

基于 FDTD 的天线远场快速算法

丁君, 于明, 郭陈江, 许家栋

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)



摘要: 将 FDTD 法与二维离散余弦变换 (2D-DCT) 递归算法相结合计算天线远场, 大幅提高了计算效率并降低了计算存储空间。采用 2D-DCT 递归算法对近场数据进行压缩, 得到失真度较小的重构场, 并用该重构场计算天线远场, 数值仿真角反射器天线所得到的结果与实验测量结果吻合良好, 说明该方法的有效性。

关键词: FDTD; 二维离散余弦变换; 递归算法; 角反射器

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2007) 14-3193-03

Fast Algorithm of Antenna Far Field in FDTD

DING Jun, YU Ming, GUO Chen-jiang, XU Jia-dong

(School of Electronic and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An efficient method of computing the antenna far field was introduced, which used the finite difference time domain (FDTD) method combining a recursion algorithm of two dimension discrete cosine transform (2D-DCT). This method improved computing efficiency greatly and saved memory. The corner reflector antenna was calculated using FDTD. A reconstructed near field calculated by 2D-DCT shows little distortion. The far fields received from reconstructed near fields agree with the experimental measuring results.

Key words: FDTD; DCT; recursion algorithm; corner reflector antenna

引言

时域有限差分(FDTD)法^[1]作为一种数值工具, 在电磁散射和辐射分析、微波电路CAD、电磁兼容以及生物电磁分析等方面得到了广泛的应用。特别是在天线的仿真中有助于理解其辐射机理, 弄清方向图随天线结构、频率变化的特点, 为天线设计者提供有价值的参数。然而由于计算机资源有限, FDTD仅能模拟有限空间的时域场。因此, 需要通过近远场变换由时域近场得到天线的远场特性。进行近远场变换的传统方法有: 时域外推^[2-3]和频域外推^[4]。时域外推法用于激励为脉冲源的情况, 即时域迭代, 适合于计算单个方向或若干个方向上的时域场, 通过对时域场进行傅立叶变换得到该方向上的远场宽频带信息。频域外推用于激励为时谐源的情况, 即频域迭代, 适合于计算单个或几个固定频率下的空间任意方向的远场特性。若由时域外推得到全向远场, 或者由频域外推得宽频带的全向远场, 无疑计算量以及存储空间都是十分惊人的。最近有学者提出采用离散余弦变换(DCT)的行列算法^[5], 来克服传统近远场变换方法的缺点。通过二维离散余弦变换对惠更斯表面的场分布进行数据压

缩, 减少惠更斯表面场分布的存储空间。但是对于大尺寸的二维惠更斯面上的数据处理, DCT 行列算法运算量很大, 因此有必要对 2D-DCT 的加速算法进行研究。本文利用递归算法^[6]对 2D-DCT 进行加速, 运算量最高可减少至 2D-DCT 行列算法的 75%。并且 2D-DCT 的递归算法对计算结构无需高度的规则性和系统性, 适于在 FDTD 中对任意尺寸的惠更斯表面上的场分布进行处理, 进一步提高了计算天线辐射场的效率。

1 二维离散余弦变换(DCT)及其逆变换(IDCT)的快速算法

对于 $M \times N$ 的二维实序列 $f(i, j)$, 其二维 DCT 变换公式

$$F(u, v) = \frac{4}{MN} E(u)E(v) \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) \cos\left[\frac{(2i+1)}{2M} u\pi\right] \cos\left[\frac{(2j+1)}{2N} v\pi\right] \quad (1)$$

$(u = 0, 1, \dots, M-1; v = 0, 1, \dots, N-1)$

二维 IDCT 变换公式

$$f(i, j) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} E(u)E(v)F(u, v) \cos\left[\frac{(2i+1)}{2M} u\pi\right] \cos\left[\frac{(2j+1)}{2N} v\pi\right] \quad (2)$$

