

基于 MUSIC 算法的天线系数测量信号分析方法

刘星汛^{1,2}, 张涛¹

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100058)

摘要: 基于自由空间场地衰减数学模型, 提出多重信号分类(MUSIC)算法的信号分析方法, 从在固定天线高度测量的场地衰减信号中, 提取直射波场地衰减量, 推算远场天线系数。取谐振频率为 500 MHz 的半波偶极子天线为研究对象, 在 300 MHz~1 GHz 频率范围内进行实验验证。结果表明, 此分析方法提取的直射波场地衰减与采用矩量法的仿真值吻合较好, 利用此场地衰减推算的远场天线系数与 CISPR16-1-6 的标准场地法测量的天线系数一致性较好, 此算法可以用于天线系数测量的信号提取。

关键词: 天线系数; MUSIC 算法; 天线; 信号处理

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2014)10-0909-05

MUSIC Algorithm-Based Signal Analysis Method of Antenna Factor Measurement

Liu Xingxun^{1,2}, Zhang Tao¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100058, China)

Abstract: A signal analysis method based on multiple signal classification (MUSIC) is proposed for distilling the site attenuation (SA) of direct wave from SA measurement with antenna at fixed height. Based on free-space site attenuation mathematic model, the far field antenna factor was calculated using the direct wave SA. A half-wave dipole antenna with tune frequency 500 MHz was used in experimental measurement in the frequency range of 300 MHz~1 GHz. The direct wave SA agreed well with simulation with the method of moments (MoMs). The far field antenna factor calculated was well consistent with the value measured using standard site method (SSM) of CISPR 16-1-6. Therefore the antenna factor measurement signal can be extracted by the signal analysis method based on MUSIC efficiently.

Keywords: antenna factor; MUSIC algorithm; antenna; signal processing

在电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC)辐射发射试验中, 常常用天线作为辐射接收设备。天线系数是 EMC 天线最重要的参数, 天线测量位置的辐射场强 $E = U + F_a$ (其中 U 为测量信号耦合在天线端口处所产生的电压, F_a 为测量天线的天线系数), 待测信号辐射场强测量值与所用天线的天线系数直接相关, 天线系数测量的准确性直接影响到辐射测试的结果。因此天线在使用之前需对其天线系数进行测量。

天线远场天线系数校准常常采用标准场地法, 标准^[1-2]规定了天线系数校准所使用的场地要求和测试方法, 频率 30 MHz~1 GHz 以下的发射天线架高 2 m, 接收天线 1~4 m 扫描。此种方法能准确地测量出天线的远场天线系数, 但是在每个频率点, 接收天线都要扫描多次才能找出测量的最大场强, 耗时多, 效率低。

Bennett 等^[3]和 McConnell^[4]提出发射、接收天线在固定高度上测量天线系数的方法, 虽然耗时小, 但

收稿日期: 2013-08-05; 修回日期: 2014-01-05。

基金项目: 国防科工局资助项目。

作者简介: 刘星汛 (1982—), 女, 博士。

通讯作者: 刘星汛, xun_zi_jing@163.com。

网络出版时间: 2014-03-25。 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.784/tdxbz201308011.html>。

是存在场地的微小差异而造成场强测量值的巨大偏差等问题。Smith 等^[5]提出标准场地法是基于 FCC 场地衰减理论, 地面反射波对 Friis 自由空间方程平均影响在 4.7 dB, 采用接收天线 1~4 m 扫描测量最大场强可以避免场强测量偏差大的问题, 其问题的本质是地面差异影响了地面反射波的特性参数从而导致接收天线处接收的直射波与地面反射波场强叠加的差异。

笔者基于多重信号分类(MUSIC)算法^[6], 通过将信号的协方差矩阵进行奇异值分解, 将信号与噪声分开, 构造信号空间谱函数, 通过功率谱峰值搜索, 可以判断信元的一维距离像, 将此信号分析方法用于天线系数的校准, 可以区分噪声、直射波和反射波所引起的场地衰减, 从而在固定天线高度条件下, 实现天线系数的准确测量。

