

文章编号 1005-0388(2008)02-0262-05

## FDTD-TDEEC 混合法计算抛物面 天线远区辐射场\*

朱湘琴<sup>1☆</sup> 王建国<sup>1,2</sup> 朱金辉<sup>1</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要** 应用时域有限差分-时域等效边缘电流(FDTD-TDEEC)混合法计算脉冲辐照情况下大口径抛物面天线的远区辐射场, 先使用 FDTD 方法计算抛物面天线馈源的近场, 再根据基尔霍夫面积分表达式(KSIR), 求出表面上任意点的场对抛物面天线口径边缘上场的贡献, 并将此贡献看作是入射脉冲, 使用 TD-EEC 方法计算抛物面天线的远区辐射场。给出馈源为偶极子的算例, 所得计算结果与 EEC 方法的结果符合较好。数值计算表明, 抛物面口径边缘的绕射对抛物面方向图的副瓣有一定影响。该方法具有通用性, 可有效分析其它类型馈源的各种电大尺寸的单反射面天线的远区辐射场, 包括馈源偏焦的情况。

**关键词** KSIR; TD-EEC 方法; 抛物面反射天线; FDTD 方法; 远区辐射场

**中图分类号** TN011

**文献标志码** A

### Computation of far-fields of paraboloidal reflector antenna using FDTD-TDEEC method

ZHU Xiang-qin<sup>1</sup> WANG Jian-guo<sup>1,2</sup> ZHU Jin-hui<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an  
Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

**Abstract** A new hybrid method combining finite-difference time-domain (FDTD) method with time-domain equivalent edge current (TD-EEC) method is applied for the computation of the far-fields of the electrically large paraboloidal reflector antenna. Near-fields radiated from the antenna feed are firstly calculated by FDTD method. Then, the electromagnetic fields at any point on the edge of reflector's aperture are calculated according to the Kirchhoff's surface integral representation (KSIR). These fields are regarded as the input pulses and used in TD-EEC method to compute the far-fields of reflector antenna. The far-fields of a paraboloidal reflector antenna illuminated by a dipole source at the focus are calculated by using this scheme. The computing results are in good agreement with that obtained by using the EEC method. In addition, numerical results show that the electromagnetic wave diffraction from the edge of the reflector's aperture has great influence on the minor-lobes of radiation pattern of paraboloid illuminated by dipole. The proposed technique has the advantages of high accuracy and efficiency. This algorithm is also

suitable for computing the far-fields of various large reflector antennas with various feeds, including offset feed antenna.

**Key words** KSIR; TD-EEC method; paraboloidal reflector antenna; FDTD method; far-field

## 1 引言

抛物面天线在微波波段的雷达、通信、制导与射电天文等领域已经得到了广泛的应用。关于抛物面天线远区辐射场的计算已经有口径场方法<sup>[1]</sup>、FDTD-PO 混合法<sup>[2]</sup>、几何绕射理论<sup>[3,4]</sup>、EEC 方法<sup>[5]</sup>等。其中,口径场方法和 FDTD-PO 方法都基于几何光学近似,计算结果仅在抛物面方向图的主瓣和近轴副瓣区域比较精确,而在远轴副瓣和后瓣区域内误差相当大<sup>[3]</sup>。有许多场合需要精确计算抛物面天线方向图的远轴副瓣和后瓣区域,此时可考虑几何绕射理论近似。但几何绕射理论在抛物面天线的轴向存在焦散区,使得计算结果在抛物面方向图的轴向及其邻近区域失效<sup>[3]</sup>。时域等效边缘电流(TD-EEC)方法<sup>[6]</sup>是在 EEC 方法的基础上发展起来的,它改善了时域物理光学(TD-PO)方法<sup>[7]</sup>的精度,考虑了边缘绕射的贡献,避免了时域几何绕射理论(TD-GTD)<sup>[8]</sup>的轴向焦散和求解时域绕射场时的卷积运算。但到目前为止,还没有文献将 FDTD 方法与 TD-EEC 方法相结合来计算任意馈源的抛物面天线的远区辐射场。

借助基尔霍夫表面积分表达式(KSIR)<sup>[9]</sup>将 FDTD 方法与 TD-EEC 方法相结合,计算了馈源为偶极子的抛物面天线方向图的远轴副瓣及后瓣区的远区辐射场及其瞬态响应。由于考虑了抛物面口径边缘的绕射作用,故使用该方法计算得到的结果在此区域比较精确。此外,对其它类型的单反射面天线和馈源(如波导口型照射器馈源等)以及馈源偏焦等情况,该方法仍然适用。

