

基于粒子群优化算法的共形阵列天线图综合

王一笑,郭陈江,丁 君,王小平

(西北工业大学电子信息学院,陕西 西安 710072)

摘要:随着阵列天线技术的发展,可与飞行器、导弹等载体共形的天线阵列得到了越来越广泛的应用。共形阵列天线为满足天线工作特性的同时,不破坏载体的外形结构和空气动力学特性。粒子群优化算法(PSO)是一种通过粒子之间的合作与竞争来实现复杂多维空间的最优区域搜索的优化算法。采用了一种改进的粒子群优化算法,通过增加变异算子,改善了 PSO 算法的全局搜索能力,对圆柱共形阵列天线的方向图进行了综合,其中采用了具有余弦分布的辐射单元,阵元设置在柱面上,其最大辐射方向为柱面法线方向,通过 500 次迭代得到不同半径及不同阵元数的优化结果,其中方向图的峰值副瓣电平低于 -20dB,说明了 PSO 算法对解决此类问题的有效性。

关键词:共形阵;粒子群算法;方向图综合

中图分类号:TN820.1 **文献标识码:**B

Pattern Synthesis of Cylindrical Conformal Arrays Using PSO

WANG Yi-xiao, GUO Chen-jiang, DING Jun, WANG Xiao-ping

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

ABSTRACT: With the development of antenna arrays, the conformal arrays, which conform to the surface of an aircraft, a missile or some other mobile platforms, are applied in more and more regions. The conformal arrays provide benefits such as visual unobtrusiveness and non-interference with aerodynamic performance and the performance of antennas. Particle swarm optimization algorithm(PSO) searches optimal regions of complex multi-dimensional space through cooperation and competition among particles. A modified particle swarm optimization algorithm was used for the pattern synthesis of the cylindrical conformal arrays. This modified algorithm improves the ability of global search by adding the mutation operator to the algorithm. The element pattern used in this paper corresponds to the cosine element pattern. The elements were set on the cylindrical surface, and radiated out along the normal direction. The optimized results of different radius and element number were got after iterative process, and the largest sidelobe level was reduced to -20dB. The simulation results show that the PSO algorithm is an effective method for solving such problems.

KEYWORDS: Conformal arrays; PSO; Pattern synthesis

1 引言

共形天线是天线与载体外形共形的一种天线,它具有不破坏载体的气动外形,不加大载体雷达散射截面等优点,因而被广泛地应用于现代空间飞行器和民用通信等领域。由数目众多的天线阵元组成的天线阵列,既能克服单个天线的缺点,又能通过改变各单元天线的电参数,实现对天线远场方向图的灵活控制。

天线的最大相对旁瓣电平是评价天线性能的一个重要

参数,在给定天线形状与阵元数量的前提下,如何恰当地选择各阵元的间距、电流幅值及相位来最大限度地降低旁瓣电平是阵列天线综合中的一类重要课题。目前,已有多种方法成功地运用于共形阵列天线的方向图综合中,例如传统的 Dolph-Chebyshev 综合法、Taylor 综合法以及遗传算法(GA)等^[1]。

粒子群优化算法(PSO)最早是由 Kennedy 和 Eberhart 等于 1995 年提出的^[2]。PSO 算法作为一种随机智能算法,由于其算法概念清晰、程序简单,目前已成功应用于多个领域的优化问题中,在电磁学领域也有了一些成功的应用。

本文将 PSO 算法应用于圆柱共形阵列天线的方向图综合,通过优化阵列的激励电流的幅值大小,实现了低旁瓣的

方向图分布。仿真结果表明,对于圆柱共形阵列天线,该算法具有良好的优化效果。

2 粒子群优化算法(PSO)

与遗传算法等大多数进化算法一样,粒子群算法也是基于群体的优化方法。PSO 算法是从鸟群捕食行为的模型中得到启示而产生的,并用于解决优化问题。

PSO 算法首先初始化一群随机粒子(随机解),在搜索空间中以一定的速度飞行,然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个极值来更新自己,第一个就是粒子本身所找到的最优解,另一个极值是整个种群目前找到的最优解。

