

文章编号 1005-0388(2008)02-0235-05

多层快速多极子技术分析微带天线

樊振宏^{*} 丁大志 陈如山

(南京理工大学通信工程系, 江苏 南京 210094)

摘要 分析了电大尺寸的微带天线辐射方向图。从混合位积分方程出发, 将空域格林函数写成多层快速多极子技术能够适用的形式, 从而使得大尺寸的天线问题得以快速并精确地分析。文中还比较了不同迭代方法在分析时的效率。算例表明, 灵活的一般最小余量法(FGMRES)的效率比其他方法高得多。

关键词 微带天线; 多层快速多极子; 迭代求解方法; 灵活的一般最小余量法

中图分类号 TN820.1+2

文献标志码 A

Multilevel fast multipole approach for analysis of microstrip antennas

FAN Zhen-hong DING Da-zhi CHEN Ru-shan

(Communication Department, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract The radiation patterns from microstrip antennas with electrically large size were analyzed. The paper derived from the mixed-potential integral equation and expanded the space-domain Green's function for planar layer structure into the form which can be adopted by the multiple level fast multipole algorithm, then the problems are solved faster and accurately. The paper also compares the efficiency of several different iterative schemes, and the numerical results display that the flexible generalized minimal residual (FGMRES) algorithm is a most efficient one.

Key words microstrip antenna; multilevel fast multipole approach; iterative solver; flexible generalized minimal residual algorithm

1 引言

近年来许多学者对电大尺寸微带贴片的散射问题进行了深入的研究, 取得了诸多进展。由于传统的其他强势求解方法如时域有限差分方法、传输线方法和有限元法需要求解的空间大, 因此这一问题常采用基于积分方程的矩量法来分析。这一方法又分为两类, 一是谱域方法, 一是空域方法^[1]。谱域方法需要处理双重无限积分, 矩阵填充的时间相当大。由于以离散复镜像技术^[2~6]为代表的快速准确地抽取空域格林函数的方法的出现, 空域方法获得了极

其迅速的发展。不少应用在积分方程的快速算法, 如迭代解法结合快速离散傅里叶变换技术, 自适应积分方法, 预校正的快速离散傅里叶变换技术, 以及多层快速多极子算法, 矩阵压缩方法都被引入到这一领域来。本论文跟踪多层快速多极子算法^[8]在这一领域的应用。

2 混合位积分方程

微带天线问题通常采用空域形式的混合位积分方程^[1], 它相比于电场积分方程来说, 优点是积分内

* 收稿日期: 2007-02-12.
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(No. 60701003)和国家自然科学基金重点项目(No. 60431010)

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(No. 60701003)和国家自然科学基金重点项目(No. 60431010)

核的奇异性更弱。便于矩量法的处理。积分方程是根据微带天线金属表面要满足电场的边界条件来建立的。根据边界条件,在微带的金属贴片表面S上电场满足关系式

$$\hat{n} \times \mathbf{E}'(\mathbf{r}) = -\hat{n} \times \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \quad (1)$$

式中, \mathbf{E}' 表示金属表面S上的电流产生的散射电场; \mathbf{E}^i 则表示馈源在表面上产生的电场, 对天线问题通常采用无限小缝隙电压馈源馈电, 对于散射问题^[2], 它通常是平面波源, 有如下形式

$$\mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}) = (\hat{\theta}^i E_\theta + \hat{\phi}^i E_\phi) e^{-jk' r} \quad (2)$$

\mathbf{K}^i 表示入射波的传播方向。用 \mathbf{E}' 则表示微带结构中, 移除上表面金属结构后的反射场, 对于上述平面波入射问题, 它可写成

$$\mathbf{E}^{ref}(\mathbf{r}) = (\hat{\theta}^i R^{TM} E_\theta + \hat{\phi}^i R^{TE} E_\phi) e^{-jk' r} \quad (3)$$

这里的 R^{TM} 和 R^{TE} 分别表示微带结构中, 移去金属表面S时, 空气与介质接口处的入射平面波为横电波及横磁波的反射系数, \mathbf{k}' 表示反射波的传播方向。最后可得

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^{ref}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

混合位积分方程可以写为

$$j\omega\mu_0 \hat{n} \times [\mathbf{A}(\mathbf{r}) + \frac{1}{k_0^2} \nabla \Phi(\mathbf{r})] = \hat{n} \times \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \quad (5)$$

式中, 矢量磁位与标量电位可写成

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \iint_S \bar{G}_A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') d\mathbf{s}' \quad (6)$$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \iint_S G_q(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') d\mathbf{s}' \quad (7)$$

