

用于分布式天线的选择分集 2D-RAKE 接收机

黄开枝，王京，陈国安，王有政

(清华大学 电子工程系, 微波与数字通信技术国家重点实验室, 北京 100084)

摘要：针对分布式天线系统, 提出了一种新的空时二维-RAKE(2D-RAKE)接收机方案, 使用 M 个 L -分支选择合并器(SC), 每个 SC 的输出送入一个有 L_R 个抽头的 RAKE 接收机。作者分析了在频率选择性 Nakagami 衰落信道中, 该接收机的误比特率特性, 讨论了不同衰落参数下不同 L , M 和 L_R 组合对系统性能的影响。数值分析表明: 与常规 2D-RAKE 接收机相比, 该机不仅可以利用多个天线的空间分集并改善系统的性能, 而且明显降低了系统复杂度, 因此可以在分布式天线系统中利用 2D-RAKE 接收机改善系统性能。

关键词: 分布式天线; 二维-RAKE 接收机(2D-RAKE); 选择分集

中图分类号: TN 914.53

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2003)01-0039-04

2D-RAKE receiver with selection diversity in distributed antenna systems

HUANG Kaizhi, WANG Jing, CHEN Guoan, WANG Youzheng

(State Key Laboratory of Microwave and Digital Communications,
Department of Electronic Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new two-dimensional RAKE (2D-RAKE) receiver that uses M groups of L -branch selection combiners (SC) and L_R RAKE fingers for each SC was developed for distributed antenna systems. A closed-form expression of the average bit error rate in a frequency-selective Nakagami fading channel was derived. The effect of different combinations of L , M and L_R on the system performance was also evaluated for different fading parameters. A numerical simulation indicates that, compared with a conventional 2D-RAKE receiver, this receiver provides significantly improved performance using space diversity reception with the same or reduced complexity. Therefore, 2D-RAKE receiver technology can be used in distributed antenna systems.

Key words: distributed antenna systems; 2D-RAKE receiver; selection diversity

码分多址技术(CDMA)日益成为无线通信系统的主要接入策略, 但是 CDMA 系统是个干扰受限

的系统, 性能受到无线信道的多径衰落、多址干扰(MAI)与码间串扰(ISI)的影响。如何消除这些影响成为提高无线通信系统性能的主要课题。目前, 天线阵和 RAKE 接收机构成的空时二维-RAKE(2D-RAKE)接收机是一个研究热点: 能够充分利用多径信号的空间与时间的可分辨特性, 在空时域上同时处理信号来抑制多径衰落及减少 MAI, 从而有效地改善了 CDMA 通信系统的性能。

许多文献^[1~3]已经研究了 Rayleigh 衰落下的, 基站采用 2D-RAKE 接收机的 CDMA 系统的设计和性能。但是每个 RAKE 接收机都需要一个信道估计电路以及相应的匹配滤波器, 所以 2D-RAKE 接收机在改善性能的同时也付出了一定的计算代价。特别是在分布式天线系统中^[4], 在小区范围内分布式地设置多个天线, 将天线接收到的信号通过光纤传输到基站, 然后再被分别送入相应的 RAKE 接收机进行时间上的处理, 此时系统的结构和计算复杂度会随着天线数的增多而增加。

本文针对分布式天线系统提出了一种新的 2D-RAKE 接收机方案, 将分布式天线系统中的天线单元分成若干(M)组, 每一组为一个天线子群, 在每个天线子群内使用一个 L -分支选择合并器(SC), 每个 SC 的输出送入相应的 L_R 抽头 RAKE 接收机。推导了频率选择性 Nakagami 多径衰落中, 该系统在二进制移相键控(BPSK)调制下的误码率(P_b)特性的闭式表达式。并且分析了不同衰落参数下不同 L , M 和 L_R 组合对系统性能的影响。数值仿真表明, 与常规 2D-RAKE 接收机相比, 该系统可在不增加系统复杂度的前提下, 用一定数量的天线提高系统的性能。利用本

收稿日期: 2001-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (041306632)

