

# 波束波导传输系统与天线设计

石俊峰 马汉清 赵交成

(西安电子工程研究所 西安 710100)

**【摘要】**波束波导传输系统具有功率容量高、不需要旋转关节等优点,非常适合在大功率微波系统中应用。本文简单介绍了波束波导系统,设计了一款基于波束波导传输系统的天线,讨论了其馈源的设计及镜面的选取,并利用基于 GRASP 软件的 QUAST 模块进行了优化分析。为进一步验证 GRASP 计算的可靠性,将波束波导天线前两个反射面在 HFSS 中进行了仿真,并与 GRASP 所得结果进行了比较,比较结果显示两者吻合较好。

**关键词:**波束波导;高功率容量

中图分类号:TN81;TN82

文献标志码:A

文章编号:1008-8652(2012)01-067-05

## Design of Beam Waveguide Transmission System and Antenna

Shi Junfeng, Ma Hanqing, Zhao Jiaocheng

(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100)

**Abstract:** Beam waveguide transmission system has advantages of high power capacity and working without rotary joints, therefore it is suitable for applying in high-power microwave system. Beam waveguide transmission system is introduced briefly; an antenna based on beam waveguide transmission system is designed; design of feed source and selection of reflectors are discussed; and optimization analyzing by using of QUAST module based on software GRASP is conducted. In order to verify reliability of GRASP computation further, simulation of two reflectors in front of beam waveguide antenna is conducted; and comparison between the simulation results and GRASP result shows that they are well coincident with each other.

**Keywords:** beam waveguide; high power capacity

## 1 引言

随着科学及军事研究对高功率、高频率微波源的需求,促使以电子回旋管为代表的高功率微波源不断发展,逐步产生了一门新的边缘科学——高功率微波技术。高功率微波天线技术是高功率微波应用中的一个重要环节,决定着能否将能量有效的辐射出去。但当系统工作在毫米波及以上频段时,由于基模系统损耗过大,传统的基模波导传输系统不再适用,本文将要介绍的波束波导传输系统及天线的设计,很好的解决了这一问题,对增加系统功率容量,减小系统体积,提高系统效率有重要意义。

## 2 波束波导传输系统简介

波束波导传输系统将一系列的平面镜和曲面镜按一定的位置排列,对馈源的辐射波束沿指定路径进行精确的引导,使其到达前端的天线并辐射出去<sup>[1]</sup>。波束波导天线特殊的结构特性,决定了其可以通过镜面的转动,实现方位面与俯仰面的扫描。图 1 为一典型的波束波导天线结构示意图<sup>[2]</sup>。

此天线的馈源为喇叭天线,其主波束经四级镜面反射之后通过前端的卡式天线辐射出去。如图 1 所示,可通过两级转动装置分别沿方位轴与俯仰轴旋转以实现方位面与俯仰面的扫描。需要特别说明的是,当借助波束波导系统进行天线旋

转时,极化方向会发生变化,因此在雷达中运用时,只适合辐射和接收圆极化波。本文设计的天线应用在高功率微波领域,不接收回波信号,因此可做成线极化形式。

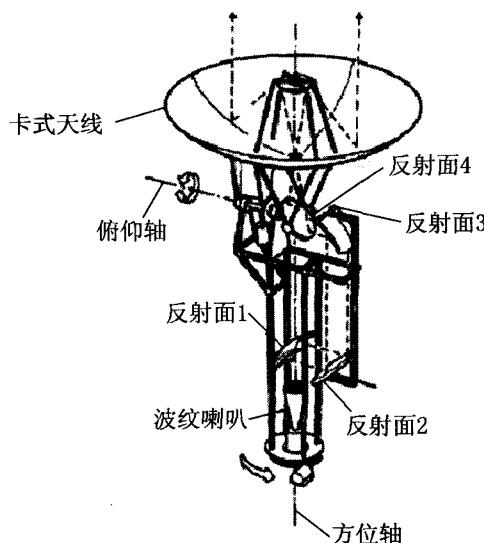


图 1 波束波导天线结构示意图

### 3 馈源的设计

在高功率微波领域,以回旋管为代表的许多微波源的输出波模式多为圆波导轴对称模,如 TE01 模。这种模式的辐射方向图成空心圆锥状,不适合直接作为天线激励。为了使天线具有较高的定向辐射特性,必须通过模式变换器将其转换为易于空间发射的 TE11、HE11 模,或其他准高斯模式,才能进行波束波导传输<sup>[3]</sup>。