此处 \mathbf{J} 是微带表面上的电流, 它是一个待求量; \bar{G}_A 及 $G_q(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 则分别表示磁矢量位与电标量位的格林函数。并矢 \bar{G}_A 有四个分量, 但对微带平面问题, 只用到 $\hat{x}\hat{x}$ 及 $\hat{y}\hat{y}$ 分量。这两个分量表达形式一样, 用 G_a 表示。 G_a 及 G_q 都可以写成 Sommerfeld 积分形式

$$G_{a, q} = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{G}_{a, q} H_0^{(2)}(k_p p) k_p dk_p \quad (8)$$

式中, $\tilde{G}_{a, q}$ 表示谱域格林函数; $H_0^{(2)}(\cdot)$ 表示零阶第二类汉克尔函数。 $\tilde{G}_{a, q}$ 的形式在文献[3][4] 已经给出, 它的形式如下

$$\tilde{G}_a = \frac{1}{j8\pi k_{x0}} [e^{-jk_{x0}(z-z')} + R_{TE} e^{-jk_{x0}(z+z')}]$$

$$\tilde{G}_q = \frac{1}{j8\pi k_{x0}} [e^{-jk_{x0}(z-z')} + (R_{TE} + R_q) e^{-jk_{x0}(z+z')}]$$

其中, R_{TE} 与 R_q 的定义式参见文献[3~5]。

3 空域格林函数

对微带问题, 积分式(8)没有解析形式的表达

式。我们采用二级离散复像方法^[6]来抽取格林函数的空间闭合形式。为了便于处理矩量法中源点与场点是同一点时的奇异积分抽取, 在进行离散复像之前, 先将 G_a 与 G_q 准静态项中含有奇异性的项抽取出来, 即用来进行二级离散复像的谱域函数是

$$\tilde{G}_a(k_p) = \tilde{G}_a(k_p) - \frac{1}{j2k_{x0}} \quad (9)$$

$$\tilde{G}_q(k_p) = \tilde{G}_q(k_p) - \frac{1}{jk_{x0}} \frac{1}{1 + \epsilon_r} \quad (10)$$

此时, 空域格林函数可以写成

$$G_a = \frac{e^{-jk_r}}{r} + \sum_{k=1}^{M_1^a} a_{1k}^a \frac{e^{-jk_{1k}}}{r_{1k}^a} + \sum_{k=1}^{M_2^a} a_{2k}^a \frac{e^{-jk_{2k}}}{r_{2k}^a} \quad (11)$$

$$G_q = \frac{2e^{-jk_r}}{(1 + \epsilon_r)r} + \sum_{k=1}^{M_1^q} a_{1k}^q \frac{e^{-jk_{1k}}}{r_{1k}^q} + \sum_{k=1}^{M_2^q} a_{2k}^q \frac{e^{-jk_{2k}}}{r_{2k}^q} \quad (12)$$

对积分方程式(5)采用迦辽金矩量法离散, 采用 RWG 基函数, 可以得到

$$j\omega\mu_0 \langle \mathbf{A}_m, \mathbf{A} \rangle - \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \langle \mathbf{A}_m, \nabla \Phi \rangle = \langle \mathbf{A}_m, \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \rangle \quad (13)$$

当基函数与测试函数相同时, 又称为自作用积分, 这时积分算子有奇异性。可以采用抽取奇异项来处理。即将奇异项单独抽取出来, 进行解析积分, 而去除了奇异性剩余下来的积分项采用高斯数值积分方法计算。奇异项的处理可以采用文献[7]中的办法解析计算出来。

4 多层快速多极子技术的应用

为了采用快速多极子技术, 需要将格林函数展开成合适的形式^[8]。采用二级离散复像技术后, 格林函数的统一形式可写成。

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \sum_{p=0}^{N_c} a_p \frac{e^{jk_p r_p}}{4\pi r_p} \quad (14)$$

式中 $r_p = |\mathbf{r} - (\mathbf{r}' + \hat{z}b_p)|$, a_p 及 b_p 是利用离散复像方法得到的复系数。

此时, 将整个平面结构包含在组 G_m ($m=1, 2, \dots, M$) 内。设 \mathbf{r}_i 是在组 G_m 内的场点, \mathbf{r}_j 是在 G_n 组内的源点, 则

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{ij} &= \mathbf{r}_i - (\mathbf{r}_j + \hat{z}b_p) \\ &= (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_m) + (\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n) + (\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_j) - \hat{z}b_p \end{aligned} \quad (15)$$