作者简介: 黄开枝(1973-), 女(汉), 安徽, 博士研究生。

通讯联系人: 王京, 教授,

E-mail: wangj@pcs.mdc.tsinghua.edu.cn

文的分析结果作为准则,可以在分布式天线系统中使用 2D-RAKE 接收机有效改善系统性能。

1 系统配置

在一个单蜂窝 CDMA 系统中,有 K 个平均发射功率均为 P 的用户。为每个用户分配一个唯一的 chip 宽度为 T_c 的二进制伪随机序列。

假设所有路径的多径数都为 L_p , 时间延迟间隔等于 T_c , 采用 L_p 抽头的时间延迟线(TDL)模型描述每个用户和各天线子群的每个天线单元之间的频率选择性多径信道。设第 q 个天线接收到的第 k 个用户的第 l 条路径的路径增益 $\{\alpha_{klq}\}_{k=1, l=0, q=1}^{K, L_p-1, LM}$ 是独立同分布的 Nakagami 随机变量, 概率密度函数(PDF)为^[5]

$$\rho_{\alpha_{klq}}(\alpha) = \frac{2\alpha^{2m_{klq}-1}}{\Gamma(m_{klq})} \left(\frac{m_{klq}}{\Omega_{klq}} \right)^{m_{klq}} \exp \left(- \frac{m_{klq}\alpha^2}{\Omega_{klq}} \right), \quad (1)$$

$k=1, 2, \dots, K$; $l=0, 1, \dots, L_p-1$; $q=1, 2, \dots, LM$ 其中: Ω_{klq} 是 α_{klq} 的二阶距, 假设 $\Omega_{k1}= \dots = \Omega_{k(LM)} = \Omega_l = \Omega_1 e^{-\lambda l}$, λ 为非负整数, 反映了平均路径强度的衰减速率。 m_{klq} 描述了信道的衰落特性, 假设 $m_{k1}= \dots = m_{k(LM)}=m_l$; m_{klq} 越小, 则路径衰落越严重, 并且 $m_{klq}=1$ 对应于 Rayleigh 衰落。 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $\Gamma(x)=\int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$, $x>0$ 。

2 接收机模型

在一个分布式天线系统中,将天线分成 M 个天线子群,每个天线子群中有 L 个天线单元。针对这个分布式天线系统的接收机结构如图 1 所示,有 M 个 L -分支选择合并器,假设每个天线的噪声统计特性都相同,则 SC 处理就等效于选择增益最强的路径。利用接收信号强度指示(RSSI)从 L 个天线接收的信号中选取幅度最强的信号输入到中心站的相关 RAKE 接收机。RAKE 接收机由匹配滤波器(MF)、 $L_R (\leq L_p)$ 抽头的 TDL 模型和合并器组成。每个 MF 都与参考用户($k=1$)的扩频序列相匹配。SC 的输出 $\{\beta_{klq}\}_{k=1, l=0, q=1}^{K, L_p-1, M}$ 是具有相同多径时延的 L 个接收信号中的最强信号,即

$$\beta_{klq} = \max \{\alpha_{k11}, \dots, \alpha_{klq}, \dots, \alpha_{k1L}\}. \quad (2)$$

然后, RAKE 接收机分解并用最大比合并(MRC)准则合并 $\{\beta_{1lq}\}_{l=0, q=1}^{L_p-1, M}$ 的多径分量, 提供分集增益。

假设正确估计出所选信道的信道参数, 则 RAKE 接收机中的抽头加权就是对应的路径增益, 即 $\omega_{nq}=(\beta_{1nq})^*$, $n=0, 1, \dots, L_R-1$; $q=1, \dots, M$ 。

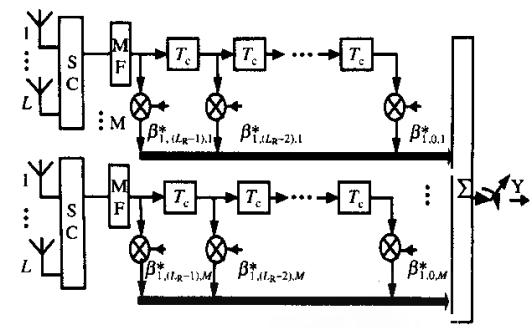


图 1 选择合并 2D-RAKE 接收机

3 性能分析

假设每个天线子群中的 L 个天线间的距离足够大,则基带接收信号可以等效为

$$r(t) = \sum_{q=1}^{LM} \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L_p-1} \sqrt{2P} \alpha_{klq} c_k(t-lT_c) \cdot b_k(t-lT_c) + n(t), \quad (3)$$

其中: $c_k(t)$ 和 $b_k(t)$ 分别是第 k ($k=1, 2, \dots, K$) 个用户的二进制扩频序列和比特周期为 T_b 的数据波形。 $n(t)$ 代表双边功率谱密度为 N_0 的复加性高斯白噪声,且 $E\{n(t) \cdot n(\tau)^H\} = 2N_0 \delta(t-\tau) I_{LM}$, 其中: $(\cdot)^H$, I_{LM} 和 $\delta(\cdot)$ 分别代表共轭转置, $LM \times LM$ 单位矩阵和 dirac delta 函数。

