

文章编号:1005-6122(2006)06-0048-04

稀疏阵列天线综合的遗传算法优化*

张浩斌¹ 杜建春² 聂在平³

(1. 电子对抗国防重点实验室,成都 610036; 2. 电子科技集团公司 29 所,成都 610036;
3. 电子科技大学电子工程学院,成都 610054)

摘要: 通过遗传算法优化选择常规满阵中一定比例的工作单元,使阵列在欠饱和状态下达到窄波束低副瓣的要求。以单元的工作状态和激励幅度为优化参量,波束宽度和副瓣电平为适值函数,通过适值缩放和多种群进化竞争使遗传进化稳定地收敛到全局最优。详细分析了稀疏阵的单元布局、稀疏率及单元激励对优化阵列特性的影响。

关键词: 稀疏阵,遗传算法,阵列综合,副瓣电平

Thinned Array Synthesis Using Genetic Algorithm

ZHANG Hao-bin¹, DU Jian-chun², NIE Zai-ping³

(1. National EW Laboratory, Chengdu 610036, China; 2. The 29th Institute of CETC, Chengdu 610036, China;
3. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Genetic Algorithm (GA) is used to optimize the selected elements from a full array, so as to achieve narrow mainlobe and minimized sidelobes pattern. Setting the working state and excitation of elements as variables, mainlobe width and sidelobe level as fitness function of GA, fitness ranking and multi-populations competition techniques were applied to assure that the GA converge to the optimum result. The effects of layouts, sparse rate and the excitation to the pattern of thinned array are analyzed in detail.

Key words: Thinned array, Genetic algorithm, Array synthesis, Sidelobe level

引言

相控阵天线能够灵活、无惯性地使波束扫描至预期的方向上,在空间功率合成大功率,在指定的区域中进行搜索、识别和跟踪多个目标,对目标的捕获率大、稳定可靠,因此在雷达、电子战、通信系统中的应用越来越广泛。但相控阵的缺点是制造成本很高,为了降低制造成本,同时为解决处理多通道的数据量问题,从天线阵列中选择以较少工作单元形成接收或发射的稀疏子阵^[1,2],而不像常规满阵那样让所有单元都同时工作,是解决问题的一项有效措施。

假设一个线阵口径尺寸为 50λ ,网格间距为 0.5λ ,即满阵由 101 个单元组成;若选择 50 个工作单元组成稀疏阵列时,那么可供选择的布阵方式就

有 2^{50} 种,因此搜索合理布局方式是令人头疼的,特别是大型阵列。空间锥削法^[3]使邻近单元间距反比于一个理想连续窗函数,但对于间距一定的离散单元阵列,中心单元的间距和连续函数期望的间距相比太大,且容易在内部产生周期性大于 0.5λ 的单元间距,使观察区域内出现栅瓣。随机法^[4]单元位置的选择取决于和期望激励函数成正比的一个概率密度分布。这种方法一方面不能直接应用于固定间距分布的阵列网格,同时其搜索过程是随机的,而不是逐步趋近于期望结果。

遗传算法(GA)作为一种全局优化方法,近年来在阵列天线的优化方面十分活跃,文献[5]将稀疏阵的单元工作状态和副瓣电平作为适应函数进行优化,没有考虑稀疏阵波束宽度对旁瓣电平的影响;文献[6]对工作单元的位置采用二进制编码进行优

* 收稿日期:2005-04-11;定稿日期:2005-07-25

化,当位置的个数不是2的整数次幂时,这样的步长不能使工作单元处在规定的位置上,必须作近似,因此难以得到最佳的优化结果。本文在给定的工作单元条件下,采用遗传算法对稀疏阵列主瓣宽度和副瓣电平进行了优化,同时考虑了工作单元分布、幅度的影响,得到了令人满意的结果。