1 基于空间平滑处理(SSP)的 MUSIC 算法

1.1 基于 SSP 处理的 MUSIC 算法

MUSIC 算法^[6]是一种基于矩阵特征空间分解的方法, 将所观测的信号空间分解成信号子空间和噪声子空间。具体有 4 个步骤。

步骤 1 求测量信号的相关矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 。

假设接收天线测量的场地衰减信号 A 在某采样频率点 f_i ($i = 1, 2, \dots, n$, n 为数据点数) 处的值为 y_i , 则 y_i 包含了直射波信号 $A_{\text{FS},i}$ 、地面反射波信号 $A_{\text{RF},i}$ 和障碍物散射信号 $A_{\text{SC},i}$ 以及其他噪声信号 c_i , 则电磁波到达接收天线的传输方程为

$$y_i = A_{\text{FS},i} e^{-j2\pi f_i t_{\text{FS}}} + A_{\text{RF},i} e^{-j2\pi f_i t_{\text{RF}}} + A_{\text{SC},i} e^{-j2\pi f_i t_{\text{SC}}} + c_i \quad (1)$$

式中: t_{FS} 为直射波到达接收天线的传输时间; t_{RF} 为地面反射波的传输时间; t_{SC} 为障碍物散射波的传输时间。

将测量频率范围分成若干个窄带, 在每个窄带范围内, 由于各采样点频率接近, 场地衰减信号可视为常数, 每个窄带范围内均匀采样 L 次共得到 L 个数据样本, 将采样数据样本分成 M 个子阵列, 每个子阵列含有 N 个采样点, $L = N + M - 1$, 如图 1 所示, 子阵列中的测量信号矩阵 \mathbf{Y} 由 N 个 y 组成, 可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f_1 t_{\text{FS}}} & e^{-j2\pi f_1 t_{\text{RF}}} & e^{-j2\pi f_1 t_{\text{SC}}} \\ e^{-j2\pi f_2 t_{\text{FS}}} & e^{-j2\pi f_2 t_{\text{RF}}} & e^{-j2\pi f_2 t_{\text{SC}}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{-j2\pi f_N t_{\text{FS}}} & e^{-j2\pi f_N t_{\text{RF}}} & e^{-j2\pi f_N t_{\text{SC}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{FS}} \\ \mathbf{A}_{\text{RF}} \\ \mathbf{A}_{\text{SC}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

可以简化矩阵的形式为

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{a}(t_{\text{FS}}) \quad \mathbf{a}(t_{\text{RF}}) \quad \mathbf{a}(t_{\text{SC}})] \mathbf{S} + \mathbf{C} = \mathbf{A}_1 \mathbf{S} + \mathbf{C} \quad (3)$$

式中: \mathbf{Y} 为 $N \times 1$ 维数据矢量, 由 N 个 y 组成; \mathbf{A}_1 为 $N \times 3$ 维信号传输时间矩阵; \mathbf{S} 为 3×1 维空间信号矢量; \mathbf{C} 为 $N \times 1$ 维噪声数据矢量。

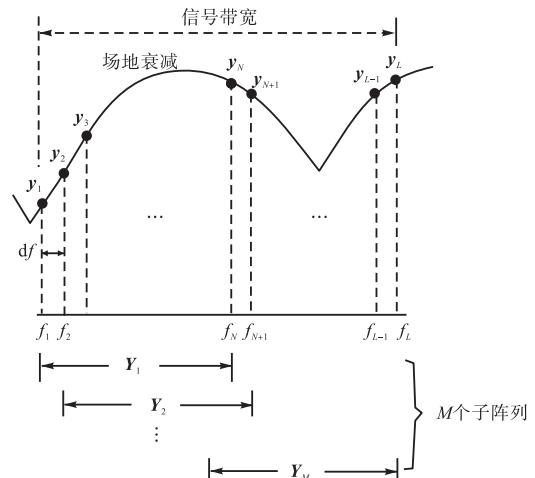


图 1 测量信号采样方法

Fig.1 Sampling method for measurement signal

假设在频带范围内, 共进行 L 次采样观测, 得到 L 个观测数据样本, 数据矢量矩阵的相关矩阵为

$$\hat{\mathbf{R}}_k = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \mathbf{y}_k(i) \mathbf{y}_k(i)^H \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{R}}_k$ 为第 k 个子阵列的数据矢量矩阵的相关矩阵, 其中 k 为 $1 \sim M$ 的任意值; $\mathbf{y}_k(i)$ 为第 k 个子阵列中的第 i 个数据矢量 ($i = 1, 2, \dots, n$); H 为共轭转置。

步骤 2 数据矢量 SSP 前处理。

由于 MUSIC 算法不能很好地分辨相关信号, 因此采用 SSP 算法^[7]对数据矢量进行去相关处理。

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{ssp}} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \hat{\mathbf{R}}_k \quad (5)$$

式中 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{ssp}}$ 为 SSP 前处理后的数据相关矩阵。

