

DOI:10.3969/j.issn.1671-0673.2013.05.009

基于遗传算法的可重构天线系统研究与实现

曹 凯,陈国虎,江 桦

(信息工程大学,河南 郑州 450001)

摘要:提出以信噪比作为可重构天线寻优过程的评价函数。采用遗传算法作为系统的寻优算法,并对其参数设置进行研究。利用信号发生器产生的信号对可重构天线系统进行测试,实验数据表明,文章中提出的直接以信噪比作为评价函数的可重构天线寻优算法,可以使可重构天线系统有效提高目标接收信号的信噪比,并在一定程度上抑制干扰信号,提高系统性能。

关键词:可重构天线;遗传算法;盲信噪比估计;寻优算法

中图分类号:TN821

文献标识码:A

文章编号:1671-0673(2013)05-0557-06

Research and Implementation of Genetic Algorithm-Based Reconfigurable Antenna Systems

CAO Kai, CHEN Guo-hu, JIANG Hua

(Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper presents a new idea that SNR is directly adopted as the evaluating function of reconfigurable antenna optimum searching algorithms to evaluate the receiving performance of reconfigurable antennas. It also provides a method of blind SNR estimating for narrow-band signals. The genetic algorithm is used as the system optimum searching algorithm, parameter setting in genetic algorithms is studied, and signals produced by signal generators are used to measure the reconfigurable antenna system. Simulation and experiment data shows that the proposed optimum searching algorithm has upgraded the performance of the reconfigurable antenna system in SNR improving and interference rejecting.

Key words: reconfigurable antenna; genetic algorithm; blind SNR estimation; optimum searching algorithm

0 引言

随着无线通信技术的不断发展,对天线的要求越来越高,可重构天线以宽频带接收、自适应调整等特点在近几年得到迅速的发展。可重构天线就是通过控制一组二极管或 MEMS 开关或高频继电器的状态,动态改变天线辐射体物理结构,使天线具有不同工作频段、不同波束等多种功能^[1-2]。

可重构天线在近年来得到了高度重视,研究发展迅速,但在具体实现上还存在一些难点和技术瓶颈。可重构天线包含天线本身、射频开关、开关控制系统、寻优算法等方面内容,而绝大部分有关可重构天线的

收稿日期:2013-03-26;修回日期:2013-05-06

作者简介:曹 凯(1988 -),男,硕士生,主要研究方向为可重构天线系统研究;

陈国虎(1975 -),男,讲师,博士,主要研究方向为电磁场数值计算与可重构天线设计;

江 桦(1956 -),男,教授,博士生导师,主要研究方向通信信号截获与分析。

研究仅限于开关和天线本身,本文则对可重构天线系统进行研究及实现。

对于一个可重构天线系统,寻优算法^[3,4]是其核心,寻优算法的作用是根据所接收的信号在数目众多的天线组合状态中确定最佳的组合状态。可重构天线的寻优过程是一个非线性的过程,国内外普遍采用仿生学算法,如遗传算法和蚁群算法。本文采用基本遗传算法,并根据相关文献进行了适当的改进,对遗传算法的参数设置规律进行了探索。

在寻优算法运行过程中,需要有相应的评价函数来提供每种天线开关组合状态的量化的参考值。评价天线的性能大多采用驻波比,驻波比所体现的天线性能最终体现在接收信号的质量上,因此本文直接采用信噪比作为评价函数。采用文献[4]的可重构天线形式,搭建了可重构天线的实际接收系统,并分析和研究可重构天线系统的接收性能。

1 可重构天线系统结构

可重构天线系统一般由天线模块、发射或接收装置和控制系统3部分组成。图1(a)为文献[4]的可重构天线系统结构图,其基本原理是:可重构天线将接收的信号由接收装置反馈给控制系统,而控制系统根据反馈信息决策如何控制可重构天线面板上的开关或电容,从而使天线处于最佳接收状态。本文采用的可重构天线如图1(b)所示,和文献[4]结构完全相同,是一种由39个继电器开关(图中矩形元件)和导线组成,其工作频段为40MHz~400MHz^[5]。此天线采用非对称结构,因此不存在两种完全相同的状态,共有 2^{39} 种不同工作状态。