## 2 计算模型

如图1所示,讨论的模型为旋转抛物面反射天

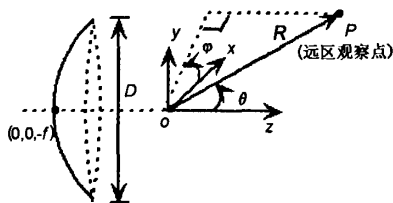


图1 抛物面坐标示意图

线。图中  $D$  和  $f$  分别为抛物面的口径及焦距,  $P$  点为抛物面天线远区辐射场的观察点,  $(\theta, \varphi)$  为该观察点的方位角。考虑到该抛物面天线的对称性,计算天线远区场时,  $\theta$  取  $0^\circ$  到  $180^\circ$  即可。

## 3 计算方法

### 3.1 计算 KS 面上某点的场对抛物面口径边缘上某点的场的贡献

在抛物面天线馈源的 FDTD 计算区域内,选择一封闭面  $s''$  作为基尔霍夫表面(KS),如图2所示。注意:计算抛物面馈源的近场时,假设抛物面天线是不存在的,即馈源置于自由空间中; $s''$  面必须是封闭的,它应包含所有的馈源,且应尽可能小;一般选择  $s''$  面为长(立)方体的表面,其与 FDTD 吸收边界的间隔  $d \geq 3\delta/2$ 。根据 KSIR 可知,抛物面口径边缘上的场可用包围馈源的封闭面  $s''$  面上各次级波源产生的场的迭加来计算,即此时  $s''$  面上每个点的场都相当于一个次波源,它们对抛物面口径边缘上各点的场都有贡献。故借助 KSIR 可得到计算  $s''$  面上某点  $A$  的磁场对抛物面天线口径边缘上某点  $Q$  在  $t'$  时刻磁场的贡献

$$h_{mc}(R', t') = \frac{1}{4\pi} \left\{ \langle \hat{n}'' \cdot u \rangle \left[ \frac{h(R'', \tau)}{|R' - R''|^2} + \frac{1}{c} \frac{\partial h(R'', \tau)}{\partial \tau} \right] - \frac{\langle \hat{n}'' \cdot \nabla'' \rangle}{|R' - R''|} h(R'', \tau) \right\}_{\tau = t - \frac{|R' - R''|}{c}} ds'' \quad (1)$$

式中,  $R'$  为抛物面天线口径边缘上某点  $Q$  的位置矢量(如图2所示);  $R''$  为  $s''$  面上任意一点  $A$  的位置矢量;  $\hat{n}''$  为  $s''$  面上  $A$  点的法向单位矢量;  $u = \frac{R' - R''}{|R' - R''|}$ ;  $h(R'', \tau)$  为  $\tau$  时刻  $A$  点的磁场,其值由 FDTD 方法计算得到。对(1)式进行差分分离<sup>[10,11]</sup>,可求出  $h_{mc}$  的值。离散时设 FDTD 计算区域中网格尺寸为  $\delta_i$ , 时间步长为  $\Delta t_i$ ; 考虑到  $\tau$  可能落在两个独立的时间点之间,故使用线性插值技术,并设  $\tau = \left[ \left( n + \frac{1}{2} \right) + p \right] \Delta t$  ( $n$  为整数,  $p$  为小数,  $|p| < 1$ )。

