

多小区分布式发射天线位置优化

刘 田, 杨 琳, 韩 亮, 唐友喜

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川成都 611731)

摘要: 在分布式发射天线的多小区环境下, 分析了多层次同频干扰对小区平均遍历容量及天线位置的影响, 给出了分布式天线位置选择与小区平均遍历容量的关系。数值分析和仿真结果表明外围的第一层同频小区干扰能量决定了分布式天线的最佳位置摆放, 在半径 1000m 的小区中, 各天线距离小区中心 450m 附近时, 小区的平均遍历容量达到峰值。

关键词: 无线通信; 分布式天线系统; 天线位置优化; 多小区干扰; 遍历容量

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2721-05

Antenna Location Optimization for Distributed Transmit Antennas in a Multicell Environment

LIU Tian, YANG Lin, HAN Liang, TANG You-xi

(National Key Lab of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: The effect of co-channel interference of multiple tiers of cells on both average ergodic capacity and optimal antenna location is analyzed in a multicell environment with distributed transmit antennas, and the relationship between the optimal antenna location and the average ergodic capacity is also studied. Numerical analysis and simulation results show that the optimal distributed antenna location is determined by the interference energy of the first tier of peripheral co-channel interfering cells. For example, In a cell with a typical radius of 1000 meters, the average ergodic capacity of the cell reaches the peak when all antennas are located at about 450 meters from the center.

Key words: wireless communication; distributed antennas systems; antenna location optimization; multicell interference; average ergodic capacity

1 引言

分布式天线系统 (Distributed Antennas System, DAS), 以其在提高系统容量和节省发射功率等方面的优势成为下一代无线移动通信备受关注的研究热点之一^[1~3]。理论研究表明: 分布式天线系统中, 发射天线的地理位置选择直接影响系统的容量和频谱效率性能^[4]。目前, 针对分布天线位置优化的研究已经从线型单小区扩展到了平面单小区, 优化的目标函数也从链路级的小区平均误码率提升到系统容量。文献[5]和[6]都以线型小区的平均误码率最小为优化目标, 分别针对 STBC-OFDM 和 V-BLAST 空时编码方式研究了分布式发射天线的位置摆放, 文献[7]以广义分布式天线系统上行链

路为背景, 在噪声受限条件下, 给出了天线位置的平方距离准则选择方法。

在分布式天线网络中, 相邻的多个小区一般采取频率复用技术来提高系统的频谱效率, 这种网络频谱规划造成多小区间的同频干扰十分严重^[8], 因此在优化天线位置的过程中需要考虑多小区环境, 引入同频干扰的影响。从文献查阅结果看, 还没有在多小区干扰环境下研究分布式天线位置摆放的相关结论, 本文拟针对这一问题进行讨论: 在多小区分层干扰下行链路环境下, 以小区平均遍历容量最大化为目标, 建立天线位置选择的优化约束方程, 通过数值分析和计算机仿真得到了多小区干扰对天线位置摆放的影响程度, 给出了分布式天线位置选择及其对应的小区遍历容量数值关系。

收稿日期: 2011-04-08; 修回日期: 2011-07-14

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60832007, No. 60902027, No. 60901018, No. 61001087); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. ZYCX2010J012, No. ZYCX2009J010); 国家科技重大专项 (No. 2010ZX03003-002-01, No. 2011ZX03001-006-01)

2 系统模型

2.1 小区结构

多小区分布式天线系统场景布局如图1所示,在边长为 R 的蜂窝小区中,多根发射天线分布在小区中不同的地理位置,具体假设如下:

- (1)每个小区都有6根分布式发射天线与中心基站相连,这些天线关于小区的中心对称,设每根天线到小区中心的距离为 r ;
- (2)不同小区间的天线布置方式相同;
- (3)各小区中心基站通过6根分布式天线发射信号;
- (4)移动台MS只有一根接收天线,且在小区内的位置服从均匀分布.