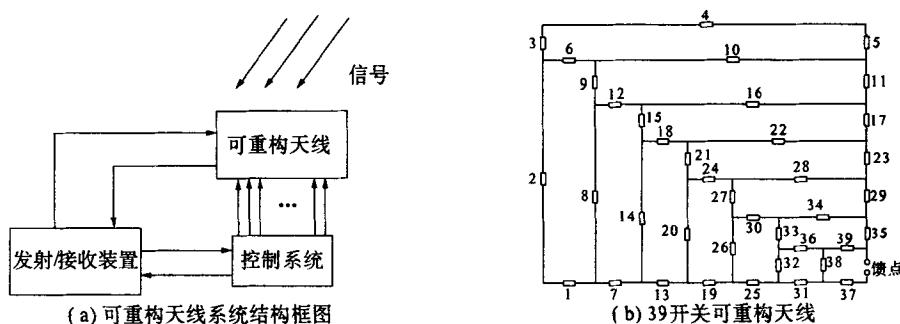


图1 可重构天线系统结构图

控制系统流程如图2所示,种群初始化后,相对应的调整天线的开关状态,由数据采集模块分析接收信号,进行信噪比估计,将估计的值作为适应度函数值反馈给遗传算法进行遗传、变异和交叉等操作,产生下一代种群,依此循环。系统的两个核心部分在于信噪比估计和遗传操作。本文将改进的遗传算法与提出的窄带盲信噪比估计^[6]方法结合在一起,提出以信噪比^[7]为评价函数的可重构天线寻优算法。

2 遗传算法

遗传算法最初由密西根大学J. Holland教授于1975年提出,是一种高度并行的并具有较强全局搜索能力的现代寻优算法。基本的遗传算法内容主要包括:种群初始化,个体评价,选择运算,交叉运算,变异运算,终止条件判断。为提高可重构天线的可重构状态的多样性,一般会设置较多开关,使用遗传算法的目的就是在众多天线状态中找到最优的一种状态。基本遗传算法所采取的方法如下:先对每个开关采用二进制进行编码,‘0’表示断开,‘1’表示导通;选择操作采用轮盘赌;交叉运算则采用单点交叉。

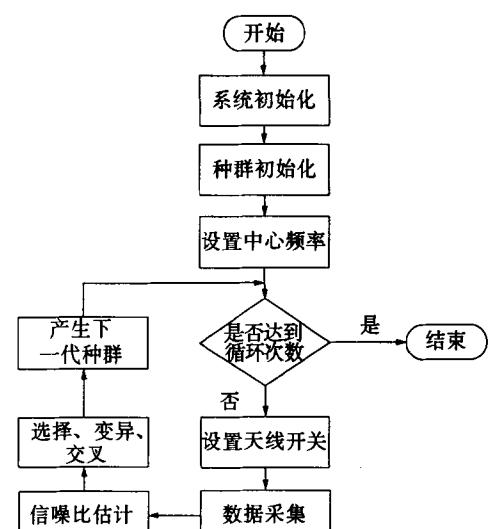


图2 控制系统流程图

可重构天线的寻优过程中存在的难题在于如何使种群朝最优的个体方向进化,由于天线状态变化的非线性,寻优过程可能停滞不前,甚至几十代内就可能“收敛”。针对此问题,文献[8]的改进是:

- ①保留每一代群体中最优的个体直接进入下一代;
- ②变异率采用阶梯式设置,遗传初期设置较小,在接近收敛时调至较大。

改进的主要依据:保留每一代中的最优个体,可以使种群的优秀基因得以保留,而当种群中的最优个体比例较大时,说明算法趋于收敛,但不一定是全局最优,如果再次循环下去,效果将会不明显,算法也很有可能陷入局部最优,此种情况下,可以增大变异率,使种群的多样性得以提高。