1 稀疏阵列

如图1所示, M 个单元组成的线阵, 单元间距为 d , 阵元的激励幅度为 $\{a_i\}$, 相位为 $\{\phi_i\}$, 单元是否激励用 $\{c_i\}$ 表示, 假设只选择其中 $m < M$ 个单元处于工作状态, 而其余的 $M - m$ 个单元接负载, 从而形成 m 个单元的稀疏阵。每个单元具有两种工作状态, $c_i = 1$ 表示该位置的单元工作(“开”), $c_i = 0$ 表示该位置单元不工作(“关”);因此稀疏阵的特性可表示为:

$$E = \sum_{i=0}^{M-1} c_i a_i e^{-j\phi_i} e^{j k c_i i d \cos \theta} \cdot f_i(\theta), \quad i = 0, \dots, M-1 \quad (1)$$

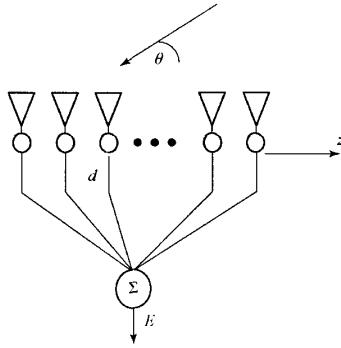


图1 相控阵模型

其中 $f_i(\theta)$ 为单元 i 在阵列中的辐射特性。阵列的主瓣宽度和阵列的口径尺寸成反比。因此,为了从物理上保证稀疏阵保持较窄的主瓣,就要让稀疏阵保持最大的口径尺寸,所以保持阵列边缘的单元处于工作状态是十分必要的。再从中间的单元选择合理的工作单元分布,一方面抑制旁瓣,同时维持波束宽度。(1)式可以写为:

$$E = a_0 f_0 + a_{M-1} f_{M-1} e^{j[k(M-1)d \cos \theta - \phi_0]} + \sum_{i=1}^{M-2} c_i a_i e^{-j\phi_i} e^{j k c_i i d \cos \theta} \cdot f_i(\theta) \quad (2)$$

若单元的辐射特性相同,(2)式可以进一步表示为:

$$E = f(\theta) \cdot \left[a_0 + a_{M-1} e^{j[k(M-1)d \cos \theta - \phi_0]} + \sum_{i=1}^{M-2} c_i a_i e^{-j\phi_i} e^{j k c_i i d \cos \theta} \right] \quad (3)$$

由(3)式可见,工作单元的幅度、相位和工作单元位

置是影响输出 E 空间分布的关键因素,合理的 $\{a_i, \phi_i, c_i\}, i = 1, \dots, M-1$ 分布是实现预期天线特性的关键。

2 遗传算法

遗传算法是基于生物自然选择和遗传机理的启发式优化算法,它将影响问题结果的参数变量编码成染色体,采用适值函数衡量各染色体的优劣程度,经过交叉和变异引导搜索向适值更高的结果(问题的最优解)进化,适者生存,优胜劣汰。其关键是选择合理的编码方式,适值评估函数,以及交叉和变异量的控制。

对稀疏阵列的优化问题,参数变量 $\{a_i, \phi_i, c_i\}$ 构成问题的编码空间。由于实际阵列单元的激励幅度和相位是通过功分器和数字移相器离散分配的,因此采用二进制编码方式是合理的;根据幅度、相位的最小可调步进,以及其动态变化范围,分别确定幅度和相位的编码位数。设天线的归一化幅度范围在 0~1 之间,采用 8 阶量化,那么就需要 3 比特的编码;移相器采用开关转换式传输线移相器,4 比特的编码可以表示步进为 $22.5^\circ, 0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的相移;天线的激励状态占用 1 比特,从而可以得到第 p 代中第 q 个染色体的编码:

$$chromosome_{p,q} = \left\{ \underbrace{I_{a1}, I_{a2}, I_{a3}, \dots, I_{a3M}}_{3M}, \underbrace{I_{\phi1}, I_{\phi2}, I_{\phi3}, I_{\phi4}, \dots, I_{\phi4M}}_{4M}, \underbrace{I_{c1}, \dots, I_{cM}}_M \right\} \quad (4)$$

