

·基金项目论文·

文章编号: 1000-3428(2002)01-0091-03

文献标识码: A

中图分类号: TN820.8<sup>1</sup>

# 一种获得导弹天线罩远场方向图的有效方法

戎华

(1.大连理工大学机械工程学院, 大连116024; 2.大连海军水面舰艇学院, 大连116018)

**摘要:** 在介绍了平面波谱表面积分方法的基础上, 重点讨论了远场方向图数值计算过程中, 应用自适应理论划分多重积分子区间, 解决计算速度与计算精度的矛盾, 提高计算效率的一种方法。

**关键词:** 天线罩; 平面波谱; 数值积分; 计算效率

## An Effective Method for Calculating Far Directional Pattern of Missile Radome

RONG HUA

(1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024; 2.Dalian Navy Academy, Dalian 116018)

**【Abstract】** Based on the analyzing the plane wave spectrum-surface integral method, a new method using self-adaptive theory to part the sub interval of multi-integral during the numerical calculation of the far directional pattern is presented in the paper. The result shows that the contradiction between the calculating speed and accuracy could be well balanced, and the calculating efficiency is greatly improved.

**【Key words】** Radome; Plane wave; Numerical integral; Calculating efficiency

天线罩是保护天线在恶劣环境下能够正常工作的一种设施。在航空、航天、导弹、雷达、通信、导航等无线电系统中得到广泛的应用。由于天线罩不同程度地影响到天线的各种性能, 而天线罩远场方向图的变化, 就是天线罩对天线  $E_r(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi^2} \int \int_{k_z}^{\infty} [k_x F_x(k_x, k_y) + k_y F_y(k_x, k_y)] e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y$  性能影响范围的度量, 因此, 人们非常重视对天线罩远场辐射方向图的研究, 并采用多种方法探讨提高天线罩远场辐射  $H_r(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi^2 \omega \mu} \int \int_{k_z}^{\infty} [k_x^2 - k_z^2] F_x + k_x k_y F_y e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y$ , 方向图的计算效率问题。由于其计算是一个非常复杂的过 程, 且计算量大, 耗时多, 无疑给快速计算带来很大的困难。因此, 提高计算效率已成为求解天线罩远场辐射方向图的一个重要环节。分析天线罩综合电性能的方法很多, 本文  $H_r(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi^2 \omega \mu} \int \int_{k_z}^{\infty} [k_x^2 - k_y^2] F_x + k_x k_y F_y e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y$  详细介绍了采用平面波谱—表面积分法求解天线罩远场辐射方向图过程中, 应用自适应理论划分多重积分子区间, 提高计算效率的方法。

### 1 天线场的平面波谱表示

为分析天线罩综合电性能, 本文采用了平面波谱—表面积分法。该方法采用子平面波叠加, 对天线罩内电磁场进行分析, 是目前用于分析天线罩性能的一个较好的方法。

#### 1.1 天线场的平面波谱表示

研究一个带有磁流的孔径天线, 其场的孔径积分公式为

$$\bar{E}(P) = - \int \bar{M} \times \nabla g(r) ds \quad (1)$$

$$\bar{H}(P) = - \frac{j}{\omega \mu} \int [(\bar{M} \cdot \nabla) \bar{V} + k^2 \bar{M}] g(r) ds \quad (2)$$

式中:  $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ ,  $g(r) = (4\pi r)^{-1} e^{-jkr}$ , 时间因子  $e^{j\omega t}$  通常略去,  $\nabla$  算子只作用于变量上。

如果用上式进行有罩天线近场的计算, 当研究整个空间的场值时, 计算量很大, 难以得到准确的结果。利用平面波谱概念, 平面孔径辐射场的波谱公式为:

$$E_r(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int \int_{k_z}^{\infty} F_x(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y \quad (3)$$

$$E_y(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int \int_{k_z}^{\infty} F_y(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y,$$

$$H_x(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi^2 \omega \mu} \int \int_{k_z}^{\infty} [k_x^2 - k_z^2] F_x + k_x k_y F_y e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y, \quad (4)$$

$$H_y(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi^2 \omega \mu} \int \int_{k_z}^{\infty} [k_y^2 - k_z^2] F_y + k_x k_y F_x e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y,$$

$$E_x(x, y, 0), E_y(x, y, 0) \text{ 是孔径场的 } x, y \text{ 分量}$$

$$F_x(k_x, k_y) = \iint_{s_1} E_x(x, y, 0) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (5)$$

$$F_y(k_x, k_y) = \iint_{s_1} E_y(x, y, 0) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (6)$$

