

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2010.05.018

## 改进的 NURBS-PO 法分析电大平台附近天线方向图

黄 锴, 贺之莉, 梁昌洪

(西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 传统的基于非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面建模的物理光学(PO)方法计算天线受扰方向图时,用球面波代替真实天线的散射场,要求天线必须远离散射体.针对该问题提出了一种改进的 NURBS-PO 方法,用精确的天线辐射场作为入射场,不存在天线必须放置在远区的局限.此外,采用改进的 Ludwig 积分计算物理光学电流的曲面积分,避免了传统方法中驻相法(SPM)计算积分的理论复杂性以及通过优化方法搜索驻相点的不可靠性.数值结果与高阶矩量法的计算结果吻合良好,证明了该方法的可行性,也显示了该方法在求解高频问题时计算速度上的优势.

**关键词:** 非均匀有理 B 样条;物理光学;Ludwig 积分;方向图

**中图分类号:** TN001 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2010)05-0879-05

## Improved NURBS-PO method for analyzing the disturbed pattern of an antenna around an electrically large platform

HUANG Kai, HE Zhi-li, LIANG Chang-hong

(Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** An improved Physics Optics(PO) method based on Non Uniform Rational B Spline(NURBS) modeling is presented to calculate the disturbed pattern of an antenna around an electrically large platform. Compared with the conventional NURBS-PO method in which the true scattered field of an antenna is replaced by the spherical wave, the new technique uses the accurate radiation field as the incident field and overcomes the limitation that the antenna must be located far away from the scatterer. The improved Ludwig integral method is applied to compute the integration of the induced current over the surface, which avoids the complicated theory and the possible invalidation in searching stationary points within the stationary phase method(SPM) method. Numerical results obtained from the proposed approach are in good agreement with those obtained from the method of moments (MOM), which confirms the feasibility of the new technique. Meanwhile, the advantage in calculation speed for solving high frequency problems is demonstrated.

**Key Words:** NURBS; physics optics; Ludwig integral; pattern

非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面建模技术具有建模精度高、面片数量少的优点.1992 年西班牙学者 J. Perez 首次将该建模技术引入高频电磁计算领域<sup>[1]</sup>.此后,基于 NURBS 曲面建模的电磁计算方法得到广泛的研究<sup>[2-5]</sup>.然而研究主要集中在 NURBS 散射体 RCS 的计算.2001 年,Olga 提出采用基于 NURBS 建模技术的物理光学方法(PO)分析电大平台下的天线受扰方向图<sup>[6]</sup>,采用球面波近似替代真实天线,因此要求天线必须距离散射体足够远.该文中计算感应电流积分时使用的是驻相法(SPM),由于 SPM 理论复杂且需要通过优化的方法来搜索驻相点,实现起来较为不易.基于上述原因,笔者提出基于改进的 Ludwig 积分<sup>[7]</sup>的 NURBS-PO 方法来计算 NURBS 电大散射体附近天线的受扰方向图.

收稿日期:2009-10-24

基金项目:“十一五”预研资助项目(51307020204);国家自然科学基金资助项目(06091030)

作者简介:黄 锴(1984-),男,西安电子科技大学博士研究生,E-mail: huangkai841025@126.com.

## 1 NURBS-PO 基本理论

NURBS 曲面虽然在建模方面具有优势,但是由于它采用的是递推形式的基函数,在应用到电磁计算时存在很大的困难.因此采用 NURBS 曲线曲面进行电磁计算时需要将其转化为 Bezier 曲面. Bezier 曲面的基本表达式为

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} P_{ij} B_i^n(u) B_j^m(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} B_i^n(u) B_j^m(v)}, \quad (u, v) \in [0, 1]^2, \quad (1)$$

其中,  $P_{ij}$  表示曲面的控制点,  $w_{ij}$  为对应于每个控制点的权值.

与文献[8]中用平面波作为入射场不同,文中方法最关键的理论即为求解电偶极子为源的情况下的物理光学散射场,如图 1 所示.用精确的偶极子磁场作为入射磁场,这就使得文中方法不存在天线必须放置在远区的局限.

