

【本文信息】杨雷,王勇,王丹.一种新的多天线 SC-FDE UWB 系统信噪比估计方法[J].电视技术,2013,37(15).

# 一种新的多天线 SC-FDE UWB 系统信噪比估计方法

杨雷,王勇,王丹

(河南科技大学 电子信息工程学院,河南 洛阳 471023)

【摘要】为辅助实现多天线单载波频域均衡超宽带系统相干检测,提出一种新的信噪比估计方法。该方法在不同发射天线传输满足空间复用条件的导频序列,接收端首先获得多天线子信道最小二乘估计,再根据信道共轭对称特性构造噪声采样矢量,然后应用克拉美罗定理获得噪声方差信息,最后联合二者计算系统的信噪比值。仿真结果表明:和传统方法不同,提出方法不仅在高信噪比端大大提高了估计精度,而且可以和简单易执行的最小二乘信道估计器同时使用。

【关键词】超宽带;多输入多输出;信噪比估计;噪声方差估计;信道估计

【中图分类号】TN911.7

【文献标志码】A

## New Signal-to-Noise Ratio Estimation Method for Multi-Antenna SC-FDE UWB Systems

YANG Lei, WANG Yong, WANG Dan

(Electronic Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China)

【Abstract】In order to assist the implementation of receiver's coherent detection, a new signal-to-noise ratio (SNR) estimation approach is proposed for multi-antenna single-carrier frequency domain equalization (SC-FDE) ultra-wideband (UWB) systems. Firstly, it allocates the preamble sequences from the different transmitters at the spatial multiplexing mode. At the receivers, the multi-antenna sub-channels parameters can be estimated by the least square (LS) rule, by which the noise sample vector can be constructed by exploiting the characteristic of channel's conjugate symmetry. Secondly, the noise variance information can be obtained based on the Cramer-Rao lower bound theorem. Finally, the noise variance and channel estimation can be united for computing the SNR value. Through computer's simulation, different from the traditional methods, the proposed method can not only improve the estimation performance significantly over the high SNR region, but also be used with the LS channel estimator simple and easy to implement.

【Key words】ultra-wideband; multiple-input multiple-output; SNR estimation; noise variance estimation; channel estimation

超宽带(Ultra-Wideband, UWB)技术是目前正被广泛研究的一种新兴无线通信技术<sup>[1]</sup>。与其他无线通信技术相比, UWB 技术具有传输速率高、系统容量大、抗多径能力强、功耗低、成本低等优点。值得注意的是, UWB 系统中主要的限制因素不是带宽, 而是其极低的功率谱密度。多天线传输技术可以在低传输功率消耗时增强系统的容量和改善系统的性能。因此, 如果将多天线技术和 UWB 技术相结合, 那么系统可以获得更高的传输率和可靠性, 从而带来更大的性能增益<sup>[2]</sup>。

信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)信息是无线通信系统非常重要的参数, 它不仅可以帮助实现接收机的信道估计、均衡和软译码, 而且还可以反馈回发射端用以实现自适应编码和调制。因此, 接收机对 SNR 进行估计是十分必要的。目前, 基于矩的估计方法<sup>[3]</sup>和基于子空间的估计方法<sup>[4]</sup>都是经典的 SNR 估计方法。然而, 目前关于分集系统中 SNR 估计问题的研究十分有限<sup>[2,5-8]</sup>。一般地, SNR 估计问题可以等效成信道估计和噪声方差的估计问题。最小二乘(Least Square, LS)信道估计方法具有

简单、易执行的优势, 但传统的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)噪声方差估计方法<sup>[5]</sup>不能和 LS 信道估计器同时使用。现有 Boumard 提出的噪声方差估计方法<sup>[6]</sup>虽然解决了 MMSE 方法不能和最小二乘信道估计同时使用的问题, 但该方法需假设相邻子载波的信道频域系数相等, 在信道频选性强时估计性能变差, 所以不适用极度频选的 UWB 信道。