本文在文献[8]基础上,对遗传算法的参数(种群规模和循环次数)设置规律进行了一定的研究。表1的数据是未对遗传算法进行第2项改进的情况下所得出的数据。测试函数采用的是 SchafferF₆函数^[9],表达式如公式(1),只有一个全局极大值点 $f(0,0)=1$ 。

$$f(x_1, x_2) = 0.5 - \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1.0 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2} \quad (-100 \leq x_1, x_2 \leq 100) \quad (1)$$

表1 不同种群规模的最大适应度值

种群规模	循环次数	最大函数值 f	算法收敛起始代数
20	200	0.959	60
40	100	0.986	75
80	50	0.999	42
160	25	0.981	25

通过表1的数据可以发现,在种群规模与循环次数乘积一定的情况下:

- ①种群规模设置太小时导致较早收敛,寻优效果不明显,如表中种群规模为20的相关数据;
- ②种群规模设置合理时可明显提高寻优效果,即最大适应度较高。如表2中种群规模为40和80的情况;
- ③种群规模设置很大,而收敛次数设置较小时,会导致算法尚未收敛即结束寻优过程。这点从种群规模为160的情况可以明显看出。

因此,在寻优时间即种群规模与寻优次数乘积相同的情况下,可以适当增大种群规模,这样可以提高寻优效果,同时也可保证算法正常收敛。

3 窄带盲信噪比估计

可重构天线的重构过程一般是针对某个频点的,因此可以认为所接收的信号为窄带信号,对于此类低复杂度窄带信号的盲信噪比估计可采用文献[6]的算法来计算。其基本的思路:首先对信号进行离散傅里叶变换,得到信号的频谱,将频谱分为若干段,分别求每段的功率,将功率最小的一段作为噪声功率。本文在文献[6]基础上提出了窄带盲信噪比估计方法,将噪声功率定义为包括除目标信号以外所有的信号及噪声功率之和,因此也包括干扰信号。

3.1 窄带信号信噪比估计方法

设天线接收到的信号为 $x(n) = s(n) + v(n)$,其中, $s(n)$ 为有用信号, $v(n)$ 为噪声,则信噪比为

$$SNR(\text{dB}) \triangleq \rho = 10 \lg \frac{P_s}{P_v} (\text{dB}) = 10 \lg \frac{\sum_{k=0}^{N-1} S^2(k)}{\sum_{k=0}^{N-1} V^2(k)} (\text{dB})。$$

上式为信噪比的定义式,其中, P_s 为 $s(n)$ 的功率, P_v 为 $v(n)$ 的功率。设 $S(K)$ 和 $V(K)$ 分别为 $s(n)$ 和 $v(n)$ 的DFT变换后的频谱, N 为频谱数组的长度。由于信号和噪声的功率均未知,只是已知二者之和,因此需要进行盲信噪比估计。本文提出以下估计方法:

- ①基底噪声功率估计 在功率谱中最底端呈水平状的即可认为是基底噪声。对于基底噪声的估计可以运用平均值法来估计。

首先将功率谱平均分成 n 等份,每一份功率记为 $P_s(i)$ ($i=1,2,\cdots,n$) ,则每段功率谱的宽度为 $\frac{N}{n}$ (> 2),其中, $P_s(i)$ 是经过降序排列的,即 $P_s(1) \geq P_s(2) \geq \cdots \geq P_s(n)$ 。令 $\hat{P}_j = \frac{1}{I} \sum_{i=n-l+1}^n P_s(i)$ (一般 I 取较小, n 取较大),则可近似认为 \hat{P}_j 即为基底噪声的功率,由于频谱采集的宽度较小,因此 n 取 20, I 取 3 比较合理。

②信号功率估计 设信号的中心频率所对应的频谱序列中位置为 f ,令 $J \triangleq \left\lfloor \frac{N}{2n} \right\rfloor$,取中心频率左右的一段宽度为 $\frac{N}{n}$ 的功率谱,即 $P'_s = \sum_{i=f-J}^{\frac{N}{n}-f+J-1} X^2(K)$,则信号功率可表示为 $\hat{P}_s \triangleq P'_s - \hat{P}_j$ 。