设第 i 个粒子表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, 它经历过的最好位置(有最好的适应度值)用 $p_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 表示。而群体所有粒子经历的最好位置用 g_{best} 表示。粒子 i 的速度用 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 表示。对每一代个体,其第 d 维 ($1 \leq d \leq D$) 的速度和位置根据如下方程变化:

$$v_{id} = w * v_{id} + c_1 * rand_1() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * rand_2() * (g_{id} - x_{id}) \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

其中: w 为惯性权重, c_1 和 c_2 为学习因子, $rand_1()$ 和 $rand_2()$ 为 $[0, 1]$ 范围内变化的随机函数。

标准的 PSO 算法的参数包括: 群体规模 $swarmsize$, 每个粒子的维数 $dimension$, 惯性权重 w , 加速常数 c_1 和 c_2 , 最大速度 V_{max} , 最大代数 G_{max} 。具体程序中 PSO 算法的参数设置如下:

种群的规模一般是由待优化的参数的个数来决定的, 一般原则是种群个数多于优化参数的个数; 种群中个体的维数就是所要优化的参数的个数; 惯性权重 w 可以是定值, 也可以是随迭代的次数而呈线性变化的, 文中使用的是后者, 其变化的范围是从 0.9 到 0.4; 加速常数 c_1 和 c_2 均设置为 2.0; 最大速度 V_{max} 设置为 1.0; 这些参数的设置都是根据大量数值试验得出的^[6], 而程序的终止条件是程序运行达到了预置的最大迭代次数。

粒子群算法在迭代初期搜索范围较大, 而在后期容易陷入局部收敛, 其原因是: 当种群的历史最优位置连续无变化或变化很小时, 由式(1)可知, 这时的粒子速度主要由 $w * v_{id}$ 决定, 随着迭代次数的增加, w 越来越小, 速度也会随之变小, 容易陷入局部最优。

针对上述 PSO 算法的不足, 本文采用了一种带变异算子的粒子群算法。这种改进的 PSO 算法对改善这一现象有很大的作用。如果粒子群出现严重聚集的情况, 则保留历史最优粒子位置, 以一定的变异概率将粒子中少部分维重新随机初始化, 以此来增强全局搜索能力, 克服收敛到局部最优点的缺点, 同时又不降低收敛速度和搜索精度。

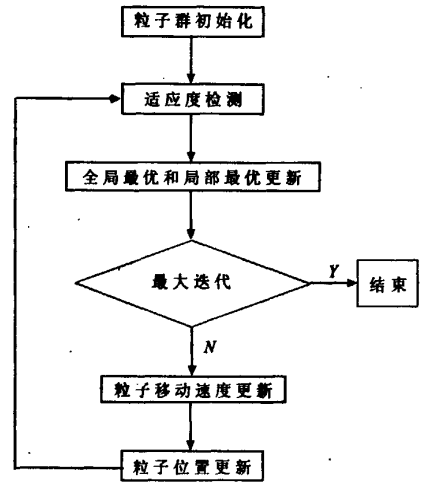


图1 粒子群算法基本流程

3 共形阵方向图函数的求解

放置于共形阵表面的阵元在三维空间中相对于原点的方向图指向是不同的。假设 O 点表示原点, 坐标为 $(0, 0, 0)$, O_n 点表示共形阵列中某个阵元 n 的位置, 相对于原点的坐标为 (x_n, y_n, z_n) , P 为空间观察点, 坐标为 (x, y, z) 。

观察点 P 点在坐标系 (x', y', z') 下的坐标为:

$$x' = [(x \sin \alpha + y \cos \alpha) \cos \tau - z \sin \tau] \sin \alpha - (y \sin \alpha - x \cos \alpha) \cos \alpha$$

$$y' = [(x \sin \alpha + y \cos \alpha) \cos \tau - z \sin \tau] \cos \alpha + (y \sin \alpha - x \cos \alpha) \sin \alpha$$

$$z' = z \cos \tau + (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \sin \tau \quad (3)$$