$(i = 0, 1, \dots, M-1; j = 0, 1, \dots, N-1)$

式中: $E(u) = E(v) = 1/\sqrt{2}$, $u, v = 0$; $E(u) = E(v) = 1$, $u, v \neq 0$ 。
 i, j 是空间域采样值; u, v 是频率域采样值。

下面推导二维 DCT 的递归算法。令

$$F(u, v) = \frac{4}{MN} E(u)E(v)\hat{F}(u, v) \quad (3)$$

$(u = 0, 1, \dots, M-1; v = 0, 1, \dots, N-1)$

则

收稿日期: 2006-05-30 修回日期: 2006-07-10

作者简介: 丁君(1964-), 女, 陕西人, 副教授, 博士, 研究方向为电磁场与微波技术、电磁计算、智能天线等; 于明(1981-), 女, 天津人, 硕士生, 研究方向为电磁场计算及天线分析与设计; 郭陈江(1963-), 男, 陕西人, 教授, 研究方向为电磁场与微波技术、微波电路设计、电磁兼容等; 许家栋(1948-), 男, 陕西人, 教授, 博导, 研究方向为电磁场与微波技术、天线与电磁散射理论等。

$$\hat{F}(u, v) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) \cos\left[\frac{(2i+1)}{2M} u\pi\right] \cos\left[\frac{(2j+1)}{2N} v\pi\right] \quad (4)$$

$(u=0, 1, \dots, M-1; v=0, 1, \dots, N-1)$

为方便推导, 设 M 、 N 均为偶数

$$\begin{aligned} a_1(i, j) &= [f(i, j) + f(M-i-1, j)] + \\ &\quad [f(i, N-j-1) + f(M-i-1, N-j-1)] \\ b_1(i, j) &= [f(i, j) + f(M-i-1, j)] - \\ &\quad [f(i, N-j-1) + f(M-i-1, N-j-1)] \\ c_1(i, j) &= [f(i, j) - f(M-i-1, j)] - \\ &\quad [f(i, N-j-1) - f(M-i-1, N-j-1)] \\ d_1(i, j) &= [f(i, j) - f(M-i-1, j)] - \\ &\quad [f(i, N-j-1) - f(M-i-1, N-j-1)] \\ (i &= 0, 1, \dots, M/2-1; j = 0, 1, \dots, N/2-1) \end{aligned} \quad (5)$$

首先, 计算四个 $M/2 \times N/2$ 二维序列

$$\begin{aligned} a(i, j) &= a_1(i, j) \\ b(i, j) &= b_1(i, j) * 2 \cos\left[\frac{(2j+1)\pi}{2N}\right] \\ c(i, j) &= c_1(i, j) * 2 \cos\left[\frac{(2i+1)\pi}{2M}\right] \\ d(i, j) &= d_1(i, j) * 4 \cos\left[\frac{(2i+1)\pi}{2M}\right] \cos\left[\frac{(2j+1)\pi}{2N}\right] \\ (i &= 0, 1, \dots, M/2-1; j = 0, 1, \dots, N/2-1) \end{aligned} \quad (6)$$

然后, 计算如下四个 $M/2 \times N/2$ 的二维 DCT

$$\begin{aligned} A(u, v) &= \sum_{i=0}^{M/2-1} \sum_{j=0}^{N/2-1} a(i, j) \cos\left[\frac{(2i+1)}{M} u\pi\right] \cos\left[\frac{(2j+1)}{N} v\pi\right] \\ B(u, v) &= \sum_{i=0}^{M/2-1} \sum_{j=0}^{N/2-1} b(i, j) \cos\left[\frac{(2i+1)}{M} u\pi\right] \cos\left[\frac{(2j+1)}{N} v\pi\right] \\ C(u, v) &= \sum_{i=0}^{M/2-1} \sum_{j=0}^{N/2-1} c(i, j) \cos\left[\frac{(2i+1)}{M} u\pi\right] \cos\left[\frac{(2j+1)}{N} v\pi\right] \\ D(u, v) &= \sum_{i=0}^{M/2-1} \sum_{j=0}^{N/2-1} d(i, j) \cos\left[\frac{(2i+1)}{M} u\pi\right] \cos\left[\frac{(2j+1)}{N} v\pi\right] \\ (u &= 0, 1, \dots, M/2-1; v = 0, 1, \dots, N/2-1) \end{aligned} \quad (7)$$