电偶极子为源发射的磁场可以由下式精确计算:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}_i) = \frac{-d(1 + jkR_d)(\mathbf{R}_d \times \hat{\mathbf{g}})}{4\pi R_d^3} \exp(-jkR_d), \quad (2)$$

为方便计算,这里只考虑单位幅度的偶极子天线,式中  $k = 2\pi f/c$ ,  $f$  为天线的工作频率,  $c$  为光速,  $d$  为偶极子的长度,  $\hat{\mathbf{g}}$  为偶极子单位方向矢量.  $\mathbf{r}_d$  是偶极子中心的位置,  $\mathbf{r}_i$  为场点,具体就是 Bezier 曲面上的点,  $\mathbf{R}_d = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_d$ .  $R_d = |\mathbf{R}_d|$  为偶极子到曲面的距离.由物理光学区域的人射磁场得到物理光学区域表面的感应电流,即

$$\mathbf{J}^{PO}(\mathbf{r}) = \begin{cases} 2\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) & \text{亮区,} \\ 0 & \text{暗区.} \end{cases} \quad (3)$$

由感应电流就可以求得物理光学散射场

$$\mathbf{E}^{PO} = \frac{1}{j\omega\epsilon 4\pi} \int_{s'} \left[ \frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} \mathbf{R}_{fs} \times (\mathbf{R}_{fs} \times \mathbf{J}^{PO}) + \frac{-1 - jkR_{fs}}{R_{fs}^3} (-2\mathbf{J}^{PO}) \right] \exp(-jkR_{fs}) ds', \quad (4)$$

式中的积分区域为散射体亮区.对于采用曲面建模的散射体,积分单元就是单个的 Bezier 曲面.此时面积单元是

$$ds' = |\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v| du dv, \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{r}_u = \partial \mathbf{r}_i / \partial u$ ,  $\mathbf{r}_v = \partial \mathbf{r}_i / \partial v$ . 将式(2), (3)代入式(4), 由于 Bezier 曲面上  $u, v$  取值都在  $[0, 1]$  区间内, 那么散射场的最终表达式为

$$\mathbf{E}^{PO} = \frac{-d}{16j\omega\epsilon\pi^2} \int_0^1 \int_0^1 \mathbf{g}(u, v) \exp(jkf(u, v)) du dv. \quad (6)$$

其中

$$f(u, v) = -(R_d + R_{fs}), \quad (7)$$

$$\mathbf{g}(u, v) = \left\{ \frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} \mathbf{R}_{fs} (2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{R}_{fs} (\mathbf{R}_d \times \hat{\mathbf{g}})) + \frac{4(1 + jkR_{fs})}{R_{fs}^3} (\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{R}_d \times \hat{\mathbf{g}})) \right\} \frac{(1 + jkR_d)}{R_d^3} |\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v|. \quad (8)$$

这样问题的核心就变成了求解一个形如

$$I = \int_0^1 \int_0^1 g(x, y) \exp(jkf(x, y)) dx dy \quad (9)$$

的曲面积分.文献[8]中利用 SPM 来计算曲面积分.由于 SPM 方法不仅理论复杂而且需要通过优化算法来搜索驻相点,而且很容易出现搜不到驻相点的情况,这里利用改进的 Ludwig 积分方法来求解该积分.

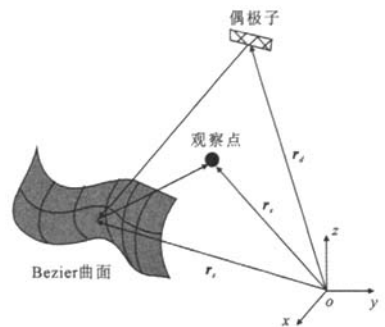


图 1 电偶极子为源的情况下  
的物理光学散射场

## 2 Ludwig 积分的应用

Ludwig 积分<sup>[8]</sup>是一种工程上非常实用的数值积分方法.应用 Ludwig 积分方法计算式(9)时,首先将被积函数的幅度项  $g$  和相位项  $f$  在积分区域的 4 个角点用泰勒级数展开,对级数展开取到一阶.相位函数的 4 个展开式为

