

文章编号 1005-0388(2007)02-0281-05

## 近地短波鱼骨天线矩量法建模及应用\*

张小林 高火涛

(武汉大学电子信息学院, xlzhang0606@163.com, 湖北 武汉 430079)

**摘 要** 结合等效电路理论和离散复镜像方法, 对架设在有耗地面上方的水平鱼骨天线进行矩量法建模, 计算了其短波段内的输入阻抗、方向图、效率和增益。在分析双鱼骨天线的基础上, 从抗极化衰落的角度提出并分析了一种正交鱼骨天线。仿真结果表明, 所用方法准确地考虑了有耗地面的影响以及各振子间的互相耦合, 具有很高的精度。

**关键词** 宽带天线, 鱼骨天线, 矩量法, 离散复镜像法

**中图分类号** TN82

**文献标识码** A

### Moment method modeling and application for shortwave fishbone antennas above ground

ZHANG Xiao-lin GAO Huo-tao

(School of Electronic Information, Wuhan University,  
xlzhang0606@163.com, Wuhan Hubei 430079, China)

**Abstract** Combined with the equivalent circuit theory and discrete complex image technology, the moment method is used to model the horizontal fishbone antennas over the lossy ground, and the computational results of input impedance, pattern, efficiency and gain of the fishbone antenna are carried out. From the view of reducing polarization mismatch, an orthogonal fishbone antenna is designed on the basis of analysis of double-fishbone antenna. The results show that the presented method has high accuracy because of taking accurately into account the influence of lossy ground and mutual coupling of dipoles.

**Key words** broadband antenna, fishbone antenna, moment method, discrete complex image method

## 1 引 言

短波通信以其自身的优点在商业、交通、工业、邮政等国民经济各个部门及军事领域中都有非常广泛的应用, 但是短波信道具有时变和色散特性, 研制高效宽带的天线以满足高速全频段跳频, 并保证良好的匹配是短波通信中必须解决的问题。常见的短波天线有偶极天线、笼形天线、菱形天线、鱼骨天线、对数周期天线等。鱼骨天线是一种宽波段行波天

线, 通常用作短波段的接收, 目前定型鱼骨天线大都工作在 3~24 MHz 的频段上。与菱形天线相比, 鱼骨天线水平面方向图的主瓣较宽, 副瓣小而且少, 因此接受干扰电平低, 作收信天线时, 比菱形天线优越。

关于鱼骨天线的数值分析, 在公开发表的文献中, 至今尚未见到。早期文献<sup>[1]</sup>将鱼骨天线看作天线阵, 在不考虑互耦的情况下对其做了近似分析, 精度有一定的限制。矩量法是一种精度较高的电磁场

数值方法,自提出以来在电磁散射和天线方面得到广泛应用,给出了十分满意的结果。本文结合等效电路理论<sup>[2][3]</sup>和矩量法对水平鱼骨天线进行建模,采用离散复镜像法<sup>[4~6]</sup>处理近场索莫菲(Sommerfeld)积分加进有耗地面对天线的影,计算得到了近地面鱼骨天线的方向图、输入阻抗、效率以及增益等电特性的数值结果。由于矩量法建模中精确考虑了有耗地面的影响以及天线各个部分之间的相互耦合,所得的结果与文献[1]相比,具有更高的精度,并且在分析双鱼骨天线的基础上,从减小极化失配损耗的角度分析了一种正交鱼骨天线,对鱼骨天线的工程应用提供了更多的理论依据。

## 2 鱼骨天线的符号表示

文献[1]中详细描述了鱼骨天线的结构特点,由于电气参数较多,通常根据耦合元件不同,将电阻、电容或电感耦合鱼骨天线分别用符号 YR、YC 或 YL 加一串数字表示,如  $YR \frac{N Z_0}{l} \frac{H}{d}$  表示电阻耦合鱼骨天线,其中,  $N$ 、 $l(m)$ 、 $Z_0(\Omega)$ 、 $d(m)$  和  $H(m)$  分别表示鱼骨天线的振子数目、振子单臂长、耦合电阻阻值,相邻两振子间距以及天线挂高,在单副鱼骨天线的符号前加 S 表示双鱼骨天线。

## 3 理论建模

### 3.1 电流积分方程

自由空间导线天线上的电流分布满足波克林顿(Pocklington)积分方程<sup>[7]</sup>,即

$$\int_L \left( \frac{\partial^2}{\partial l'^2} + k_0^2 \right) I(l') g_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dl' = -j\omega\epsilon_0 E_{\text{tan}}^i \quad (1)$$

