

文章编号 1005-0388(2005)06-0824-05

渐近波形估计技术在线天线分析中的应用^{*}

秦建军¹ 殷兆伟¹ 曹祥玉² 童创明¹ 张 厚¹

(1. 空军工程大学导弹学院, qinjianjuncz@163.com, 陕西 三原 713800;
2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 叙述了矩量法(MOM)结合渐近波形估计(AWE)技术快速求解天线宽带输入阻抗的一般步骤,并将AWE技术拓展应用到阵列方向图的求解中。AWE技术的计算结果与经典矩量法计算的结果和SuperNEC的仿真结果比较,三者吻合很好,从而证明了该方法的精确性,同时也显现出了渐近波形估计技术可以大大减少计算时间的优势。

关键词 渐近波形估计,矩量法,输入阻抗,天线阵列方向图

中图分类号 TN821 文献标识码 B

Applications of asymptotic waveform evaluation technique in the analysis of wire antenna

QIN Jian-jun¹ YIN Zhao-wei¹ CAO Xiang-yu²

TONG Chuang-ming¹ ZHANG Hou²

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, qinjianjuncz@163.com,
Sanyuan Shaanxi 713800, China; 2. The Telecommunication Engineering
Institute, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract The method of moments (MOM) in conjunction with the asymptotic waveform evaluation (AWE) technique to calculate the wide-band input impedance fleetly is depicted briefly. And then the application of AWE technique is expanded to calculate the antenna array pattern. The results of AWE are well agreed with those of MOM and SuperNEC, which proves that the method is accurate in this paper, and also shows that the AWE technique can decrease the computing time greatly.

Key words AWE, MOM, input impedance, antenna array pattern

1 引言

矩量法是求解电磁问题的经典数值算法,它具备理论成熟、求解精度高、解稳定性好等特点。其计算核心是稠密的满阻抗矩阵方程的求解,这是最费机时的,当需要求解电磁问题的宽频带特性时,往往需要反复解算矩阵方程,势必造成计算时间大大增加。目前已经开发了许多加速算法来加速计算,例如,渐近波形估计(AWE)技术^{[3][4]}、快速多极子

(FMM)、多层快速多极子(MLFMM)^[6]等。文中主要讨论AWE在线天线中的应用,AWE技术能有效地减少方程重复求解的工作量。

2 电场积分方程(EFIE)

直接给出线性振子的电场积分方程^{[1][2]}:

$$E_z^i(z) = \frac{j\eta}{4k\pi} \left(\frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right) \int_{-l}^l I(z') G(z, z') dz' \quad (1)$$

式中, $\eta = 120\pi$, $k = 2\pi/\lambda$

$$G(z, z') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\exp(-jkR)}{R} d(\phi - \phi') \quad (2)$$

$$R = \sqrt{(z - z')^2 + \rho^2 + a^2 + 2\rho a \cos(\phi - \phi')}$$

其中, (a, ϕ', z') 和 (ρ, ϕ, z) 分别表示源点坐标和场点坐标。

当振子半径不可忽略时, 积分核可表示为^[2]:

$$G(z, z') = \frac{\exp(-jkR_0)}{R_0} \left\{ 1 - \left(\frac{kpa}{2R_0} \right) \left[1 - \frac{3j}{kR_0} - \frac{3}{(kR_0)^2} \right] \right\} \quad (3)$$

式中, $R_0 = \sqrt{(z - z')^2 + \rho^2 + a^2}$ 。

将线性振子均匀剖分为 M 段, 选择三角形函数为基函数, 并采用脉冲函数为权函数, 采用矩量法求解方程(1), 可得如下矩阵方程:

$$\mathbf{ZI} = \mathbf{V} \quad (4)$$

式中,

电压向量 \mathbf{V} 的元素 V_m 在馈电点处为 1, 其他均为 0;

阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的元素 Z_{mn} 由式(5)给出:

$$Z_{mn} = \frac{j30}{\Delta} \left[\frac{1}{k} G_{m-1,n} - \frac{2}{k} G_{m,n} + \Delta^2 k G_{m,n} + \frac{1}{k} G_{m+1,n} \right] \quad (5)$$

上式中,

Δ 表示单元振子分段的长度;

$$G_{r,n} = \int_{z_n - \frac{\Delta}{2}}^{z_n + \frac{\Delta}{2}} \left\{ \left(\frac{3(\rho_r a)^2}{4R_{r,n}^5} + \frac{1}{R_{r,n}} \right) \exp(-jkR_{r,n}) \right\} dz' - \int_{z_n - \frac{\Delta}{2}}^{z_n + \frac{\Delta}{2}} \left\{ \left(\frac{(\rho_r a)^2}{4R_{r,n}^3} \right) k^2 \exp(-jkR_{r,n}) \right\} dz' + \int_{z_n - \frac{\Delta}{2}}^{z_n + \frac{\Delta}{2}} \left\{ \left(\frac{3(\rho_r a)^2}{4R_{r,n}^4} \right) k \exp(-jkR_{r,n}) \right\} dz' \quad (6)$$

式中, $r = m-1, m, m+1, m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, M$, $R_{r,n} = \sqrt{(z_r - z_n)^2 + \rho_r^2 + a^2}$ 。

从(5)式和(6)式可以看出, 阻抗是频率 f 的函数, 亦即波数 k 的函数。故矩阵方程(4)可写为:

$$[\mathbf{Z}(k)]_{M \times M} [\mathbf{I}(k)]_{M \times 1} = [\mathbf{V}(k)]_{M \times 1} \quad (7)$$

3 渐进波形估计技术理论^{[3][4]}

以求解线天线的宽带输入阻抗为讨论对象叙述 AWE 技术的基本思想:

AWE 技术是将任意频率下的天线电流在给定频率 f_0 处按频率展开成 Taylor 级数, 在大多数情况下, 用 Taylor 级数能得到相当好的逼近效果, 不过由于 Taylor 级数的收敛半径小使得其精度有限,

此时, 一般是采用有理函数逼近的方法来改进精度, 即通过 Taylor 级数的系数与 Pade 逼近匹配将其转化为有理函数的形式, 与 Taylor 级数相比, Pade 有理逼近具有较大的收敛半径, 因此可以进行较大范围的外推。

首先将电流系数 $I_n(k)$ 在 k_0 处展开成 Taylor 级数:

$$I_n(k) = \sum_{s=1}^S C_s (k - k_0)^s \quad (8)$$

将其转换成有理分式形式

$$I_n(k) = \left(\sum_{l=0}^L a_l (k - k_0)^l \right) / \left(1 + \sum_{p=1}^P b_p (k - k_0)^p \right) \quad (9)$$

根据同次幂项系数相等, 由等式(8)和(9)可得:

$$\sum_{i=0}^l C_{l-i} b_i = a_l \quad (l = 0, 1 \dots L) \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^P C_{l-i} b_i = 0 \quad (l = L+1, \dots, L+P) \quad (11)$$

将(8)~(11)式中的系数 a, b, C 表示为列向量的形式 $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_L]^T$, $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_P]^T$, $\mathbf{C} = [C_1, C_2, \dots, C_s]^T$ 。这里的关键在于列向量 \mathbf{C} 的求解, 根据 Taylor 级数展开式(8)可得:

$$C_s = \frac{I_n^{(s)}(k_0)}{s!} \quad (12)$$

求出列向量 \mathbf{C} 并代入式(11)可求得 \mathbf{B} , 然后将向量 \mathbf{C} 和向量 \mathbf{B} 代入(10)可求得列向量 \mathbf{A} , 从而由(9)式就可求得第 n 个分段上各个频率展开点电流系数 $I_n(k)$ 的有理分式表示式, 进而求得所需频段内天线的输入阻抗。