本文针对现有 SNR 估计方法受制于信道频选性(或信道时延扩展)以及不能和简单易执行的最小二乘信道估计方法同时使用的问题, 基于空间复用(Spatial Multiplexing, SM)的导频分配模式, 将单天线噪声方差估计方法<sup>[9]</sup>推广至多天线环境, 提出一种对信道频选性鲁棒的多天线超宽带系统 SNR 估计方法, 以获得较优的估计性能, 且执行复杂度不高。

## 1 多天线 SC-FDE UWB 系统模型

考虑一个具有两发、两收的单载波频域均衡(SC-FDE)UWB 系统<sup>[2]</sup>, 其系统模型如框图 1 所示。收发天线

基金项目: 国家自然科学基金项目(N61101167); 国家航空科学基金项目(20110142002); 河南省科技攻关计划项目(112102210431); 河南科技大学博士科研启动基金资助项目(09001409); 河南科技大学青年科学基金资助项目(2010QN0019)

间形成了4个相互独立的UWB子信道。信道满足帧衰落特性,每根发射天线传输模式相同,每一帧含有两个前导频块和若干数据块,数据块长度和导频块相同,且导频块和数据块之间采用时分复用,发射天线在“0”时刻和

“1”时刻传输的导频序列满足SM。背景噪声服从零均值加性白高斯分布。信号经过衰落信道后,在频域完成信道均衡,而信道均衡需要由信噪比估计和信道估计辅助实现。

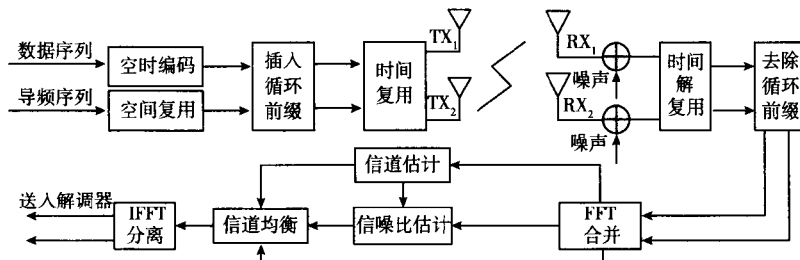


图1 多天线 SC-FDE UWB 系统模型

### 1.1 发送模型

在发送端,二进制数据序列经信道编码后,经调制器进行调制,然后进行时间逆转空时编码处理,已获得发射分集。在数据序列前分别加入循环前缀(Cyclic Prefix, CP),以避免符号间干扰。发射端以SM模式分配每根发射天线在“0”符号时刻和“1”符号时刻的导频序列,以避免导频传输期间天线间干扰对信道估计的影响,即发射天线*i*在“0”时刻传输导频序列块为 $\mathbf{x}_i^0 = [x_i^0(0), \dots, x_i^0(K-1)]^T$ 和“1”时刻导频序列块为 $\mathbf{x}_i^1 = [x_i^1(0), \dots, x_i^1(K-1)]^T$ ,其中*i*=1,2,然后对每个导频块插入CP。最后每根发射天线将若干个数据块和两个导频块进行时分复用后组成一个完整的帧由发射天线发出。接收端则利用去掉CP的频域导频序列进行信噪比估计,最后在频域中进行信道均衡与符号相干检测。

### 1.2 接收模型

接收端每根天线首先对经过无线信道传输的帧进行时间解复用,提取导频块并去除循环前缀后,得到第*j*个接收天线第*n*个符号时刻的时域接收导频信号矢量为

$$\mathbf{y}_j^n = \sum_{i=1}^2 \tilde{\mathbf{H}}_{ij} \mathbf{x}_i^n + \mathbf{w}_j^n, j=1,2; n=0,1 \quad (1)$$