式中  $g_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  为自由空间格林函数。(1)式是矩量法求解导线天线电流分布的出发点之一。当导线天线位于有耗地面附近时,对于水平极化的导线天线,(1)式应改写为<sup>[6]</sup>

$$\int_L I(y') \left\{ \left( \frac{\partial^2}{\partial y'^2} + k_0^2 \right) [g_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + S_h^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] + \frac{\partial^2}{\partial y'^2} S_h^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \right\} = -j\omega\epsilon_0 E_{\text{tan}}^i \quad (2)$$

$S_h^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  和  $S_h^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  均为 Sommerfeld 积分。在应用矩量法前必须解决 Sommerfeld 积分的问题,否则,积分方程很难求解。

(2)式中的 Sommerfeld 积分,场点、源点均在近地振子天线表面,属于近场,若采用直接积分法,应用于矩量法时计算量过大而不适用,因此采用计算量较小的离散复镜像法<sup>[4~6]</sup>求解,将 Sommerfeld

积分化为若干复位置镜像的贡献。以 SI 表示 Sommerfeld 积分,则由离散复镜像法可得<sup>[6]</sup>

$$SI = \sum_{i=1}^M a_i \frac{e^{-jk_0 R_i}}{R_i} \quad (3)$$

$$R_i = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z' - \frac{b_i}{k_0})^2}$$

式中,  $M$  为复镜像位置的个数,  $a_i$  和  $b_i$  均为复数,可以通过 Prony 逼近法<sup>[8]</sup>求得。

在天线的远场区,采用驻相法<sup>[9]</sup>求解 Sommerfeld 积分即得到鱼骨天线的方向图和增益等。

### 3.2 广义阻抗矩阵和电压向量

若暂不考虑振子与集合线间串联的耦合元件,则鱼骨天线每对振子上的电流分布均满足(2)式。在应用矩量法求解各振子上电流分布时,为简化计算过程并获得较快的收敛速度,采用分段正弦-伽略金法<sup>[10]</sup>。对每对振子进行相同的均匀分段,在计算广义阻抗矩阵时充分利用天线结构和分段的对称性,计算矩阵的第一行元素即可得到整个矩阵,从而较快的得到不考虑耦合元件情况下的广义阻抗矩阵  $Z'_M$ 。为了展宽鱼骨天线的工作频带,各对振子经耦合元件接至集合线上,不计耦合元件的大小,由于耦合元件位于分段节点,完整的广义阻抗矩阵只需在  $Z'_M$  对角线相对应的元素上加上耦合元件阻抗的影响即可<sup>[11][12]</sup>。

与一般导线天线阵不同的是,鱼骨天线各对振子由集合线进行馈电,因此,在进行矩量法建模时必须注意到集合线的处理。根据电路理论,鱼骨形天线可以看作天线阵网络和集合线网络两部分的并联<sup>[2][6]</sup>,分别把这两部分看作  $N$  端口无源网络,则有

$$I_A = Y_A U_A, I_l = Y_l U_l \quad (4)$$

其中  $U_A, I_A, Y_A$  和  $U_l, I_l, Y_l$  分别为天线阵网络和集合线网络的电压、电流向量以及  $N$  阶导纳矩阵。由于天线网络和集合线网络并联,因此,

$$U_A = U_l, I_A + I_l = I \quad (5)$$

$$I = [I_m, 0, \dots, 0] \quad (6)$$

式中,  $I_m$  为鱼骨天线的激励电流,可设为 1,由(4)、(5)两式可得

$$I_A = [Y_l Y_A^{-1} + U]^{-1} I \quad (7)$$

$U$  为  $N$  阶单位阵。设  $U_M, I_M$  分别为矩量法中的电压、电流向量,则

$$U_M = Z_M I_M \quad (8)$$

$I_M$  与  $I_A, U_M$  与  $U_A$  之间满足<sup>[6]</sup>

$$I_A = C I_M, U_M = S U_A, S = C^T \quad (9)$$

因此,

$$I_A = CZ_M^{-1}SU_A = Y_A U_A \tag{10}$$

$$Y_A = CZ_M^{-1}S \tag{11}$$

$$\begin{aligned} U_M &= SU_A = SY_A^{-1}I_A \\ &= S[Y_I + CZ_M^{-1}S]^{-1}I \end{aligned} \tag{12}$$