2.1 适值函数的定标

染色体是问题参数定义域中的个体的密码,适应度函数通过解密将定义域和目标解空间(值域)对应起来,并判定该染色体在解空间中的优劣程度。将染色体的编码(4)式代入(3)式,其对应的阵列特性为 $E_{p,q}(\theta)$, 分别对应最高副瓣电平 Sl 和主瓣宽度 Sj ,要保持阵列的低旁瓣和窄波束特性,就以 Sl 和 Sj 来定义该染色体的适应评估:

$$Sc_{p,q} = \alpha \times Sl + \beta \times Sj \quad (5)$$

适当调节 α, β 能够反映对主瓣宽度和副瓣电平的不同要求。为保证 α, β 的直观有效,令 $\alpha + \beta = 1$,这时要求 Sl, Sj 的值分别对其期望的值进行归一,否则评估函数很难达到同时优化主瓣和副瓣电平的目的。

通常,遗传算法依据染色体适应度的大小成比例地赋予其繁殖的机会,如正比选择和转轮选择。当种群中染色体的适应度分布集中、相差不大时,具

有较高适应度的个体优势不易表现出来;当染色体的适应度相差悬殊时,具有最高适应度的个体几乎总被选中做父辈,容易出现局部最优退出进化过程。为此,对各代染色体的适应值做缩放处理。由于阵列优化通常是求最小值的问题,即 $Sc_{p,q}$ 越小,对应的染色体越优越,首先对第 p 代染色体的适应值按升序进行排序,适应值最低的染色体的位置为 1,依次类推;按照适应值排序后的位置得到各染色体的繁殖期望:

$$Exp(k) = \frac{N}{\sqrt{k} \left(\sum_{i=1}^N 1/\sqrt{i} \right)}, k = 1, \dots, N \quad (6)$$

N 为染色体种群的大小, k 为排序后染色体的位置。各染色体的繁殖期望只和染色体排序后的位置有关,每一代中相同位置上染色体的繁殖概率是相同的,染色体排序越靠前,繁殖的机会越大,而与实际的适值无关。这样,当种群适应度分布集中时,通过缩放提高了个体的竞争力,同时,也避免了适应度相差悬殊时最优个体总是被选择。

根据繁殖期望 Exp ,选择保留最优个体,并采用转轮选择从父辈中选择个体进行交叉和变异形成新的种群后代。实际设计中,阵列的稀疏率一定,即工作单元数是确定的,而编码过程中给出的天线工作状态是随机的,此时随机产生的工作状态可能超过给定约束,也可能不足,因此必须对种群中的染色体进行分析。当阵列稀疏率超过指标,从‘0’状态的单元中随机选择差额个单元,强制其工作状态为‘1’;当阵列稀疏率低于指标,那么,从‘1’状态的单元中随机选择差额个单元,强制其工作状态为‘0’。

2.2 多种群并行进化竞争

遗传算法是一种全局优化的算法,但其优化进程在很大程度上依赖于适值函数及其它参数的选择,同时考虑到运算量的要求,当适值函数变动不大时就截断了进化,因此很难保证得到全局最优的结果,多种群同时进化竞争则能从很大程度上解决这一困难。

从初始化开始,同时产生 N 个独立的种群,并让各个种群开始进行并行独立的遗传变异和进化。经过 t 代之后,从种群 $j, j=1, \dots, N$ 中选择 x 个最差的染色体,分别让 $j-1, j+1$ 种群中的 x 个最优的染色体进行竞争,替换种群 j 中的 x 个最差的染色体。当 $j=1$ 时,取 $j-1=N, j+1=1$;当 $j=N$ 时,取 $j+1=1$ 。多个种群同时独立进化,通过交叉竞争使搜索向全局最优的方向进化。本文的算法流程如图 2 所示。