③噪声功率估计 由②的运算可知,噪声功率为 $\hat{P}_n = P_x - \hat{P}_s = P_x + \hat{P}_j - P'_s$ 。

④信噪比估计 综合①~③的推算,可以得出本文的信噪比估计表达式:

$$SNR(\text{dB}) = 10 \lg \frac{\sum_{K=f-J}^{\frac{N}{n}-f+J-1} X^2(K) - \frac{1}{I} \sum_{i=n-l+1}^n P_s(i)}{\sum_{K=0}^{N-1} X^2(K) + \frac{1}{I} \sum_{i=n-l+1}^n P_s(i) - \sum_{K=f-J}^{\frac{N}{n}-f+J-1} X^2(K)} (\text{dB}) \quad (2)$$

信噪比的估计值最终反馈给遗传算法作为适应度值,因此对于同一种目标信号,每一种天线开关组合状态所对应的信噪比理论上是不能变的。由于估计值每次都可能有偏差,为保证每种天线状态所对应的每次信噪比估计值一致,本文建立天线状态与信噪比估计值对应表。如表 2 所示,是表格的一部分,记录的是每种状态第 1 次的信噪比估计值,而在后续的寻优操作中,对于表格中存在的组合状态,直接调用表格中的信噪比估计值,这样可以避免多次估计所造成的适应度不确定。

表2 信噪比估计值表

可重构天线的开关组合状态	信噪比首次估计值(dB)
00000000000000000000000000000000	9.021
11111111111111111111111111111111	10.053
01011101010000010010110101010101010	17.695

3.2 仿真及结论

为测试上述信噪比估计方法的性能,运用蒙特卡洛方法在 AWGN 信道下进行仿真实验,仿真环境:信号带宽 30 kHz,调制方式 BPSK,输入信号信噪比范围为 $-10 \text{ dB} \sim +20 \text{ dB}$,间隔为 2 dB,仿真结果均为 600 次独立实验结果。估计方法的性能可以用标准差 (NMSE) 来评价:

$$NMSE(\hat{\rho}) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (\hat{\rho}_i - \rho)^2}.$$

L 表独立实验次数, ρ 表示信噪比的真实值, $\hat{\rho}_i$ 表示第 i 次实验的信噪比估计值。

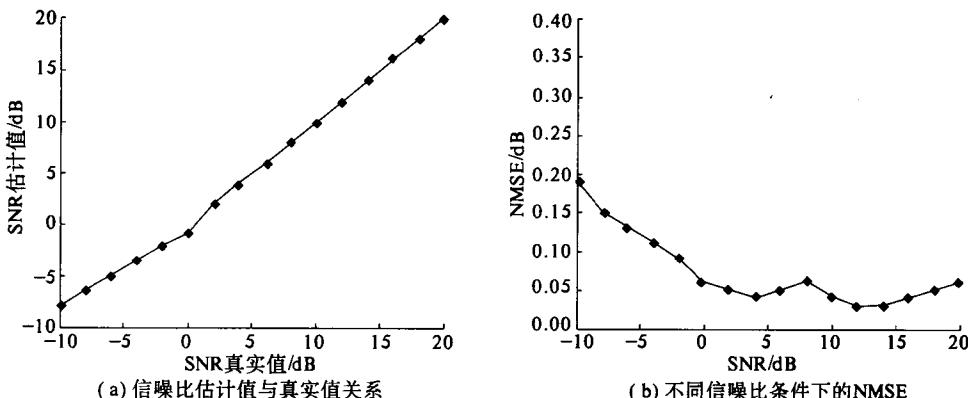


图3 信噪比估计方法的性能曲线

由图3(a)可以看出,本文提出的信噪比估计方法所估计的信噪比值基本与真实值相同,即使在信噪比较低的情况下,误差也很小,满足可重构天线的系统要求。图3(b)中的标准差曲线说明本文的信噪比估计方法性能较好,可以稳定准确地估计出窄带信号的信噪比值。由于上述信噪比的估计是针对可重构天线系统的信号接收特点而提出的,属于相对较精确的估计,适用于能量较集中的窄带信号。由上述的分析可以看出,本文改进的算法估计精度相对更高,另一方面,从信噪比噪声功率的定义看,本文的定义更有利于可重构天线系统的寻优操作,因为本文将干扰信号功率也纳入噪声的功率,从而使寻优过程中带有一定程度的抑制干扰任务。