考虑到天线系统整体尺寸、后续加工及功率容量等问题,决定采用 Vlasov 辐射器<sup>[3]</sup>作为模式变换器,将微波源的输出模变换为准高斯模。为使其 E 面和 H 面波束等化,在其上方添加了一级反射面,将 Vlasov 辐射器及此反射面统称为 Vlasov 天线。其工作频率为  $f_0 = 94.5\text{GHz}$ , 天线的结构如图 2 所示,远场仿真方向图如图 3 所示。



图 2 Vlasov 天线结构示意图

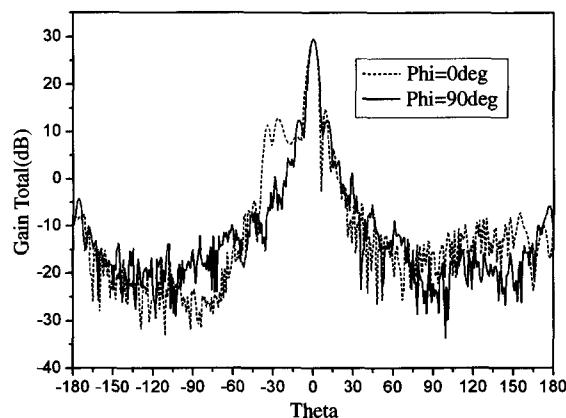


图 3 Vlasov 天线仿真方向图

### 4 馈源的等效高斯波束分析

高斯波束在传播过程中,大部分能量集中在传播轴附近,其横向上的幅度是变化的,且符合高斯分布<sup>[4]</sup>。高斯波束在近轴近似条件下的基模为:

$$E(r, z) = \left( \frac{2}{\pi\omega^2} \right)^{0.5} \exp\left( \frac{-r^2}{\omega^2} - jkz - \frac{j\pi r^2}{\lambda R} + j\varphi_0 \right) \quad (1)$$

式中  $\omega$  为波束半径,定义为幅度下降为  $1/e$  处的位置;在  $z = 0$  处,高斯波束的波束半径最小,用  $\omega_0$  表示,定义为束腰。下面列出高斯波束几个重要参量之间的相互关系:

$$R = z + \frac{\pi\omega_0^2}{z\lambda} \quad (2)$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2} \right)^2} \quad (3)$$

$$\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\omega}{z} \right) \right] = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \right) \quad (4)$$

式中,  $R$  为高斯波束波前曲率半径;  $\theta_0$  为在远场的极限条件下,波束半径增大的渐近角。

波束波导天线的馈源多采用波纹喇叭形式,因为此类馈源的辐射波束对称性好,交叉极化低,关于波纹喇叭辐射波束的高斯波束展开,可以参看参考文献[4]。而关于 Vlasov 天线辐射波束的高斯波束展开,目前还没有成熟的方法,但由式(2)、(3)、(4),可知束腰  $\omega_0$  为高斯波束的核心参数,如果求得  $\omega_0$ ,高斯波束的很多性质就可以大致确定。由波束半径  $\omega$  的定义,结合馈源的仿真结果,可得 Vlasov 天线的波束半径增大的渐近角  $\theta_0 \approx 5^\circ$ ,又馈源的工作频率为  $f_0 = 94.5\text{GHz}$ ,可得  $\lambda = c/f_0 = 3.17\text{mm}$ ,由

式(4),可得:

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan(\theta_0)} = 11.5 \text{ mm} \quad (5)$$

即 Vlasov 天线的等效束腰半径为 11.5mm。

## 5 波束波导传输系统设计

由馈源的仿真结果可知,辐射功率的最大方向不在波导的轴线上,鉴于此,拟采用图 4 所示六级反射面结构,结构尺寸如图 4 所示。

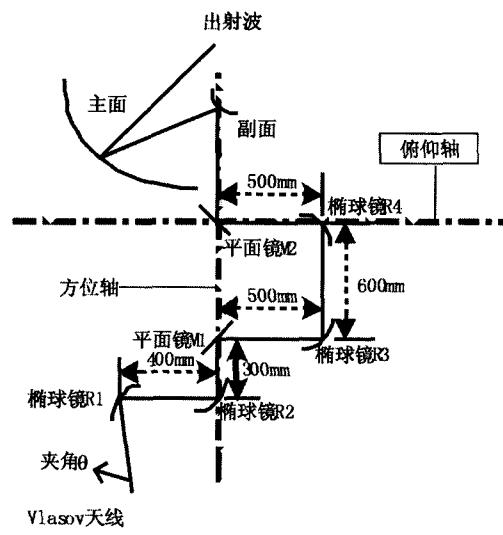


图 4 六级反射面的波束波导天线

其工作原理为:Vlasov 天线的斜出射波经椭球镜 R1、R2 的反射之后,主辐射方向转变为垂直于水平面,经后四级镜面的反射到达前端的卡式天线。此设计方案中前两级椭球面主要起调整波束传播方向的作用,后四级反射面(平面镜 M1、M2 及椭球镜 R3、R4)起引导波束的作用,同时通过引入转动装置,可使天线在水平方向及俯仰方向上进行扫描。