使用类似自由空间格林函数的计算表达式, 当 $r_{im} > |r_{in} + r_{nj} - \hat{z}b_p|$ 时, 可以写出

$$G(r, r') \approx \frac{k}{j16\pi^2} \sum_{p=0}^{N_c} a_p e^{jk \cdot \hat{r}_p} \cdot e^{-jk \cdot (r_m - r_p)} T(\hat{r}_m \cdot \hat{k}) d^2 k \quad (16)$$

其中

$$T(\hat{r}_m \cdot \hat{k}) = \sum_{l=0}^L (-j)^l (2l+1) h_l^{(2)} (kr_m) P_l(\hat{r}_m \cdot \hat{k})$$

L 是截断参数,由于格林函数比起自由空间来,增加了复镜像项,对分组的要求就要严格。为了能使(16)式成立,要求最细层组的单元尺寸要大于复镜像中最大 $|b_p|$ 值的 $\sqrt{2}/2$ 倍。此时 L 的选取应该是 $L = kv + \ln(\pi + v)$, 其中 $v = \sqrt{d^2 + s^2}$, d 是组内基函数间的最大距离,通常取正方形组的对角线长度, s 则是 $\max |b_p|$ 。此时矩量法系数矩阵远作用区元素可以用如下快速多极子表达式计算。

$$Z_{ij} = \frac{\mu_0 \omega k}{16\pi^2} \left[\sum_{n \in B_m} S^A(\hat{k}) U_{jn}(\hat{k}) \cdot T(\hat{r}_m, \hat{k}) U_{jn}^*(\hat{k}) d^2 \hat{k} - \frac{1}{k^2} \sum_{n \in B_m} S^B(\hat{k}) V_{jn}(\hat{k}) T(\hat{r}_m, \hat{k}) V_{jn}^*(\hat{k}) d^2 \hat{k} \right]$$

其中

$$U_{jn}(\hat{k}) = \iint_{T_i} e^{-jk \cdot r_m} f_i dr$$

$$V_{jn}(\hat{k}) = \iint_{T_i} e^{-jk \cdot r_m} \nabla \cdot f_i dr$$

$$S(\hat{k}) = \sum_{p=0}^{N_c} a_p e^{jk \cdot \hat{r}_p},$$

在利用迭代方法求解时,矩阵矢量相乘运算可以用下面的式子快速计算

$$\sum_{j=1}^N Z_{ij} I_j = \sum_{n \in B_m} \sum_{j \in G_n} Z_{ij} I_j + \frac{\mu_0 \omega k}{16\pi^2} \cdot \left[\sum_{n \in B_m} S^A(\hat{k}) U_{jn}(\hat{k}) \cdot \sum_{j \in G_n} T(\hat{r}_m, \hat{k}) \sum_{j \in G_n} U_{jn}^*(\hat{k}) d^2 \hat{k} - \frac{1}{k^2} \sum_{n \in B_m} S^B(\hat{k}) V_{jn}(\hat{k}) \cdot \sum_{n \in B_m} T(\hat{r}_m, \hat{k}) \cdot \sum_{j \in G_n} V_{jn}^*(\hat{k}) d^2 \hat{k} \right]$$

其中 $i \in G_m$, B_m 表示组 G_m 的包含自身的近作用组。不难将这一算法推广到多层情况。这样处理后,内存消耗与计算复杂度均从 N^2 降到 $N \log N$ 量级。

当求解出表面电流密度的系数后,可以利用互易定理计算散射场或辐射场^[2]。由互易定理

$$\iint E_x \cdot J_{ext} dS = \iint E_{ext} \cdot J_{patch} dS \quad (17)$$

式中, E_x 是待求的散射场; J_{ext} 是为了求散射场而引入的在观察点放置的检验电流源; E_{ext} 是此检验

电流源在贴片处产生的电场, J_{patch} 是问题中求解出来的表面电流密度。若引入的散射方向无穷远处的电流源为

$$J_{ext} = -\hat{v} \frac{4\pi r}{j\omega\mu_0} \delta(r - r') \quad (18)$$

则此时 E_{ext} 等效于方向为 \hat{v} 的单位平面波在贴片处(此时将贴片移去)产生的场,它可以使用式(4)来计算,联合式(17)与式(18)可得散射场的表达式

$$E_x = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi r} e^{-jk_0 r} \iint E_{ext} \cdot J_{patch} dS \quad (19)$$