类似可求出(封闭的) $s''$ 面中六个平面上各个点的电场对抛物面口径边缘上Q点的电场的贡献 $e_{inc}$ 。

### 3.2 抛物面天线远区辐射场的计算

TD-EEC 绕射场的表达式可写为<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned} e_d^{TDEEC}(r, t) = & \frac{1}{4\pi r} s \times [s \times \oint_c [D_e^i e_{inc}(r', \tau) \cdot l + \\ & Z_0 D_h^i h_{inc}(r', \tau) \cdot l] dl'] + \\ & \frac{1}{4\pi r} s \times \oint_c Z_0 D_h^M(h_{inc}(r', \tau) \cdot l) dl' \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $e_{inc}(R', \tau)$  和  $h_{inc}(R', \tau)$  分别为 KS 上某点的电场和磁场  $\tau$  对时刻抛物面口径边缘上某点的电场和磁场的贡献, 可根据 3.1 节求出;  $\tau = t - (R/c) + (R' \cdot s/c)$  为延迟时间;  $Z_0$  为自由空间中的波阻抗;  $R$  为远区观察点到原点的距离(如图 2 所示);  $s$  为从源点到观察点位置的单位矢量,  $s = \frac{R - R'}{|R - R'|}$ ;  $l$  为抛物面口径边缘的单位切向矢量, 沿着边缘的长度单元  $dl'$  可表示为  $dl' = l dl'$ ;  $R'$  为抛物面口径边缘的位置矢量;  $D_e^i, D_h^i, D_h^M$  为角绕射系数, 仅与边缘上各点的四个角  $\beta', \phi', \beta, \phi$  (如图 3 所示) 有关, 其中  $\beta'$  为抛物面口径边缘切线正方向  $\hat{l}$  与入射波正方向  $\hat{s}'$  之间的夹角,  $\beta$  为抛物面口径边缘切线正方向  $\hat{l}$  与散射波正方向  $\hat{s}$  之间的夹角;  $\phi'$  为从抛物面的照明面与法平面的交线  $\hat{c}$  指向入射射线在法平面上的投影角(不穿过抛物面),  $\phi$  为从抛物面的照明面与法平面的交线  $\hat{c}$  指向散射射线在法平面上的投影角(不穿过抛物面)。根据图 3, 这四个绕射角可表示为

$$\beta' = \cos^{-1}(\hat{l} \cdot \hat{s}') \quad (3)$$

$$\beta = \cos^{-1}(\hat{l} \cdot \hat{s}) \quad (4)$$

$$\phi' = \cos^{-1}\left(\frac{(\hat{n} \times \hat{l}) \cdot (-\hat{s}')}{\sin \beta'}\right) \quad (5)$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{(\hat{n} \times \hat{l}) \cdot \hat{s}}{\sin \beta}\right) \quad (6)$$

求解这四个绕射角度时需注意: 由于 KS 上的各个点为次波源, 故将图 2 中  $s''$  面上任意 A 点到抛物面上任意 Q 点位置的单位矢量作为  $s'$ ; 同时, 将  $s''$  面上任意 A 点的场对抛物面上任意 Q 点场的贡献作为入射脉冲  $e_{inc}, h_{inc}$ ;  $\hat{n}$  为抛物面的单位法向矢量, 位于抛物面的口径边缘。角绕射系数有多种不同的表达式, 其中一种易于理解的形式是将与等效边缘电磁流相关的角绕射系数区分为两部分: 物理光学(PO)部分和非一致性(边缘)部分, 即

$$\begin{aligned} D_e^i &= D_e^{i, PO} + D_e^{i, f} \\ D_h^i &= D_h^{i, PO} + D_h^{i, f} \\ D_h^M &= D_h^{M, PO} + D_h^{M, f} \end{aligned} \quad (7)$$

绕射系数的 PO 部分和边缘部分均采用文献[6]中的表达形式。根据(2)式, 并采用投盒子的外推方法<sup>[12]</sup>, 即可求出抛物面的远区辐射场。实际计算中, 为节约内存, 通常先在 FDTD 程序循环中先计算出(2)式中各积分项的累加值, 然后再代入(2)式计算。