$E_x(x, y, 0), E_y(x, y, 0)$  是孔径场的  $x, y$  分量。

#### 1.2 天线近场穿过罩壁的透射

空间任一点的场是由振幅为谱值的无限个平面波的叠加, 由于罩处于天线近区场, 其中  $k_x, k_y, k_z$  为  $k_0$  在  $X, Y, Z$  方向上分量。离开天线口径几个波长, 可以认为天线建立的波谱带宽是有限的。

$$\bar{E}(x, y, z) = \sum_{l=-L}^L \sum_{p=-L}^{L(l)} \Delta \bar{E}_{lp}(x, y, z) \quad (7)$$

$$\text{其中: } L = \frac{k_0}{\Delta k_x}, \quad L(l) = \frac{\sqrt{k_0^2 - l^2 \Delta k_x^2}}{\Delta k_y}$$

**基金项目:** 航天部重点资金资助项目

**作者简介:** 戎华(1963~), 女, 博士, 主研方向: 计算机辅助设计

**收稿日期:** 2001-04-03

$$\Delta \bar{E}_{ip} = \Delta E_{xip} \bar{i} + \Delta E_{yip} \bar{j} + \Delta E_{zip} \bar{k} \quad (8)$$

$$\Delta E_{ip} = \frac{1}{4\pi^2} \Delta k_x \Delta k_y F_i(k_{x1}, k_{y1}) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (9)$$

其中,  $\Delta E_{xip}$ ,  $\Delta E_{yip}$ ,  $\Delta E_{zip}$  分别为子平面波电场  $\Delta \bar{E}_{ip}$  在  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向上的分量。

由于罩处于天线近区场, 为此, 利用入射场的子平面分解, 通过分别讨论这些子平面波穿过罩壁的传输, 来研究罩外表面上的场。

若罩形状的函数为  $f(x, y, z) = 0$ , 则罩壁一点  $p$  的单位法向量为

$$\bar{n} = \frac{\nabla \bar{f}}{|\nabla \bar{f}|} \quad (10)$$

对于入射方向为  $\bar{k} = (k_{x1}, k_{y1}, k_{z1})/k$  的子平面波, 其垂直极化向量  $b$  和平行极化向量  $t$  分别为

$$\bar{b} = \bar{n} \times \bar{k} \quad (11)$$

$$\bar{t} = \bar{n} \times \bar{b} \quad (12)$$

将入射在罩内表面上的此子平面波投影在  $\bar{b}$ ,  $\bar{t}$  方向,

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{\perp} \\ \Delta E_{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_x & b_y & b_z \\ t_x & t_y & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{xip} \\ \Delta E_{yip} \\ \Delta E_{zip} \end{bmatrix} \quad (13)$$

于是对应此平面波的罩外场为

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{\perp 2} \\ \Delta E_{\parallel 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{\perp}(\theta_i) & 0 \\ 0 & W_{\parallel}(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{\perp} \\ \Delta E_{\parallel} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中  $\theta_i = \arccos(\bar{n} \cdot \bar{k})$  为入射角;  $W_{\perp}(\theta_i)$ ,  $W_{\parallel}(\theta_i)$  分别是垂直入射波, 平行入射波的传输过程函数为

$$W(\theta_i) = \begin{cases} T(\theta_i) & \theta_i \leq \pi/2 \\ 1 + R(\theta_i) & \theta_i > \pi/2 \end{cases} \quad (15)$$

$T(\theta_i)$ ,  $R(\theta_i)$  分别为平面波在罩壁的透射系数, 反射系数。在局部平板假定下,  $T(\theta_i)$ ,  $R(\theta_i)$  的计算可通过适当的程序求得。将  $\Delta E_{\perp 2}$ ,  $\Delta E_{\parallel 2}$  还原成  $x$ ,  $y$ ,  $z$  分量