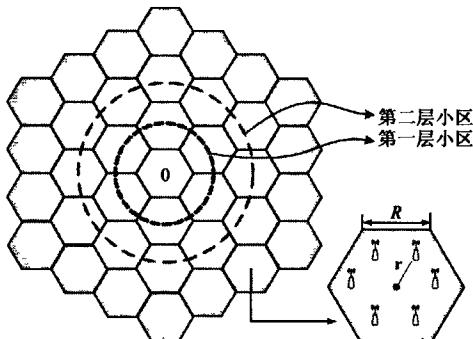


图1 多小区分布式天线系统布局

2.2 信号模型

在图1中,0代表中心小区,其他小区按照图中虚线圆的方式环绕着中心小区,第 k ($k=1,\dots,K$)层有 $6k$ 个小区,假设各小区间同频复用,考虑下行链路,设第 k ($k=1,\dots,K$)层第 n ($n=1,\dots,6k$)个小区的发射信号为:

$$\mathbf{X}_{kn} = [x_1^{(kn)}, \dots, x_6^{(kn)}]^T \quad (1)$$

其中 $x_m^{(kn)}$ 代表第 k ($k=1,\dots,K$)层第 n ($n=1,\dots,6k$)个小区第 m 根发射天线发射的信号,天线的发射功率满足 $P_m^{(kn)} = E[|x_m^{(kn)}|^2]$.

位于中心小区的移动台接收到的信号为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}_0 \mathbf{X}_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 h_m^{(kn)} x_m^{(kn)} + \mathbf{w} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{X}_0 = [x_1^{(0)}, \dots, x_6^{(0)}]^T$ 代表中心小区的发射信号, $\mathbf{H}_0 = [h_1^{(0)}, \dots, h_6^{(0)}]^T$ 代表中心小区的发射天线到移动台的信道, $h_m^{(kn)}$ 代表第 k ($k=1,\dots,K$)层第 n ($n=1,\dots,6k$)个小区第 m 根发射天线到移动台的信道, \mathbf{w} 代表加性复高斯白噪声,均值为0,方差为 σ_w^2 .本文将信道建模^[9]为

$$h_m^{(kn)} = \sqrt{S_m^{(kn)}} \tilde{h}_m^{(kn)} \quad (3)$$

其中 $\tilde{h}_m^{(kn)}$ 代表第 k 层第 n 个小区第 m 根发射天线到移动台的小尺度衰落,且假设 $\tilde{h}_m^{(kn)}$ 为独立同分布的归一化零均值复高斯随机变量 $\sim CN(0,1)$; $S_m^{(kn)}$ 代表第 k 层第 n 个小区第 m 根发射天线到移动台的路径损耗.

对于中心小区的移动台来说,除了中心小区的发射信号外,其他小区的发射信号为干扰,由于干扰源的数目足够大,而且是相互独立的,根据中心极限定理,

干扰源加噪声项 $\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 h_m^{(kn)} x_m^{(kn)} + \mathbf{w}$ 可以看成是一个新的复高斯随机变量 z ,其方差^[10]为

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 |h_m^{(kn)}|^2 P_m^{(kn)} + \sigma_w^2 \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} S_m^{(kn)} P_m^{(kn)} + \sigma_w^2 \end{aligned} \quad (4)$$

3 容量分析

为了得到多小区分布式发射天线的最优位置,本文以移动台在整个中心小区的平均遍历容量最大化作为目标函数.平均遍历容量的推导分成两个步骤,首先给出移动台位置固定时的遍历容量,然后是用户均匀分布下的情况.

3.1 移动台位置固定时的遍历容量

假设只有移动台能够获得信道状态信息,并且信道是各态历经的,那么对于移动台在一个给定的位置 A 的情况,其遍历容量为^[11]

$$C(A) = E_{H_0} \left[\log_2 \left(1 + \frac{\mathbf{H}_0 \mathbf{S} \mathbf{H}_0^H}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (5)$$

其中 $(\cdot)^H$ 代表共轭转置运算, \mathbf{S} 是发送信号矢量 \mathbf{X}_0 的协方差矩阵,即

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} P_1^{(0)} & & & & & \\ & P_2^{(0)} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & P_6^{(0)} & & \end{bmatrix} \quad (6)$$

