

一种抗干扰且低复杂度的混合型智能天线系统设计

王 刚, 何明华

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 提出了一种低复杂度的混合型智能天线, 用来解决频率选择性衰落信道中的符号间干扰 (ISI) 的问题。仿真结果证实, 该低复杂度的混合智能天线系统可以在具有 ISI 多路径信道衰落下具有良好的性能, 并且优于利用定向天线以及多径分集增益的智能天线系统。

关键词: 混合型智能天线; 码间干扰; 数字波束形成器

中图分类号: TN91

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)02-0047-03

Design of anti-interference and low complexity mix-smart antenna

Wang Gang, He Minghua

(Physics and Information Engineering Institute, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This paper proposes a low complexity hybrid smart antenna system with directional elements and reduced-size digital beam former. Simulation results confirm that the proposed methods can provide robust performance over frequency-selective fading channels with ISI. It can outperform the conventional smart antenna systems because of using directional antennas and utilization of multipath diversity gain.

Key words: hybrid smart antenna; ISI; digital beam former

在无线通信系统中, 智能天线可以用于改善覆盖范围、链路质量、数据速率和系统能力, 通过整合优化算法的性能检测期望信号(SOI)以及抑制干扰(如多径信号)。通常, 在频率选择性的多径衰落信道中, 多径信号到达天线接收阵列的角度(AOA)和时间(TOA)不同。在多径信道中, 不同的 TOA 导致符号间干扰(ISI), 降低系统的性能。传统的智能天线系统利用不同的 AOAs 来抑制 ISI 的影响^[1]。通过灵活地使用智能天线的多个阵列单元, 一个智能天线系统可以形成多个波束, 每个波束对应多径信道中的不同方向的信号, 极大地降低符号间干扰, 但传统的智能天线利用全方位数字波束形成抑制干扰, 计算量较大。

为了解决计算复杂的问题, 在平坦衰落信道中, 天线阵列仅采用最大信干噪比的合并算法^[2], 在频率选择性信道中, 采用混合智能天线系统来抑制多径传播下的 ISI 干扰。其基本思想是考虑到信号沿多径传播以及天线单元的几何阵列, 将传统的智能天线阵列分成两组子阵列。第一组阵列中不含 ISI, 可以用相对较简单的最大比合并(MRC)来进行处理。第二组阵列包含 ISI 间干扰, 需要利用减少尺寸的最佳波束形成来抑制干扰。最后, 将两组输出信号融合来检测传输信号。仿真结果证实,

该设计方案的混合智能天线系统可以在存在 ISI 的多路径衰落信道下表现出良好的性能, 相比利用定向天线以及多径分集增益的传统智能天线系统毫不逊色。

1 混合型智能天线模型

与传统的采用全方位阵列单元的智能天线系统不同, 混合型智能天线系统融合了模拟波束转换和数字波束, 形成二者共同的优势。

本文主要针对传输符号周期比信道延迟周期小很多的宽带通信系统。其结果在传播信道模型中, 存在不同的 AOA 和 TOA 组成的频率选择性信道。如在具有 8 阵元的智能天线系统中, 对于 90° 波束宽度的情况, 所有阵元的波束在 360° 覆盖范围内将会有部分重叠。如图 1 所示, 对于 TOA 不同的两路 30° 波束宽度的信号传播模型, 两组天线阵列单元将同时接收多径信号, 其中阵元 1 和 4 接收的信号没有 ISI 干扰, 而阵元 2 和 3 将会接收包含 ISI 的信号。这种情形下, 混合型智能天线系统会利用频率选择性分集增益并抑制 ISI 干扰。混合型智能天线由多个定向天线单元、高/中频变频器、模数转换器及两个接收分支组成。其中第一分支是没有 ISI 干扰的子阵列单元, 另一分支则存在 ISI 干扰。

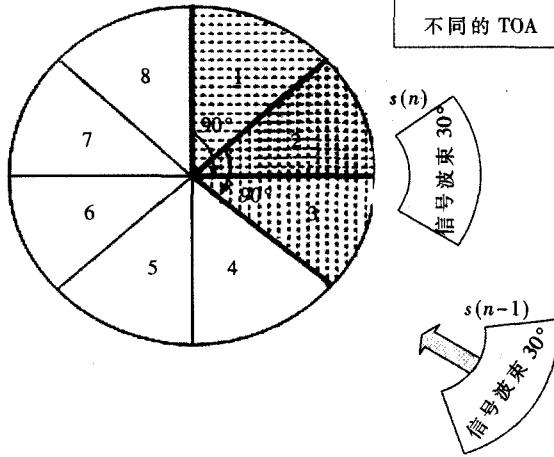


图 1 两路波束宽度为 30°信号在不同时刻入射到波束宽度为 90°天线系统

2 混合型智能天线系统接收机的设计

混合型智能天线系统结构如图 2 所示,首先传输信号通过 L 条瑞利衰落的多径信道,第 n 个天线阵元接收的基带信号可以表示为:

$$x^{(n)}(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l^{(n)} f_n(\theta_l) s(t - \tau_l) + n(t) \quad (1)$$