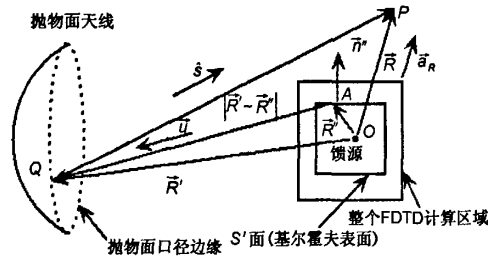


图 2 抛物面天线远区辐射场计算示意图

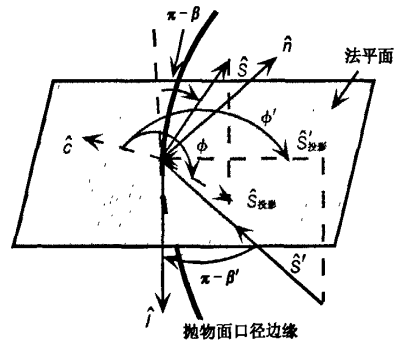


图 3 抛物面口径边缘的绕射角示意图

## 4 数值计算与讨论

【算例 1】设抛物面的口径  $D = 10\lambda$ ,  $\lambda = c/f_0$ , 所关心的频率  $f_0 = 3.95\text{GHz}$ 。并设  $f/D = 0.25$ ,  $f$  为抛物面的焦距。抛物面天线的馈源为置于抛物面焦点处的偶极子。在 3.1 节所述的 FDTD 计算区域中, 网格尺寸  $\delta_1 = \lambda/30$ , 时间步长  $\Delta t_1 = \delta_1/2c$ ; FDTD 计算区域的大小为  $24\delta_1 \times 24\delta_1 \times 24\delta_1$ ; 选择 KS 边界为  $-8.7, -8.7, -8.7$ 。图 4 给出了利用 FDTD-TDEEC 混合法及离散傅立叶变换(DFFT)计算得到的抛物面天线 H 面( $\varphi = 90^\circ$ )方向图的远轴副瓣和后瓣区域。作为比较, 图中还给出了 EEC 方法的计算结果及物理光学(PO)方法计算得到的结果<sup>[6]</sup>。由图 4 可知, 在方向图的远副瓣及后瓣方位, FDTD-TDEEC 混合法计算得到的结果与 EEC

方法的结果符合较好,而 PO 方法与 EEC 方法计算得到的结果相差较大。这主要是因为 PO 方法没有考虑抛物面边缘的绕射作用,导致其计算结果在抛物面远副瓣方向及后瓣区域不准确。

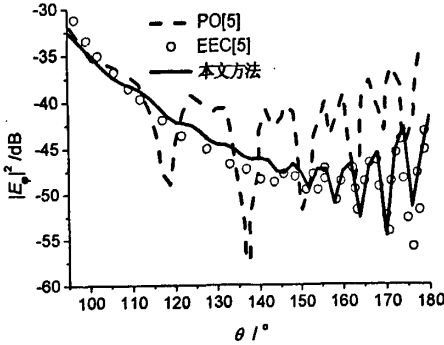
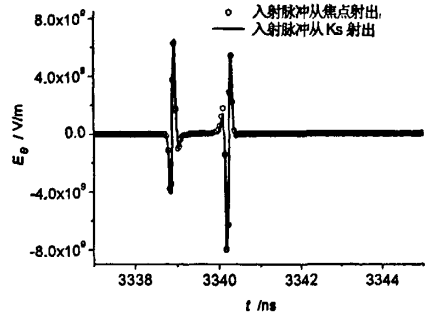
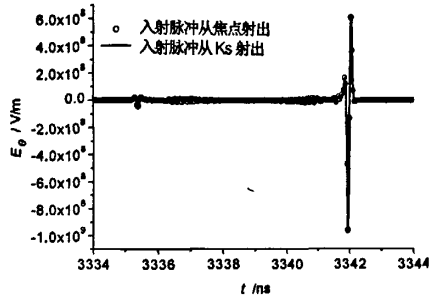


图 4 抛物面 H 面方向图的远轴副瓣及后瓣区

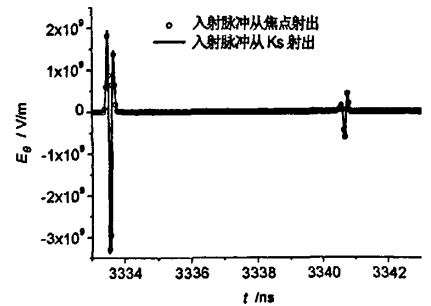
【算例 2】设抛物面的口径  $D=30\lambda$ ,  $\lambda=c/f_0$ ,  $f_0$  取值同上。并设  $f/D=0.4$ ,  $f$  为抛物面的焦距。抛物面天线的馈源为置于抛物面焦点处的偶极子。在 3.1 节所述的 FDTD 计算区域中,网格尺寸、时间步长同上;选择 KS 边界的范围同上。根据 FDTD-TDEEC 混合法(即假设入射脉冲从 KS 面上射出)计算得到的抛物面天线在 E 面( $\varphi=0^\circ$ )内  $r=1000\text{m}$   $\approx 14.6 \cdot (\frac{D^2}{\lambda})$  处的远区辐射电场如图 5 所示。由于本例中馈源为置于焦点处的偶极子,故又可假设入射脉冲是从焦点处射出的,即  $\hat{s}'$  为由焦点指向抛物面口径边缘上的各点。此时,可直接先用 KSIR 计算抛物面口径边缘上的电磁场,再使用 TD-EEC 方法(即(2)式)计算抛物面的远区辐射场。理论上,两种方法计算的结果应相同。作为比较,图中还给出了上述方法(即假设入射脉冲由焦点射出)的计算结果。由图可知,两种方法的结果符合很好,由此可见 FDTD-TDEEC 混合法的可靠性。需要指出的是,对于实际应用中常见的馈源不为点源(如波导缝隙馈源等)或偏焦情况,只能假设入射脉冲从 KS 面上射出。此外,从图 5 可以看出,图中的两个波峰分别由口径边缘上的两个点(指的是连接焦点 F、边缘绕射点 Q 和远区接收点 P 的折线中,使光程为最小值、最大值的两个绕射点  $Q_1$ 、 $Q_2$ )<sup>[3]</sup> 的绕射场引起的;当接收点与这两个点的距离的差比较小时,这两个脉冲出现的时间间距也较小,反之变大;若某个脉冲的幅值趋于零,说明产生该脉冲的绕射点的绕射线接近被遮挡。