$Y_I$  由传输线理论可以求得<sup>[2][6]</sup>。由(12)式求得  $U_M$  后便可由矩量法计算鱼骨天线各对振子的电流分布,从而得到鱼骨天线的输入阻抗、方向图、效率、增益等。

对于双鱼骨天线,广义阻抗矩阵计算方法不变,只需将(6)式改为

$$I = [I_m, 0, \dots, 0, I_{N+1}, 0, \dots, 0] \tag{13}$$

$I_{N+1}$  为第二副鱼骨天线的输入电流,其他各式均不作改变。由双鱼骨天线的并联关系可得  $U_{A1} = U_{A(N+1)}$ ,若取  $I_m$  为 1,记(12)式中  $S[Y_I + CZ_M^{-1}S]^{-1} = Z$ ,则有

$$U_{A1} = Z_{1,1}I_m + Z_{1,N+1}I_{N+1} \tag{14}$$

$$U_{A(N+1)} = Z_{N+1,1}I_m + Z_{N+1,N+1}I_{N+1} \tag{15}$$

由(14)(15)式即可求得  $I_{N+1}$ 。

4 计算机仿真

为了验证算法的合理性,取地面电磁参数为  $\epsilon_r = 8, \mu_r = 1, \sigma = 0.005$ ,用矩量法计算了鱼骨天线在不同频率时的方向图,与文献[1]中的结果比较可知,在短波频段的低端,两者相差较小,随着频率的增大,两者的差别也逐渐增大,图 1 给出了的 24 MHz 和 12.5 MHz 时  $YR_{\frac{21\ 200}{8\ 4.5}}^{17}$  水平面和垂直面的方向图(文献[1]在 24 MHz 时只给出了方位角和仰角  $0 \sim 90^\circ$  范围内的方向图)。分析其中的差异,文献[1]虽在计算各对振子的输入导纳时考虑了空间耦合,但将所得的导纳平均后近似看作均匀分布在振子间的集合线上,从集合线分布参数改变的角度计算了电磁波沿集合线传播的相速度,得到了各对振子输入端电流幅度和相位的关系,再利用方向图乘积定理求得鱼骨天线的远场方向图。这在波长较长时可以看作较好的近似,但当波长变小时,振子间距  $d$  与波长的比增大,这种近似会带来很大的误差。而用矩量法结合等效电路理论,不存在类似的近似,而且准确地考虑了各对振子之间的相互耦合及有耗地面对振子表面电流分布的影响,不论在频率的高端还是低端都具有很高的精度。

图 2 示出了  $YR_{\frac{21\ 200}{8\ 4.5}}^{17}$  在不同频率时各对振子输入端的相对电流幅度分布,从图中可以看出,振万方数据

子输入端电流幅度的分布无明显规律,这一点与对数周期偶极天线不同,即没有与之类似的随频率转移的“辐射区<sup>[2]</sup>”存在。鱼骨天线的宽带特性主要是处于行波工作状态的集合线和各对振子上的耦合元件的作用。

