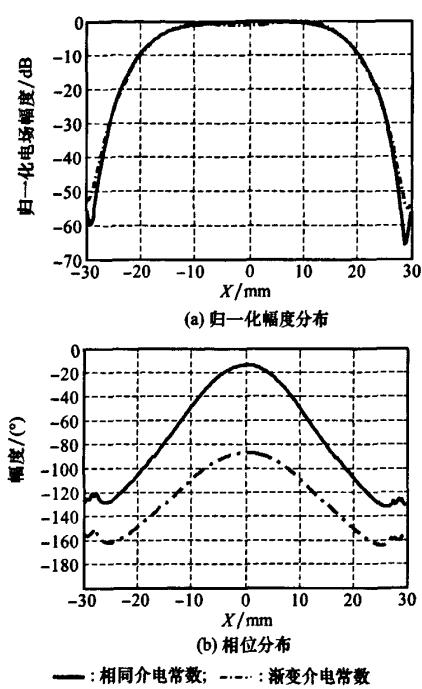


图 10 观察面上电场沿曲线①的电场分布

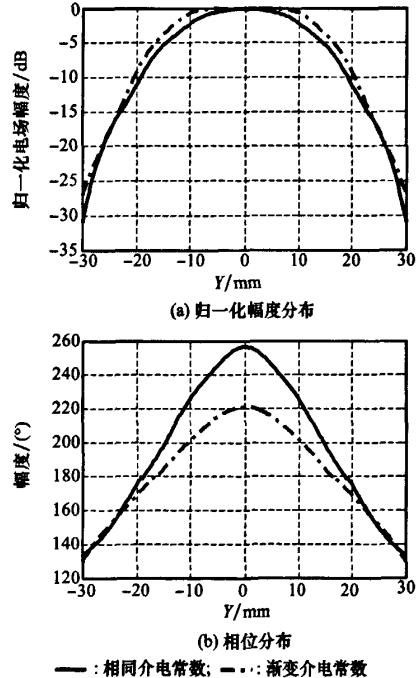


图 11 观察面上电场沿曲线②的电场分布

同相辐射口面的方向性系数 $D = \frac{4\pi}{\lambda^2} S v^{[16]}$, 其中 S 是口径面积, v 是面积利用系数。本文的覆盖层的尺寸是

$3\lambda_0 \times 3\lambda_0$, 对于这样一个尺寸在电场分布完全均匀情况下, 可以得到天线方向性系数为 20.53 dB。在采用渐变介电常数前后分别得到 17.15 dB 和 18.19 dB 的方向性系数, 分别可得面积利用系数 v 为 67.77% 和 76.39%。可见, 在采用渐变介电常数的介质覆盖层后, 口面利用系数提高了近 8%。

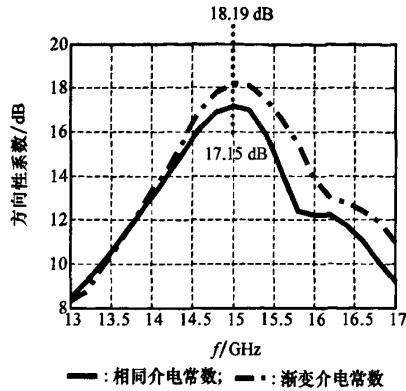


图 12 采用常数介电常数和渐变介电常数覆盖层的方向性系数对比曲线

3 结 论

本文给出了将贴片天线放置于 FP 腔体内增大微带贴片天线方向性的系统分析方法, 采用接收工作状态分析了如何确定 FP 谐振腔体高度与频率的关系。从理论和物理机制出发, 提出了采用渐变介电常数的介质覆盖层, 使得电场的分布更加均匀, 从而进一步增加天线的方向性, 并计算了口面的利用率。本文的分析方法为增加微带贴片天线的方向性提供了一种系统的设计分析方法与思路。

参考文献:

- [1] Trentini G V. Partially reflecting sheet arrays[J]. *IRE Trans. on Antennas and Propagation*, 1956, 4(4): 666–671.
- [2] Keigo I. *Elements of photonics*[M]. USA: Wiley, 2002.
- [3] Thevenot M, Cheype C, Reineix A, et al. Directive photonic band-gap antennas[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2115–2122.
- [4] Akalin T, Danglot J, Vanbesien O, et al. Highly directive dipole antenna embedded in a Fabry-Perot type cavity[J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, 2002, 12(2): 48–50.
- [5] James J R, Kinany S J A, Peel P D, et al. Leaky-wave multiple dichroic beamformers[J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(18): 1209–1211.
- [6] Feresidis A P, Goussetis G, Wang S, et al. Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 209–215.

