

文章编号:1005-6122(2006)06-0022-05

复杂载体上 Koch 分形天线的矩量法分析*

李 苗^{1,2} 顾长青² 徐金平¹

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室,南京 210096; 2. 南京航空航天大学信息科学与技术学院,南京 210016)

摘要: 基于电场积分方程的矩量法(EFIE-MoM),利用线面结点基函数(wire-surface basis function)研究复杂金属载体上 Koch 分形天线的电磁特性,完成了数值方法的理论建模和程序实现。首先通过几种金属载体上普通单极子天线算例验证了理论模型和计算程序,接着计算了几种复杂金属载体上 Koch 分形天线的输入阻抗和远场方向性曲线,并对计算结果作了分析。

关键词: 矩量法,线面交接处,Koch 分形天线

Analysis of EM Characteristics of Koch Fractal Antenna Mounted on Complex Metal Objects

LI Zhuo, GU Chang-qing², XU Jin-ping¹

(1. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. College of Information Science and Technology, NUAA, Nanjing 210016, China)

Abstract: On the basis of EFIE-MoM and wire-surface basis function, the EM characteristics of Koch fractal antenna mounted on complex metal objects are analyzed. Theoretical models and a computer program are verified by some examples of conventional monopole antennas on metal objects. The input impedance and radiation pattern of Koch fractal antenna mounted on complex metal objects are calculated. The obtained numerical results are analyzed and some conclusions are deduced.

Key words: Method of moments, Wire-surface junction, Koch fractal antenna

引言

众所周知,复杂金属载体如在车辆、舰艇或飞机上安装的通讯天线,其电磁特性会因为天线本身和载体之间的耦合而发生变化,受到影响的天线性能会变差甚至无法正常工作,或者在载体上的某些部位产生干扰电场,妨碍其它电子设备的正常工作。对于单个 Koch 分形天线和复杂金属载体上的直导线天线都已经有过较深入的研究,而对复杂金属载体上 Koch 分形天线的研究就作者所了解还不多。由于 Koch 分形天线具有自相似性,能实现多频工作特性,同时其空间填充特性又能减小天线尺寸,我们采用面电流模型和连接处基函数,通过理论建模、有效的网格自动剖分技术和程序实现,对一些金属载体上单极子天线和 Koch 分形天线的电磁特性进行了研究,具有一定的理论研究与工程实用价值。

1 基本理论

1.1 基于面电流模型的矩量法

电场积分方程(EFIE)可以适用于封闭或者开放的理想电导体(PEC),它可表示为

$$\hat{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}) = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_S \hat{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS', \mathbf{r} \in S \quad (1)$$

式中 $\hat{\mathbf{t}}$ 为理想导体表面的单位切向矢量。 $\mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为电并矢格林函数。

用我们熟知的 RWG 屋顶基函数、分段正弦基函数分别作为金属载体表面上和导线上电流的展开函数,而线面结点处用一种常用的非均匀电流分布的线面混合基函数,各种基函数的图示见图 1~3,表达式如下:

* 收稿日期:2005-06-24;定稿日期:2005-09-05

基金项目:南京航空航天大学青年基金资助项目(Y0413-041)

$$f_n^*(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n} \rho_n^+ & \mathbf{r} \text{ 在 } T_n^+ \text{ 内} \\ \frac{l_n}{2A_n} \rho_n^- & \mathbf{r} \text{ 在 } T_n^- \text{ 内} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_n^*(l) = l \begin{cases} \frac{\sin(l - l_{n-1})}{\sin k \Delta l} & l_{n-1} < l < l_n \\ \frac{\sin(k(l_{n+1} - l))}{\sin k \Delta l} & l_n < l < l_{n+1} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_n^{*,Sk}(\mathbf{r}) = \begin{cases} -\frac{[1 - (1 - \eta_n^k)^2] \rho_n^k}{\alpha_n^T + \rho_n^k l^2} & \mathbf{r} \in \text{线面结合处} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$f_n^*(\mathbf{r}) = f_n^{*,w}(l) + \sum_{k=1}^{Kn} f_n^{*,Sk}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