从各天线子群的 L 个接收信号中选出最强信号,对这 M 个信号做时间处理,分解出相应的多径分量,并将各多径分量加权求和^[6],在接收机的输出端形成基于 $\{\beta_{1nq}\}_{n=0, q=1}^{L_R-1, M}$ 的条件判决变量:

$$Y = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^M \sum_{l=0}^{L_p-1} \sum_{n=0}^{L_R-1} 2P \beta_{1nq}^* \beta_{klq} I_{knl} + \sum_{q=1}^M \sum_{n=0}^{L_R-1} \int_0^{T_b} \sqrt{2P} \beta_{1nq}^* n_q(t) c_1^*(t-nT_c) dt \right\}, \quad (4)$$

其中 $I_{knl} = \int_0^{T_b} c_1^*(t-nT_c) c_k(t-lT_c) b_l(t-lT_c) dt$ 。以 $\{\beta_{1nq}\}_{n=0, q=1}^{L_R-1, M}$ 为参数,可将 Y 模型化为方差为

$$\sigma^2 = \left\{ \frac{E^2 \Omega_1}{N} \left[\frac{4(K-1)F(L_p)}{3} + 2F(L_p-1) \right] + 2EN_0 \right\} \sum_{q=1}^M \sum_{n=0}^{L_R-1} \beta_{1nq}^2,$$

均值为 $2b_1 E \sum_{q=1}^M \sum_{n=0}^{L_R-1} \beta_{1nq}^2$ 的条件高斯随机变量^[6]。其中 b_1 是待检测的信息码位, $E=PT_b$ 是平均码位能量, $F(i)=\frac{1-e^{-\lambda i}}{1-e^{-\lambda}}$, $N=\frac{T_b}{T_c}$ 是系统处理增益。

所以接收机的瞬时信干噪比(SINR) γ_1 为

$$\gamma_1 = \sum_{q=1}^M \sum_{n=0}^{L_R-1} S \beta_{1nq}^2 = \sum_{q=1}^M \sum_{n=0}^{L_R-1} \gamma_{1nq}, \quad (5)$$

其中:

$$S = \frac{6NEb_1^2}{3NN_0 + \Omega_1 E[3F(L_P-1) + 2(K-1)F(L_P)]}.$$

由式(1), (2)和式(5), $\{\alpha_{klq}\}_{k=1, l=0, q=1}^{K, L_P-1, LM}$ 的分布函数和 $\{\gamma_{1nq}\}_{n=0, q=1}^{L_R-1, M}$ 的 PDF 可以分别表示为

$$F_{\alpha_{klq}}(\alpha) = \frac{\left(\frac{m_l}{S\Omega_l}\right)^{m_l} \alpha^{2m_l} e^{\frac{m_l}{S\Omega_l}\alpha^2}}{\Gamma(m_l)m_l} {}_1F_1\left(1; m_l+1; \frac{m_l}{S\Omega_l}\alpha^2\right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} p_{\gamma_{1nq}}(\gamma) &= \frac{L\left(\frac{m_n}{S\Omega_n}\right)^{m_n} \gamma^{m_n-1} e^{-\frac{m_n}{S\Omega_n}\gamma}}{\Gamma(m_n)} \times \\ &\left[\frac{\left(\frac{m_n}{S\Omega_n}\right)^{m_n}}{m_n\Gamma(m_n)} e^{-\frac{m_n}{S\Omega_n}\gamma} {}_1F_1\left(1; m_n+1; \frac{m_n}{S\Omega_n}\gamma\right)\right]^{L-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 ${}_1F_1(\cdot; \cdot)$ 是如下定义的超几何函数^[7]:

$${}_1F_1(a; c; x) = \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(a)\Gamma(c-a)} \int_0^1 e^{xt} t^{a-1} (1-t)^{c-a-1} dt. \quad (7a)$$

当 Nakagami 分布的衰落参数 m_n 为整数时, 式(7)可以得到简化, 从而可简化系统分析^[8]。当 m_n 取整数值时, 式(7a)为

$${}_1F_1(a; c; x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(a+n-1)!(c-1)!x^n}{(c+n-1)!(a-1)!n!}. \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), $\{\gamma_{1nq}\}_{n=0, q=1}^{L_R-1, M}$ 的 PDF 可以写为

$$f_{\gamma_{1nq}}(\gamma) = A_L(m_n, \Omega_n) \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j \in B} D_L(i, j) e^{\frac{(i+1)m_n\gamma}{S\Omega_n}} \gamma^{C_{ji} + m_n - 1}, \quad (9)$$