式中:信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_{ij}$ 是第*i*个发射天线和第*j*个接收天线间子信道的循环Toeplitz矩阵,它由子信道时域冲激响应矢量 $\mathbf{h}_{ji} = [h_{ji}(1), h_{ji}(2), \dots, h_{ji}(L)]^T$ 生成;矢量 $\mathbf{w}_j = [w_j(0), \dots, w_j(K-1)]^T$ 是空时独立的零均值、协方差矩阵为 $\mathbf{C}_{\mathbf{w}_j} = E\{\mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H\} = \sigma_{w_j}^2 \mathbf{I}_K$ 的高斯白噪声矢量,且每个天线的噪声方差在一帧内是常数。对时域接收导频信号进行傅里叶变换的第*j*个接收天线第0和1符号时刻在第*k*个子载波处的频域接收信号为

$$\begin{cases} Y_j^0(k) = \sum_{i=1}^2 H_{ji}(k) X_i^0(k) + W_j^0(k) \\ Y_j^1(k) = \sum_{i=1}^2 H_{ji}(k) X_i^1(k) + W_j^1(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中:*j*=1,2; $H_{ji}(k)$ 是信道时域冲激响应 $\mathbf{h}_{ji}$ 在第*k*个频率元处的频域响应, $k=0,1,\dots,K-1$ ; $X_i^n(k)$ 和 $W_j^n(k)$ 分别是相应的频域导频信号和频域噪声元。

## 2 SNR 估计方法

目前的单天线系统的SNR估计方法可以分成两大类<sup>[10]</sup>:一类是直接计算SNR值,一类是先计算信号功率或噪声功率的值,由二者的比值获得SNR的估计值。目前的研究主要集中在第二类SNR估计方法,其中,信号功率的估计方法又可分为两大类:一类首先估计噪声方差信息,然后借助该信息并基于接收信号的二阶矩估计信号功率<sup>[11-12]</sup>;一类则是通过信道估计值和导频序列来进行信号功率的计算,整个过程无需噪声方差信息的辅助<sup>[6,13]</sup>。本文则重点研究了第二类的SNR估计方法,而且,为了方便接收机进行相干接收,其中的信号功率由信道估计值和导频序列联合计算。然而,传统的最优MMSE估计方法无法和简单易执行的最小二乘信道估计器同时使用;传统的多天线系统下Boumard提出的SNR估计方法<sup>[6]</sup>需要假设信道是平坦衰落的,将之推广至频选UWB信道下时,性能急剧下降。本文所研究的SNR估计方法不仅可以和最小二乘信道估计器同时使用,并且无须假设信道具有平坦衰落特性,而是根据信道共轭对称特性构造噪声采样矢量,然后应用克拉美罗定理获得噪声方差信息。这样,和传统方法比,本文提出方法的估计精度得到了极大提高。本文提出的SNR估计方法如图2所示。

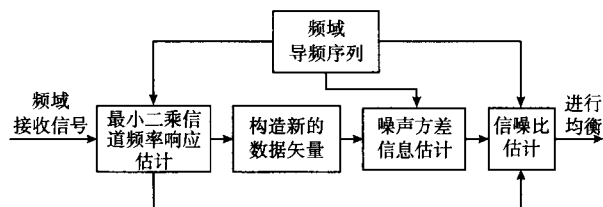


图2 提出的信噪比估计方法

具体步骤如下:

1) 为方便求解信道频域响应,将式(2)第 $j$ 个接收天线两个导频传输时刻频域接收信号整理成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} Y_j^0(k) \\ Y_j^1(k) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} X_1^0(k) & X_2^0(k) \\ X_1^1(k) & X_2^1(k) \end{bmatrix}}_{S(k)} \underbrace{\begin{bmatrix} H_{j1}(k) \\ H_{j2}(k) \end{bmatrix}}_{H_j(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} W_j^0(k) \\ W_j^1(k) \end{bmatrix}}_{W_j(k)} \quad (3)$$

式中: $j=1,2$ ;  $Y_j(k)$  为第 $j$ 个接收天线第 $k$ 个频率元的接收信号矢量; $S(k)$  为第 $k$ 个频率元的导频块对角矩阵; $W_j(k)$  为噪声频域矢量,其噪声方差为  $\sigma_{w_j}^2 = K\sigma_w^2$ 。