考虑到用户在小区内是均匀分布的,同时为了简化分析,我们假设6根分布式发射天线的发射功率相等,即 $P_m^{(kn)} = P_T$.将式(6)代入式(5)整理后可得

$$\begin{aligned} C(A) &= E_{H_0} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_T}{\sigma_z^2} \sum_{m=1}^6 |\tilde{h}_m^{(0)}|^2 S_m^{(0)} \right) \right] \\ &= E_{H_0} [\log_2 (1 + \gamma)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\gamma = \frac{P_T}{\sigma_z^2} \sum_{m=1}^6 |\tilde{h}_m^{(0)}|^2 S_m^{(0)}$,由于 $\tilde{h}_m^{(0)}$ 是独立同分布的归一化零均值复高斯随机变量,所以 γ 是一个加权 χ^2 的随机变量^[12],其概率密度函数为

$$f_\gamma(\gamma) = \sum_{m=1}^6 \frac{\sigma_z^2 \beta_m}{S_m^{(0)} P_T} \exp \left(-\frac{\sigma_z^2 \gamma}{S_m^{(0)} P_T} \right) \quad (8)$$

其中 $\beta_m = \prod_{j=1, j \neq m}^6 \frac{S_m^{(0)}}{S_m^{(0)} - S_j^{(0)}}$, 从而遍历容量可以写成

$$C(A) = \frac{1}{\ln 2} \sum_{m=1}^6 \beta_m \exp\left(-\frac{\sigma_z^2}{S_m^{(0)} P_T}\right) E_i\left(\frac{\sigma_z^2}{S_m^{(0)} P_T}\right) \quad (9)$$

其中 $E_i(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$.

将式(4)代入式(9)可得移动台位于 A 时的遍历容量

$$C(A) = \frac{1}{\ln 2} \sum_{m=1}^6 \beta_m \exp\left(-\frac{1}{S_m^{(0)} P_T} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 S_m^{(kn)} P_T + \sigma_n^2 \right)\right) \cdot E_i\left(\frac{1}{S_m^{(0)} P_T} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 S_m^{(kn)} P_T + \sigma_n^2 \right)\right) \quad (10)$$

考虑在一个干扰受限系统中, 干扰功率远超过噪声功率, 噪声可以忽略^[13], 式(10)可以写为

$$C(A) = \frac{1}{\ln 2} \sum_{m=1}^6 \beta_m \exp\left(-\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 \frac{S_m^{(kn)}}{S_m^{(0)}}\right) \cdot E_i\left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 \frac{S_m^{(kn)}}{S_m^{(0)}}\right) \quad (11)$$

3.2 小区平均遍历容量

遍历容量表达式(11)给出了位置 A 处的遍历容量; 整个小区内的平均遍历容量, 可以对用户分布取平均得到.

在假设用户位置均匀分布的前提下, 小区平均遍历容量可以表示为

$$\bar{C}(r) = E_A\{C(A)\} = \frac{1}{\ln 2} E_A\left\{\sum_{m=1}^6 \beta_m \exp\left(-\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 \frac{S_m^{(kn)}}{S_m^{(0)}}\right) \cdot E_i\left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{6k} \sum_{m=1}^6 \frac{S_m^{(kn)}}{S_m^{(0)}}\right)\right\} \quad (12)$$

4 最优位置的求解

通过使 $\bar{C}(r)$ 最大化就可以得到最优发射天线的位置, 此优化问题可以写成

$$\begin{cases} r = \operatorname{argmax}\{\bar{C}(r)\} \\ \text{s.t. } 0 \leq r \leq R \end{cases} \quad (13)$$

观察式(13)中的数学优化方程, 发现这是一个约束条件下的非线性优化问题, 解决这类优化问题的基本思路是将整体目标分解为多个可以通过迭代实现求解的子优化问题^[14]. 目前普遍采用的方法是逐次二次规划法和迭代搜索法, 本文采用迭代搜索法获得式(13)的数值解, 步骤如下:

步骤 1 初始化:

- (1) 设定小区的边长 R ;
- (2) 确定路径损耗 $S_m^{(kn)}$ 采用的模型;
- (3) 产生在小区内均匀分布的点集合 $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}$;

步骤 2 计算小区平均遍历容量:

(1) 确定搜索的步长 s ;

(2) For $r = 0 : s : R$

设 $\bar{C}(r) = 0, j = 1$;

(a) while $\{j \leq N\}$;

(b) 计算点 ω_j 的路径损耗 $S_m^{(kn)}$;

(c) 根据式计算 $C(A)$;

(d) $\bar{C}(r) = \bar{C}(r) + C(A)$;

(e) $j = j + 1$;

end

步骤 3 确定最优天线位置:

比较 $\bar{C}(r)$, 其中最大的一个对应的 r 即是最优的天线位置.