4 实验及结果分析

为验证算法的效果,本文采用的实验设备主要包括可重构天线、接收机(频率:20MHz~1350MHz;中频输出值:70MHz;输入阻抗:50Ω;带宽:12MHz、4MHz、700kHz、35kHz;)、上位机以及信号发生器(型号:FLUKE 6080A;频率:10kHz~1024MHz;输出:-140dBm~19dBm),采用的编程软件为Labview8.6。为测试寻优算法性能,分别采用实际广播信号和信号发生器产生的稳定信号对可重构系统进行测试。实验过程如下:

①使用信号发生器分别产生 $f=270\text{MHz}$ 和 $f=280\text{MHz}$,电平为20dB的超短波信号,选择这两频率发送信号,主要考虑此段频谱信号相对较少,便于验证算法性能。发射天线采用盘椎天线,接收天线采用的是图1所示的可重构天线,可以实现在50MHz~500MHz的信号接收。

②接收调频广播信号FM91.2MHz。广播信号的频谱是略微波动的,因此在处理其信噪比估计时,对每一种天线状态接收的广播信号计算3次频谱,然后求平均信噪比,以避免由于信号的略微波动所造成的信噪比估计的误差。种群规模设为50,循环次数设为100。

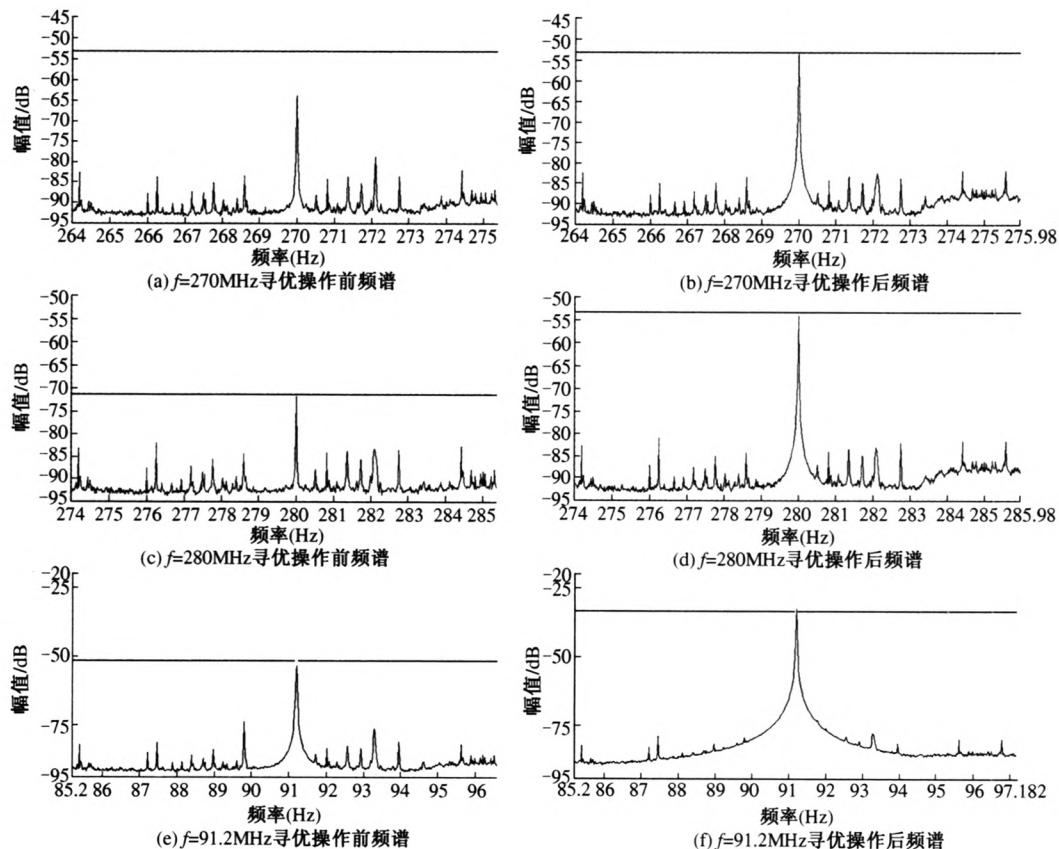


图4 不同频率的寻优操作前后频谱

从图4中(纵轴幅值单位为dB,横轴频率单位为Hz)给出的寻优操作前后的频谱可以看出,本文提出的以信噪比直接作为评价函数的寻优算法效果很明显,在3个实验频率点,谱值增加均在10dB以上。同

时注意到,在目标信号的功率提高的同时,噪声及干扰信号的功率则有所下降,因此可以看出本文所采用的可重构天线系统具有一定的干扰抑制作用。

表3列出的是不同频率信号对应的可重构天线面板上的最优开关组合,表4列出的是寻优算法启动前后的天线的性能参数对比,包括信噪比和天线的电压驻波比(VSWR)。由表4的数据可以看出,本文改进的寻优算法可以改善天线的性能,使天线的结构最适合接收目标信号,降低其电压驻波比,提高天线的接收效果。

表3 寻优过程相关参数

信号频率	种群规模	循环次数	最优开关组合
91.2 MHz	50	100	100101010101010110110110011110101100
270 MHz	50	100	11010110101101010011011001101011010111
280 MHz	50	100	110110111011001101100110101101001111101

表4 寻优操作前后信号参数对比

信号频率	寻优前信噪比	寻优后信噪比	寻优前 VSWR	寻优后 VSWR
91.2 MHz	9.2 dB	14.5 dB	3.05	1.01
270 MHz	4.1	8.3 dB	3.21	1.03
280 MHz	4.0	8.1 dB	4.09	1.01

5 结论