$$f(x, y) \approx f(0, 0) + f_x(0, 0)x + f_y(0, 0)y, \quad (10)$$

$$f(x, y) \approx f(1, 1) + f_x(1, 1)(x - 1) + f_y(1, 1)(y - 1), \quad (11)$$

$$f(x, y) \approx f(0, 1) + f_x(0, 1)x + f_y(0, 1)(y - 1), \quad (12)$$

$$f(x, y) \approx f(1, 0) + f_x(1, 0)(x - 1) + f_y(1, 0)y. \quad (13)$$

幅度函数的 4 个展开式可以对应得到.取 4 个角点展开公式的平均值并将展开公式中的偏导采用差分近似.最后被积函数相位项  $f$  的近似公式为

$$f(x, y) = a + bx + cy, \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad a = [3f(0, 0) - f(1, 1) + f(1, 0) + f(0, 1)]/4, \quad (15)$$

$$b = [f(1, 0) - f(0, 0) + f(1, 1) - f(0, 1)]/2, \quad (16)$$

$$c = [f(0, 1) - f(0, 0) + f(1, 1) - f(1, 0)]/2. \quad (17)$$

同理可以得到幅度函数的近似公式为

$$g(x, y) = l + mx + ny. \quad (18)$$

$$\text{整个积分可以写成} \quad I = \int_0^1 \int_0^1 (l + mx + ny) \exp(jk(a + bx + cy)) dx dy. \quad (19)$$

$$\text{可将积分表示为} \quad I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (20)$$

上述积分均可解析求解,具体有

$$I_1 = \int_0^1 \int_0^1 l \exp(jk(a + bx + cy)) dx dy = l \exp(jka) \left( \frac{\exp(jkb) - 1}{jkb} + \frac{\exp(jkc) - 1}{jkc} \right), \quad (21)$$

$$I_2 = \int_0^1 \int_0^1 mx \exp(jk(a + bx + cy)) dx dy = m \exp(jka) \frac{\exp(jkc) - 1}{jkc} \left( \frac{\exp(jkb)}{jkb} - \frac{\exp(jkb) - 1}{(jkb)^2} \right), \quad (22)$$

$$I_3 = \int_0^1 \int_0^1 ny \exp(jk(a + bx + cy)) dx dy = n \exp(jka) \frac{\exp(jkb) - 1}{jkb} \left( \frac{\exp(jkc)}{jkc} - \frac{\exp(jkc) - 1}{(jkc)^2} \right). \quad (23)$$

由此可以得出式(9)的积分结果.为了提高精度,实际计算时通常需要考虑将式(9)的积分区域,即一个边长为 1 的正方形区域划分成  $N \times N$  个小正方形,最后将每个小正方形上的结果矢量叠加得到最终的积分结果.此外,当  $|kb|$  或者  $|kc|$  远远小于 1 时,积分结果会出现奇异性.幸运的是,文献[7]合理地处理了 Ludwig 积分可能存在的奇异性问题.文中运用的正是这种改进的 Ludwig 积分.

## 3 算例与分析

文中算例均是在内存 1.0 G, CPU 单核 3.0 G 的台式机上完成.

**算例 1** NURBS 建模的球面模型如图 2 所示,偶极子天线中心距离散射体 0.5 个波长,工作频率为 3 GHz,计算了  $\phi = 45^\circ$  切面的受扰方向图(图 3),与基于高阶矩量法的某软件得到的结果做了对比,结果的吻合度很好.该算例说明了文中算法的可行性.

**算例 2** 图 4 所示的模型是一个 NURBS 曲面建模得到的抛物面,图中可以清晰看到该模型的控制点.计算时其被分解成 4 个 Bezier 曲面.天线中心位于 (1.0, 0.0, 2.0),工作频率为 300 MHz.计算结果与 MOM 得到的结果进行了对比,结果如图 5 所示.两者吻合度很高,说明了文中方法针对多 Bezier 曲面模型的有效性.