5 仿真结果

本节希望通过计算机仿真给出路径损耗因子 α 和总干扰层数 K 对天线最优位置和小区平均遍历容量 $\bar{C}(r)$ 的影响. 场景参数设置如下: 小区半径 $R = 1000m$, 路径损耗模型 $S_m^{(kn)} = 1/(d_m^{(kn)})^\alpha$, 其中 $(d_m^{(kn)})$ 代表第 k 层第 n 个小区第 m 根发射天线到移动台的距离; α 代表路径损耗因子.

考虑中心小区只受到第一层干扰, 在不同的路径损耗因子 α 下, 小区平均遍历容量 $\bar{C}(r)$ 和发射天线位置 r 的关系如图 2 所示.

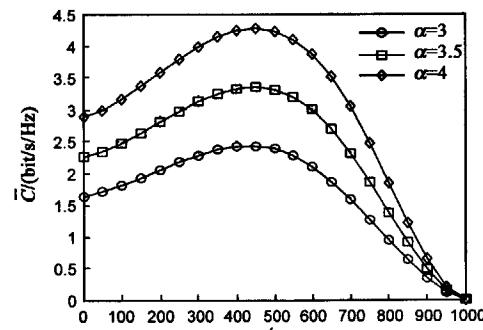


图 2 不同 α 下小区平均遍历容量与分布式天线位置的关系

从图 2 可以看出:(1) 小区的平均遍历容量 $\bar{C}(r)$ 随着路径损耗因子 α 的增大而增大. 从 $S_m^{(kn)} = 1/(d_m^{(kn)})^\alpha$ 和式(4)可知, 随着路径损耗因子 α 的增大, 移动台接收到的功率减小, 但是同时干扰也会相应减小, 由于接收的信号主要源于中心小区, 干扰来自外层的多个小区, 因此相对于接收功率的减小而言, 干扰的减小更明显, 可见干扰对小区平均遍历容量起主要作用;(2) 随着天线位置 r 的增大, 小区平均遍历容量 $\bar{C}(r)$ 先增大, 然后减小, 当 $r \approx 450$ m 时小区的平均遍历容量达到最大, 也就是说最优的发射天线位置应该是在 $r \approx 450$ m 左右;(3) 当 $r = 0$ 时, 发射天线集中在小区中心, 此时对应于传统的蜂窝系统, 从图中可以看出这个时候的小

区平均遍历容量要小于 $r = 450\text{m}$ 的时候,但是大于 $700\text{m} \leq r \leq 1000\text{m}$ 的区域,因此可以得到结论:相对于蜂窝系统,通过合理布置分布式天线的位置可以减少小区间的干扰。

考虑在 $\alpha = 3$ 下,不同的总干扰层数 $K = 1, 2, 3$ 时对最优天线位置的影响,小区平均遍历容量 $\bar{C}(r)$ 和发射天线位置 r 的关系如 3 所示。

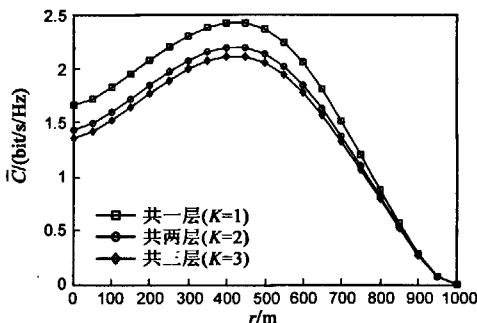


图3 不同K下小区平均遍历容量与分布式天线位置的关系

从图 3 可以看出:(1)小区的平均遍历容量 $\bar{C}(r)$ 随着总干扰层数 K 的增大而减小,随着 K 的增大,小区平均遍历容量减少的趋势不明显,因此第二层以外的干扰对小区平均遍历容量影响不大;(2)随着天线位置 r 的增大,小区平均遍历容量先增大,然后减小,当 $r \approx 450\text{m}$ 时小区的平均遍历容量达到最大,这与图 2 的结果一致,也就是说总干扰层数 K 对发射天线的最优位置并无明显的影响,因此可以得到结论:在分析多小区分布式天线系统发射天线的最优位置时,只需考虑第一层的干扰。