若取入射平面波的极化方向 \hat{u} , 检验电流源的方向 \hat{v} , 则使用式(19)可以表达出 E_x^w , 从而可以计算出天线的辐射方向图。

5 算例及讨论

为了验证上述算法的有效性,我们给出几个有关微带天线辐射的算例。在分析时采用的计算机配置是 Pentium 4, 主频 2.9 GHz, 内存 512 MB, 采用双精度型浮点数。工程上一般常用的有共轭梯度法 CG, 双共轭梯度法 BICG, 带重启的一般最小余量法 GMRES(m), 在此引入灵活的一般最小余量 FGMRES(m, k) 迭代算法^[3], 其中 m 是重启时的迭代步数, k 表示内迭代的迭代步数, 设置它们的收敛精度是 10^{-3} , 迭代算法的最大迭代步数控制在 2000 以内。FGMRES 内迭代矩阵采用近区作用元素生成的稀疏矩阵 Z_{near} 。

第一个例子分析的是并联线边馈 8×4 结构的天线阵例子,它是将图 1 中虚线右边的结构移除里的情况。表 1 列出了不同迭代方法计算此问题所用的矩阵乘数及时间。从表 1 中可以看出传统的共轭

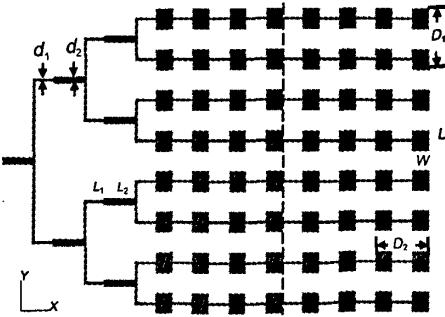


图 1 微带贴片天线单元及其馈线示意图

工作频率 9.42 GHz, 结构中的介电常数为 $\epsilon_r = 2.2$, 高度为 $h = 1.59$ mm, 天线单元尺寸为宽 $W = 10.08$ mm, 长 $L = 11.79$ mm, 馈线的宽度为 $d_1 = 1.3$ mm, $d_2 = 3.93$ mm, 长度为 $L_1 = 12.32$ mm, $L_2 = 18.48$ mm, 单元分布参数为 $D_1 = 23.58$ mm, $D_2 = 22.40$ mm

梯度(CG)迭代算法需要很多的矩阵乘次数,时间相当长。利用求解对称线性方程组的双共轭梯度(BICG)算法则在2000步内无法收敛。表中列出了不同参数的FGMRES迭代解法的收敛效率,我们在比较时,保证了FGMRES所消耗的内存与GMRES(70)所耗的内存一样。可以看出,使用近区作用元素做内迭代来预条件的FGMRES(10,50)算法的加速效果更加明显。

表1 微带贴片天线 8×4 单元用MLFMM(4)时
所用矩阵乘次数(MVP)及时间(秒)

迭代解法	CGNE	BICG	GMRES(70)	FGMRES(30,10)
MVP	3144	1734	1608	157
时间	614	342	327	91
迭代解法	FGMRES(20,30)	FGMRES(15,40)	FGMRES(10,50)	FGMRES(5,60)
MVP	43	31	24	25
时间	59	55	53	66

表2 微带贴片天线 8×8 天线单元用MLFMA(4)时
所用矩阵乘数(MVP)及所耗时间(秒)

解法	CG	BICG	GMRES(70)	FGMRES(10,50)
MVP	3040	不	1542	30
时间	1114	收敛	591	71

第二个例子分析的是图1所示的 8×8 的天线结构,图2显示了计算出来的 8×8 天线的H面辐射方向图,表2列出了不同迭代算法的效率,我们可以看出FGMRES(10,50)的迭代效率依然很高。更多的例子表明,使用 Z_{near} 来内迭代的FGMRES方法在解决微带天线的多层快速多极子方法时加速效果明显。

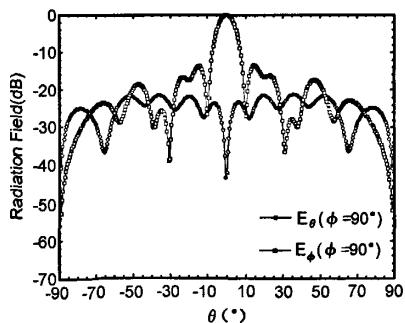


图2 微带馈 8×8 微带天线的电场随 θ 角变化的H面($\phi=90^\circ$)分布图

6 结论

将多层快速多极子用于微带天线的分析中,保留了矩量法精确性的同时得到了明显的加速效果,并且引入了使用近区作用元素组成的矩阵做内迭代的FGMRES方法,进一步提高了传统迭代算法的效率,为工程实践提供了一个有价值的参考。