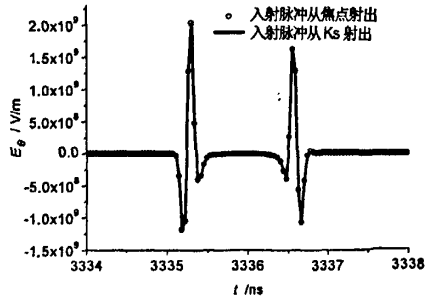
(a)  $\theta=10^\circ$



(b)  $\theta=60^\circ$



(c)  $\theta=110^\circ$



(d)  $\theta=170^\circ$

图 5 抛物面天线远区辐射场  $E_\theta$  的瞬态响应(E 面内)

## 5 结论

使用 FDTD-TDEEC 混合法计算了大型旋转抛物面天线的远区辐射场。先用 FDTD 方法计算

馈源附近的场,再借助 KSIR 计算出 KS 上的电、磁场对抛物面口径边缘的电、磁场的贡献,并结合 TD-EEC 方法求出抛物面的远区辐射场。该方法没有考虑抛物面对馈源的反馈作用,但考虑了抛物面边缘的一次绕射作用,故计算抛物面方向图的副瓣和远副瓣区比较准确。对于其它类型的面天线(如双曲面反射天线、球形反射面天线等),其它类型的馈源(如波导口型照射器等)以及馈源偏焦的情况,该方法仍然适用。

### 参考文献

- [1] 田 瞰. 偏焦抛物反射面天线辐射特性研究[D]. 西北工业大学硕士论文, 2005.
- [2] 尹家贤, 刘克成, 刘国培等. 用 FDTD 和物理光学混合法分析毫米波抛物面天线[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 791-793.
- [3] 卢万铮. 天线理论与技术[M]. 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [4] M S Narasimhan, S Christopher. A new method of analysis of the near and far fields of paraboloidal reflectors [J]. IEEE Trans. AP, 1984, AP-32(1): 13-19.
- [5] Graeme L James and Vassilios K. Reflector antenna radiation pattern analysis by equivalent edge currents [J]. IEEE Trans. AP, 1973, AP-21(1): 19-24.
- [6] A Altintas, P Russer. Time-domain equivalent edge currents for transient scattering [J]. IEEE Trans. AP, 2001, 49(4): 602-606.
- [7] E Sun, W V Rusch. Time-domain physical-optics [J]. IEEE Trans. AP, 1994, AP-42(1): 9-15.
- [8] T Veruttipong. Time-domain version of the uniform GTD [J]. IEEE Trans. AP, 1990, 38(11): 1757-1764.
- [9] Omar M Ramahi. Near-and far-field calculations in FDTD simulations using Kirchhoff surface integral representation [J]. IEEE Trans. AP, 1997, 45(5): 753-759.
- [10] 张光甫, 刘培国, 谭怀英等. 基于基尔霍夫积分的近远场变换的改进[J]. 电波科学学报, 2000, 15(3): 339-342.  
Zhang G F, Liu P G, Tan H Y, et al.. Improved near-to far-field transformation based on Kirchhoff integral in FDTD simulation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(3): 339-342.
- [11] J De Moerlosse, D De zutter. Surface integral representation radiation boundary condition for the FDTD method [J]. IEEE Trans. AP, 1993, 41(7): 890-896.
- [12] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 4.



朱湘琴 (1978—), 女, 江苏人, 博士, 助理研究员, 主要从事计算电磁学、电磁波与光散射、天线与电磁散射研究。

王建国 (1965—), 男, 江苏人, 博士, 研究员, 博导, 主要从事瞬态电磁场理论和高功率微波技术的研究。



朱金辉 (1978—), 男, 湖南人, 博士生, 主要从事辐射防护和粒子输运模拟及瞬态电磁场的研究。

## 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>