(下转第 2197 页)

- pendulum around its homoclinic orbit[J]. *Systems & Control Letters*, 2000, 40(3): 197–204.
- [5] Angeli D. Almost global stabilization of the inverted pendulum via continuous state feedback[J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 1103–1108.
- [6] Cavdaroglu M E, Olgac N. Trajectory tracking of cart-pendulum dynamics using multiple time-delayed feedback[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2008, 2(6): 458–466.
- [7] 段学超, 仇原鹰, 盛英. 平面二级倒立摆的圆周行走与稳定控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(12): 1337–1340.
- [8] Chang L H, Lee A C. Design of nonlinear controller for bi-axial inverted pendulum system[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(4): 979–986.
- [9] Shiroma N, Matsumoto O, Kajita S, et al. Cooperative behavior of a wheeled inverted pendulum for object transportation[C]// Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan: IEEE Press, 1996: 396–401.
- [10] Murakami T, Sasaki K. A motion control for two-wheel inverted pendulum type of mobile manipulator[J]. *IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering*, 2009, 4(2): 192–198.
- [11] Sun D, Feng G, Lam C M, et al. Orientation control of a differential mobile robot through wheel synchronization [J]. *IEEE-Asme Trans. on Mechatronics*, 2005, 10(3): 345–351.
- [12] Sun D, Feng G. A synchronization approach to the mutual error control of a mobile manipulator[C]// Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei: IEEE Press, 2003: 3005–3010.
- [13] Tsai M C, Shen B H. Synchronisation control of parallel dual inverted pendulums driven by linear servomotors[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(1): 320–327.
- [14] Zhu D F, Zhou D. Synchronization control of parallel dual inverted pendulums[C]// Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao: IEEE Press, 2008: 1486–1490.
- [15] Isidori A. *Nonlinear control systems*[M]. 3rd ed. New York: Springer Verlag, 1995: 137–150.
- [16] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. *Nonlinear and adaptive control design*[M]. New York: Wiley, 1995: 29–49.

(上接第2127页)

- [7] Feresidis A P, Vardaxoglou J C. High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces[C]// IEE Proc. of Microwaves, Antennas and Propagation, 2001, 148(6): 345–350.
- [8] Boutayeb H, Mahdjoubi K, Tarot A C, et al. Directivity of an antenna embedded inside a Fabry-Perot cavity: analysis and design[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, 48(1): 12–17.
- [9] Biswas R, Ozbay E, Temelkuran B, et al. Exceptionally directional sources with photonic band-gap crystals[J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2001, 18(11): 1684–1689.
- [10] Lee Y J, Yeo J, Mittra R, et al. Design of a high-directivity electromagnetic band gap (EBG) resonator using a frequency selective surface (FSS) superstrate[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 43(6): 462–467.
- [11] Lee Y J, Yeo J, Mittra R, et al. Application of electromagnetic bandgap (EBG) superstrates with controllable defects for a class of patch antennas as spatial angular filter[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 224–235.
- [12] Young J L, Junho Y, Mittra R, et al. Design of a frequency selective surface (FSS) type superstrate for dual-band directivity enhancement of microstrip patch antennas [C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005, 3A: 2–5.
- [13] Sauleau R. *Fabry Perot resonators*[M]// Chang K. *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, USA: Wiley, 2005: 1381–1401.
- [14] Jackson D R, Alexopoulos N G. Gain enhancement methods for printed circuit antennas[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1985, 33(9): 976–987.
- [15] GEMS. 3-D high performance parallel EM simulation software [OB/EL]. www.2comu.com.
- [16] 宋铮, 张建华, 黄治. 天线与电波传播[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.

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>