3.1 AWE 技术结合矩量法获取天线宽带响应

在矩阵方程(7)两边同时求关于 k 的 s 阶导数, 并结合(12)式可得:

$$I^{(s)}(k_0) = \begin{cases} Z^{-1}(k_0)V(k_0) & s=0 \\ Z^{-1}(k_0)[V^{(s)}(k_0) - \sum_{q=1}^s z^{(q)}(k_0) \frac{s!}{q!(s-q)!} I^{(s-q)}(k_0)] & s \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$C_s = \begin{cases} Z^{-1}(k_0)V(k_0) & s=0 \\ Z^{-1}(k_0) \left[\frac{V^{(s)}(k_0)}{s!} - \sum_{q=1}^s Z^{(q)}(k_0) \frac{1}{q!(s-q)!} I^{(s-q)}(k_0) \right] & s \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

下面求解阻抗矩阵 $Z^{(q)}(k_0)$, 在式(5)两端求 $Z(k)$ 关于 k 的 q 阶导数可得以下结果:

$$\mathbf{Z}^{(q)}(k_0) = j \frac{30}{\Delta} (\phi_1^{(q)} - 2\phi_2^{(q)} + \phi_3^{(q)} + \Delta^2 \phi_4^{(q)}) \quad (15)$$

式中,

$$\varphi_1 = G_{m-1,n}/k, \varphi_2 = G_{m,n}/k,$$

$$\varphi_3 = G_{m+1,n}/k, \varphi_4 = kG_{m+1,n}.$$

ϕ_1, ϕ_2 和 ϕ_3 关于 k 的 q 阶导数可统一表示为:

$$\phi_i^{(q)} = \varphi_1^{(q)} - \varphi_2^{(q)} + \varphi_3^{(q)} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (16)$$

(16)式中,

$$\varphi_1^{(q)} = \int_{z_n - \frac{\Delta}{2}}^{z_n + \frac{\Delta}{2}} \left(\frac{3(\rho, a)^2}{4R_{r,n}^5} + \frac{1}{R_0} \right) \sum_{t=0}^q [C_q^t (-1)^t \cdot t! \cdot k_0^{-(t-1)} (-jR_{r,n})^{q-t} \cdot \exp(-jk_0 R_{r,n})] dz'$$

$$\varphi_2^{(q)} = \int_{z_n - \frac{\Delta}{2}}^{z_n + \frac{\Delta}{2}} \frac{(\rho, a)^2}{4R_{r,n}^3} (-jR_{r,n})^{q-1} \cdot \exp(-jk_0 R_{r,n}) (q - jk_0 R_{r,n}) dz'$$

$$\varphi_3^{(q)} = \int_{z_n - \frac{\Delta}{2}}^{z_n + \frac{\Delta}{2}} \frac{3}{4} (\rho, a)^2 (j)^{q+4} (R_{r,n})^{q-4} \cdot \exp(-jk_0 R_{r,n}) dz'$$

ϕ_4 关于 k 的 q 阶导数为:

$$\phi_4^{(q)} = \int_{z_n - \frac{\Delta}{2}}^{z_n + \frac{\Delta}{2}} \{ (-jR_{r,n})^{q-3} \cdot \exp(-jk_0 R_{r,n}) (X + jY) \} dz' \quad (17)$$

(17)式中,

$$X = \frac{-q^3 + 6q^2 + 8q}{4R_{r,n}^3} (\rho, a)^2 +$$

$$\frac{3(q-1)}{4R_{r,n}} (k_0 \rho, a)^2 - qR_{r,n}$$

$$Y = \frac{3q^2 - 9q + 3}{4R_{r,n}^2} k_0 (\rho, a)^2 -$$

$$\frac{1}{4} k_0^3 (\rho, a)^2 + k_0 R_{r,n}^2$$

将(16)、(17)式代入(15)式就可求得阻抗矩阵 $\mathbf{Z}^{(q)}(k_0)$, 由(14)式可得向量 \mathbf{C} , 根据 AWE 技术理论即可求得天线上各频率点上的电流分布, 进而求得各个频率点上的输入阻抗。