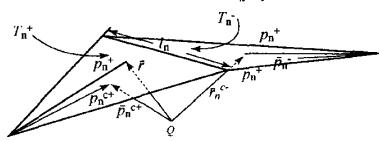


图1 RWG 基函数

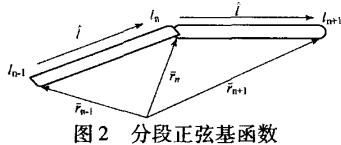


图2 分段正弦基函数

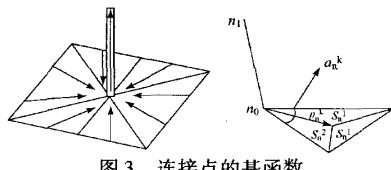


图3 连接点的基函数

采用细线模型,此时线天线的直径都非常细,在实际中常常遇到的情况是半径 $a \ll \lambda$ (因而可以使用忽略 φ 方向电流分量的细线模型)。从物理的角度讲,在细线和载体的连接处常常使用的是同轴馈电,同轴线的外导体和载体表面相连接,内导体与细线连接。然而我们知道同轴线内外导体上的电流相等,又由于连接处的电流应满足连续性条件,即载体表面上的电流流入该点的总电流应该全部分布到线天线的表面上。

基于 RWG 基函数与连接点的基函数的良好的性质(在每个小三角块的各个边上均不产生额外线、面电荷,且在结点处电流保持连续性),可以将阻抗矩阵写成下面的对称形式,即:

$$Z_{mn} = jw\mu \langle f_{i,m} \mathbf{I} g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot f_{j,n} \rangle + \frac{1}{jw\epsilon} \langle \nabla_i \cdot f_{i,m} \mathbf{I} g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \nabla_j \cdot f_{j,n} \rangle \quad (5)$$

上式中 $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为自由空间标量格林函数, \mathbf{I} 为单位并矢, t 表示面或线; i, j 表示面线或者面线结合处。由此我们采用 Galerkin 方法并遵循矩量法的求解步骤,将得到下列矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{ss} & \mathbf{Z}_{sw} & \mathbf{Z}_{sj} \\ \mathbf{Z}_{ws} & \mathbf{Z}_{ww} & \mathbf{Z}_{wj} \\ \mathbf{Z}_{js} & \mathbf{Z}_{jw} & \mathbf{Z}_{jj} \end{bmatrix} \mathbf{g} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_w \\ \mathbf{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_s \\ \mathbf{V}_w \\ \mathbf{V}_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,阻抗矩阵由 9 部分组成,分别表示面元、线元和结点元的自作用及相互作用。求解该方程即可获得面电流、线电流和线元之交叉点处电流的展开系数,进而计算出混合结构的近远场和阻抗特性。

1.2 Koch 分形天线

图 4 所示为零阶至 3 阶 Koch 分形天线特征图,Koch 分形单极天线是简单的多频天线,它通过改变线天线的几何结构,从而改变天线的电磁特性且有效地缩小了天线的尺寸。Koch 曲线是一种不规则曲线,它的分形阶数每增加一阶,每单位直线段中间的 $1/3$ 段分别绕着两个分段点旋转 60° 和 -60° 后连接形成高一阶的分形天线,总长度变为原来的 $4/3$ 倍,因为每一局部形状都与整体形状相似,当分形的阶数无限增大,使其外形的任意部分都变得粗糙。这样的几何特性使 Koch 分形单极线天线成为一个高效的辐射器。

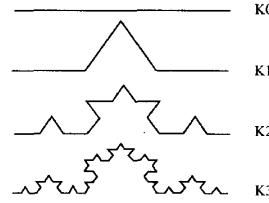


图4 Koch 分形天线

2 计算实例

以下实例的程序编制均在 Visual Fortran 6.6A 编译环境下进行。

2.1 金属平板上单极子天线

图 5(a) 为一边长为 0.914m 的金属平板,其中竖一根长度为 0.421m 的单极子天线(天线为底馈),其输入导纳频响曲线以及 300MHz 时的辐射方向图见图 5(b),(c)。

在 300MHz 时网格剖分数为 200 个三角块(均匀抛分),线上为 6 段,此单极子天线在金属平板的作用下方向图发生了明显的变化,平板上半空间辐射最强,由于平板的作用使方向图由苹果状变成了蝴蝶状。图 5(b) 中导纳特性的计算结果和文献中