步骤 3 对 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{ssp}}$ 进行特征值分解, 确定信号子空间 $\hat{\mathbf{U}}_s$ 和噪声子空间 $\hat{\mathbf{U}}_n$, 根据功率谱函数进行峰值搜索, 对自相关函数 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{ssp}}$ 进行特征值分解, 其中特征值为 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$, 对应的特征向量为 (e_1, e_2, \dots, e_m) , 根据 MUSIC 算法特性^[6], 噪声子空间由相关矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{ssp}}$ 中所有最小特征值(噪声方差)对应的特征向量 $\hat{\mathbf{U}}_n$ 组成, 它与信号子空间矩阵 \mathbf{A}_1 正交, 根据功率谱函数进行峰值搜索, 其中峰值极大点所对应的时间, 即是各信号到达接收天线的传输时间

$$\mathbf{P}_{\text{MUSIC}}(t) = \frac{\mathbf{a}(t)^H \mathbf{a}(t)}{\mathbf{a}(t)^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}(t)} \quad (6)$$

步骤4 计算自由空间场地衰减 A_{FS}

A_{FS} 、 A_{RF} 、 A_{SC} 的计算式^[8]为

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} A_{FS} \\ A_{RF} \\ A_{SC} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}_I^H \mathbf{A}_I)^{-1} \mathbf{A}_I^H \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \mathbf{y}_k(i) \quad (7)$$

1.2 算法实现

整个算法是在 Matlab6.5 中实现的, MUSIC 算法数据处理流程如图 2 所示。

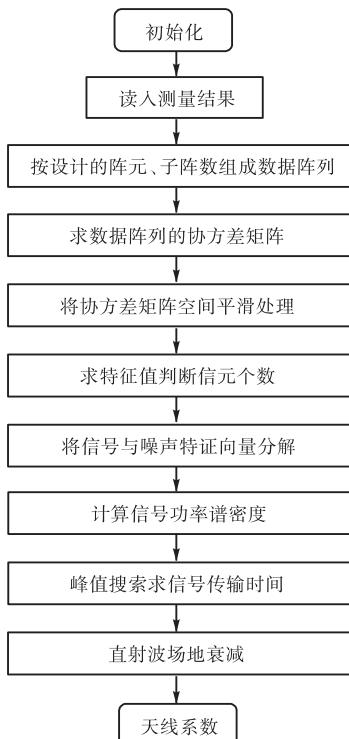


图 2 信号处理流程

Fig.2 Flow chart of signal processing

2 实验验证及结果分析

为了验证算法的有效性,选用场强可精确计算,谐振频率为 500 MHz 的一对半波偶极子天线(HZ-12、HZ-13)作为研究对象,由于 300 MHz 以下,偶极子接收的信号幅值太小,因此选择频率测量范围为 300 MHz ~ 1 GHz。采用矢量网络分析仪(AV3629D)作为信号发生和接收设备。

2.1 偶极子天线系数测量方法

如图 3 所示,天线系数测量在半电波暗室中进行,发射天线与接收天线垂直极化,且架高 h ,相距 d (此处取 $h = 4$ m, $d = 3$ m),接收天线收到 2 路电磁波信号,一路是发射天线发出的电磁波直接被接收天线接收,另一路是发射天线发出的电磁波经地面反射进入接收天线^[9]。2 路信号进入接收天线的时间差为

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\sqrt{d^2 + 4h^2} - d}{c} \quad (8)$$

式中: d 为天线之间的距离; h 为天线架设的高度; c 为光的传播速度。

假设接收天线测量的场地衰减信号为 A ,直射波对场地衰减贡献为 A_{FS} 、地面反射波对场地衰减贡献为 A_{RF} ,根据直射波与发射波的传输时间差,将测量的场地衰减信号 A 通过 MUSIC 算法提取自由空间场地衰减 A_{FS} 。

根据 CISPR 16-1-6^[1],自由空间场地衰减数学模型(无地面反射波和任何反射物)为

$$A_{FS} = F_{at} + F_{ar} + 20 \lg \frac{39.8}{f} - 20 \lg \frac{1}{d} \quad (9)$$