为了验证以上的理论分析, 图 1 和图 2 给出了采用 AWE 求得的半波对称振子的宽带输入阻抗与矩量法计算的结果, 同时为了验证, 求解的精度也给出了 SuperNEC 仿真结果。半波振子的尺寸长度 0.5m, 振子半径 1.59mm, 展开频率范围 50MHz~2250MHz。

计算时间: MOM: 121.4s; AWE: 30.3s。由此可见采用 AWE 技术后, 求解速度单纯采用 MOM 的 4 倍; 同时结果与 SuperNEC 仿真结果非常吻合。

3.2 AWE 技术结合矩量法获取天线阵列方向图
计算已知线天线上电流分布情况下, 空间任一

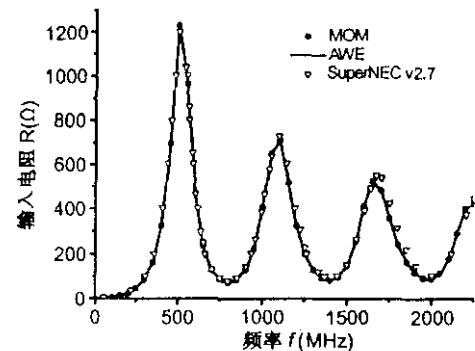


图 1 AWE 和 MOM 求得的半波对称振子的输入电阻

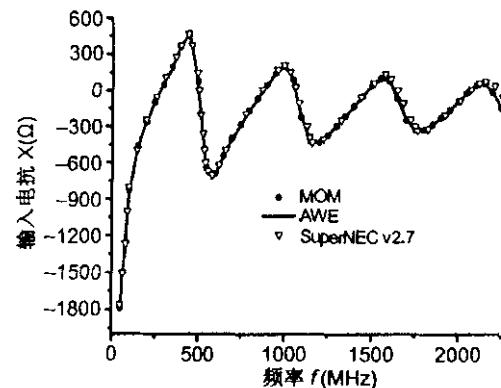


图 2 AWE 和 MOM 求得的半波对称振子的输入电抗

处的远场, 其一般表达式为^[5]:

$$E(r, \theta, \phi) = -j\omega\mu \frac{\exp(-jkr_0)}{4\pi r_0} \int I(\xi) F(\theta, \phi) d\xi \quad (18)$$

$$F(\theta, \phi) = \exp[jk(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi + z' \cos\theta)] \quad (19)$$

式中: (x', y', z') 表示源坐标, 则 (θ, ϕ) 表示观察点在空间的角位置。

设 $\varphi = k(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi + z' \cos\theta)$, 则(19)式可表示为:

$$F(\varphi) = \exp(j\varphi) \quad (20)$$

由于由矩量法求得的电流是离散函数, 此时可将积分变为求和得:

$$E(r, \varphi) = -j\omega\mu \frac{\exp(-jkr_0)}{4\pi r_0} \sum I_n F(\varphi) \cdot \Delta \quad (21)$$

式中, \sum 表示对阵列中所有单元上的节点求和。

可以看出在(18)式中只有 $F(\theta, \phi)$ 与角度变量有关系, 因此在对场求关于角度变量的高阶导数时, 主要是 $F(\theta, \phi)$ 的求解。然而, 直接对 θ 或者 ϕ 求导数显得有些复杂不利于计算, 这里将其转化为求关

于 φ 的高阶导数,就简单多了,即

$$F^{(s)}(\varphi) = \exp(j\varphi) \cdot (j)^s \quad (22)$$

在(21)式两端求关于 φ 的 s 阶导数,并归一化得:

$$E_0^{(s)}(r, \varphi) = \frac{\sum I_n F^{(s)}(\varphi)}{\sum I_n} \quad (23)$$