最后, 利用递归计算如下表达式

$$\begin{aligned} \hat{F}(2u, 2v) &= A(u, v) \quad (u = 0, 1, \dots, M/2-1; v = 0, 1, \dots, N/2-1) \\ \hat{F}(2u, 1) &= \frac{1}{2} B(u, 0) \quad (u = 0, 1, \dots, M/2-1) \\ \hat{F}(2u, 2v+1) &= B(u, v) - \hat{F}(2u, 2v-1) \\ (u &= 0, 1, \dots, M/2-1; v = 1, 2, \dots, N/2-1) \\ \hat{F}(1, 2v) &= \frac{1}{2} C(0, v) \quad (v = 0, 1, \dots, N/2-1) \\ \hat{F}(2u+1, 2v) &= C(u, v) - \hat{F}(2u-1, 2v) \\ (u &= 1, 2, \dots, M/2-1; v = 0, 1, \dots, N/2-1) \\ \hat{F}(1, 1) &= \frac{1}{4} D(0, 0) \\ \hat{F}(2u+1, 1) &= \frac{1}{2} D(u, 0) - \hat{F}(2u-1, 1) \quad (u = 1, 2, \dots, M/2-1) \\ \hat{F}(1, 2v+1) &= \frac{1}{2} D(0, v) - \hat{F}(1, 2v-1) \quad (v = 1, 2, \dots, N/2-1) \\ \hat{F}(2u+1, 2v+1) &= P(u, v) - \hat{F}(2u+1, 2v-1) \quad (8) \\ (u &= 1, 2, \dots, M/2-1; v = 1, 2, \dots, N/2-1) \end{aligned}$$

式(8)中的 $P(u, v)$ 由式(9)进行递归计算得到

$$\begin{aligned} P(0, v) &= \frac{1}{2} D(0, v) \quad (v = 1, 2, \dots, N/2-1) \\ P(u, v) &= D(u, v) - P(u-1, v) \quad (9) \\ (u &= 1, 2, \dots, M/2-1; v = 1, 2, \dots, N/2-1) \end{aligned}$$

将递归计算得到的式(8)代入式(4), 便得到二维 DCT 的结果。上述推导过程是建立在 M 、 N 均为偶数的前提下。在实际应用中, 可能会遇到 M 、 N 有一个或两个均不满足上述前提的情况。在这种情况下, 可以采用补零的方法增加序列的长度而保持序列的值不变。

下面比较 DCT 的递归算法与行列算法的运算量。

若用 $M_u(M, N)$ 、 $A_d(M, N)$ 表示 $M \times N$ 的二维 DCT 的实运算量。设 $M = 2^r$ 和 $N = 2^s$ (r 、 s 为自然数), 因此一个 $M \times N$ 的二维 DCT 递归算法的运算量为

$$\left\{ \begin{array}{l} M_u(M, N) = 4M_u\left(\frac{M}{2}, \frac{N}{2}\right) + \frac{3}{4}MN \\ = \frac{1}{2}MN \log_2 \max(M, N) + \\ \frac{1}{4}MN \log_2 \min(M, N) \\ A_d(M, N) = 4A_d\left(\frac{M}{2}, \frac{N}{2}\right) + 3MN - M - N \\ = \frac{3}{2}MN \log_2 MN - 2MN + M + N \end{array} \right. \quad (10)$$

若利用行列算法计算二维 DCT, 其运算量为

$$\left\{ \begin{array}{l} M_u(M, N) = \frac{1}{2}MN \log_2 MN \\ A_d(M, N) = \frac{3}{2}MN \log_2 MN - 2MN + M + N \end{array} \right. \quad (11)$$

