

天线互耦对 X 型极化分集系统中信道参数的影响

徐 志, 刘其中, 章传芳, 郭景丽

(西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室 陕西 西安 710071)

摘要: 基于等效网络拓展模型, 通过耦合矩阵级联的方式建立了包含天线单元间互耦影响的 X 型极化分集系统理论分析模型, 进而推导出天线单元平均接收功率以及空域相关系数的解析式, 由此可以分析天线间互耦与来波平均到达角对天线单元平均接收功率及其信道容量等的影响。仿真结果表明, 在以对称振子为单元的分集系统中互耦降低了天线单元平均接收功率及其信道容量。

关键词: 极化分集; 天线互耦; 空域相关性; 信道容量

中图分类号: TN828.6; TN911.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-240X(2007)04-0558-04

Effect of antenna mutual coupling on channel parameters of the X-type polarization diversity system

XU Zhi, LIU Qi-zhong, ZHANG Chuan-fang, GUO Jing-li

(Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A useful model for analyzing the effect of mutual coupling (MC) of the X-type polarization diversity system is propounded by the cascading of coupling coefficients matrix from the equivalent network model. The analytical expressions for both the average received power for each antenna element and spatial correlation between elements are also derived, and the effects of both MC and the mean Direction of Arrival (DOA) on the average power and capacity of MIMO wireless channels could be investigated, with the characters of the effect of mutual coupling in a dipole system shown.

Key Words: polarization diversity; mutual coupling; spatial correlation; channel capacity

MIMO (multi-input multi-output) 技术综合利用多种分集效果可显著提高未来无线通信系统的性能。极化分集作为抗多径衰落的一种重要方法, 能够有效地提高系统的链路性能, 显示了 MIMO 系统的优越性^[1~3]。

天线单元间耦合在空间有限的极化分集系统中影响显著。文献 [4~6] 研究了极化分集系统中不同的天线单元形式及不同的放置方式导致的互耦影响, 而关于由半波对称振子组成的 X 型极化分集系统中天线间互耦影响的研究, 尤其是系统的理论推导及分析并不多见。基于这种情况, 并以文献 [7] 中讨论的天线及电路间互耦对 X 型极化分集系统性能的影响为出发点, 笔者将在文献 [7] 中建立的 X 型极化分集系统天线部分的理论模型基础上, 理论推导由半波对称振子组成的 X 型极化分集系统中天线单元平均接收功率以及空域相关系数的解析式, 分析分集天线间互耦与平均到达角对 MIMO 无线通信空域相关性及其容量的影响。

1 天线接收信号与互耦

1.1 天线单元接收信号分析

为了便于说明, 先简要介绍 X 型极化分集系统中接收天线的理论模型^[7], 如图 1 所示。相同天线单元 A_1 、 A_2 与 Y 轴的夹角分别为 $\pm \alpha$ (在 XOY 面内形成“X”型), 如图 1(a)。此时极化分集接收天线阵的主波束沿 Z 轴方向。设典型多径来波信号位于 XOZ 面内, 并与 Z 轴夹角为 ϕ , 如图 1(b)。可见, 常用的垂直、水平正交

极化模型是此模型的一种特殊情况.

已知半波对称振子的 E 面归一化场强方向函数为

$$f(\theta) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right) / \sin \theta \quad , \quad (1)$$

其中 θ 为天线 E 面方向角.

图 1 中 如果给定 A_1 A_2 与 Y 轴之间的夹角 α 则 A_1 和 A_2 的接收信号为

天线 A_1
$$f_1(\phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \phi\right)}{\sin(\arccos(\sin \alpha \sin \phi))} \quad ; \quad (2)$$

天线 A_2
$$f_2(\phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \phi\right)}{\sin(\arccos(-\sin \alpha \sin \phi))} \quad . \quad (3)$$

1.2 天线等效网络模型

图 2 给出了接收天线系统 A_1 A_2 的等效网络拓展模型^[8]. 图中 z_{L1} z_{L2} 是天线负载阻抗 z_{A1} z_{A2} 是天线自阻抗 来波相当于信号源 (S_{s1} S_{s2}) 作用于天线 A_1 A_2 上. 若 A_1 A_2 的负载阻抗 z_L 相等且自阻抗 z_A 也相等, 由等效网络原理可得天线系统阵元间的耦合系数矩阵 C_r 为

$$C_r = (z_L + z_A)(Z_L + Z)^{-1} \quad , \quad (4)$$

式中 Z 是互阻抗矩阵 Z_L 为负载对角矩阵. 设定天线单元无源且互易 则天线 A_1 A_2 间的耦合矩阵为

$$C_r = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix} \quad . \quad (5)$$