本文在对遗传算法的参数设置的探索的基础上,充分利用提高种群的多样性来提高种群的适应度,可以有效避免遗传算法陷入局部最优解。针对可重构天线系统及目标信号的特点所提出的窄带盲信噪比估计方法,可以较好地满足系统要求。通过搭建一套完整的可重构天线接收系统,对本文的算法进行测试验证,结果表明算法可快速搜索到最优化接收目标信号的天线开关组合结构,提高可重构天线系统性能,有效提高目标信号的信噪比,并可以在一定程度上抑制干扰信号。

参考文献:

- [1] 王安国,张佳杰.可重构天线的研究现状与发展趋势[J].电波科学学报,2008,23(5):997-1001.
- [2] Tawk Y, Albrecht A R, Hemmady S, et al. Optically pumped frequency reconfigurable antenna design[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 16(9):280-283.
- [3] Coleman C M, Rothwell E J, Ross J E. Investigation of Simulated annealing, ant-colony optimization, and genetic algorithms for self-structuring antennas[J]. EEE Trans. on Antennas and Propagation, 2004, 52(4):1007-1014.
- [4] 魏文博,尹应增,刘其中.可重构线天线的快速优化设计[J].西安电子科技大学学报,2007,34(3):448-452.
- [5] Coleman C M. Self-structuring antennas[D]. Michigan State Univ. East Lansing, 2002.
- [6] Hua Jinyu, Hua Nan, Meng Qingmin, et al. A scheme for the SNR estimation and its application in doppler shift estimation of mobile communication[C]//Proc of IEEE VTC 2004 Spring. 2004, 59(1):284-288.
- [7] Peter J Smith, Abdulla Firag, Philippa A. Martin, and Ross Murch. SNR Performance Analysis of Reconfigurable Antennas[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(4):498-501.
- [8] 曹道友.基于改进遗传算法的应用研究[D].合肥:安徽大学,2010.
- [9] 李坤,李军华,杨小芹.遗传参数协同进化的自适应遗传算法[J].计算机仿真,2010,27(11):204-208.

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>