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{xj2} \\ \Delta E_{yj2} \\ \Delta E_{zj2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_x & t_x \\ b_y & t_y \\ b_z & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{\perp 2} \\ \Delta E_{\parallel 2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

则有罩问题中的罩外透射场为

$$\bar{E}_2(x, y, z) = \sum_{l=1}^L \sum_{p=-L(l)}^{L(l)} (\Delta E_{xj2} \bar{x} + \Delta E_{yj2} \bar{y} + \Delta E_{zj2} \bar{z}) \quad (17)$$

其中,  $L = k_0 / \Delta k_x$ ,  $L' = \sqrt{k_0^2 - (l \Delta k_x)^2} / \Delta k_y$

### 1.3 天线—天线罩体的远区辐射场

在求得  $E_2$  后, 对磁场作相应的分析, 也可得  $H_2$  类似的表达。将罩外场  $E_2$ ,  $H_2$  作为二次源, 根据等效原理, 利用表面积分技术, 则远区场为

$$\bar{E} = -\frac{jk_0}{4\pi r} e^{-jk_0 r} \bar{R}_1 \times \int_{S_1} \int_{S_2} \bar{n}_{RM0} \times \bar{E}_2 - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \bar{R}_1 \times (\bar{n}_{RM0} \times \bar{H}_2) e^{jk_0 r} \bar{R}_1 ds_R \quad (18)$$

其中,  $r$  表示观测点到天线罩坐标原点的距离,  $\bar{R}_1$  为观测方向单位矢量,  $\bar{r}$  为天线罩外表面矢径,  $\bar{n}_{RM0}$  是天线罩外表面上源点(M点)处的单位外法线方向。应该注意: 式(18)积

分号中方括号中的量值为天线坐标系中的, 而积分面元  $ds$  沿罩表面取得, 为了便于施行积分运算, 必须把天线坐标中的诸量变换到罩坐标系中。对式(18)进行数值积分, 便可求出天线罩体在给定方向上的远区方向图。

## 2 近场计算、多重积分子区间个数对提高计算效率与计算精度的影响及计算算例

如前所述, 天线罩电性能的求解过程是一个复杂的过 程。从计算公式可以看出, 远场方向图是一个关于  $ds$  的二重积分, 被积函数是关于  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $ds$  的二重积分, 最终远区方向图为关于  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $ds$  的四重积分。用于天线罩分析的方法, 如二维边缘绕射法, 三维孔径积分法, 都对衍射、传输、透过提供了一个很好的近似值。但由于计算量过大, 这种分析对中、大三维天线是不适用的。而平面波谱法分析对大天线计算近场很适用, 可以提高近场计算效率, 可以计算典型的三维天线—天线罩的远场方向图及瞄准误差。平面波谱数值法求解天线罩远场方向图涉及近场、透过场、远场积分, 其中, 求天线罩内壁表面上各点的近场是整个计算过程的第一步, 该场值及计算速度直接影响远场计算精度与计算效率。对于三维天线—天线罩分析, 平面波谱法可以快速计算大天线近场及瞄准误差。通过实例计算, 某天线近场计算可由计算机快速完成, 计算时间每点 0.3s。天线罩分析涉及表面积分, 表面各元素皆需要进行近场计算, 由于各元素划分尺寸为波长  $\lambda$  平方或更小, 因此实际天线近场计算量很大。例如: 直径为  $10\lambda$  的孔径至少需 500~1000 近场计算, 用常规孔径积分法近场计算需 4h, 而用平面波谱法可减少至 12min。根据公式(7), 本文分别计算出子区间划分为 4, 4.4, 8, 8.8, 16, 16, 16 时的均匀圆口径天线 (口径直径  $10\lambda$ ) 在离开口径  $2\lambda$  距离平面上的近场分布(见图1)。

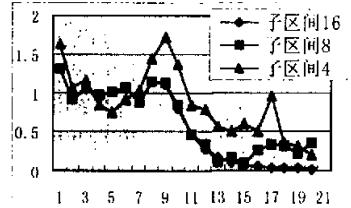


图1 子区间划分不同时的近场分布 (离孔径距离  $2\lambda$ )