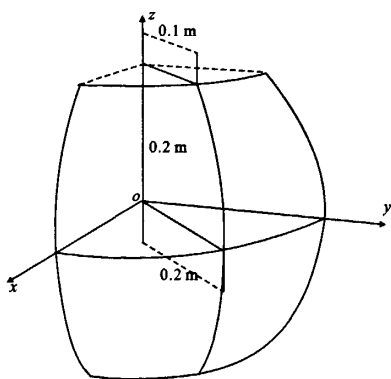


图 2 球面模型

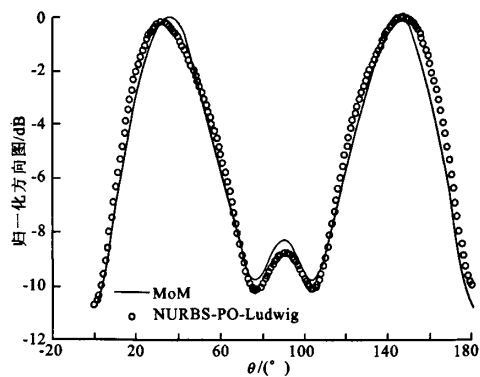
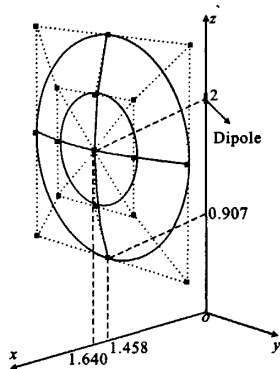
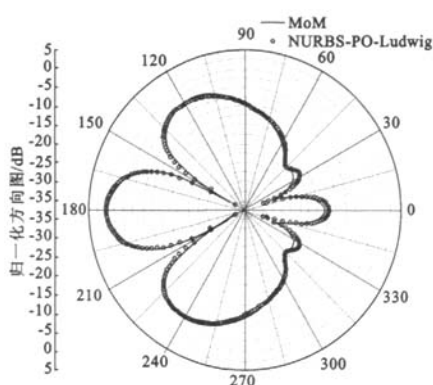
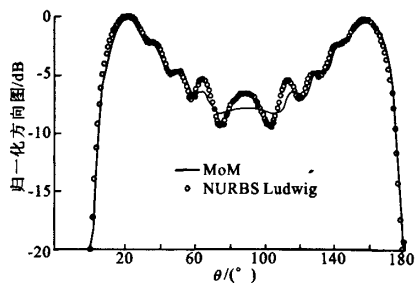
图 3 算例 1 的  $\phi=45^\circ$  切面受扰方向图

图 4 NURBS 抛物面模型

图 5 算例 2 的  $xy$  面受扰方向图

**算例 3** 将工作频率提高到 2 GHz, 则图 4 所示的抛物面模型口径尺寸约为 20 个波长. 图 6 示出该工作频率下, 天线仍然位于 (1.0, 0.0, 2.0) 时  $\phi=45^\circ$  切面的受扰方向图. 文中方法结果与矩量法结果对比吻合良好, 但是  $\theta$  在  $70^\circ \sim 110^\circ$  区间内出现了约 2 dB 的最大误差, 这是由于 PO 方法将暗区近似为无感应电流而导致的, 一般是可以达到工程精度要求的. 两种方法的计算时间分别为 20 667 s 和 2 067 s. 由此可以看出文中方法在计算高频问题中的速度优势.

图 6 算例 3 的  $\phi=45^\circ$  切面受扰方向图

## 4 结束语

采用基于 NURBS 曲面建模的物理光学方法来分析 NURBS 电大散射体附近天线的受扰方向图. 克服了用球面波代替真实天线, 使得天线必须远离散射体的局限. 利用 Ludwig 积分来计算感应电流的曲面积分, 避免了使用优化方法来搜索驻相点, 使得算法更加简洁易于实现. 数值结果证明了文中方法的可行性. 进一步的工作方向是: 首先通过加入对暗区电流的修正使得该算法的结果更加精确, 其次, 以已经能处理的偶极子天线为单元, 引入 MOM-PO 混合算法来分析更复杂的电磁问题.

### 参考文献:

- [1] Perez J, Catedra M F. RCS of Electrically Large Targets Modeled with NURBS Surfaces[J]. Electronics Letters, 1992, 28(12): 1119-1121.
- [2] 陈铭, 张玉, 王楠, 等. 基于 NURBS 曲面建模的物理光学法中的遮挡判断算法研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2006,

33(6): 430-432.