实现扫描的具体过程可参看图 4,当天线需要在方位面进行扫描时,以方位轴为中心,转动平面镜 M1 及以上各个反射面,即可实现方位面扫描;当天线需要在俯仰面进行扫描时,以俯仰轴为中心,转动 M2 及以上部分,即可实现俯仰面扫描,结构实现时拟采用与图 1 所示类似的机械结构。

在波束波导传输系统设计时,还需要保证波束经过最后一级反射镜 M2 出射后,其波束特性与万方数据

Vlasov 天线的特性基本一致,这样在系统连调时,可将 Vlasov 天线直接作为卡式天线的馈源进行测试与分析,方便系统调试。

具体到每个反射面的设计,只需确定其尺寸与形状。对于反射面的尺寸,通常选取镜面半径为镜面处入射高斯波束半径的两倍,这样可以保证 98% 以上的能量被反射<sup>[4]</sup>。由于本设计方案涉及到高功率,为进一步减小衍射,所选取镜面的半径略大于波束半径的两倍。对于平面镜来说,其尺寸确定以后整个设计就完成了,而椭球镜既要考虑镜面的尺寸,还要考虑镜面的形状。在对椭球镜进行设计时,有一个有用的结论:当  $R_i = R_1$ ,  $R_o = R_2$  时达到匹配,如图 5 所示。

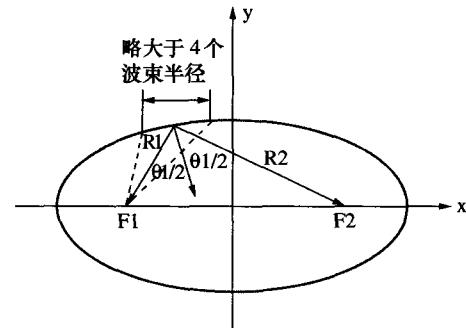


图 5 椭球面反射镜几何结构

这表明当入射波在反射镜处的球面相位波前对应的曲率半径  $R_i$  与入射点和椭球面的反射镜所在椭球几何焦点  $F_1$  之间的  $R_1$  相等,同时  $R_o$  与椭球面反射镜光心和椭球另一个几何焦点  $F_2$  之间的距离  $R_2$  也相等时,入射波束与出射波束匹配。本文选择所有椭球面镜的  $R_i = R_2$ ,通过高斯波束展开,选择椭球镜的人射点和出射点之后,椭球面就可用圆柱体或圆锥体截取椭球体的方法获得,需要说明的是,选择不同的人射点和出射点,截取镜面的形状也不同。高斯波束经镜面的反射后,其辐射特性会发生变化,在设计时,需要对经过镜面反射之后的高斯波束的参数进行研究。对于平面镜,高斯波束反射后只改变传播方向,其他参数不发生改变;对于椭球镜,高斯波束反射后的传播情况,可以等效为透镜处理,具体方法可参阅参考文献[4]。合理调整各个反射面参数,保证 Vlasov 天线经六级反射面之后的出射束腰与其束腰近似相等,就完成了六级反射面的设计。