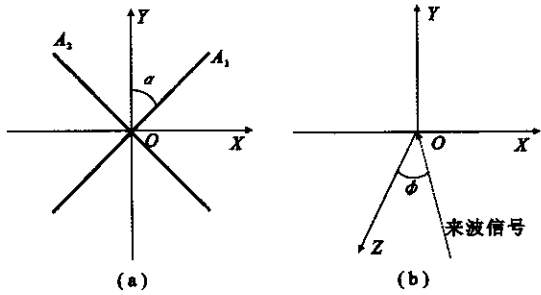


图 1 极化分集接收天线理论模型及多径来波

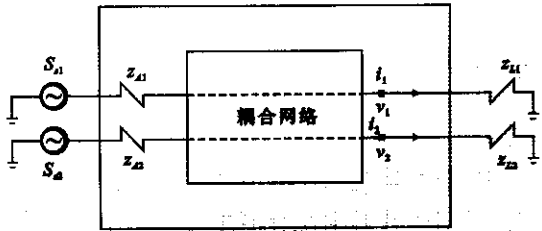


图 2 A_1 A_2 天线系统的等效网络拓展模型

2 空域相关性与 MIMO 信道

2.1 空域相关性

在不计互耦影响下 如图 1 所示的天线阵接收信号向量为

$$r^{nc}(\phi) = [f_1(\phi) \ f_2(\phi)]^T \quad , \quad (6)$$

则计及互耦影响的天线阵接收信号向量为 $r^c(\phi) = C_r \cdot r^{nc}(\phi)$. (7)

将式 (5) (6) 代入 (7) 得 $r^c(\phi) = [af_1(\phi) + bf_2(\phi) \ bf_1(\phi) + af_2(\phi)]^T$. (8)

与式 (6) 比较可知 互耦影响等效于使天线单元方向图畸变为

$$\begin{bmatrix} f_1^c(\phi) \\ f_2^c(\phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \phi\right)}{\sin(\arccos(\sin \alpha \sin \phi))} + b \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \phi\right)}{\sin(\arccos(-\sin \alpha \sin \phi))} \\ b \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \phi\right)}{\sin(\arccos(\sin \alpha \sin \phi))} + a \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \phi\right)}{\sin(\arccos(-\sin \alpha \sin \phi))} \end{bmatrix} \quad . \quad (9)$$

设定来波功率角谱 $p(\phi)$ 服从高斯分布 定义两天线单元接收信号的电压相关系数为^[5]

$$\rho_{12} = R_{xx} + jR_{xy} = \frac{1}{(P_1 P_2)^{1/2}} \int_{\phi_0 - \pi}^{\phi_0 + \pi} r_1(\phi) r_2^*(\phi) p(\phi) d\phi \quad , \quad (10)$$

式中 P_1 P_2 是两天线单元的平均接收功率 R_{xx} R_{xy} 是接收信号电压实部—实部和实部—虚部间的归一化相关系数 ϕ_0 是平均来波到达角 (DOA).

这里定义的平均接收功率为
$$P_1 = \int_{\phi_0 - \pi}^{\phi_0 + \pi} |r_1(\phi)|^2 p(\phi) d\phi \quad , \quad (11a)$$

万方数据
$$P_2 = \int_{\phi_0 - \pi}^{\phi_0 + \pi} |r_2(\phi)|^2 p(\phi) d\phi \quad , \quad (11b)$$

则信号包络相关系数为(12)

$$\rho_{\text{env}} = |\rho|^2 = R_{xx}^2 + R_{xy}^2$$

若计及互耦与天线单元方向性 将式(9)代入(10)和(11)得到 X 型极化分集系统的信号空域相关系数解析式为

$$\rho_{12}^c = \frac{1}{(P_1^c P_2^c)^{1/2}} \int_{\phi_0-\pi}^{\phi_0+\pi} \left[a \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(\sin\alpha \sin\phi))} + b \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(-\sin\alpha \sin\phi))} \right] \cdot \left[b \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(\sin\alpha \sin\phi))} + a \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(-\sin\alpha \sin\phi))} \right]^* p(\phi) d\phi \quad (13)$$

式(13)单元平均接收功率为

$$P_1^c = \int_{\phi_0-\pi}^{\phi_0+\pi} \left| a \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(\sin\alpha \sin\phi))} + b \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(-\sin\alpha \sin\phi))} \right|^2 p(\phi) d\phi \quad (14a)$$

$$P_2^c = \int_{\phi_0-\pi}^{\phi_0+\pi} \left| b \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(\sin\alpha \sin\phi))} + a \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \sin\phi\right)}{\sin(\arccos(-\sin\alpha \sin\phi))} \right|^2 p(\phi) d\phi \quad (14b)$$