2) 计算每个收发天线对子信道频响的 LS 估计为

$$\hat{H}_j(k) = S^{-1}(k)Y_j(k), k=0,1,\dots,K-1 \quad (4)$$

为使子信道频响 LS 估计存在,第 $k$ 个频率元的导频矩阵应可逆,即满足如下的 SM 条件

$$X_1^0(k)X_2^1(k) \neq X_1^1(k)X_2^0(k) \quad (5)$$

为简单起见,这里假设导频满足下述关系

$$X_1^0(k) = -X_2^1(k) = X_1^1(k) = X_2^0(k) = X(k) \quad (6)$$

则有

$$\hat{H}_j(k) = H_j(k) + \frac{1}{2X(k)} \begin{bmatrix} W_j^0(k) - W_j^1(k) \\ W_j^0(k) + W_j^1(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

成立。

3) 利用 LS 信道估计矢量(式(7))构造如下关于噪声方差信息的数据矢量

$$D_{ji}(k) = \hat{H}_{ji}(k) - \hat{H}_{ji}^*(K-k) = \frac{N_{ji}(k)}{X(k)} - \frac{N_{ji}^*(K-k)}{X^*(K-k)} \quad (8)$$

其中:

$$N_j(k) = \begin{bmatrix} N_{j1}(k) \\ N_{j2}(k) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} W_j^0(k) - W_j^1(k) \\ W_j^0(k) + W_j^1(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $k=1,2,\dots,K/2-1$ ;  $i,j=1,2$ ; “\*”表示复共轭操作,且有  $\sigma_{w_j}^2 = 2\sigma_{N_j}^2 = K\sigma_w^2$ 。

4) 借助步骤3)构造的新数据矢量(式(8))并应用克拉美罗定理<sup>[5,9]</sup>,得到多天线 UWB 系统第 $j$ 个接收天线噪声方差的估计为

$$\hat{\sigma}_{w_j}^2 = \frac{2}{K-2} \sum_{k=1}^{K/2-1} \frac{|D_{ji}(k)|^2 |X(k)X(K-k)|^2}{|X(k)|^2 + |X(K-k)|^2} \quad (10)$$

式中: $|\cdot|$ 表示绝对值操作,相应的估计器的克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRB)为

$$\text{var}(\hat{\sigma}_{w_j}^2) = \frac{2}{K-2} \sigma_{w_j}^4 \quad (11)$$

由式(11)知,多天线的噪声方差估计器(式(10))具

有和单天线噪声方差估计器<sup>[7]</sup>相同的方差下界。因此,和 MMSE 方法比,提出的估计器性能损失大约 3 dB。

5) 按式(12)计算多天线系统下的信噪比估计值为

$$\hat{SNR} = \frac{1}{4K} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{j=1}^2 \frac{\sum_{n=0}^1 \sum_{i=1}^2 |X_i^n(k) \hat{H}_{ji}(k)|^2}{\hat{\sigma}_{w_j}^2} \quad (12)$$

式(12)中的信号功率是通过 LS 信道估计值(式(7))和导频序列来计算的。估计出的信噪比信息可以反馈给发送端用于自适应调制或者送入接收机的信道均衡器用以计算均衡器系数。

### 3 仿真结果

系统仿真分别基于 IEEE802.15.3a 标准的 CM1 及 CM4 信道模型<sup>[14]</sup>进行。发射天线导频可采用 CAZAC 序列,且满足空间复用特性。系统成形匹配脉冲采用了滚降系数为 0.5 的奈奎斯特滤波器,块长为 256 个采样点,CP 长度为 64 个采样点。每根发射天线的一帧由 100 个数据块和 2 个导频块组成。