通过比较式(10)、(11)可知, 当计算 $M \times N$ 二维 DCT 时, 递归算法与行列算法具有相同的加法量, 但是乘法量减少 $0.25MN \log_2 \min(M, N)$ 。特别地, 当 $M = N$ 时, 递归算法的乘法量相对于行列算法的乘法量减少 25%。对于二维 IDCT 其递归推导公式原理与 DCT 相似, 仅在系数上有差别, 由于篇幅所限, 不再赘述。

2 数值结果

以角反射器天线为例, 验证本文所提出的方法的有效性。角反射器天线结构如图 1 所示, 由两片长 l , 宽 w 的金属薄板, 以夹角 ψ 相交而成, 其中一个反射板位于 xoz 平面。激励源为高斯脉冲激励的偶极子天线, 它距相交轴的距离为 ρ_0 , 与 xoz 平面的夹角为 ϕ_0 。计算参数选取: $l = 120\text{mm}$, $w = 120\text{mm}$, $\psi = 60^\circ$, $\phi_0 = 30^\circ$, $\rho_0 = 30\text{mm}$, FDTD 计算区域 $81 \times 75 \times 81$, 惠更斯面的区域为 $[(10:71), (10:65), (10:71)]$, $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3.0\text{mm}$, $\Delta t = 5.777\text{ps}$, 时间步数 $n = 2000$, 最大工作频率 9.9GHz 。采用廖氏吸收边界条件。

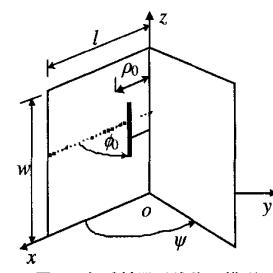


图 1 角反射器天线物理模型

根据采样定理及该天线的工作频率上限确定一个周期

内的采样时间步间隔为 9。当时域近场达到稳定后, 每隔 9 个时间步便对惠更斯面上分布的场量采用递归算法的离散余弦变换进行数据压缩。图 2(a)、(b) 是 $n = 311$, xoy 面上的 E_z 原始场分布与重构场分布的比较。

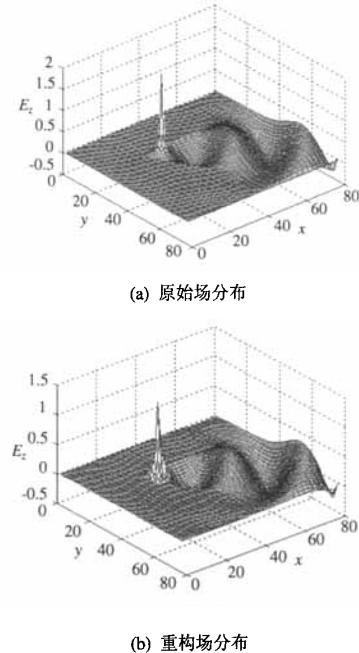


图 2 $z=w/2$ 处的 E_z 场分布

图 3 给出 E_z 原始场分布在该平面上经过 2D-DCT 变换后的变换谱。由图 3 可知, 对原始场分布的数据经过 DCT 变换到频率域后, 反映图像主要信息的分量占原始场分布区域的 15%, 因此可以仅存储占原始场 15% 的数据再通过 IDCT 来恢复场的信息, 达到压缩数据的目的。利用压缩后的数据进行场的重构, 比较图 2(a) 和 (b), 显然, 重构场失真度很小。可见, 该方法的确可以节约大量的数据存储空间。