2.2 信道容量

如果同时计及天线单元间的互耦与空域相关性影响,则等效的 MIMO 信道矩阵 H 为

$$H = C_r R_r^{1/2} H_w \quad (15)$$

式中 R_r 是不计互耦情况下的接收阵列空域相关矩阵,其元素为不计互耦情况下阵元间的空域相关系数 H_w 是高斯矩阵,其元素是空域独立同分布的高斯分布. 设相关矩阵 R_{rc} 已包含互耦影响,则

$$H = R_{rc}^{1/2} H_w \quad (16)$$

在发射机未知信道状态而平均分配功率的条件下,MIMO 系统的瞬时信息容量为

$$C = \log_2 [\det(I_{N_r} + (\rho/N_t) H H^H)] \quad (17)$$

式中 ρ 是各接收天线单元的平均信噪比 N_t 是发射天线单元数目.

3 数值结果与讨论

使用矩量法(MOM)计算如图1所示的 X 型极化分集天线间的互耦影响,工作频率为 300 MHz,互阻抗为线径 0.001λ 的对称振子, λ 为波长. 设天线单元中心距为 0.1λ ,等幅同相馈电,负载阻抗均为 $50\ \Omega$,自阻抗算得为 $Z_{11} = 81.31 + j41.4\ \Omega$. X 型极化分集天线单元间互阻抗与 α 角关系见表 1.

表 1 X 型极化分集天线单元间互阻抗与 α 角关系

$\alpha/(^\circ)$	0	5	15	30	45
Z_{12}	$78.89 + 1.04i$	$77.99 + 0.19i$	$69.69 + 5.84i$	$40.29 + 6.19i$	$0.82 + 0.80i$

由于 X 型极化分集天线的特殊放置方式,所以只需研究 α 从 0° 到 45° 之间的互阻抗变化规律.

图 3 显示了互阻抗与 α 之间的变化规律,可知天线 A_1 与 A_2 之间的互阻抗在 $\alpha = 0^\circ$,即两天线平行时最大,并随 α 增大单调递减.在 $\alpha = 45^\circ$,即 A_1 与 A_2 彼此正交时基本降为 0.

同时,伴随着互阻抗的变化,天线单元 A_1 在 XOZ 面内的方向图如图 4 所示(图中 $\alpha = 0^\circ$ 表示天线单元 A_1 与 Y 轴夹角 α 为 0° ,并计及互耦. $\alpha_{nc} = 0^\circ$ 则表示不考虑互耦影响,其余标号类似).可见,天线 A_2 对 A_1 的互耦作用直观上压缩了天线 A_1 在 XOZ 面即来波所在平面内的方向图,且 α 越小压缩效果越明显.例如 $\alpha = 0^\circ$ 时,无耦合影响的归一化场强比计及互耦时大 0.3567 . $\alpha = 45^\circ$ 时,互耦影响基本为 10^{-3} 量级,方向图基本没有变化.这是由于天线 A_1 与 A_2 等幅同相馈电, A_1 在 A_1 上产生的感应电流抑制了 A_1 的原始