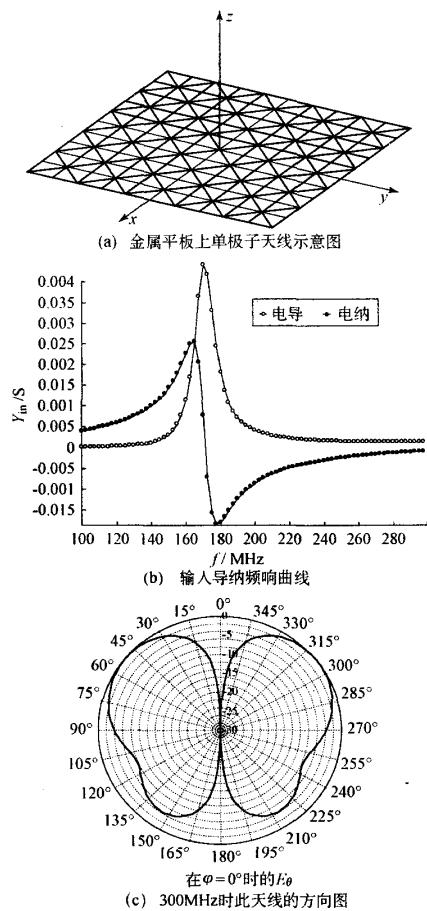


图5 金属平板上单极子天线的计算结果

的数据比对吻合非常好,验证了程序的正确性。

2.2 组合金属模型上的两根天线

图6(a)为某组合金属体模型上单极子天线示意图(天线为底馈,暂不考虑海平面的影响),该模型长1.20m,宽0.30m,高0.15m,上方一侧有一个长0.30m,宽0.30m,高0.20m的长方体。天线1,2长度均为0.20m,天线2与突出体相隔0.05m,在200MHz时的辐射方向图见图6(b),(c)。

2.3 舰船模型上的两根天线

图7(a)所示为一种舰船的简单模型,船体长为1.0波长,宽为0.2波长,高为0.1波长,船体上方建筑用长0.3波长,宽0.1波长,高0.1波长的长方体来模拟。设船头方向为y方向。船的前部和后部各有一个0.25波长的线天线。从图7可以看出由于船上建筑的遮挡作用使得方向图具有一定的方向性。这显示出金属体对电磁波的遮挡及反射作用。

2.4 金属平板上一根Koch分形天线

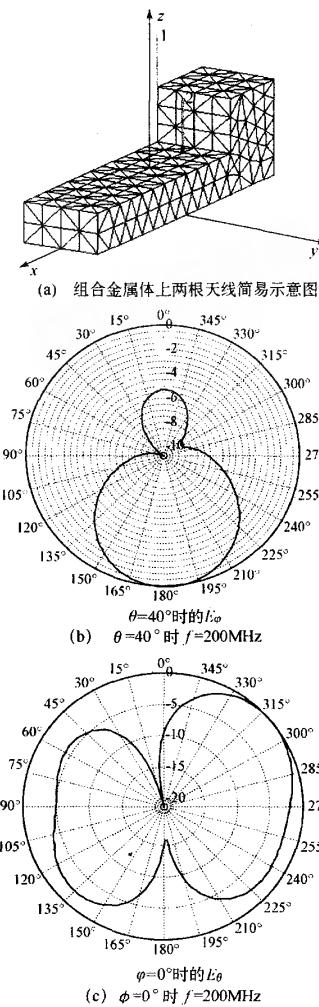


图6 组合金属体上单极子天线的计算结果

图8(a)为一边长为1m的金属平板,其中心竖一根长度为1m的Koch分形天线(天线为底馈),其S₁₁参数频响曲线、输入阻抗频响曲线以及300MHz时的辐射方向图见图8(b)、(c)、(d)。