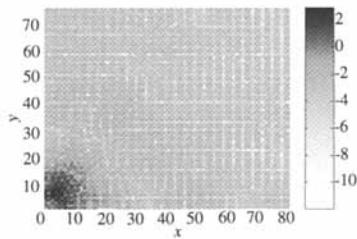
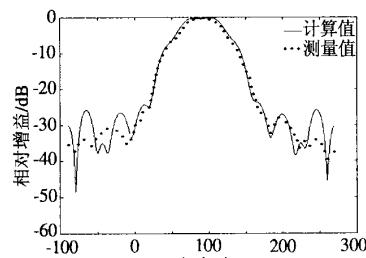
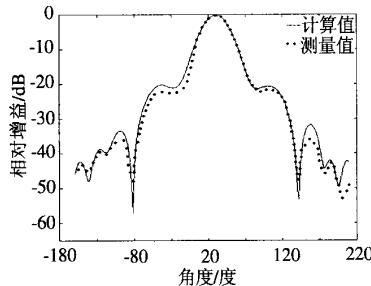


图 3 DCT 变换后的二维变换谱

当 FDTD 近场计算完成后, 对惠更斯面上所分布的场量的压缩数据采用递归算法的离散余弦逆变换进行数据解压, 重构时域场分布。利用近远场变换对重构场分布进行计算可以得到角反射器天线的方向图。图 4 为总场 E 的远场方向图。由图可见, 计算值与实验测量值^[7]相当吻合。图 5 给出分别利用惠更斯表面上的原始场分布与重构场分布计算所得的远场方向图。显然, 两者吻合良好。



(a) E 面方向图



(b) H 面方向图

图 4 工作频率为 5.0GHz 时的远场方向图

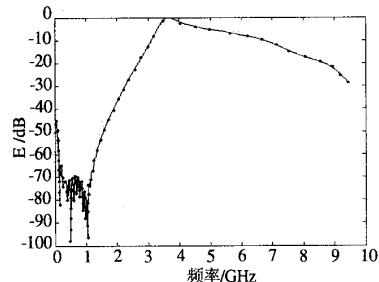


图 5 $\theta=90^\circ$, $\varphi=30^\circ$ 的远场

表 1 给出针对本文所用的天线的 FDTD 模型, 分别利用本文所提出的二维离散余弦变换的递归算法与通常所采用的二维离散余弦变换的行列算法在计算量, 以及额外计算时间相对值(额外计算时间相对值是指添加 DCT 对惠更斯表面场分布的处理运算的 FDTD 近场计算运行时间与不存储惠更斯表面场的 FDTD 近场计算运行时间的比值)的比较结果, 其中的数据结果是在 P4, 2.80GHz, 内存为 1.0G 的计算机上运行得出。由表 1 可以看出, 二维离散余弦变换的递归算法比行列算法在额外计算时间上减少约 35%, 并且额外计算时间相对于不存储惠更斯表面的分布场的 FDTD 近场计算运行时间仅有不足 7% 的增加。对于 FDTD 计算中大尺寸的惠更斯表面场分布进行数据压缩, 利用二维离散余弦变换的递归算法可以节约大量的运行时间, 提高计算效率。

表 1 2D-DCT 递归算法与行列算法的计算量比较

	乘法计算量	加法计算量	额外运算时间相对值
递归法	2.0510E7 次	7.5608E7 次	1.0627
行列法	2.7272E7 次	7.5608E7 次	1.4150

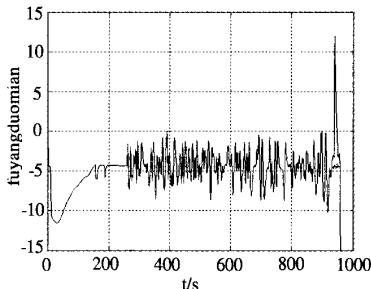


图 5 倾仰舵面变化曲线

4 结论

从以上弹道仿真曲线可以看出,本文设计的规划方法生成的优化弹道能够很好地进行地形跟随飞行,弹道各项参数指标在地形跟随飞行段均能控制在合理的范围内,导弹飞行能保持在50m至150m的离地高度安全走廊内,且由地形起伏引起的参数变化并不使系统发散,飞行的功角、俯仰角和舵面变化均在合理的飞行状态内,跟随飞行工作稳定,算法规划300公里左右的地形约在20s,具有较快的实时规划能力。通过上述的仿真算例可以看出,本文采用的控制编码的