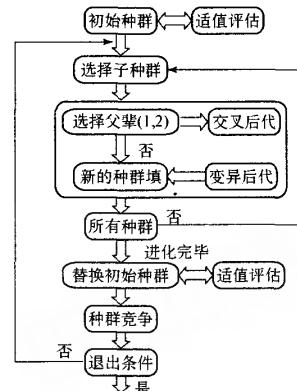


图 2 遗传算法流程

3 稀疏阵列的优化结果

3.1 等幅同相激励的稀疏阵列布局优化

若单元采用等幅同相激励,且工作单元的分布关于中心对称,此时只需要对一半的天线状态 $\{c\}$ 编码,即稀疏阵的布局优化。设 $M=200, m=154$, 取 $\alpha=0, \beta=1$, 即只考虑天线的副瓣电平而不考虑其主瓣宽度,优化结果如图 3 所示(稀疏阵: $_v_v_v_$, 满阵: $_o_o_o_$)。满阵的最高副瓣电平为 -13.5 dB , 主瓣宽度为 1.05° 。稀疏阵列最高副瓣电平为 -22.9 dB , 波束主瓣宽度为 1.42° 。可见,稀疏阵列的主瓣宽度有所展宽,虽然最高副瓣电平有所下降,但在更宽的角度范围内都维持了较高的副瓣电平,是以展宽主瓣和提高远角副瓣电平的代价来换取主波束附近低副瓣的。

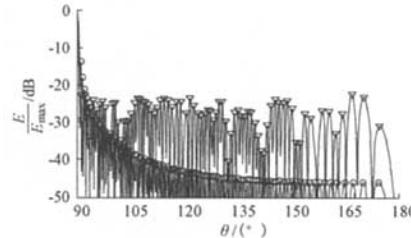


图 3 稀疏阵列与满阵的特性比较(上方为单元布局的优化结果, 黑线为工作单元)

3.2 稀疏率和阵列副瓣的优化

以 63 单元的均匀线阵为例,阵列采用对称激励,在主瓣不受约束的条件下,进一步研究了稀疏阵列稀疏率(0 状态单元占总单元的比例)和副瓣电平及主瓣宽度的关系,优化结果如图 4 所示。结果表明,随着稀疏率的递增,副瓣开始降低,主瓣宽度增大;但当稀疏率超过一定的比例后,优化结果的副

瓣电平不再继续下降,反而有所增加,主瓣宽度也不再明显展宽。这是因为当稀疏率超过一定比例后,随着单元间距的增大,可能出现的栅瓣不能继续得到有效抑制,使副瓣回升。因此,应当选择合适的稀疏率,不仅需要考虑节省单元成本,同时还需要顾及天线的特性,找到最佳的组合。

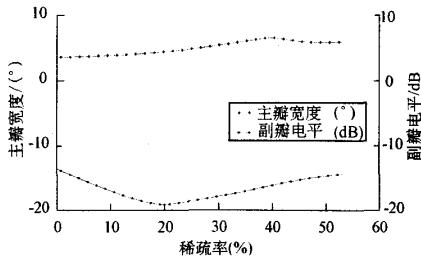


图 4 稀疏率与副瓣电平的关系

3.3 主瓣宽度和副瓣电平的综合优化

天线辐射能量一定的情况下,主瓣宽度和副瓣电平是相互关联的,只能通过合理的分布使其达到预期的目标。均匀分布阵列主瓣最窄增益最大,但副瓣电平也相对较高;展宽波束宽度,使能量集中在主瓣,必然能减少和降低副瓣,但没有工程实际意义。以 2.2 中的模型为代表,在不同的稀疏率下,调节 α, β 的比值,图 5 表明了不同约束关系下遗传算法得到的最佳主瓣宽度和副瓣电平的关系。可以看到,主瓣增加,副瓣必然降低,而且选择合适的稀疏率(稀疏率 19.05%, 38.1%),能够在主瓣约束下得到更低的副瓣电平,结果表明,稀疏率在 20% 左右的性能是较好的。但和均匀满阵的主瓣宽度和最低副瓣相比,稀疏阵列都获得了更窄的波束和更低的副瓣电平。