式中 f 为频率, MHz。

当发射天线与接收天线相同时, $F_{at} = F_{ar}$, 则天线系数为

$$F_a = \frac{1}{2} A_{FS} - 10 \lg \frac{39.8d}{f} \quad (10)$$

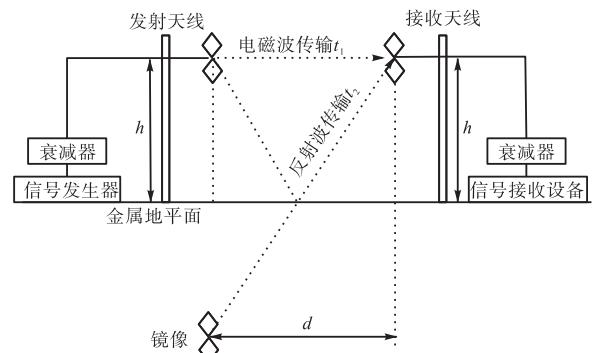


图 3 天线系数测量示意

Fig.3 Antenna factor measurement layout

2.2 实验结果及分析

按照以上描述的布置条件, 测量偶极子天线的场地衰减, 结果如图 4 所示, 将测量的场地衰减 A 进行 SSP 前处理 MUSIC 算法信号分析, 取子阵元个数为 10, 频率步进 5 MHz, 信号带宽 BW 分别取 20 MHz、30 MHz、50 MHz, 其功率谱峰值搜索结果如图 5 所示, 带宽越大, 搜索效果越好, 然而在程序中, 单个带宽频率范围内, 认为场地衰减相同, 而实际上不同频率场地衰减不同, 因此加大带宽同时会使引入的误差变大。图 5 中当带宽较窄(取 20 MHz)时, 功率谱只有 1 个峰值, 这是因为信号域搜索区模糊, 不能搜索到所有信源, 当带宽加大到 30 MHz、50 MHz 时, 功率谱出现 2 个峰值, 可清晰地分辨出直射波和反射波 2 路信号, 2 个峰值对应的时间差为

21 ns, 与理论值 18.5 ns 吻合较好.

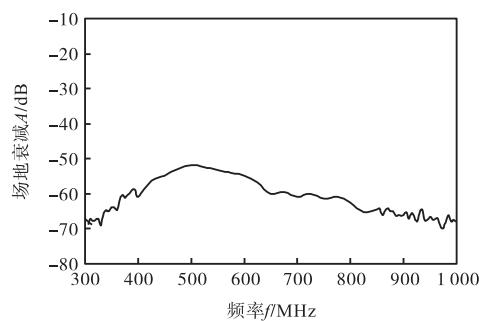


图 4 偶极子天线场地衰减 A 测量值

Fig.4 A measurement values of dipole antenna

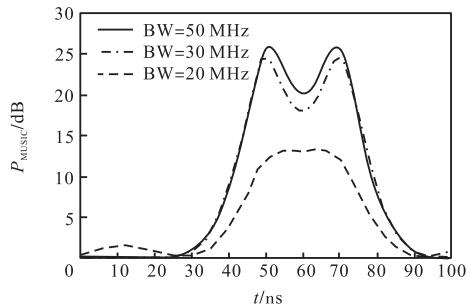


图 5 MUSIC 算法信号处理后功率谱

Fig.5 Power spectra after MUSIC algorithm signal processing

图 6 为 MUSIC 处理后的自由空间天线系数 F_a 处理值和半波偶极子天线 A_{FS} 仿真值比较; 图 7 为两者之间的差值. 仿真不考虑阻抗匹配、线缆损耗、环境噪声等实际情况所引入的不确定度, 采用矩量法模拟两个相同的半波偶极子天线在架设 4 m 高度、之间相隔距离 3 m 条件下的自由空间场地衰减值^[10]. 从图 6 和图 7 可知, MUSIC 信号处理后的场地衰减 A_{FS} 与理论仿真值吻合较好, 整个频段内, 场地衰减相差均在±1 dB 以内, 在 1 GHz 频率点上, 场地衰减误差最大为 −0.8 dB, 是因为偶极子天线在 1 GHz 已经到达工作频率限值, 接收的信号幅值小, 信噪比相对较小, 所以使误差变大.