(上接第3195页)

图6为二维离散余弦变换的递归算法相对于行列算法的运算减少量随 $(\max(M, N)/\min(M, N))$ 变化的曲线图。从该图可以看出当M与N的大小越接近时,递归算法相对于行列算法的运算减少量越明显。这为选取惠更斯表面的尺寸提供了一定的参考,但同时也要考虑到计算空间的存储量的问题,从而使算法在计算时间和存储空间方面都得到较好的协调。

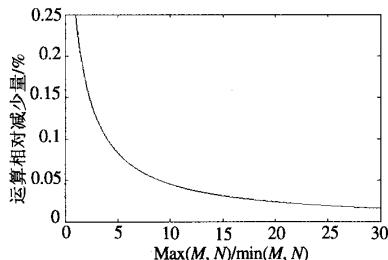


图 6 2D-DCT 递归算法相对行列算法的运算减少量

3 结论

本文将FDTD与数据压缩技术相结合,根据近远场变换原理计算天线远场。采用二维离散余弦变换的递归算法进行加速计算,与行列算法相比最大可缩减25%的乘法运算量。同时对于角反射器天线惠更斯表面分布的场量压缩率可达

改进遗传算法在处理复杂地形与威胁下的低空突防路线规划问题时具有很好的效果。本文对遗传算法的改进极大的提高了算法的适应性和计算速度,并能处理复杂地形下威胁不连续的情况,克服了标准遗传算法在工程应用上的缺陷,具有很好的实用价值。

参考文献:

- [1] 杨剑影. 低空突防三维优化轨迹的生成与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1545-1547. (YANG Jian-ying. An Optimal Route-planning Method for Low Penetration Trajectory Based on Genetic Algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(7): 1545-1547.)
- [2] 闵昌万. 飞行器航迹规划研究 [D]. 西北工业大学, 1999: 55-59.
- [3] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [4] 尚磊云. 空面导弹系统的建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 771-773. (SHANG Lei-yun. Modeling and Simulation of Air-to-Surface Missile System [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 771-773.)
- [5] 商重阳. 基于面向对象技术的飞行控制系统仿真框架 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 472-474. (SHANG Chong-yang. Flight Control System Simulation Framework Based on Object-Oriented Technology [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2): 472-474.)

85%, 大幅节省了计算存储空间。利用重构场得到的天线方向图与实验测量结果以及利用原始场得到的天线方向图均吻合良好。可见,在FDTD的近远场变换计算天线远场中结合二维离散余弦变换的递归算法的确能够提高计算效率,缩减存储空间,准确性高。

参考文献:

- [1] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法 [M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2002.
- [2] Martin T. An Improved Near to Far Zone Transformation for the Finite Difference Time Domain Method [J]. IEEE Trans. On Antenna and Propagation(S0018-926X), 1998, 46(9):1263-1271..
- [3] 沈爱国, 宋铮, 邢军. FDTD 近场到远场的时域转换 [J]. 微波学报, 2001, 17(3): 36-42.
- [4] Luebers R J, Kunz K S, Schneider M A. A Finite-Difference Time-Domain Near Zone to Far Zone Transmission [J]. IEEE Trans. On Antenna and Propagation (S0018-926X), 1991, 39(4):429-433.
- [5] Zhou Baixin, Wang Sicong, Yu Wenhua. An Efficient Approach to Predict Far Field Pattern in FDTD Simulation [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters (S1536-1225), 2004, 3: 148-151.
- [6] Fang WH, Hu NC, Shih SK. Recursive Fast Computation of the Two-Dimensional Discrete Cosine Transform [J]. IEE Proceedings Vision, Image, and Signal Processing(S1350-2417), 1999, 146(1): 25-33.
- [7] Wilson A C, Cotton H V. Radiation Patterns of Finite-Size Corner-Reflector Antennas [J]. IEEE Trans. On Antenna and Propagation, (S0096-1973), 1960, 8(2): 144-157.

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>