3.4 幅度和布局的综合优化

通过上面的分析,在期望的主瓣波束约束下,稀疏单元的布局对副瓣电平的降低是有限的,进一步降低副瓣电平必须优化调整激励的分布。文献[5]对单元分布和激励进行了独立优化,在此,选择单元分布和激励同时作为参量进行综合优化,以 3.1 中模型为例,与文献[5]结果(-25dB)相比,综合优化使布局和激励同时最优,优化的激励分布如图 6 所示,阵列特性如图 7,副瓣电平达到了 -25.7dB,主瓣宽度为 3.8°。

3.5 多种群并行竞争与一般算法的比较

在一般遗传算法中,为保证算法的稳定性,每一代都要保留其中的最优个体。在稀布阵优化过程中,存在很多种分布情况,其副瓣性能都能达到较低

的状态。实验证明,遗传算法容易收敛到最优值的 90% 左右,之后向最优值的进化非常缓慢,特别是搜索域存在多种接近峰值的亚最优状态的情况下。所以,当进化过程陷入其中任意一个分布亚最优状态,向全局最优的进化可能需要一个非常非常漫长的过程。采用多种群并行进化,可能同时搜索到多个局部最优,增加了直接进入全局最优域的机率,最优竞争的情况下,能够较快地缩减搜索域,加快进化进程。以 77% 的系数率对 200 个单元进行优化,表 1 比较了多种群并行竞争和一般算法的优化结果,证明了多种群并行竞争的优势。

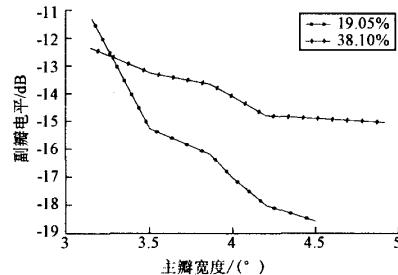


图 5 稀疏阵列主瓣和副瓣综合优化结果

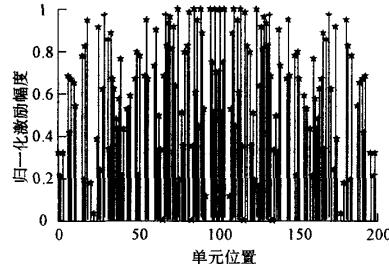


图 6 布局和激励综合优化的激励分布

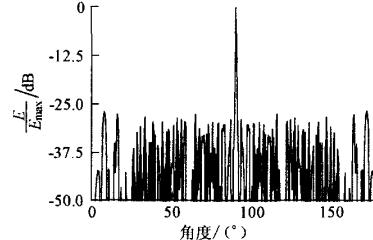


图 7 布局和激励综合优化阵列方向图

表 1 多种群并行算法与一般算法的比较

	一般算法	多种群算法
种群 * 染色体数	1 * 40	3 * 20
同副瓣(-20.8dB) 时间(min)	147.3	112.2
同副瓣(-20.8dB) 代数	4370	2228
相同代(4370)进化副瓣	-22.9dB	-21.2dB
同时间(180min)进化副瓣	-22.9dB	-21.6dB

(下转第 62 页)

4 结论

本文研制了高集成度、低成本的第三代移动通信用测试信号源射频模块。该射频模块的模式切换由基带软件控制,可以实现 W-CDMA / cdma2000 / TD-SCDMA 多种模式信号的输出,能够满足 3GPP TS 25.104, 3GPP2 C. S0010-C 和 3GPP TS 25.105 等标准中有关 W-CDMA, cdma2000 和 TD-SCDMA 系统射频指标测试的需求。