式中 $\alpha_l^{(n)}$ 、 τ_l 和 θ_l 为复高斯随机变量,分别是第 l 路衰落信道噪声乘性系数、时间延迟和到达角; $n(t)$ 是功率为 σ_n^2 的高斯随机噪声; 函数 $f_n(\cdot)$ 是第 n 个天线阵列单元的放大倍数,对于全方位阵列天线这个值是相同的,对于 90°波束宽度的定向单元,当到达角落入主瓣区域时, $f_n(\cdot)$ 值设为 2; $s(t)$ 是周期为 T_s 的期望信号。在此假设信道抽头之间的时间间隔是 T_s ,即意味着延迟时间 $\tau_l = l \times T_s$ 。

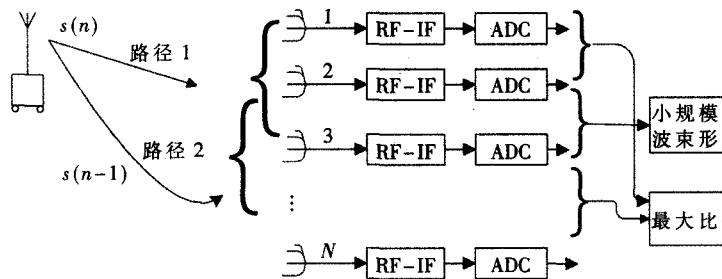


图 2 频率选择性衰落信道下低复杂度智能天线系统模型

假设接收机是理想的,对第 n 个阵列单元接收的信号进行 i 次采样,则:

$$x^{(n)}(i) = x^{(n)}(t_i)$$

其中:

$$t_i = iT_s$$

$$x^{(n)}(i) = \sum_{l=1}^L \alpha_l^{(n)} f_n(\theta_l) s(i - l + 1) + n(i) \quad (2)$$

以第 i 次采样为例,天线阵元的接收信号可以用下列向量式来表示:

$$X(i) = \sum_{l=1}^L \{\alpha_l \cdot f(\theta_l)\} s(i - l + 1) + n(i) == \sum_{l=1}^L \beta_l s(i - l + 1) + n(i) \quad (3)$$

其中, $X(i) = [x^{(1)}(i), \dots, x^{(N)}(i)]^T$, $\alpha_l = [\alpha_l^{(1)}, \dots, \alpha_l^{(N)}]^T$, $f(\theta_l) = [f_1(\theta_l^{(1)}), \dots, f_N(\theta_l^{(N)})]^T$, $\beta_l = \alpha_l \cdot f(\theta_l)$ 是复信道向量,其中 \cdot 是对应矩阵对应元素点积,由于定向天线转换波束的零陷效应的影响,复信道可以被分成两部分,即 $\beta_l = \beta_l^{no} + \beta_l^{(o)}$, β_l^{no} 、 $\beta_l^{(o)}$ 分别表示非重叠和重叠的复合信道。图 1 的情况下,第 1、2 支路阵元导向向量分别表示为 $f(\theta_1) = [f_1(\theta_1^{(1)}) f_2(\theta_1^{(2)}) f_3(\theta_1^{(3)}) 0 0 0 0]^T$, $f(\theta_2) = [0 f_2(\theta_2^{(2)}) f_3(\theta_2^{(3)}) f_4(\theta_2^{(4)}) 0 0 0 0]^T$ 。基于 $f(\theta_1)$ 和 $f(\theta_2)$ 场景的天线单元 2 与 3 相互重叠,则复合信道可以重新表示为: $\beta_l = \beta_l^{no} + \beta_l^{(o)}$, $l = 1, 2$ 。因此,在接收端可以充分利用两路分支信号来得到接收信号。在第一路分支中,由于不存在 ISI 干扰,可以直接利用 MRC 来合并非重叠区域的接收信号:

$$z^{(no)}(i) = \sum_{l=1}^L \beta_l^{(no)H} X^{(no)}(i - l + 1) == \sum_{l=1}^L \beta_l^{(no)H} \beta_l^{(no)} s(i) + \tilde{n}(i) \quad (4)$$