将设计好的反射面,在仿真软件 QUAST 建模并进行优化,如图 6 所示。

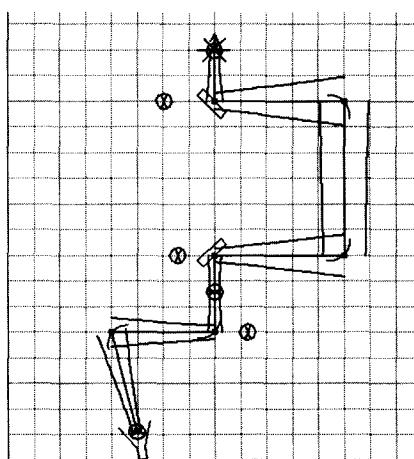


图 6 波束波导在 QUAST 中的模型

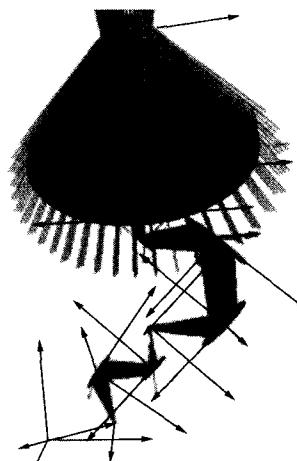


图 8 GRASP 中生成的立体模型及射线路径

## 6 反射面天线的设计

如前所述,波束波导系统输出波束与 Vlasov 天线基本一致,因此,可以直接将 Vlasov 天线作为卡式天线的馈源进行反射面设计。图 7 所示的为 Vlasov 天线直接作为馈源时卡式天线的结构示意图。此天线采用的为偏馈形式,主面焦距为 1.8m, 直径为 1.2m, 副面直径为 0.29m, Vlasov 天线位于图中馈源所示位置。

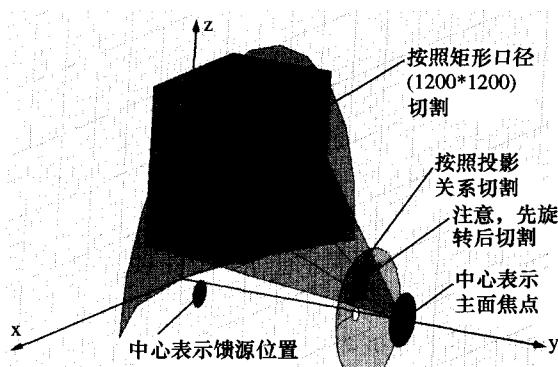


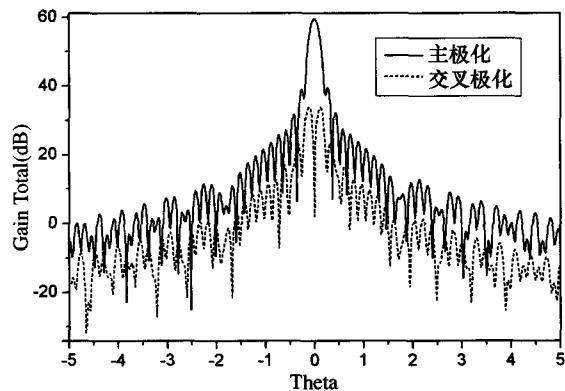
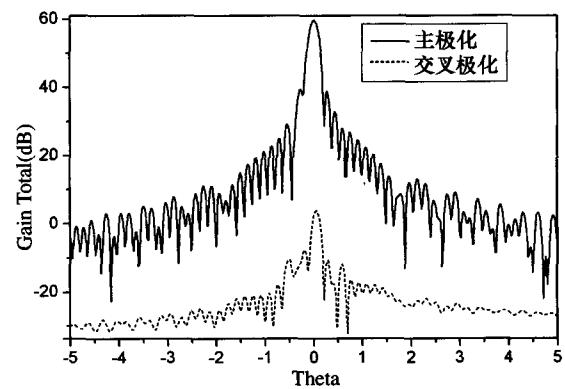
图 7 Vlasov 天线作为馈源的卡式天线

## 7 仿真结果及分析

将设计好的反射面在 QUAST 建模, 并在 GRASP 下生成立体模型, 见图 8 所示。

将生成的模型进行仿真分析, 其远场方向图分别如图 9、图 10 所示, 其中虚线为交叉极化, 实线为主极化。

由仿真结果可得, 天线远场方向图对称性较好, 增益可达 59.5dB, 波束宽度为 0.17°, 基本达到了设计要求。

图 9  $\Phi = 0^\circ$  时主极化与交叉极化图 10  $\Phi = 90^\circ$  时主极化与交叉极化

## 8 仿真结果对比

为了验证设计的正确性, 决定将设计好的天线系统分别在 HFSS 和 GRASP 建模并仿真分析, 并将仿真结果进行对比。考虑到在 HFSS 中仿真电大尺寸的反射面天线所需硬件较高, 所需时间较长, 如将

整个天线系统放在 HFSS 中进行仿真较难实现,所以本文选择馈源加上前两级反射面分别在 GRASP 和 HFSS12 中进行了仿真。图 11、图 12、图 13 分别为两者在不同切面处的仿真结果对比,其中虚线为 GRASP 仿真结果,实线为 HFSS12 的仿真结果。