其中: $A_L(m_n, \Omega_n) = \frac{L(m_n/(S\Omega_n))^{m_n}}{\Gamma(m_n)}$, $C_{ji} = \sum_{k=0}^{m_n-1} kn_k$,

$$D_L(i, j) = \frac{\binom{L-1}{i} (-1)^i \left(\frac{m_n}{S\Omega_n}\right)^{C_{ji}} (i!)^i}{\prod_{k=0}^{m_n-1} (n_k!) \cdot \prod_{k=0}^{m_n-1} (k!)^{n_k}}, B \text{ 为所有}$$

满足条件 $\sum_{k=0}^{m_n-1} n_k = i$ 的非负整数集合。相应的

$\{\gamma_{1nq}\}_{n=0, q=1}^{L_R-1, M}$ 的特征函数为

$$\Phi_{\gamma_{1nq}}(u) = A_L(m_n, \Omega_n) \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j \in B} \frac{D_L(i, j) (C_{ij} + m_n - 1)!}{\left[\frac{(i+1)m_n}{S\Omega_n} - u\right]^{C_{ij} + m_n}}. \quad (10)$$

由于 $\{\gamma_{1nq}\}_{n=0, q=1}^{L_R-1, M}$ 相互之间统计独立, 所以当 $m_1=m_2=\dots=m_{L_R}=m$ 时, γ 的特征函数就是 $\Phi_{\gamma_{nm}}(u)$ 的 $(L_R \times M)$ 次幂。BPSK 系统的条件错误概率为

$$P_b(\gamma_1) = Q(\sqrt{2\gamma_1}), \text{ 其中:}$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$$

是高斯 Q 函数。利用高斯 Q 函数的另一表达形式^[9]:

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \sin^2 y}\right) dy,$$

则系统在频率选择性 Nakagami 衰落中的平均误比特率特性为

$$\begin{aligned} P_b &= \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\gamma_1}) p(\gamma_1) d\gamma_1 = \\ &\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\gamma_1}{\sin^2 y}\right) dy p_{\gamma}(\gamma_1) d\gamma_1 = \\ &\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} (\Phi_{\gamma_{1nq}}(u))^{L_R \times M} \Big|_{u=\frac{-1}{\sin^2 y}} dy. \end{aligned} \quad (11)$$

4 数值分析

为了说明该接收机对分布式 CDMA 无线通信系统的性能改善, 特别是相对于常规 2D-RAKE 接收机的 P_b 特性的改善和计算复杂度的减少程度, 本文把式(11)计算出的 P_b 特性与 L, M, L_R, m 的关系, 用图 2~4 直观地表示出来。其中: $E\Omega_1/N_0$ 代表平均接收的信噪比(r_{SNR}), 用 (L, M) 组合 $(1, 4)$ 表示常规 2D-RAKE 接收机, $(4, 1)$ 表示空间的 L 分支 SC+RAKE 接收机。

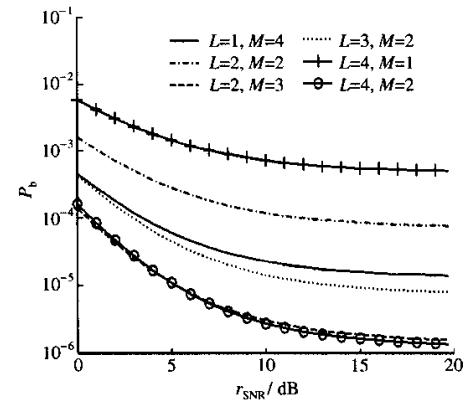


图 2 平均 P_b 特性与 r_{SNR} 的关系

图 2 说明了平均 P_b 特性与 r_{SNR} 之间的关系, 其中 Nakagami 参数取 $m=1, 60$ 个用户。显而易见, $(4, 1)$ 系统的性能劣于其他所有 (L, M) 接收机的性