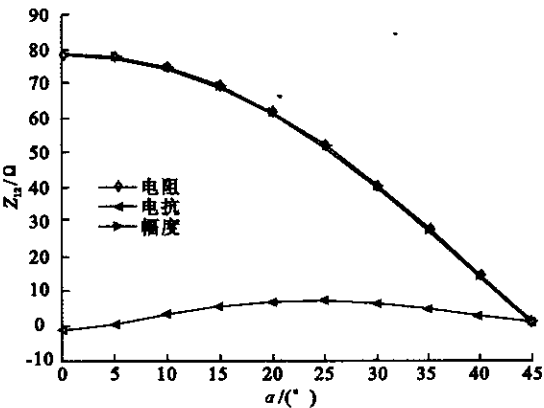


图 3 X 型极化分集天线单元间互阻抗

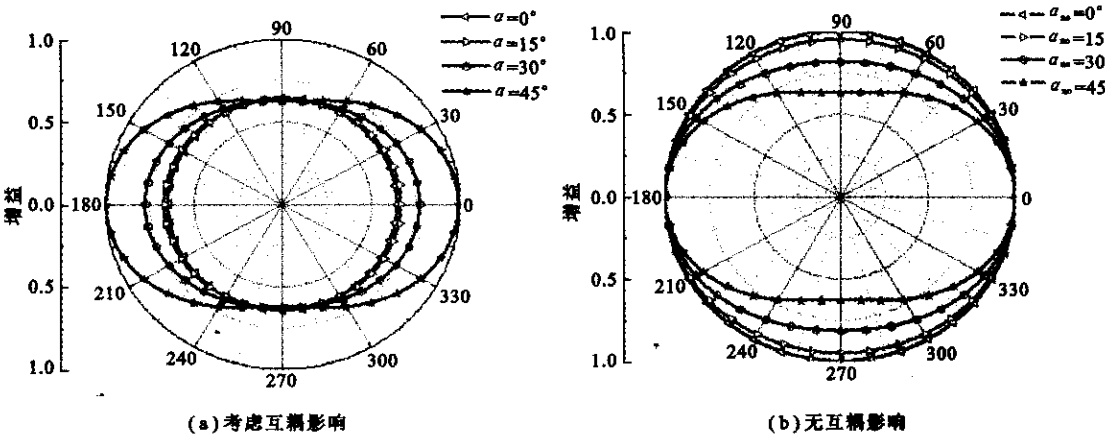


图 4 X 型极化分集天线单元 A_1 在 XOZ 面内的方向图

电流, 并且天线平行时产生的感应电流最大, 抑制影响也最大。

由图 1 知, 相同的半波对称振子天线 A_1 、 A_2 关于 Y 轴对称分布, 来波功率角谱分布在 XOZ 面内。通过计算可知, 尽管来波到达角 ϕ_0 不同, 天线 A_1 、 A_2 将接收到不同的功率, 但 A_1 与 A_2 之间的功率差十分微小, 信号间的相关系数 ρ 接近于 1。同时可以看到式 (13)、(14) 对振子类天线等具有的十分实用的扩展作用。

由式 (14) 分析了天线单元平均接收功率随来波平均到达角 ϕ_0 的变化规律, 如图 5 所示 (图中 $\phi_0 = 0^\circ$ 表示来波平均到达角 ϕ_0 为 0° , 并计及互耦影响, $\phi_{0nc} = 0^\circ$ 则表示不考虑互耦影响, 其余标号类似)。可见 ϕ_0 确定时, 天线间的耦合将降低天线单元的平均接收功率。因此, 伴随 α 的增大, 互耦的减小, 天线单元平均接收功率将增加并趋近于无互耦影响时的接收功率。当 α 确定, ϕ_0 变化时, ϕ_0 的增大将全面减小天线单元的平均接收功率, 并在 $\alpha = 33^\circ$ 附近计及互耦影响的接收功率将随 ϕ_0 的变化首次超过无互耦影响时的接收功率值。所以实际系统中, 为获得最大的接收信号功率, 应该让来波波面平行于天线单元组成的阵面。

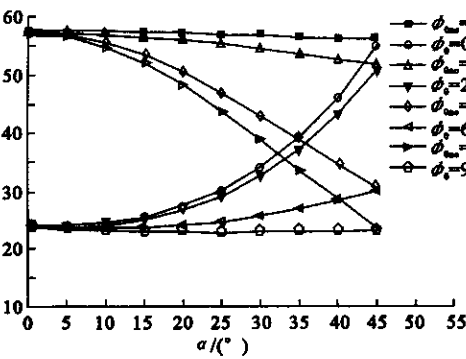


图 5 互耦与平均到达角对 X 型极化分集天线单元接收功率影响

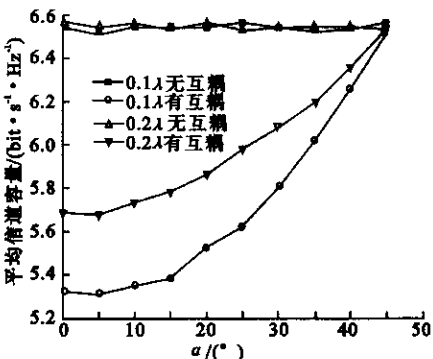


图 6 互耦对 2×2 MIMO 信道容量影响

图 6 给出了当天线间距变化时互耦对 2×2 MIMO 信道容量的影响, 设定 H_w 为 $(0, 1)$ 的复高斯分布。可以看到, 天线间距的增大, 天线单元间互耦影响减小, 信号相关性降低, 提高了 MIMO 系统的信道容量。并且 α 越小, 间距的变化对信道容量的影响越大。在天线单元正交时, 互耦影响基本为 0, 信道容量达到最大。同时注意到在实际系统中天线间距的增加也会使 MIMO 系统多径效应的优势越加明显, 信道容量将进一步提高。