根据 AWE 的基本求解思想即可求得已知电流分布情况下,线天线或者天线阵列在空间的远场分布。

为了验证以上理论分析,图 5 给出了 AWE 技术求得的由 8 个半波对称振子组成的等间距平行排列直线阵(其俯视图如图 3 所示)、等幅同相激励时的 H一面方向图,单元间距为半波;图 6 给出了由 8 个半波对称振子组成的均匀平行排列圆环形阵(其俯视图如图 4 所示)、等幅同相激励时的 H-面方向图,圆环半径为 0.65 倍的波长。

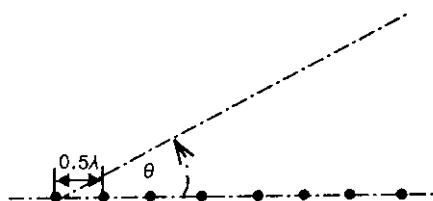


图 3 直线阵的俯视图

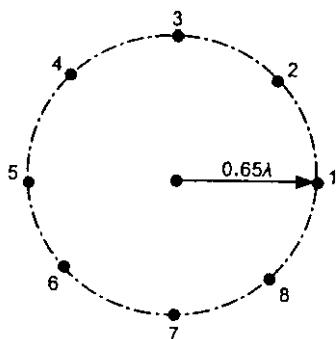


图 4 圆环阵的俯视图

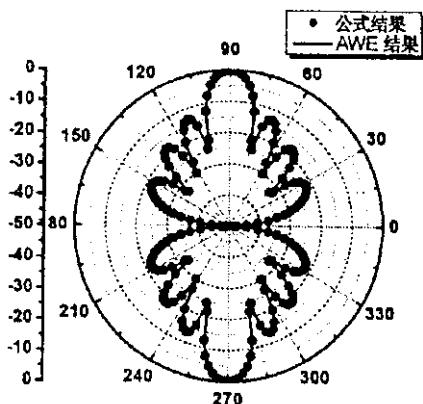


图 5 8 单元等幅同相激励平行排列直线阵列

采用 AWE 技术计算耗时:6s,直接由公式(21)计算

耗时:15s,由此可见同样采用 AWE 技术后,求解速度要比直接由公式(21)求解速度快。

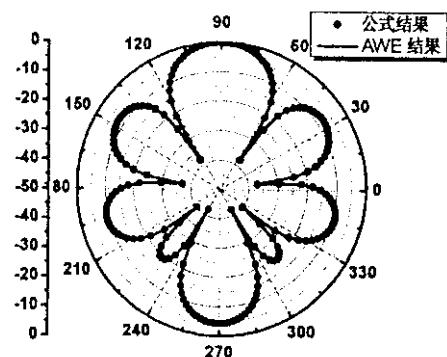


图 6 8 单元等幅同相激励圆环阵列

4 结论

讨论了矩量法(MOM)结合渐近波形估计(AWE)技术在线天线输入阻抗和天线阵列方向图的快速求解中的应用。详细推导了基于完整圆柱积分核的互阻抗及其高阶导数的一般表达式,文中虽未讨论线天线的半径问题,但文献[2]已经证明文中所推导的互阻抗表达式是完全可以求解一定粗细的线天线。

通过对文中给出的 AWE 技术的计算结果与经典矩量法计算的结果比较,可见在保证计算精度的基础上,AWE 技术可以有效地加速计算。

从 AWE 技术的基本思想中,容易看出 AWE 技术求解天线的宽带输入阻抗过程中需要求互阻抗矩阵关于频率的高阶导数,为此在选择基函数和权函数展开时应注意:为简化导数的求解,基函数和权函数应尽量选取简单的形式,最好选取与频率无关的形式,如傅立叶级数、幂级数、脉冲函数、三角波函数和二次内插级数等。为了简化阻抗矩阵元素的推导,加快解算速度,文中选取三角形函数为基函数,脉冲函数为权函数。