Chen Ming, Zhang Yu, Wang Nan, et al. Study of the Shadowing Technique in the NURBS-PO Method[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(6): 430-432.

- [3] Serim H A, Ergin A A. Computation of the Physical Optics Integral on NURBS Surfaces Using a Radon Transform Interpretation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7): 70-73.
- [4] 袁浩波, 王楠, 梁昌洪. 一种高效率计算雷达散射截面的矩量法[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(4): 629-632.  
Yuan Haobo, Wang Nan, Liang Changhong. Efficient Method of Moments for the Computation of RCS[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(4): 629-632.
- [5] 陈晓杰, 王萌, 史小卫. NURBS 模型间二次散射场的计算与应用[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 34-37.  
Chen Xiaojie, Wang Meng, Shi Xiaowei. Calculation of the Double Reflection Between Objects Modeled by NURBS Surfaces[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 34-37.
- [6] Conde O M, Perez J, Catedra M F. Stationary Phase Method Application for the Analysis of Radiation of Complex 3-D Conducting Structures[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2001, 49(5): 724-730.
- [7] Ludwig A C. Computation of Radiation Patterns Involving Numerical Double Integration[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1968, 11(6): 767-769.
- [8] 王萌, 陈铭, 梁昌洪. LUDWIG 算法的改进与应用[J]. 电波科学学报, 2006, 21(6): 935-938.  
Wang Meng, Chen Ming, Liang Changhong. Improvement of Ludwig's Algorithm and Its Application on NURBS-PO Method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 935-938.

(编辑: 齐淑娟)

(上接第 865 页)

混合遗传模拟退火算法应用于基本粒子滤波算法, 提出一种新的粒子滤波算法. 通过仿真实验证明, 改进后的算法大大提高了滤波性能, 更能符合高精度滤波的要求, 而且其良好的抗粒子退化能力, 可以很好地应用于非线性非高斯目标跟踪.

#### 参考文献:

- [1] Meropolis N, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N, et al. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines[J]. Journal of Chemical Physics, 1953, 21(6): 1087-1092.
- [2] Doucet A. On Sequential Simulation-based Method for Bayesian Filtering[R]. Technical Report Dept Engi CUED-F-TR310. Cambridge: Cambridge University, 1998.
- [3] Liu J S, Chen R. Sequential Monte Carlo Methods for Dynamic Systems[J]. Journal of the American Statistical Association, 1998, 93(443): 1032-1044.
- [4] Julier S J, Uhlmann J K, Durrant-Whyte H F. A New Approach for Filter Nonlinear System[DB/OL]. [2009-02-21]. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5209213>.
- [5] Wang Fasheng, Lin Yuejin. Improving Particle Filter with a New Sample Strategy[DB/OL]. [2009-03-23]. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5209213>.
- [6] Cheng Qi, Bondon P. A New Unscented Particle Filter[DB/OL]. [2009-02-21]. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4505270>.
- [7] Zhang Peng, Li Ming, Wang Yajun. Design and Optimization of Frequency and Phase Combined Modulation Signal Using Genetic Simulated Annealing Algorithm[C]//Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar: 2. Xi'an: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2009: 911-915.
- [8] Gordon N, Salmond D, Smith A F M. Novel Approach to Nonlinear/non-Gaussian Bayesian State Estimation[J]. IEEE Proceedings-F Radar, Sonar and Navigation, 1993, 140(2): 107-113.
- [9] Merwe R V, Doucet A, Freitas N D. The Unscented Particle Filter[R]. Technical Report Cued/F-INFENG/TR380, Engineering Department. Cambridge: Cambridge University, 2000.
- [10] Zheng Shijue, Shu Wanneng, Gao Li. Task Scheduling Using Parallel Genetic Simulated Annealing Algorithm[DB/OL]. [2009-03-15]. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4125524>.
- [11] Julier S J. The Scaled Unscented Transformation[DB/OL]. [2009-02-20]. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7965>.

(编辑: 齐淑娟)

## 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>