图 3 为本文提出的 SNR 估计方法、传统 Boumard 估计方法<sup>[4]</sup>以及传统 MMSE 估计方法<sup>[3]</sup>的归一化均方误差(Normalized Mean Square Error, NMSE)性能随真实 SNR 变化的比较结果。其中 MMSE 方法在 SNR 计算时使用完美信道估计和估计的噪声方差信息联合计算。Boumard 方法则和提出的 SNR 估计方法一样,均使用了 SM 的 LS 信道估计值来计算信号功率。结果表明:在 CM1 信道下, Boumard 方法在 SNR = 12 dB 时性能曲线出现拐点,而在频选极度严重的多天线 CM4 信道下, Boumard 方法在 SNR = 6 dB 时出现拐点,这是因为在低 SNR 端信道估计误差是影响 SNR 估计的主要因素,而在高 SNR 端噪声方差估计是影响 SNR 估计误差的主导。由于 CM4 信道是极度频选的,所以 Boumard 方法在高 SNR 端噪声方差估计性能极度变差,而本文的估计方法由于未假设信道慢频选性,所以 NMSE 性能在 SNR > 7.5 dB 时明显优于传统 Boumard 信噪比估计方法。另外,由于本文方法仅使用 MMSE 方法噪声采样集大小的一半数据来估计噪声方差,所以在高 SNR 端略差于 MMSE 估计方法。值得注意的是,在 SNR 较高时,提出方法和 MMSE 方法在 CM4 信道下性能均有所下降,这是因为 CM4 信道是极度频选的,64 个采样点的 CP 长度已经不充分,所以引起了块间干扰,并导致噪声方差估计器的性能略有下降。如果将 CP 长度增加,则此性能损失可以弥补。

图 4 给出了上述 SNR 估计方法的估计值与 SNR 真值的比较结果。由图 4 可知,提出的估计方法不论信道频

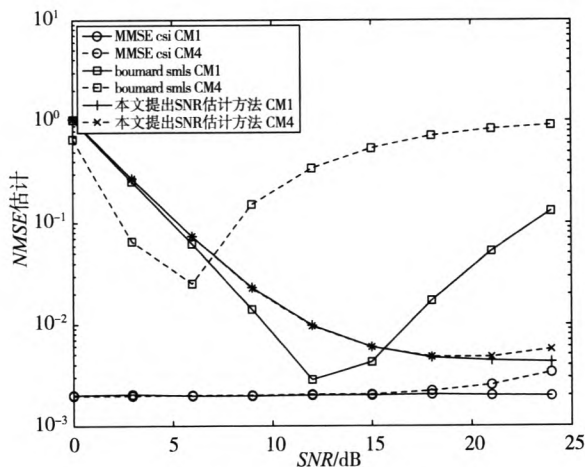


图3 信噪比估计方法 NMSE 性能比较

选择性如何,在  $SNR > 9$  dB 时,估计值均逼近真值,而传统的 Boumard 方法则由于信道频选性的影响,估计性能在极度频选的 CM4 信道下,估计性能急剧下降,且估计值已经远远偏离真值。MMSE 方法估计值与真值十分逼近,但它不能和 LS 信道估计器共用。由此可见,本文方法不仅运算复杂度低,可以和简单易执行的 LS 信道估计方法同时使用,无需事先获取信道的相关特性信息,估计精度高,而且对信道频选性鲁棒,适用于多天线 UWB 信道环境。