参考文献

- [1] D H Werner. An exact formulation for the vector potential of a cylindrical antenna with uniformly distributed current and arbitrary radius[J]. IEEE Trans. On AP, 1993, 41(8): 1009~1018.
- [2] D H Werner. A method of moments approach for the efficient and accurate modeling of moderately thick cylindrical wire antennas [J]. IEEE Trans. On AP, 1998, 46(3): 373~382.
- [3] 童创明,张光甫,等. 一维 FSS 电磁散射宽带特性的快

- 速计算[J]. 电波科学学报, 2002, 17(5): 441~444.
- C M Tong, G F Zhang, *et al.*. Fast calculation of the broadband electromagnetic scattering of one-dimensional frequency selective surfaces[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(5): 441~444.
- [4] 童创明, 洪伟等. 漸近波形估计技术应用于宽带 RCS 频率响应的快速获取[J]. 应用科学学报, 2001, 19(3): 206~209.
- [5] R 米特拉编著, 金元松译. 计算机技术在电磁学中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1983 年 8 月, 第一版.
- [6] 胡俊, 聂在平, 等. 三维电大目标散射求解的多层快速多极子方法[J]. 电波科学学报, 2004, 19(5): 509~514.
- J Hu, Z P Nie, *et al.*. Multilevel fast multipole algorithm for solving scattering from 3-D electrically large

object[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(5): 509~514.

秦建军 (1977—), 男, 河南人, 空军工程大学导弹学院电磁场与微波技术专业, 在读博士, 主要研究方向天线与电磁兼容, 电磁场数值计算。

殷兆伟 (1973—), 男, 山东人, 空军工程大学导弹学院电磁场与微波技术专业, 在读博士, 研究方向为电子对抗, 宽带天线技术, 共形天线。

曹祥玉 (1964—), 女, 陕西人, 空军工程大学电讯工程学院, 教授, 博士生导师, 主要从事天线与电磁兼容、电磁辐射与散射、电磁场数值计算、军事通信等方面的研究。

(上接第 818 页)

- [5] S Peleg, B Friedlander. The discrete polynomialphase transform[J]. IEEE Transaction on Signal processing, 1995, 43(8): 1901~1914.
- [6] Barbarossa. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar, part I: optimal detection and parameter estimation theory[J]. IEE Proc. Pt. F. 1992, 39(1): 79~88.
- [7] 黄克骥, 田达, 陈天麒. 基于任意阵列形式的 LFM 信号参数估计[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 346~351.
- K J Huang, D Tian, T Q Chen. Parameter estimation of LFM signals based on array of any form[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(3): 346~351.
- [8] M Z Ikram, K Abed-Meraim, *et al.*. Estimating the parameters of chirp signals: an iterative approach[J]. IEEE Transaction on Signal processing. 1998, 46(12): 3436~3441.
- [9] Wojtkiewicz A, Rytel-Andrianik R. Optimal detection and estimation in FMCW radar[J]. Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2002, (3): 778~781.
- [10] Namias V. The fractional Fourier transform and its application in quantum mechanics[J]. J. Inst. Appl. Math. 1980, (25): 241~265.

[11] Almeida L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. IEE Transaction on Signal processing. 1994, 42(11): 3084~3091.

[12] Ozaktas H M, Arikan O, Kutay M A, *et al.*. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Transaction on Signal processing. 1996, 44(9): 2141~2150.

[13] Steven M Kay. Fundamentals of statistical signal processing [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993. (Steven M. Kay“统计信号处理基础”. 北京: 电子工业出版社. 2003.)



杜雨洛 (1977—), 男, 四川人, 电子科技大学博士研究生。主要研究方向 LFM-CW 雷达理论及系统设计, 信号多参量估计。



杨建宇 (1963—), 男, 四川人, 电子科技大学电子工程学院教授, 博士生导师。研究领域: LFM-CW 雷达理论、关键技术与系统应用, 毫米波雷达成像, 数字信号处理, 信号检测与估计。

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>