其中 $\tilde{n}(i)$ 是 MRC 的输出噪声, $X^{(no)}(i - l + 1)$ 是第 $(i - l + 1)$ 符号周期内的非重叠信号。因此,式(3)接收信号 $X(i)$ 也可以表示为重叠区域接收信号 $X^{(o)}$ 与非重叠区域接收信号 $X^{(no)}$ 之和:

$$X(i) = X^{(o)} + X^{(no)} \quad (5)$$

接下来,在第二支路存在 ISI 干扰的作用下,最优权向量可以用来合并重叠区域的接收信号:

$$\begin{aligned} z^{(o)}(i) &= w_l^H X^{(o)}(i - l + 1) \\ &= w_l^H \beta_l^{(o)H} s(i) + \bar{n}(i) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\bar{n}(i)$ 是优化后的合并输出噪声,优化的权向量可以根据最大信干噪比准则推出:

$$w_l = (\mathbf{R}_{in}^{(o)})^{-1} \beta_l^{(o)} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{R}_{in}^{(o)}$ 表示接收信号 $X^{(o)}(i)$ 干扰加噪声的相关矩阵, $X^{(o)}(i)$ 的相关矩阵可表达为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x^{(o)} &= E\{X^{(o)}(i) \cdot X^{(o)H}(i)\} \\ &= \beta_l^{(o)H} \cdot \beta_l^{(o)} + \mathbf{R}_{in}^{(o)} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{R}_{in}^{(o)} = E\{(I(i) + n(i)) \cdot (I(i) + n(i))^H\}$, 干扰信号 $I(i) = \sum_{k=1, k \neq l}^L \beta_k s(i - k + 1)$ 。

最后,结合两路输出信号式(4)和式(6),传输信号 $s(i)$ 可以由下式得到:

$$\begin{aligned} \hat{s}(i) &= \mu(z^{(o)}(i) + z^{(no)}(i)) \\ &= \mu \left[w_l^H \cdot \beta_l^{(o)H} + \sum_{l=1}^L \beta_l^{(no)H} \cdot \beta_l^{(no)} \right] s(i) + \mu \hat{n}(i) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\mu = \left| w_l^H \cdot \beta_l^{(o)} + \sum_{l=1}^L \beta_l^{(no)H} \cdot \beta_l^{(no)} \right|^{-1}$ 是归一化因子。

3 数据仿真

对混合型智能天线与 8 阵元的传统智能天线在频率选择性衰落信道中进行仿真对比, 在传统的智能天线系统中, 在所有的仿真条件下, 通过延迟 $T_l(0-t_l)$ 之间, 产生 $l=2$ 两条独立的瑞利衰落信道, α_l 路径增益假设为复随机变量与单位方差比值, 传输信号经过 16 QAM 调制生成^[3], 输出对应的误码率与信噪比关系图都是在进行 50 000 次蒙特-卡洛试验基础上得出的, 为了对其性能进行充分的比较, 在不同的 AOA、TOA 以及信号在不同的主波束带宽条件下对混合型智能天线与传统智能天线进行仿真。

以纵轴表示误码率, 横轴表示信噪比, 对不同的波

(上接第 46 页)

表 3 CAN 网工作状态应答命令帧报文数据设置

DATA0	DATA1	DATA2	DATA3	DATA4[错误寄存器]	DATA5[错误寄存器]	DATA6	DATA7
0x00	0x00	0x00	0x00	接收错误计数器值	发送错误计数器值	0x00	0x00

表 4 设备复位命令帧报文数据设置

DATA0	DATA1	DATA2	DATA3	DATA4	DATA5	DATA6	DATA7
0x00							

表 5 设备复位报告命令报文数据设置

DATA0	DATA1	DATA2	DATA3	DATA4	DATA5	DATA6	DATA7
0x00	0x01 (Software Reset)	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00

现在让管理节点 Node1 与从设备节点 Node2 进行通信, 用上位机软件来监视节点 Node1 与节点 Node2 通信过程中发送的 CAN 报文数据, 实验结果如图 7 所示。