其中 α 表示变换后的坐标系 (x', y', z') 在 xy 平面与原坐标系的夹角, τ 表示变换后的坐标系 (x', y', z') 在 z 方向与原坐标系的夹角。

若变换到以 O_n 为原点的坐标系中可以得到观察点 P 的圆柱坐标为:

$$\phi'_n = \tan^{-1} \left(\frac{y'_n}{x'_n} \right), \theta'_n = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{x'^2_n + y'^2_n}}{z'_n} \right), \quad z'_n = z' - z_n \quad (4)$$

令所选阵元方向图为 $g_n(\theta, \phi)$, 当把阵元放置到共形阵列中, 以原点 O 为相位参考点, 若阵列有 N 个阵元, 阵元激励为 A_n , 此时阵列的方向图函数为:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \{ A_n g_n(\theta'_n, \phi'_n) \exp[jk(\sin \theta'_n \cos \phi'_n x_n + \sin \theta'_n \sin \phi'_n y_n + \cos \phi'_n z_n)] \} \quad (5)$$

经过局部坐标变换, 将(3)、(4)式带入(5)式, 则可得到共形阵列的方向图函数。

对圆柱共形阵列天线来说, 由于对其遮挡效应和不希望能量浪费在圆柱体内的考虑, 因此, 选择有向阵元沿径向向外辐射为最强, 然后向左右两边按某一规律递减, 其辐射范

图应该是方位角方向左右正负 90 度。因此,对于一个 M 行, N 列,半径为 a ,阵元间距为 d 的圆柱共形阵列,阵元辐射函数取为^[5]:

$$g(\theta,\phi) = \sin \theta \cos \phi \quad |\phi| \leq 90^\circ$$

$$g(\theta,\phi) = 0 \quad |\phi| > 90^\circ$$

则圆柱共形阵列的方向图函数为:

$$F(\theta,\phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{A_{n,m} g_{n,m}(\theta,\phi - \phi_n) \exp \{-j[\psi_{mn} - kr_m(\sin \theta_m \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \cos \theta_m \cos \theta)]\}\} \quad (6)$$

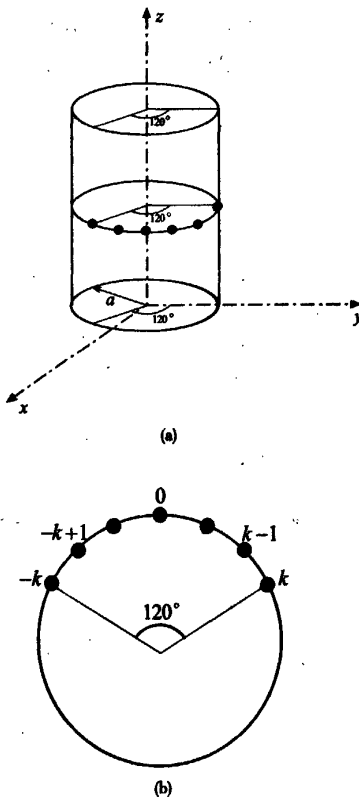
其中, $k = 2\pi/\lambda$, $r_m = \sqrt{a^2 + (m-1)^2 d^2}$, $\tan \theta_m = a/[(m-1)d]$, $A_{n,m}$ 表示第 (n,m) 个阵元的激励, $g_{n,m}(\theta,\phi - \phi_n)$ 表示第 (n,m) 个阵元在阵列中的方向图函数, ϕ_n 为第 (n,m) 个阵元的最大指向。 ψ_{mn} 表示相应阵元的初始相位。为了使主波束能指向指定的 (θ_0, ϕ_0) 方向,

$$\psi_{mn} = kr_m [\sin \theta_m \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n) + \cos \theta_m \cos \theta_0] \quad (7)$$

4 仿真结果

本文分别对三个不同的算例进行了计算机仿真。仿真模型示意图如图 2 所示。

三个算例中,适应度函数设计为:



(a) 三维立体示意图; (b) 俯视图

图 2 圆柱共形阵列几何模型

$$fitness = \frac{1}{1 + \sqrt{\sum_{m=1}^M e_m/M}}$$

其中, $e_m = [(f(\theta_m) - f_d(\theta_m))/f_d(\theta_m)]^2$, θ_m 为抽样点 $f(\theta_m)$ 为待优化方向图函数, $f_d(\theta_m)$ 为预达到的目标方向图, M 个抽样点,在 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 范围内每隔 1 度抽样一次。

算例一、17 元圆柱共形阵。圆柱半径为 3.82λ ,阵元以间距 $d = 0.47\lambda$,均匀分布在 120° 曲面上,各阵元激励电流幅度也相等,主波束指向 $(90^\circ, 0^\circ)$ 。综合要求:阵列副瓣降低,最大旁瓣电平降至 -20dB 。PSO 优化结果如图 3 所示。

具体算法参数的设置为:种群的大小设为 100,每个粒子的维数为 17,用来表示天线单元的激励幅度。程序在迭代至 500 代后,得到图 1 所示结果。可以看到最大旁瓣电平降至 -20dB ,阵列的副瓣电平也均得到了降低,满足综合要求。

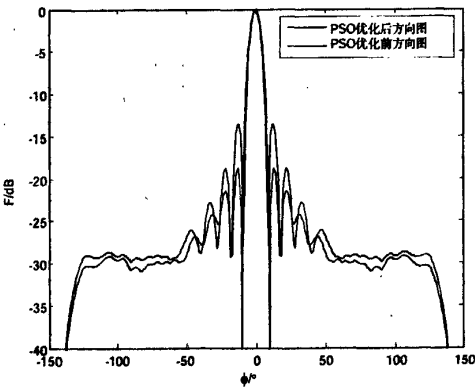


图 3 半径 3.82λ 的 17 元圆柱共形阵列方向图

表 1 图 3 所示阵列优化后列阵元的激励幅值(归一化)

阵元	激励幅值	阵元	激励幅值
1	0.4455	10	0.6159
2	0.4173	11	0.5997
3	0.3966	12	0.5324
4	0.4071	13	0.4760
5	0.4763	14	0.4072
6	0.5325	15	0.3967
7	0.5996	16	0.4173
8	0.6161	17	0.4456
9	0.5857		

算例二、17 元圆柱共形阵。圆柱半径为 4.25λ ,阵元以间距 $d = 0.52\lambda$,均匀分布在 120° 曲面上,各阵元激励电流幅度相等,主波束主波束指向 $(90^\circ, 0^\circ)$ 。综合要求:阵列副瓣降低,最大旁瓣电平降至 -20dB 。PSO 优化结果如图 4 所示。

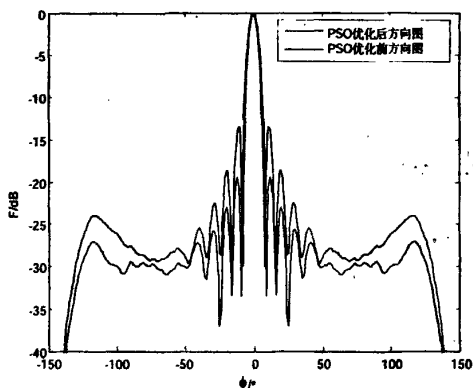


图4 半径 4.25λ 的17元圆柱共形阵列方向图

表2 图4所示阵列优化后阵元的激励幅值(归一化)

阵元	激励幅值	阵元	激励幅值
1	0.3479	10	0.5733
2	0.3045	11	0.5251
3	0.3387	12	0.4986
4	0.4183	13	0.4521
5	0.4512	14	0.4180
6	0.4984	15	0.3381
7	0.5258	16	0.3044
8	0.5227	17	0.3483
9	0.6025		

具体算法参数的设置为:种群的大小设为100,每个粒子的维数为17,用来表示天线单元的激励幅度。程序在迭代至500代后,得到图2所示结果。可以看到最大旁瓣电平降至-20dB,阵列的副瓣电平也均得到了降低,满足综合要求。