参 考 文 献

- [1] 孙立新, 尤肖虎, 张萍, 等. 第三代移动通信技术. 北京: 人民邮电出版社, 2000
- [2] 吴伟陵. 移动通信中的关键技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000
- [3] Walid Y Ali-Ahmad. RF system issues related to CDMA receiver specifications. *RF Design*, 1999(9): 22 ~ 32
- [4] 赵嘉宁, 朱晓维, 洪伟, 周健义, 刘进, 陈建宏. W-CDMA/cdma2000/GSM 三频/三模移动台射频模块的研究. *通信学报*, 2003, 24(10): 71
- [5] Maxim 应用指南. WCDMA 终端 EVM 指标分析. 第三届中国无线电技术研讨会及展览会, 上海, 2000
- [6] Testing and troubleshooting digital RF communications transmitter designs. Agilent Application Note, Literature number 5968-3578E
- [7] 3GPP: TS 25.104 V6.4.0 base station (BS) radio transmission and reception (FDD). <http://www.3GPP.org>
- [8] 3GPP2: C. S0010-C recommended minimum performance standards for cdma2000 spread spectrum base stations. <http://www.3GPP2.org>
- [9] 3GPP: TS 25.105 V6.2.0 base station (BS) radio transmission and reception (TDD). <http://www.3GPP.org>
- [10] Agilent E4406A vector signal analyzer performance guide using 89601A vector signal analysis software. Agilent Application Note, Literature number 5988-2906EN

(上接第 51 页)

4 结论

遗传算法在解决复杂优化问题中具有独特的优势, 但选择合适的参数以保证遗传算法向着全局最优的方向收敛是遗传算法的一个重要问题。本文采用了适值函数缩放和多种群并行进化、相互竞争技术来保证算法能够稳定向着全局最优方向收敛, 通过验证, 可以保证算法多次都收敛在很小的变动范围内。采用该算法对稀疏阵列的布局、稀疏率及激励等因素进行了优化分析, 得到了保证最小波束宽度和副瓣电平的优化结果, 并分析了各种参数选择对阵列性能的影响。

参 考 文 献

- [1] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms. *IEEE Trans on AP*, 1994, 42(7): 993 ~ 999

严蘋蘋 女, 1978 年生。现正攻读东南大学电磁场与微波技术专业博士学位。主要研究方向为微波与射频电路设计、微波与射频集成电路的设计。

E-mail: ppyan@emfield.org

洪伟 1962 年生。现为东南大学无线电工程系教授、博士生导师。教育部长江学者计划特聘教授、副系主任、毫米波国家重点实验室主任。近年来发表学术论文 200 多篇, 出版学术专著 2 部, 曾获自然科学奖、教育部和江苏省科技进步奖等多项奖励。现为国际权威刊物 *IEEE Trans. MTT* 等国内外权威学术刊物的编委或审稿人, 中国电子学会天线分会副主任委员等。

- [2] O'Neill D J. Element placement in thinned arrays using genetic algorithms. *IEEE Proc OCEANS*, Breast, France, 1994: IL/301 ~ 306
- [3] Samii Y R, Michielssen E. Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithm. New York: John Wiley & Sons, 1999
- [4] Johnson J M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithms in engineering electromagnetics. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1997, 39(4): 7 ~ 23
- [5] 王玲玲, 方大纲. 运用遗传算法综合稀疏阵列. *电子学报*, 2003, 31(12): 2135 ~ 2138
- [6] 张子敬, 赵永波, 焦李成. 阵列天线的遗传优. *电子科学学刊*, 2000, 22(1): 174 ~ 176

张浩斌 男, 1976 年生, 主要研究方向为相控阵天线的设计分析, 以及天线散射、隐身特性的研究。

E-mail: zzhbbb2002@hotmail.com

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>