序号	第几帧 CAN	帧 ID(不移位)	帧格式	帧类型	数据长度	数据
00000000	0	0x408866a0	扩展帧	扩展帧	0x08	11 00 00 00 00 00 00 00
00000001	0	0x60666610	扩展帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
00000002	0	0x40886600	扩展帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
00000003	0	0x44666620	扩展帧	扩展帧	0x08	00 01 00 00 00 00 00 00

图 7 CAN 总线智能节点间通信实验结果

分析图 7 的实验结果: 4 个在第 0 路 CAN 上传输的 CAN 报文的帧格式均为数据帧, 帧类型为扩展帧; 由第 0 条 CAN 报文帧标识符 0x408866a0 可知, 报文优先级为 2, 目的地址为 0x88, 源地址为 0x66, 说明该报文是管理节点 Node1 发向从设备节点 Node2 的 CAN 网工作状态查询命令; 由第 1 条 CAN 报文帧标识符 0x60666610 可知, 报文优先级为 3, 目的地址为 0x66, 源地址为 0x88, 说明该报文是从设备节点 Node2 发向管理节点 Node1 的对 CAN 网工作状态查询命令的应答命令, 此外由 DATA4=0x00, DATA5=0x00 可知, CAN 错误状态寄存器接收计数器和发送计数器值均为 0, 说明 CAN 网是稳定可靠的; 由第 2 条 CAN 报文帧标识符 0x40886600 可知, 报文优先级为 2, 目的地址为 0x88, 源地址为 0x66, 说明该报文是管理节点 Node1 发向从设备节点 Node2 的设

束带宽的阵元在不同的 AOA 以及 TOA 信号下进行仿真, 阵元模型如图 2 所示, 混合型智能天线系统分别在 45°、90°、135°、180° 波束宽度下对具有不同 AOA 和 TOA 的 30° 信号波束宽度进行仿真, 具有相同 AOA 和 TOA 的信道模型将呈现平坦衰落^[4], 如图 3 所示, 仿真结果表明当波束带宽为 180° 时, 混合型智能天线的性能与传统智能天线基本相当。当智能天线的波束为 135° 时, 由于更高的天线增益以及多路分集增益, 混合型智能天线超越传统智能天线系统。所以在频率选择性衰落信道中, 低复杂度的混合型智能天线能够有更加良好的抗干扰能力。

本文提出了一种新型的适用于频率选择性衰落信道下的混合型智能天线接收系统, 与采用定向天线阵列来抑制干扰的传统智能天线相比, 混合型智能天线系统

(下转第 52 页)

备复位命令; 由第 3 条 CAN 报文帧标识符 0x406668f0 可知, 报文优先级为 2, 目的地址为 0x66, 源地址为 0x88, 说明该报文是从设备节点 Node2 发向管理节点 Node1 的设备复位报告命令, 即对设备复位命令的回应报文。

本文设计的 CAN 总线智能节点已应用于车载控制系统中。应用结果表明, 利用 ARM STM32F107 芯片和通用 CAN 收发器 CTM8251T 芯片设计的 CAN 总线智能节点具有结构简单、节点易于扩展、系统运行稳定可靠、实时性好、抗干扰能力强等特点, 具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 吴文珍, 韩玉祥, 司光宇, 等. 基于 CAN 总线智能检测仪的设计[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 29(5): 85-87.
- [2] 饶运涛, 邹继军, 王进宏, 等. 现场总线 CAN 原理与应用技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [3] 王月娇, 朱家驹. CAN 总线智能测控节点的设计[J]. 湖北大学学报, 2005, 27(2): 133-136.
- [4] 徐爱钧. IAR EMARM V5 嵌入式系统应用编程与开发[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

(收稿日期: 2011-09-20)

作者简介:

纪文志, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 现代通信中的智能信号处理技术。

所示, 测试波形的峰值高于通过 IBIS 模型得到的仿真波形, 通过 IBIS 参数调整修正仿真波形如图 4 所示, 通过手动和自动修正后, 得到表 1 修正结果。通过比较得出, 波形差异减小。

表 1 测试与修正结果

	DA	DP	DAI/%	DPI/%
模型验证	0.19	0.83	5.66	25.30
自动修正	0.16	0.53	5.01	16.21
手动修正	0.17	0.58	5.33	17.65

经过多次实验, 把修改的 IBIS 模型指派到不同的 IC 上, 多次比对后, 修改后的模型同样可以减小波形的误差, 达到修正的目的。

该方案对 IBIS 模型的修正同样存在很多难题未解决, 如误差处理参数仅仅通过 DA、DP、DAI、DPI 的计算, 没有给出多种可供选择的收敛方法; 对于图形的比对没有设计更精确的方案; 并且参数的修改多是采用经验公式, 相比 SPICE 参数存在很多误差。结合以上问题, 本课题还需要深入研究 Cadence 对 IBIS 模型仿真模式。