对比图5与图8可以看出,同样高度的Koch分形天线比单极子天线具有更多的谐振频点,即验证了分形天线的多频特性,为进一步应用分形天线打下了基础。

2.5 金属方盒上一根Koch分形天线

图9是边长为1m的金属方盒子,其上竖一根高度为0.9m的Koch分形天线,它在300MHz与100MHz时的辐射方向图如图10(a)~(d)(底馈)。

金属方盒子表面共划分为192个三角块,Koch分形天线上每一小段分配一个基函数,共有48段,即48个线基函数。由于Koch天线本身的不对称性

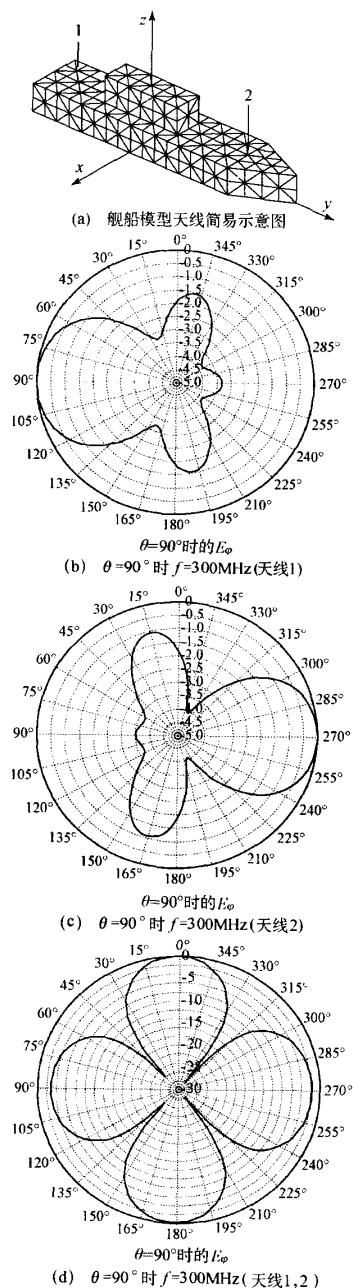


图7 舰船模型上单极子天线的计算结果

导致 x - z 平面方向图的不对称, 又由于金属方盒子的作用, 使下半部的辐射较弱, 但随频率变化较大, 可以推测此天线也具有多频特性。

3 结论

本文以金属载体上直导线天线电磁特性为基础研究了金属载体上 Koch 分形天线的电磁特性, 取得

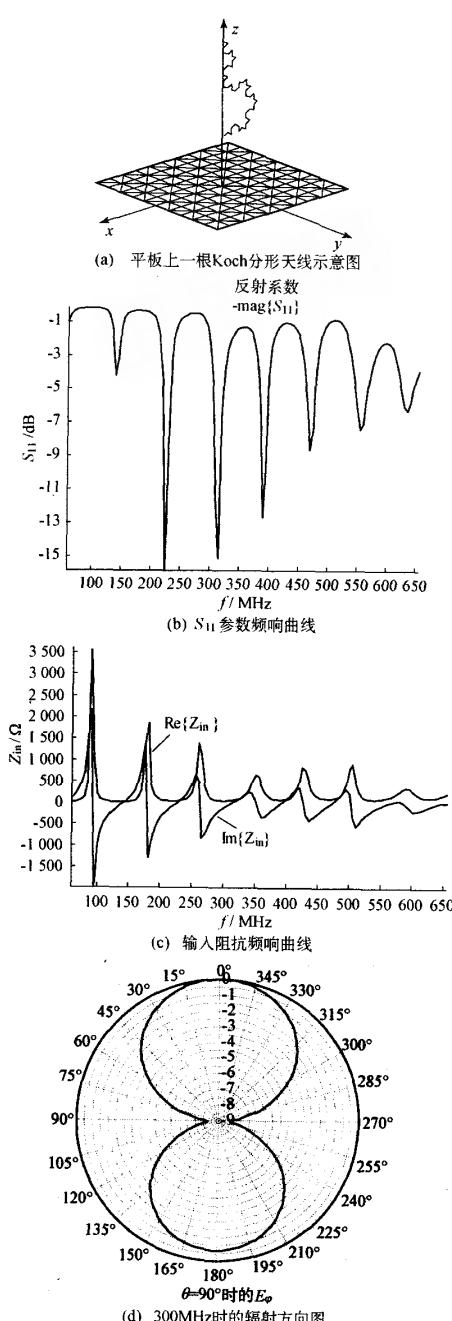


图8 金属方块上 Koch 分形天线的计算结果

了一些计算结果。由于计算机硬件条件限制, 只计算了一些电尺寸较小的形体, 对于电尺寸较大的形体可以采取非均匀网格划分的方法以减少未知元数目, 在电流变化剧烈的地方划分精细一些, 而在变化平缓的地方划分粗糙一些, 或者采用高阶曲面三角基来进一步减少未知元数目, 这在权衡计算精度和