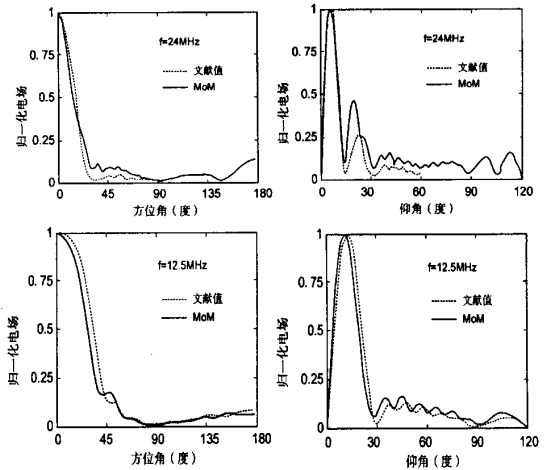


图 1 文献值与矩量法所得方向图的比较

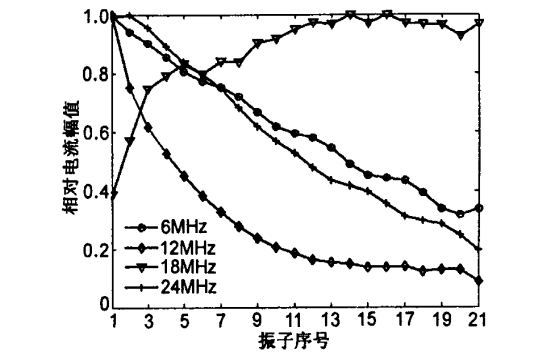


图 2 各对振子输入端电流相对幅值分布

图 3 和图 4 中的实线分别表示出了鱼骨天线  $YR_{\frac{21\ 200}{8\ 4.5}}^{17}$  的输入阻抗和方向图的频率特性。由图可知,输入电阻和电抗随频率波动较小,在很宽的频带内可与接收机良好的匹配并具有良好的方向图特性。随着频率的升高,其方向图的副瓣逐渐增大,若要使其工作在较高频率,必须减小振子的臂长。如图 4 中虚线所示,28 MHz 时鱼骨天线  $YR_{\frac{21\ 200}{6.5\ 4.5}}^{17}$  在水平面和垂直面方向图均只有较小的副瓣。但振子臂长的减小导致了鱼骨天线的增益有所下降,此时可采用并联的双鱼骨天线解决这一问题。如图 5 所示,实线,短划线和虚线分别表示  $YR_{\frac{21}{8}}$

$\frac{200}{4.5}17, YR \frac{21}{6.5} \frac{200}{4.5}17$  以及  $YR \frac{21}{6.5} \frac{200}{4.5}17$  的增益和效率。由图5还可以看出,由于耦合元件上的损耗,鱼骨天线的效率较低,一般适合于用作接收天线。

地面的导电性对鱼骨天线的电性能有一定影响,图6中给出了鱼骨天线  $YR \frac{21}{8} \frac{200}{4.5}17$  在两种地面介质参数时的方向图与理想导电地面情形的结果比较。由图可知,地面参数对方向图主瓣仰角影响不大,但随着地面导电性的降低,远场的电场幅度会

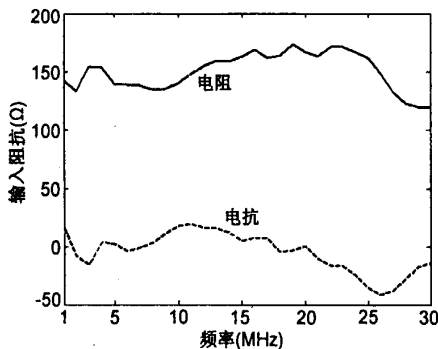


图3 输入阻抗随频率的变化关系

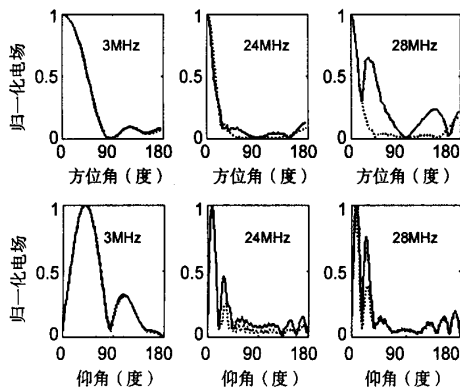


图4 不同频率的方向图

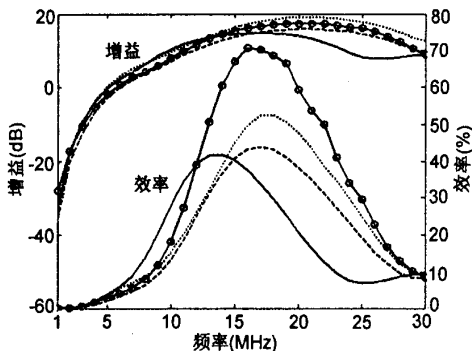


图5 增益和效率随频率的变化关系

万方数据

随之减小,导致天线的增益下降,因此,在架设时应在地面铺设地网以改善地面的导电性。

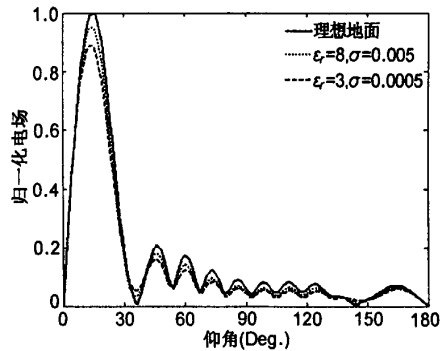


图6 不同地面上鱼骨天线的垂直面方向图

## 5 正交鱼骨天线

根据双鱼骨天线建模与分析,提出并分析了一种正交鱼骨天线,将两副鱼骨天线相差 $90^\circ$ 馈电,一副水平架设,另一副垂直架设,两副天线的集合线中心重合,与单副鱼骨天线相比,正交鱼骨天线没有增加天线的占地面积。计算由两副  $YR \frac{21}{6.5} \frac{200}{4.5}17$  组成的正交鱼骨天线,所得的增益和效率如图5中带圆圈的曲线所示,由于正交鱼骨天线可以接收两个垂直方向极化的电磁波,因此有较高的效率和增益,在抗极化衰落等工程中有一定的应用价值。图7给出了正交鱼骨天线在水平面和垂直面内的方向图,在28 MHz时方向图的副瓣仍较小,即说明了正交鱼骨天线也有很好的宽带特性。