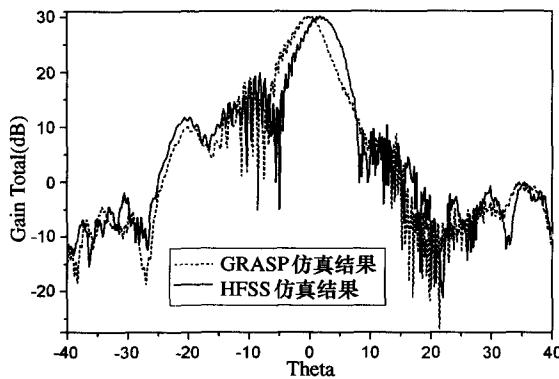


图 11  $\Phi = 0^\circ$  时仿真结果比较

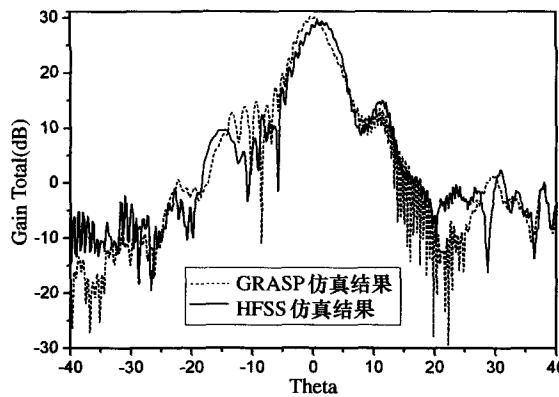


图 12  $\Phi = 45^\circ$  时仿真结果比较

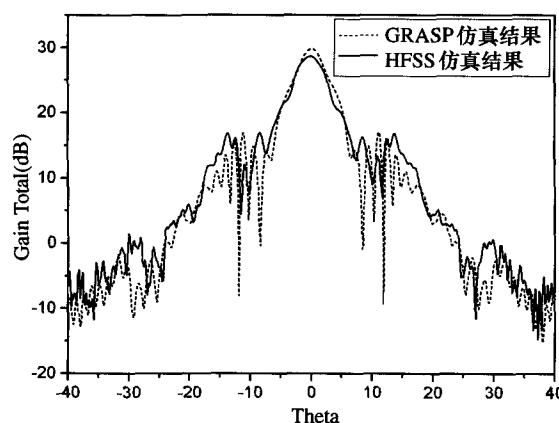


图 13  $\Phi = 90^\circ$  时仿真结果比较

由仿真结果的对比可知,两种算法算得的前两级反射面出射波束方向图基本吻合,只有两主波束的指向略有差异。分析原因为:在 GRASP 中进行仿真时,仅导入 Vlasov 天线远场的几组切面数据的幅度值代表其远场,未充分考虑其相位特性。实际上,由于前两级反射面的口径均满足  $-30\text{dB}$  边缘照射条件,因此前两级出射波束的指向将不会显著影响后续波束波导系统的传输特性。

分析以上原因带来的误差,同时结合仿真结果,证明设计方案是准确的,结果是真实可信的。

## 9 结论

本文结合工程需求,设计了一款适用于高功率微波传输的波束波导天线。考虑到高功率微波源输出波模式不适合作为天线的激励使用,使用了 Vlasov 天线对输出波模式进行变换,同时为了实现方位面与俯仰面的波束扫描,采用了六级反射面结构。本文对设计方案进行了仿真分析,结果达到设计目的。文章最后将 GRASP 与 HFSS12 仿真结果进行了比较,发现两者吻合较好,验证了设计的合理性与正确性。下一步工作的重点将对天线结构作进一步研究,并进行实物加工及测量。

## 参考文献:

- [1] William. A. Imbriale. Design and applications of beam waveguide systems [ C ]. Aerospace Conference, 1997. Proceedings, IEEE. Vol. AP - 21, February 1973.
- [2] Brent Toland, Alon S. Barlevy, William M. Hughes and Dan R. Johnson. Novel Three - Axis Beam Waveguide Feed for Space - Based Millimeter - Wave Applications [ J ]. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, 1997, 45(6).
- [3] 袁成卫,高功率微波轴对称模式天线辐射技术研究 [ D ]. 国防科技大学研究生院硕士论文,2002.
- [4] 俞俊生、陈晓东,毫米波与亚毫米波准光技术 [ M ]. 北京:北京邮电大学出版社,2010.

## 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>