将天线罩内壁表面上各点的场透过罩后, 求其外表面各点的场, 并进一步求出天线罩外表面各点的合成切向场; 利用等效方法, 再求二次源的辐射场—远场方向图。

高斯求积法是使用不等间隔区间的一种非常有效的方法, 本文为求解远场方向图, 对多重积分采用高斯方法, 设多重积分为

$$S = \int_0^b dx_1 \int_{a_1(x_1)}^{b_1(x_1)} dx_2 \dots \int_{a_{n-1}(x_{n-1})}^{b_{n-1}(x_{n-1})} f(x_1 x_2 \dots x_n) dx_n \quad$$

在计算  $n$  重积分时, 分别将  $1, 2, \dots, n$  层区间分为相等的  $JS_1, JS_2, \dots, JS_n$  个子区间。首先求出各积分区间上的第一个子区间中第一个高斯型点  $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ , 然后固定  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n-1}$ , 按高斯方法计算最内层 (即第  $n$  层) 积分, 再从内到外计算各层积分值。最后得到所求的  $n$  重积分的近似值。

在整个数值计算过程中可以看出, 主要工作量是用在计算函数值上, 因此, 尽量减少计算函数值的次数是考虑算

法的一个原则。本文中被积函数  $f(x)$  在整个积分区间上的变化不是均衡的。把积分区间分成若干个子区间，被积函数  $f(x)$  在有些子区间上变化缓慢，而在另一些子区间上变化较快。为了使计算结果达到预定的精确度，对变化大的子区间要分得细些，而与此相反，在变化小的区间上就不必分得同样的细，由此可以减少对一些函数值的不必要的计算，从而提高计算效率。从大量算例结果表明：子区间划分的个数越少，计算量越小，计算时间越短，精度越差；反之，子区间划分的个数越多，计算量越大，计算时间越长，精度越高；因此，寻找合适的子区间个数的划分在整个计算过程中十分重要。本文采用自适应高斯积分法，其实质就是根据计算结果逐步细分那些求积函数变化剧烈的区间，以达到根据精度找到最佳了区间划分，减少计算函数值的次数，提高计算效率的目的。经过简单的推导，函数  $f(x)$  在区间  $[a,b]$  上的高斯积分误差事后估计式为

$$\int_a^b f(x)dx - I_2 = \frac{1}{2^{2n-1} - 1} (I_1 - I_2) \quad (19)$$

其中,  $n$ 为每个区间上的高斯积分点数,  $I_1$ 为 $f(x)$ 在区间 $[a,b]$ 上的高斯积分结果,  $I_2$ 为将区间 $[a,b]$ 划分为两部分后的复合高斯积分结果。通过(19)式就可估算出计算结果是否满足精度。如果 $|I_2 - I_1|$ 相差较大, 则对孩子区间再细分为两个小区间, 进行自适应细分, 直到满足给定的精度要求为止。在实际计算中, 本文采用了两点高斯积分, 即 $n=2$ 的情况, 并用相对误差来设定精度:  $|I_2 - I_1|$ ;

$$err = \frac{|I_2 - I_1|}{|I_2| + 1}$$

对给定的精度要求 $\text{eps}$ ，若 $\text{err} < \text{eps}$ ，则以 $\text{l}$ 作为该区间积分的计算结果，否则，进行自适应细分。在计算时间上，计算量与区间划分是呈指数增长的。经实例验证，区间划分为8.8.8.8和16.16.16.16的计算时间分别约为区间划分是4.4.4.4的16倍和256倍。同时，为提高计算效率，要尽可能将被积函数简化，参数设置及相关计算最好在外重积分进行，然后，以哑元代入被积函数，减少计算量，提高计算效率。图2显示了长细比为2:1的某天线罩( $\Omega=100$ )区间划分分别为4.4.4.4及8.8.8.8和16.16.16.16时的远场方向图。