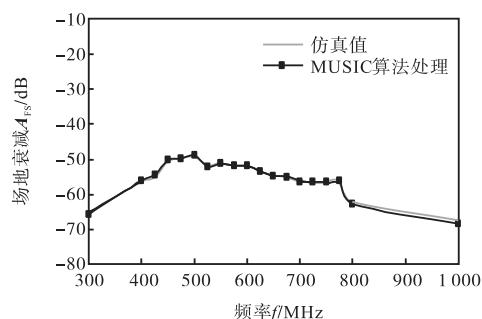


图 6 A_{FS} 的 MUSIC 算法信号处理值和仿真值

Fig.6 A_{FS} data of simulator and processing data with MU-SIC algorithm

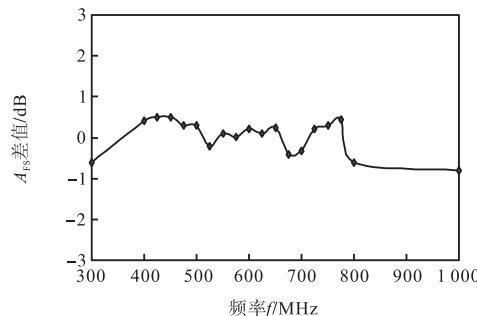


图 7 MUSIC 算法处理值与仿真值的差值

Fig.7 Difference between processing data with MUSIC algorithm and simulator

图 8 为偶极子天线的天线系数; 2条曲线分别为 MUSIC 算法信号处理后所得的自由空间天线系数 A_{FS} (代入式 (10) 的计算结果) 和采用标准场地法^[1-2] SSM 测量的天线系数校准结果. 从图 8 可知, 除了频率点 300 MHz、1 GHz 两点以外, 采用信号处理方法所计算的天线系数与标准场地法天线系数校准值相差在 0.5 dB 以内, 充分证明基于 MUSIC 算法的信号分析方法能够有效地将不同信源区分, 实现了频率低于 1 GHz 以下的电磁兼容天线的远场天线系数在固定架设高度下的准确测量, 避免了标准场地法测量过程中 1~4 m 天线扫描, 可缩短天线计量时间, 提高天线计量效率.

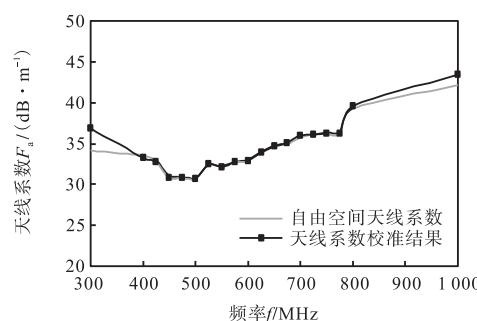


图 8 偶极子天线系数的信号处理值与校准值

Fig.8 Signal processing values and calibration values of dipole antenna factor

3 结语

本文研究了一种基于 MUSIC 算法的 EMC 测试天线的天线系数测量信号分析方法, 通过信号传输时间差, 将直射波与反射波信号区分, 实现了直射波信号场地衰减分量的提取. 实验结果表明, 天线架设在固定高度, 通过此信号分析方法能有效地计算出天线的远场天线系数.

根据此信号分析方法的去噪原理,分析天线校准场地环境不理想对测量信号产生的噪声特点,将可用于天线系数现场校准结果的修正。

参考文献:

- [1] Draft CISPR 16-1-6 EMC Antenna Calibration [S]. FDIS, 2012.
- [2] ANSI C 63.5—2006 American National Standard for Electromagnetic Compatibility-Radiated Emission Measurement in Electromagnetic Interference(EMI) Control-Calibration of Antennas(9 kHz to 40 GHz) [S]. New York, USA, 2006.
- [3] Bennett W S, Taggart H E. Characterization of a far-field EMI test site with ground screen[C]// *The 3rd Symposium Technical Exhibit*. Rotterdam, the Netherlands, 1979: 507-513.
- [4] McConnell R A. A method of determining free space antenna factor on an open area test site[C]// *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Washington, DC, USA, 2000, 2: 499-504.
- [5] Smith A A, German R F, Pate J B. Calculation of site attenuation from antenna factors[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1982, 24(3): 301-315.
- [6] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Trans on Antennas Propag*, 1986, 34(3): 276-280.
- [7] Chen Yimin. On spatial smoothing for two-dimensional direction of arrival estimation of coherent signals[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1997, 45(7): 274-278.
- [8] Yamada H, Ohmiya M, Ogawa Y, et al. Super resolution techniques for time-domain measurements with a network analyzer[J]. *IEEE Trans on Antennas Propag*, 1991, 39(2): 177-183.
- [9] Zhang Wei, Xi Xiaoli. Analysis and simulation of the direction of arrival estimation algorithm of spatial signal [C]// *The 8th International Conference on EMI*. Xi'an, China, 2007: 576-579.
- [10] Jungkuy P, Dongchan J, Hoon Y, et al. Mutual comparison on calibration of free-space antenna factor for EMI antenna in 30 MHz—1 GHz[C] // *The 19th Asia-Pac Symp EMC*. Singapore, 2008: 875-878.

(责任编辑: 孙立华)

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>