表 2 X 型极化分集系统的分集增益

信号处理方式	极化分集增益公式	极化分集增益/dB
选择性合并	$G = 5.71 \exp(-0.87\rho - 0.16\Delta)$	2.3924
等增益合并(EGC)	$G = -8.98 + 15.22 \exp(-0.20\rho - 0.04\Delta)$	3.4811
最大比合并(MRC)	$G = 7.14 \exp(-0.59\rho - 0.11\Delta)$	3.9578

Disease[C]//Self-Organized Biological Dynamics and Nonlinear Control . Cambridge : Cambridge University Press , 2000 : 66-96.

[8] Hu M K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants[J]. IEEE Trans on Information Theory , 1962 , 8(2) : 179-187.

[9] Sluzek A. Identification and Inspection of 2-D Objects Using New Moment-Based Shape Descriptors[J]. Pattern Recognition Letters , 1995 , 16(7) : 687-697.

[10] Shutler J D , Grant M G , Nixon M S , et al. On a Large Sequence-Based Human Gait Database[C]//Proc 4th International Conference on Recent Advances in Soft Computing. Nottingham : The Nottingham Trent University , 2002 : 66-71.

[11] Foster J P , Nixon M S , Prugel-Bennett A. Automatic Gait Recognition Using Area-Based Metrics[J]. Pattern Recognition Letters , 2003 , 24(14) : 2489-2497.

[12] Wagg D K , Nixon M S. On Automated Model-Based Extraction and Analysis of Gait[C]//Proc Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. Seoul : IEEE , 2004 : 11-16.

(编辑 : 郭 华)

(上接第 561 页)

最后 , 通过文献 [9] 给出的经验极化分集增益公式计算了当信息处理方式不同且 A_1 与 A_2 正交时 , X 型极化分集系统的极化分集增益 , 如表 2 所示. 表 2 中 ρ 为相关系数 Δ 为平均接收功率比 L .

4 结 束 语

以上通过建立的互耦分析模型分析了 X 型极化分集系统中互耦的影响. 笔者推导了天线单元平均接收功率以及空域相关系数的解析式 , 分析天线间互耦与来波平均到达角对 MIMO 极化分集系统天线单元平均接收功率及信道容量的影响. 通过计算以对称阵子为单元组成的 X 型极化分集系统中的互耦合相关系数 , 指出在该系统中互耦不但压缩了天线在来波平面内的方向图 , 而且降低了天线单元平均接收功率及信道容量.

参考文献 :

[1] Andrews M R , Mina P P , de Carvalho R. Tripling the Capacity of Wireless Communications Using Electromagnetic Polarization [J]. Nature , 2001 , 409(1) : 316-318.

[2] Michishita N , Arai H. A Polarization Diversity Antenna Using a Printed Dipole and Patch with a Hole[J]. Electron Commun Jpn , 2003 , 86(9) : 57-66.

[3] Chen Sheng-bing , Jiao Yong-chang , Zhang Fu-shun , et al. Advances in Base Station Antenna Techniques for Cellular Mobile Communications [J]. Journal of Xidian University , 2003 , 30(6) : 792-797.

[4] Li Xin , Nie Zai-ping. Effect of Mutual Coupling on Performance of MIMO Wireless Channels[EB/OL]. [2004-08-18]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs-all.jsp?arnumber=1411482&fromcon>.

[5] Liang Dong , Hosung Choo , R W Heath , et al. Simulation of MIMO Channel Capacity with Antenna Polarization Diversity [J]. IEEE Trans on Wireless Communications , 2005 , 4(4) : 1869-1873.

[6] Janaswamy R. Effect of Element Mutual Coupling on the Capacity of Fixed Length Linear Arrays [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters , 2002 , 1(1) : 157-160.

[7] Xu Zhi , Liu Qizhong , Sun Baohua , et al. Analysis of Mutual Coupling in the X-type Polarization Diversity System[J]. Journal of Xidian University , 2007 , 34(2) : 222-226.

[8] Gupta I J , Ksienski A K. Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Arrays[J]. IEEE Trans on Antennas Prop , 1983 , 31(5) : 785-791.

[9] Turkmani A M D , Arowojolu A A , Jefford P A , et al. An Experimental Evaluation of the Performance of Two-branch Space and Polarization Diversity Schemes at 1800MHz [J]. IEEE Trans on Vehi Tech , 1995 , 44(2) : 318-326.

(编辑 : 郭 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),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>