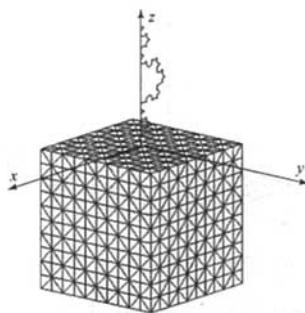


图9 金属方盒子上 Koch 分形天线示意图

计算时间上来说是一个不错的选择。但对于电尺寸超大的形体,比如飞机,舰船等一般都采用快速多极子(FMM)以及多层快速多极子技术(MLFMA)来加快计算速度和减小计算复杂度。

参 考 文 献

- [1] RAO S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic scattering by surface of arbitrary shape. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1982,30(3): 409 ~ 418
- [2] RAO S M, Wilton D R, Glisson A W. Potential integrals for uniform and linear source distributions on polygonal and polyhedral domains. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1984,32(3): 276 ~ 281
- [3] Fujimoto K, Henderson A. 小天线. 北京:兵器工业出版社,1992
- [4] Harrington R F. Field Computation by Moment Methods. New York: McMillan, 1968
- [5] 金建铭. 电磁场有限元方法. 王建国,译. 西安:西安电子科技大学出版社,1998
- [6] 李世智. 电磁辐射与散射中的矩量法. 北京:电子工业出版社,1985
- [7] Ibrahim Tekin, Newman E H. Method of moment solution for a wire attached to an arbitrary faceted surface. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1998,46(4):559
- [8] Bhattacharya, et al. The input impedance of a monopole antenna mounted on a cubical conducting box. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1987,35:756 ~ 762
- [9] Punete C, el al. The koch monopole: a small fractal antenna. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2000, 48(11): 1773 ~ 1781

李 苗 男,1979 年生,南京航空航天大学信息科学与技术学院电磁场与微波技术教研室讲师,东南大学毫米波国家重点实验室在职博士生,主要研究方向:计算电磁学及其快速算法、手征媒质、电磁兼容。

E-mail: zhuoli@emfield.org

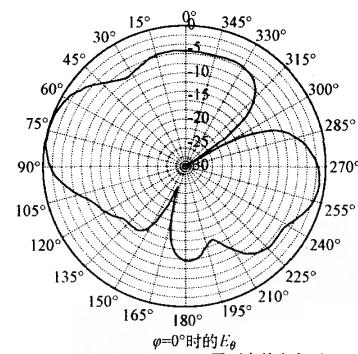
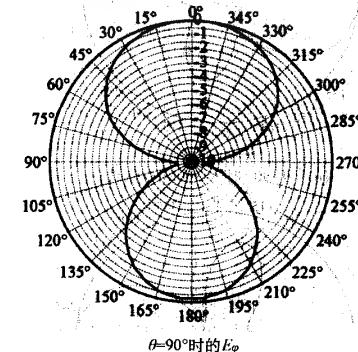
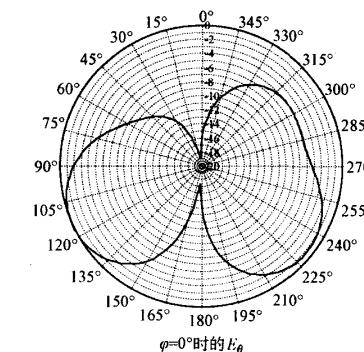
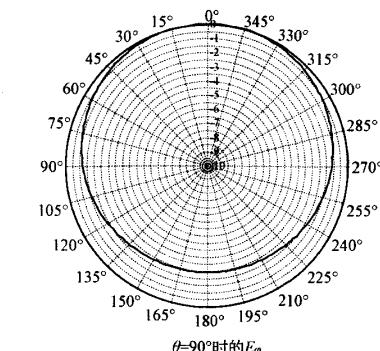
(a) $f=300\text{MHz}$ x - z 平面内的方向图(b) $f=300\text{MHz}$ x - y 平面内的方向图(c) $f=100\text{MHz}$ x - z 平面内的方向图(d) $f=100\text{MHz}$ x - y 平面内的方向图

图10 金属方盒上 Koch 分形天线的计算结果

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>