算例三、21元圆柱共形阵。圆柱半径为 3.82λ ,阵元以间距 $d=0.38\lambda$,均匀分布在 120° 曲面上,各阵元激励电流幅度相等,主波束主波束指向 $(90^\circ, 0^\circ)$ 。综合要求:阵列副瓣

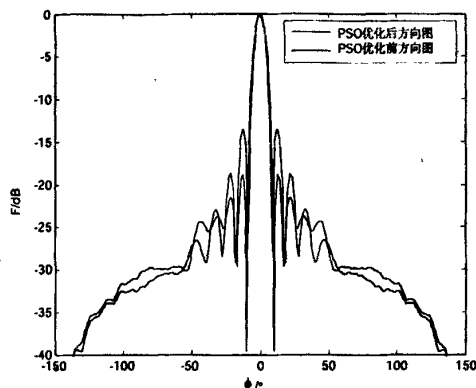


图5 半径 3.82λ 的21元圆柱共形阵列方向图

降低,最大旁瓣电平降至-20dB。PSO优化结果如图5所示。

具体算法参数的设置为:种群的大小设为100,每个粒子的维数为21,用来表示天线单元的激励幅度。程序在迭代至500代后,得到图3所示结果。可以看到最大旁瓣电平降至-20dB,阵列的副瓣电平也均得到了降低,满足综合要求。

表3 图5所示阵列优化后阵元的激励幅值(归一化)

阵元	激励幅值	阵元	激励幅值	阵元	激励幅值
1	0.6068	8	0.6547	15	0.5968
2	0.5146	9	0.7458	16	0.5790
3	0.4560	10	0.7024	17	0.5093
4	0.4138	11	0.6936	18	0.4143
5	0.5096	12	0.7029	19	0.4560
6	0.5783	13	0.7449	20	0.5151
7	0.5973	14	0.6550	21	0.6071

5 结论

PSO算法数学表达式简单,概念清晰,计算速度较快,对于复杂、非线性的优化问题非常适用。本文采用带变异算子的PSO算法研究了圆柱共形阵列天线方向图综合的问题,得到了较好的优化结果,证明该方法是解决此类问题的一种行之有效的方法。

参考文献:

- [1] L Josefsson, P Persson. Conformal Array Antenna Theory and Design[M]. Wiley IEEE Press, 2006.
- [2] J Kennedy, R Eberhart. Particle Swarm Optimization[C]. Proc IEEE Int Conf. Neural Networks, Perth. Australia, 1995. 1942-1948.
- [3] J Robinson, Y Rahmat - Samii. Particle Swarm Optimization in Electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Feb. 2004, 52(2):397-407.
- [4] D W Boeringer, D H Werner. Efficiency - Constrained Particle Swarm Optimization of a Modified Bernstein Polynomial for Conformal Array Excitation Amplitude Synthesis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Aug. 2005, 53(8):2662-2673.
- [5] J A Ferreira, F Ares. Pattern Synthesis of Conformal Arrays by The Simulated Annealing Technique[J]. Electronics Letters, July. 1997, 33(14):1187-1189.
- [6] 焦永昌,等. 粒子群优化算法用于阵列天线方向图综合设计[J]. 电波科学学报, 2006, 21(16):16-20.
- [7] 陈腾博, 焦永昌, 张福顺. 基于改进型粒子群算法的阵列天线综合[J]. 微波学报, 2006, 22(增刊): 39-43.
- [8] 李宁,等. 带变异算子的粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 17:12-14, 35.
- [9] 张钧,等. 微波天线理论与工程[M]. 北京:国防工业出版社, 1988.