参考文献

- [1] VARMA A K, STEER M. Improving behavioral IO buffer modeling based on IBIS[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2008, 31(4): 711-721.
- [2] BOGATIN E, 著. 信号完整性分析[M]. 李玉山, 李丽萍, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [3] BUCHANAN J E. Signal and power integrity in digital

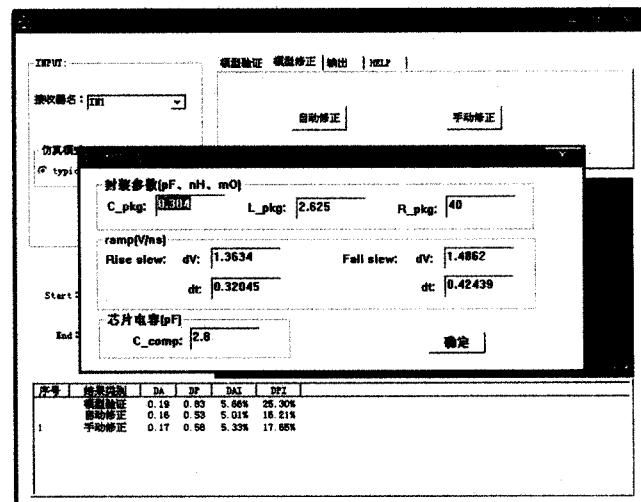


图 4 参数调整与计算结果

systems[M]. McGraw-Hill Book Company, 1995.

- [4] MIRMAK M. Issues with C_comp and differential multi-stage IBIS models[C]. IBIS Summit Design Con East, 2004.
- [5] WANG L. Waveform comparison & S2IBIS3 roadmap[C]. IBIS-Santa Clara, CA, USA, Design Con, 2008.

(收稿日期: 2011-09-30)

作者简介:

贾树恒, 男, 1977 年生, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 电路与系统。

(上接第 49 页)

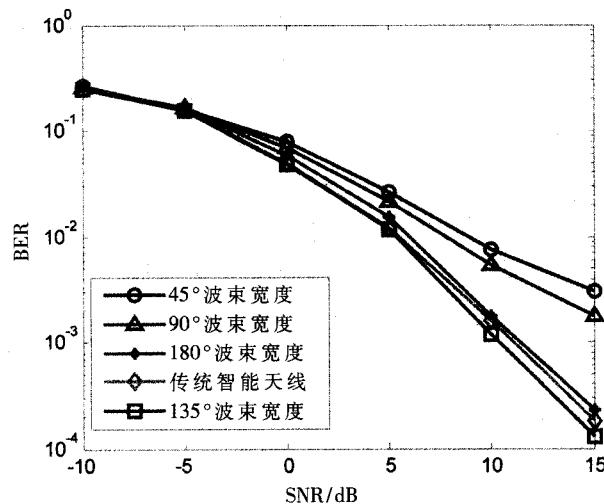


图 3 频率选择性衰落信道下,

混合型智能天线不同波速宽度下误码率与信噪比关系图

所采用的数字波束形成技术具有更低的复杂度。而且, 运用 MRC 可以结合没有 ISI 的输出信号。两路接收信号分别进行处理以消除不同 AOA 以及 TOA 带来的干扰,

该方法具有更好的效果。仿真结果证实本文提出的混合智能天线方案接近传统的智能天线系统的性能, 而且在频率选择性多径衰落信道条件下性能更佳。

参考文献

- [1] 金荣洪, 耿军平, 范瑜. 无线通信中的智能天线[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 150-151.
- [2] GROSS K, 著. 智能天线(MATLAB 版)[M]. 何业军, 桂良启, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009: 215-218.
- [3] CELIK N, ISKANDER M F, ZHANG Z. Experimental verification of the hybrid smart antenna algorithm with modulated waveforms[C]. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 2009(8): 236-239.
- [4] ZHANG Z, ISKANDER M F, YUN M F, et al. Hybrid smart antenna system using directional elements—performance analysis in flat Rayleigh fading[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2003, 51(10): 2926-2935.

(收稿日期: 2011-09-20)

作者简介:

王刚, 男, 1985 年生, 研究生, 主要研究方向: 智能天线。

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>