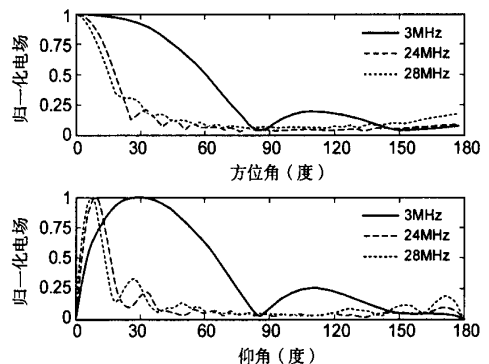


图7 正交鱼骨天线的方向图

## 6 结论

鱼骨天线是一种宽频段行波天线,在实际工程应用中,文献[1]中的方法在频率的低端能给出较好的近似,但随着频率的升高,误差逐渐增大,若要精

确分析鱼骨天线在整个短波段的性能参数,必须采用精确的数值方法进行建模。文中用矩量法结合等效电路理论和离散复镜像法对近地短波鱼骨天线作了详尽准确的数值计算,并简单分析了鱼骨天线振子长度,地面参数等对其性能的影响。由于准确考虑了振子间的互耦和地面对天线的影响,计算结果更加可靠。最后,在分析双鱼骨天线的基础上提出了一种正交鱼骨天线,可以用于减小接收过程中的极化衰落。文中的分析和结果对短波宽带鱼骨天线的分析和设计具有重要的指导意义。

### 参考文献

- [1] 顾爱金堡. 短波天线[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1965.
- [2] 谢处方, 邱文杰. 天线原理与设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [3] 周建华, 殷建平, 张光生. 宽带对数周期天线的优化设计[J]. 电波科学学报, 2000, 15(2): 157-161.  
Zhou J H, Yin J P, Zhang G S. Optimization of wide band LPOA[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(2): 157-161.
- [4] 李太全, 田茂, 徐继生. 复镜像法分析探地雷达天线阻抗特性[J]. 电波科学学报, 2003, 18(4): 423-427.  
Li T Q, Tian M, Xu J S. Analysis on the input impedance of Ground penetrating radar antennas using complex image method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(4): 423-427.
- [5] Shubair R M, Chow Y L. A simple and accurate complex image interpretation of vertical antennas in contiguous dielectric half-spaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(6): 806-812.
- [6] 丁晓磊. 对数周期偶极天线扇形阵的特性分析及其软件实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2002.
- [7] B D 波波维奇著, 杨渊译. 导线天线的分析与综合[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1987.
- [8] 王建, 兰康, 彭仲秋. 有耗半空间天线问题中的广义索末菲积分[J]. 电子学报, 1995, 23(3): 104-107.
- [9] Chew A W 著, 聂在平, 柳清伙译. 非均匀介质中的场与波[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
- [10] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985.
- [11] 牛俊伟. 电抗加载定向天线阵的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [12] 延晓荣, 金元松, 罗翠梅. 阻容加载偶极天线的宽带性能及效率分析[J]. 电波科学学报, 2000, 15(2): 169-173.  
Yan X R, Jin Y S, Luo C M. Analysis of wide-band properties and efficiency for dipole antennas with resistive and capacitive loadings[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(2): 169-173.

**张小林** (1981—), 男, 湖北人, 武汉大学电子信息学院博士生, 目前主要研究方向为电磁场数值计算、电磁散射以及天线分析与设计等。



**高火涛** (1963—), 男, 湖北人, 武汉大学电子信息学院副教授、博士, 中国电子学会高级会员, 获国家教育部科技进步一等奖两项, 获发明专利三项, 发表论文多篇。目前研究方向为天线理论与工程设计、电磁波辐射、传播和散射、空间自适应阵列信号处理等。

E-mail: gaoght863@163.com

## 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>