(下转第196页)

图2(a)为原始图像;图2(b)为经过小波处理后的低频图像;图2(c)为图像小波系数在三个方向的加权和二进制图像,对此二进制图像按本方法做膨胀腐蚀处理得到图2(d);图2(e)与图2(f)为采用微分算子得到的轮廓图。从图2可以看出,经过数学形态法处理后的图像比采用微分算法的图像更能反映出图像的大体内容,处理方法更加简单。采用这种方法所用时间与传统边缘提取算子所用时间比较如表1所示。

表1 处理时间比较

	膨胀(2次)	侵蚀(4次)	Sober	Roberts
时间(S)	0.0202	0.0194	0.0503	0.0510
总和(S)	0.0396		0.0503	0.0510

5 结束语

本文分析了压缩域图像处理技术,提出了一种利用数学形态学进行基于边缘轮廓的小波域图像处理方法,该方法试图直接利用小波变换系数对图像轮廓特征进行提取,处理过程中采用数学形态学对感兴趣区域进行划分,细化图像轮廓,以达到快速检索的性能。结果表明该方法计算简单,实现效率有较大提高,但本方法对具有复杂对象的图像缺乏有效的处理,这是下一步的主要研究工作。

参考文献:

- [1] (美)Ingrid Daubechies 著,李建平,杨万年译,小波十讲[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 刘文耀. 小波图像编码与专用VLSI设计[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] Ricardo L de Queiroz. Processing JPEG - compressed images and documents[J]. IEEE Transactions ON Image Processing, December 1998, 7(12).
- [4] B Shen, I K Sethi. Direct feature extraction from compressed images[C]. Proc of SPIE: Storage and Retrieval for Image video Database IV, San Jose, CAUSA, 1996.
- [5] 贺贵明,吴元宝. 基于内容的视频编码与传输控制技术[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.

- [6] Abdelmalek, J E Hershey. Feature cueing in the discrete cosine domain[J]. J Electronic imaging 3, 1/94:71 - 80.
- [7] Hyun Sung Chang, Kyeongok Kang. A compressed domain scheme for classifying block edge patterns[J]. IEEE Transactions On Image Processing, February 2005, 14(2).
- [8] 沈兰荪,李晓华,黄祥林. 压缩域图像检索技术的研究[J]. 北京工业大学学报,Dec. 2003 - 12, 29(4).
- [9] R Venkatesh Babu, K R RamaKrishnan and S H Srinivasan. Video Object Segmentation: A Compressed Domain Approach[J]. IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology, April 2004, 14(4).
- [10] 李晓华. 小波压缩域图像检索技术的初步研究[D]. 北京工业大学博士学位论文,2004 - 3.
- [11] 李晓华,沈兰荪. 基于小波压缩域的统计纹理特征提取方法[J]. 电子学报,Dec. 2003 - 12, 31(12A).
- [12] 黄祥林. 基于压缩域的图像检索技术的初步研究[D]. 北京工业大学博士学位论文,2001 - 11.
- [13] 姚庆栋,等. 图像编码基础(第3版)[M]. 北京:清华大学出版社,2006 - 8.
- [14] I Daubechies, W Sweldens. Factoring wavelet transforms into lifting steps[R], Technical report, Bell Laboratories, Lucent Technologies, 1996.
- [15] C E Jacobs. Fast multi - resolution image querying[C]. in: ACM International Conference on Computer graphics and interactive techniques, Los Angeles, 1995. 277 - 286.

[作者简介]



刘波(1983.01-),男(汉族),重庆铜梁人,硕士生,主要研究方向为数字视频、嵌入式系统。
库锡树(1964-),男(汉族),湖北武穴人,博士,教授,主要研究方向为多媒体技术,图像处理,嵌入式系统。

翟庆林(1980-),男(汉族),山东烟台人,讲师,主要研究方向为图像处理,雷达技术。

刘菊蓉(1966-),女(汉族),湖北武汉人,高工,主要研究方向为电路与系统,多媒体技术。

(上接第177页)

[作者简介]



王一笑(1982.12-),男(汉族),江苏南京人,西北工业大学硕士研究生,主要从事共形阵列天线方面的研究。

郭陈江(1963.2-),男(汉族),陕西人,西北工业大学教授,主要从事电磁散射、天线、电磁兼容等方

面的研究,发表论文50多篇。

丁君(1964.11-),女(汉族),陕西人,西北工业大学副教授,主要从事电磁散射、天线等方面的研究。

王小平(1982.2-),男(汉族),陕西人,西北工业大学硕士研究生,主要从事微带天线及其微带天线数值计算方面的研究。

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>