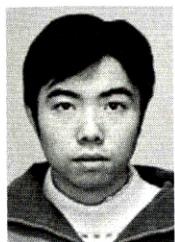
6 总结

本文针对多小区分布式天线系统下行场景,分析了存在同频干扰情况下的分布式天线系统的小区平均遍历容量,通过使小区的平均遍历容量最大化得到了最优的发射天线位置。数值结果表明在半径 1000m 的小区中,各天线距离小区中心 450m 附近时小区的平均遍历容量达到峰值,且该容量大于所有天线集中在小区中心的情况;来自外围的第一层同频小区干扰对天线地理位置选择起决定性作用,次外层同频小区干扰对系统容量有较为明显的影响,但并没有显著改变最优的天线位置。该结论从多小区同频干扰环境的角度说明天线分布比集中摆放具有优势,且存在最佳的摆放位置。

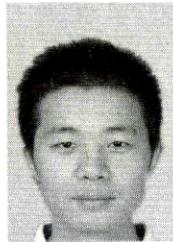
参考文献

- [1] ZHOU Shi-dong, ZHAO Ming, XU Xi-bin, et al. Distributed wireless communication system: A new architecture for future public wireless access [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3): 108 – 113.
- [2] JONGHYUN P, EUISEOK S, WONJIN S. Capacity analysis for distributed antenna systems using cooperative transmission schemes in fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 586 – 592.
- [3] 刘宝玲,陶小峰,张平.同频分布式 FuTURE TDD 第四代移动通信系统 [J].电子学报,2007,35(6A): 131 – 135.
LIU Bao-ling, TAO Xiao-feng, et al. Single frequency distributed FuTURE 4G TDD mobile communication system [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6A): 131 – 135. (in Chinese)
- [4] ZHUANG Hai-ruo, DAI Lin, XIAO Liang, et al. Spectral efficiency of distributed antenna system with random antenna layout [J]. IEEE Electronics Letters, 2003, 39(6): 495 – 496.
- [5] SHEN Ying, TANG You-xi, KONG Ting, et al. Optimal antenna location for STBC-OFDM downlink with distributed transmit antennas in linear cells [J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(5): 387 – 389.
- [6] 韩亮,柳鑫,唐友喜,邵士海.线型小区中 V-BLAST 两根分布发射天线的位置优化 [J].电子与信息学报,2010,32(4): 978 – 982.
HAN Liang, LIU Xin, et al. Optimal antenna location for V-BLAST with two distributed transmit antennas in linear cells [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(4): 978 – 982. (in Chinese)
- [7] WANG Xin-zheng, ZHU Peng-cheng, CHEN Ming. Antenna location design for generalized distributed antenna systems [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(5): 315 – 317.
- [8] CHATZINOTAS S, IMRAN M, HOSHOVAR R. On the multi-cell processing capacity of the cellular MIMO uplink channel in correlated Rayleigh fading environment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3704 – 3715.
- [9] PARSONS J. D. The Mobile Radio Propagation Channel [M] 2nd ed. New York: Wiley, 2000. 168 – 169.
- [10] ASSRA A, HAMOUDA W, YOUSSEF A. A channel-estimation and data-detection scheme for multiuser MIMO-CDMA systems in fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2830 – 2834.
- [11] WAN Choi, Andrews J G. Downlink performance and capacity of distributed antenna systems in a multicell environment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(1): 69 – 73.
- [12] PROAKIS J G. Digital Communications [M]. 4th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2001. 31 – 32.
- [13] GOLDSMITH A. Wireless Communications [M]. London, UK: Cambridge University Press, 2005. 424 – 425.
- [14] FLETCHER. Practical Methods of Optimization [M]. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 2000. 265 – 270.

作者简介



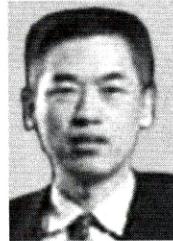
刘 田 男,1981 年出生于四川省成都市。
电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室博士研究生,主要从事 OFDM、分布 MIMO 方向的研究。
E-mail: liutian@uestc.edu.cn



韩 亮 男,1983 年出生于山东省莱芜市。
电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室博士研究生,主要研究分布式 MIMO。
E-mail: hanliang@uestc.edu.cn



杨 琳 女,1987 年出生于贵州省遵义市。
电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室硕士研究生,主要研究 OFDM 多载波技术。
E-mail: yanglin1010@uestc.edu.cn



唐友喜 男,1964 年出生于河南省潢川县。
电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室教授,博士生导师,主要研究无线通信中的信号处理。
E-mail: tangyx@uestc.edu.cn

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>