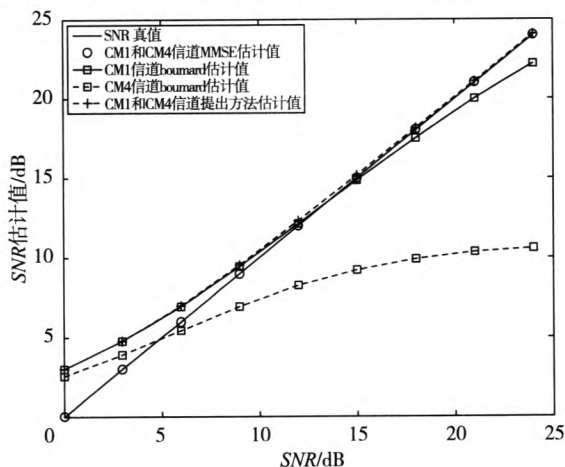


图4 信噪比估计方法估计值与真值比较

## 4 小结

在本文提出的信噪比估计方法中,采用了简单易执行的 LS 信道估计,由 LS 信道估计构造新的噪声方差采样矢量估计噪声方差,最后利用估计的信道和噪声方差信息计算 SNR 估计值。整个估计过程要求不同发射天线的导频序列应满足 SM 特性,但未使用信道相关特性知识和复杂的矩阵操作,也没有假设信道频选的慢变性,因此在复杂度增加不多的前提下有效地提高了 SNR 估计的精度,而且特别适合极度频选的 UWB 多天线信道。下一步将研究如何提高低 SNR 端 SNR 估计精度的问题。

## 参考文献:

- [1] WANG Y, DONG X D, WITTKE P H, et al. Cyclic prefixed single carrier transmission in ultra-wideband communications[J]. IEEE Trans. Wireless Communications, 2006, 5(8): 2017-2021.
- [2] 王丹, 蒋铃鸽, 何晨. 基于块传输 SC-FDE UWB 系统的 MIMO 传输方案[C]//通信理论与信号处理学术年会论文集. 秦皇岛, 中国: 电子工业出版社, 2007: 23-30.
- [3] 韩博, 吴杰, 许华, 等. 一种新的 QAM 信号信噪比估计算法[J]. 电视技术, 2012, 36(21): 132-134.
- [4] 杨富银, 张白愚, 黄焱. DVB-S2 ACM 技术中的信噪比估计[J]. 电视技术, 2012, 36(13): 106-109.
- [5] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1993.
- [6] BOUMARD S. Novel noise variance and SNR estimation algorithm for wireless MIMO OFDM systems[C]//Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). San Francisco, CA: IEEE Press, 2003: 1330-1334.
- [7] ZIVKOVIC M, RUDOLF M. Preamble-based SNR estimation algorithm for wireless MIMO OFDM systems[C]//Proc. 6th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Tuscany, Italy: IEEE Press, 2009: 96-100.
- [8] XU X D, JING Y, ZHAO J, et al. Subspace-based noise variance and SNR estimation for MIMO OFDM systems[J]. Journal of Electronics (China), 2006, 23(2): 176-180.
- [9] WANG D, JIANG L, HE C. Noise variance estimation and optimal sequences for channel estimation in SC-FDE UWB systems[J]. Electronics Letters, 2007, 43(11): 621-623.
- [10] YANG L, WANG D. Comparisons of several SNR estimation methods for SC-FDE UWB wireless communications[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2012(21): 359-368.
- [11] REN G, ZHANG H, CHANG Y. SNR estimation algorithm based on the preamble for OFDM systems in frequency selective channels[J]. IEEE Trans. Communications, 2009, 57(8): 2230-2234.
- [12] CHANG S, KELLEY B. A time-domain SNR estimator based on a periodic preamble for wireless OFDM systems[J]. IEICE Electronics Express, 2011(24): 2073-2079.
- [13] ZIVKOVIC M, RUDOLF M. An improved preamble-based SNR estimation algorithm for OFDM systems[C]//Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Istanbul, Turkey: IEEE press, 2010: 172-176.
- [14] FOERSTER J. P802.15-02/490r1-SG3a, Channel modeling subcommittee report (Final)[R]. [S.l.]: IEEE P802.15.3a Working Group, 2003.

## 作者简介:

杨雷(1979—), 硕士, 讲师, 主研信号分析与处理、智能传感技术、计算机检测技术;

王勇(1979—), 硕士, 讲师, 主研信号分析与处理、计算机检测技术;

王丹(1979—), 女, 博士, 副教授, 主研通信信号处理。

责任编辑: 薛京

收稿日期: 2013-03-26

## 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,一直致力和专注于微波、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>