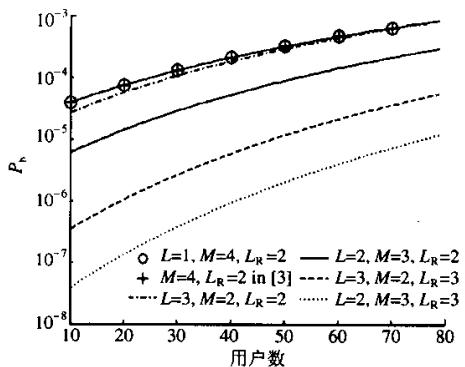


图 3 平均 P_b 特性与用户数, L_R 的关系

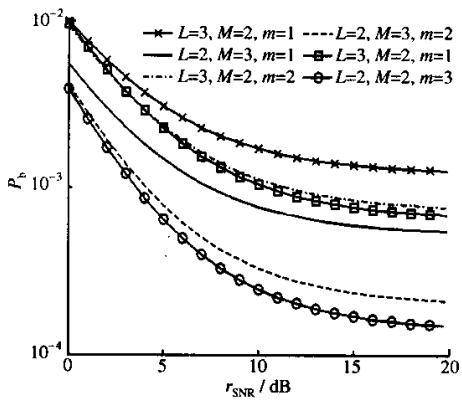


图 4 衰落参数对平均 P_b 特性的影响

能。并且,尽管(2,2)系统的性能不如常规2D-RAKE接收机,但是只需增加两个天线的(2,3)、(3,2)系统却优于(1,4)系统。而且系统配置和计算复杂度大大减少了,例如铺设的光缆以及信道参数估计电路都相应地减少了,并且当 $L_R=2$ 时,总的RAKE抽头数可从8相应地减少到了6和4,只是要以更多的天线为代价。

图3考虑了平均 P_b 特性与系统内的用户、不同(L, M, L_R)组合之间的关系。当 $M \times L = L \times M$ 保持常数时, $L < M$ 系统的性能要优于 $M < L$ 系统,但是 $M < L$ 系统却比 $L < M$ 系统简单,且光纤的铺设代价也较低。所以我们可以根据物理环境和系统需求来配置不同的系统。而且,当路径数 L_p 保持不变时, L_R 越大,2D-RAKE接收机的性能就越好。例如,当 $L_p=3$ 时,从 $L_R=2$ 改变到 $L_R=3$ 使 $L=2, M=3$ 系统的性能改善了多个数量级。而且, $L=1, M=4, L_R=2$ 的系统性能与文[3]中的结果完全一致。

万方数据

平均 P_b 特性与Nakagami衰落参数之间的关系见图4所示。在 r_{SNR} 较低的情况下,当 m 增加时,系统的性能得到了改善。然后当 r_{SNR} 增加到一定值时,系统性能保持恒定,即衰落参数 m 影响了系统的 P_b 性能界。可以根据具体的环境用较少的天线和较低的复杂度得到较高的系统性能。

5 结 论

本文针对分布式天线系统提出了一种新的选择分集2D-RAKE接收机方案,使用 M 组 L -分支选择合并器,每个选择合并器的后面是一个 L_R 抽头RAKE接收机。在Nakagami衰落信道上,这个系统与常规2D-RAKE接收机相比可以在相同或较少的复杂度条件下提供较好的接收性能。本文给出了频率选择性Nakagami多径衰落下,该系统的误比特率特性的闭式表达式,同时还包含了常规2D-RAKE接收机的性能分析。实际使用时可以针对不同衰落环境设计不同 L, M 和 L_R 组合的系统,从而在减少复杂性和费用的同时提高系统的性能。在分布式天线系统中,可以使用本文提出的2D-RAKE接收机改善系统性能。

参考文献 (References)

- [1] Thompson J S, Grant P M, Mulgrew B. Smart antenna arrays for CDMA systems [J]. *IEEE Personal Communications*, 1996, 3(5): 16-25.
- [2] Kohno R. Spatial and temporal communication theory using adaptive antenna array [J]. *IEEE Personal Communications*, 1998, 5(2): 28-35.
- [3] Huang K Z, Wang J. Performance analysis of coherent 2D-RAKE receiver for WCDMA in Nakagami multipath fading [A]. IEEE VTC 2001 Fall, Vol. 2 [C]. 1168-1171.
- [4] Cheung K W, Murch R D. Fading characteristics of distributed antennas [J]. *Electron Lett*, 1996, 32(3): 172-174.
- [5] Nakagami M. The m-distribution, a general formula of intensity distribution of rapid fading [M]. Oxford, U.K.: Pergamon, 1960.
- [6] Eng T, Milstein L B. Coherent DS-CDMA performance in Nakagami-m multipath fading [J]. *IEEE Trans Commun*, 1995, 43(2/3/4): 1134-1143.
- [7] Slater L J. Confluent hypergeometric functions [M]. Cambridge: University Press, 1960.
- [8] Abu-Dayya A A, Beaulieu N C. Micro- and macrodiversity NCFSK (DPSK) on shadowed Nakagami-m-fading channels [J]. *IEEE Trans Commun*, 1994, 42(9): 2693-2702.
- [9] Simon M, Alouini M S. A unified approach to the performance analysis of digital communication over generalized fading channels [J]. *Proc IEEE*, 1998, 86(9): 1860-1877.

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>