和以往入侵检测方法相比，本方案具有以下优点：

· 突破了以往入侵检测只利用行为特征、执行次数等方法来进行检测的局限，补充了网络底层数据和浏览器数据进行比较的新思路，提高了检测入侵的精确性。

通过分析数据,可以识别出非法程序,当浏览器下载程序时,使用户能做出正确的选择,减少了非法入侵的机率。

· 通过把浏览器数据与浏览器相关文件状态信息进行关联分析，使本系统不再是被动的和孤立的。

：加入知识库管理使系统具有自学习的功能提高其智能化

本方案是立足于实际情况,面对网上犯罪日益严重的形势下提出来的。它利用已有的入侵检测模型方法,对现有的基于浏览器的防护系统进行了补充。提出了利用网络底层数据和浏览器数据进行比较分析的新思路,拓展了网络防护的途径,提高了浏览器对于Java Applet、ActiveX控件的识别能力,更加有效地阻止了来自浏览器的不安全因素,完善了网络防护功能,提高了网络安全,减少了网上入侵。

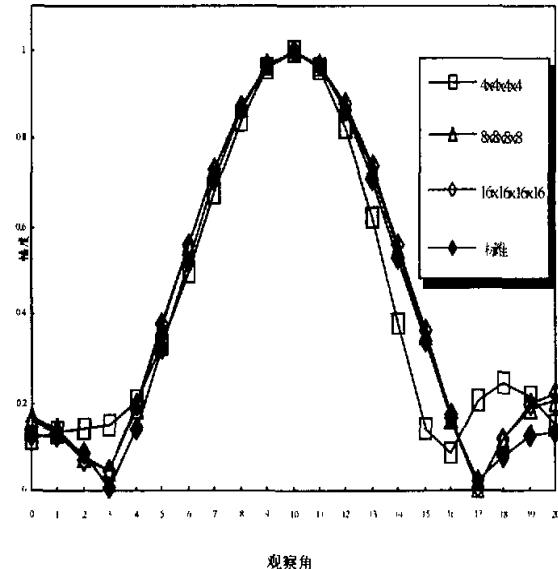


图2 某天线罩积分区间划分不同时的远场方向图

### 3 结论

由于天线罩远场方向图的变化,能衡量天线罩对天线性能的影响,因此,人们非常重视天线罩远场方向图的研究,并探讨各种计算方法。本文在运用数值法计算远场方向图过程中,为处理好计算速度与计算精度的矛盾,采用平面波谱法快速计算近场,运用自适应高斯积分方法划分子区间,在反复演算大量实例基础上,寻找到能同时满足计算精度和计算速度的算法,该算法可大大提高计算效率,经验证,效果良好。

### 参考文献

- 1 Tavis M.A Three-dimensional Ray Tracing Method for the Calculation of Radome Boresight Error and Antenna Pattern Distortion Report No. Tor-0059(56860)-2,1971  
2 杜耀惟.天线罩电信设计方法.北京:国防工业出版社,1993  
3 邹 海.最优设计中的新计算法.北京:新时代出版社,1982  
4 方大刚.电磁理论中的频域方法.合肥:安徽教育出版社,1995

4 结束语

随着网络的迅速发展，网络安全已经成为摆在我们面前的一项刻不容缓的任务，而网络功能的不断丰富，基于浏览器的安全问题必将引起人们的高度重视。本文探讨了基于浏览器安全问题，并在目前解决方案的基础上提出了一种新的思路。由于基于浏览器的安全防护是网络安全领域中一个新的课题，还有许多工作有待于进一步探讨和研究。

### 参考文献

- 1 Crigney, Rubens A, Simpson W, et al. RFC 2138, Remot Authentication Dial in User Service(RADIUS)[J]. 1997-04-18
  - 2 Herringshaw C. Detecting attacks[J]. Computer 1997(12):16-17
  - 3 Heberlein L T, Dias G V, Levitt K N, et al. A Network Security Monitor. [c] Proceeding of the IEEE Symposium on Security and Privacy. IEEE press, 1990
  - 4 The Java Extensions Framework. JDK 1.2 Documentation. Sun Microsystems, Inc., 1998. <http://java.sun.com/products/jdk/1.2/docs/guide/extensions>

## 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>