参考文献

- [1] J R Mosig. Arbitrarily shaped microstrip structures and their analysis with a mixed potential integral equation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1988, 36(2): 314-323.
- [2] F Ling and J M Jin. Scattering and radiation analysis of microstrip antennas using discrete complex image method and reciprocity theorem[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1997, 16(4): 212-216.
- [3] D G Fang, J J Yang, G Y Delisle. Discrete image theory for horizontal electric dipole in a multiplayer medium[J]. Proc. IEE, 1988, 135(10): 297-303.
- [4] 方大纲. 天线理论与微带天线[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 余显烨. 微波集成电路的格林函数法计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [6] M I Aksun. A Robust Approach for the Derivation of Closed-Form Green's Functions[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(5): 651-657.
- [7] P Arcioni, M Bressan, L Perigrini. On the Evaluation of the Double Surface Integrals Arising in the Application of the Boundary Integral Method to 3-D Problems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 1997, 45(3): 436-439.
- [8] J X Wan, T M Xiang, C H Liang. Fast Multipole Method for Analysis of Large-Scale Microstrip Antennas Arrays[J]. PIER, 2004, 49: 239-255.
- [9] Y Saad. Iterative Methods for Sparse Linear systems [M]. PWS Publishing Company, 1996.



樊振宏 (1978—),男,江苏人,南京理工大学讲师,博士,2005年11月至2006年11月在香港城市大学电子工程系无线通信研究中心进修深造,担任Research Assistant。主要研究方向为天线及散射分析中的快速方法。

(下转第271页)

4 结论

提出了一种左手介质表面波天线，并利用严格的模匹配与多模网络相结合的方法分析了不同渐变曲线形状天线的反射与辐射特性。计算结果证实了左手天线的后向辐射特性。文中详细讨论了不同渐变形状对左手介质表面波天线反射特性和辐射方向图的影响，并与传统表面波天线的特性进行了比较，说明了产生不同结果的原因。这些研究结果对此类天线的设计具有实际指导意义。

参考文献

- [1] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Usp. Fiz. Nauk., 1967, 92: 517-526.
- [2] A Alú N Engheta. Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or doublepositive (DPS) layers [J]. IEEE Trans on MTT, 2004, 52(1): 199-210.
- [3] Paolo Baccarelli, et al.. Fundamental Modal Properties of Surface Waves on Metamaterial Grounded Slabs [J]. IEEE Trans on MTT, 2005, 53(4):1431-1442.
- [4] Wu Jianqiang, Xiong Caidong, Liu Shenggang. Excitation of microwave by an annular electron beam in a plasma-filled dielectric lined waveguide [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, 16(9):1573-1581.
- [5] S T Peng, A A Oliner. Guidance and leakage properties of a class of the open dielectric waveguides. Part I: Mathematical formulation [J]. IEEE Trans on MTT, 1981, 29(9): 843-855.
- [6] Meng Huang, Shanjia Xu, Ke Wu. Scattering and radiation characteristics of step discontinuity in left-handed slab waveguide operating in evanescent surface-mode[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27(9): 1293-1306.
- [7] Shanjia Xu, S T Peng. Reflection Analysis for Planar Surface Antennas with Different Tapering Profiles[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, 16(12): 2195-2208.

黄萌 (1982—),男,河北人,中国科学技术大学电子工程与信息科学系博士生,主要从事介质导波结构不连续性问题的研究。



徐善驾 (1939—),男,浙江人,中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授,博士生导师,IEEE Fellow。长期从事微波、毫米波和光波理论和技术方面的教学和科研工作。在国内外共发表论文520余篇。



(上接第 238 页)



丁大志 (1979—),男,江苏人,南京理工大学讲师,博士,2004年7月至2005年7月在香港城市大学电子工程系无线通信研究中心进修深造,担任 Research Assistant。从事电磁场与微波技术专业教学与科研工作。在国内外期刊及会议发表相关论文30多篇,其中18篇被SCI、EI收录。



陈如山 (1965—),男,江苏人,南京理工大学教授,博士生导师,现为中国电子学会高级会员,江苏省天线与微波专业委员会副主任委员,中国电子学会电磁兼容委员会委员,中国兵工学会电磁技术委员会委员,南京理工大学学报编委会委员,2004年获国家杰出青年基金,2007年被聘为教育部“长江学者奖励计划”特聘教授。研究领域包括第四代移动通信理论、通信与信息系统中的快速智能算法、微波毫米波集成电路与系统、电磁脉冲与瞬态电磁场,雷达与电磁兼容技术、计算电磁学。在国内外期刊杂志上发表了论文170多篇,SCI收录的论文90余篇,EI收录的论文80余篇。

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>