

文章编号 1005-0388(2009)04-0697-05

基于停滞检测粒子群算法的 阵列天线方向图综合

刘东^{1,2} 冯全源²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;
2. 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘要 在线性递减权重粒子群算法的基础上提出了一种改进的粒子群优化算法。新算法采用了合适的邻域结构, 通过停滞检测以及对全局最佳粒子的微扰改善了算法的优化速度和收敛特性。仿真结果表明: 将此算法应用于天线方向图综合中, 在多零点和低旁瓣约束情况下可以取得良好的优化效果。

关键词 粒子群优化算法; 停滞检测; 阵列天线; 方向图综合

中图分类号 TN802 文献标志码 A

Pattern synthesis of antennas based on modified PSO algorithm with stagnation detection

LIU Dong^{1,2} FENG Quan-yuan²

(1. School of Electrical Engineering, Chengdu Sichuan 610031, China;
2. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong
University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract In this paper, a novel Particle Swarm Optimization based on Linear Decreasing Weight Particle Swarm Optimization(LDW-PSO) is presented. In order to improve the optimization speed and convergence performance, neighborhood topologies, stagnation detection and global best perturbatio are adopted to build the novel algorithm. The simulation results show its high performance in the radiation antenna arrays pattern synthesis with multi-null and low side lobe restrictions.

Key words particle swarm optimization algorithms; stagnation detection; array antennas; patterns synthesis

引言

由于天线优化问题中的目标函数或约束条件具有多参数、非线性、不可微甚至不连续等特性, 这类大规模非线性的全局优化问题, 传统的最小二乘等局部搜索方法很难满足要求^[1]。由于智能优化算法在解决全局优化问题时表现出良好的性能, 将智能优化算法与阵列天线方向图综合相结合是一个研究热点。

近年来, 粒子群优化(PSO: Particle Swarm Optimization)算法^[2]得到了广泛的关注。PSO 算法是 KENNEDY 与 EBERHART 提出的一种模仿鸟群社会行为的智能优化算法, 已成功地应用于许多工程优化问题中。它利用 m 个粒子组成的粒子群在 D 维目标搜索空间中以迭代的方式寻找最优解。对于 PSO 算法来讲, 惯性权重 ω 是粒子保持本身速度特性的参数, 对算法影响很大。具备一定自适应特性的线性递减权重粒子群算法(LDW-PSO)比基本

PSO 算法具备更好的全局收敛特性。但线性递减惯性权重的方法仍然存在不足,单一的 ω 变化策略仍然容易早熟收敛。文献[3]改变了 LDW-PSO 单一的 ω 递减方式,使 ω 从大到小呈锯齿形循环变化,在优化的不同阶段都能使用不同的 ω 来进行搜索,取得了较好效果。

基本 PSO 算法中除全局最优粒子外的粒子都向全局最优粒子靠拢,这使得整个粒子群可以仔细搜索全局最优粒子附近的区域,因为全局最优极值点在全局最佳粒子附近的概率最大。但是当维数增高或局部极值点较多时,这一策略会使整个粒子群很快聚集到局部极值点附近从而导致早熟收敛。为了跳出局部极值点,可以人为给全局最优粒子加一个扰动^[3]。也可以增加种群的多样性,避免整个种群过快聚集到一起。文献[4]分析了 PSO 算法中邻域和拓扑结构对优化效果的影响,文献[5]将变异引入 PSO 算法,防止种群过快趋同,文献[6]用混沌搜索方法代替随机数产生器在较好的区域搜索最优解,文献[7]为不同的粒子分配不同的惯性权值以及加速系数,这些算法都在不同程度上改善了算法性能。

文献[8]将遗传算法用于阵列天线方向图综合,文献[9]将粒子群算法用于阵列天线方向图综合,文献[3]在 LDW-PSO 算法基础上改进了 ω 变化策略同时对全局最优粒子进行扰动,并将改进算法应用于阵列天线方向图综合,文献[10]将遗传算法中的交叉变异思想引入 PSO 算法并应用于阵列天线方向图综合,这些算法在旁瓣抑制和深零陷生成上取得了良好的效果,但对于多零点低旁瓣约束的阵列天线方向图综合仍然难以避免早熟收敛。

本文提出了一种基于停滞检测的粒子群算法,其基本思想是当发现优化可能陷入停滞时才调整 ω 并对最优粒子进行扰动,使得增强粒子活性更具针对性,更加有效。同时为了增加种群的多样性,算法采用了 Ring 型邻域结构和 LocalBest 策略以削弱全局最优粒子的影响力。仿真结果表明:在多零点约束低旁瓣阵列天线方向图综合优化中具有良好的效果。

1 改进 PSO 算法

对于 Ring 邻域拓扑结构的 LocalBest PSO 算法,其每步迭代中的第 i 个粒子速度与位置更新表达式为

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_{1d}(t)(p_{id}(t) + x_{id}(t)) +$$

$$c_2 v_{id} r_{2d}(t)(p_{id}(t) - x_{id}(t)) \quad (1)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (2)$$

传统 PSO 算法公式中的 p_g 被替换成个体邻域最优 p_i ,以期削弱全局最优粒子的影响力,增强粒子群寻优能力。公式中, $i=1, \dots, m, d=1, \dots, D$, D 维向量 $x_i(t)$ 与 $v_i(t)$ 分别为粒子 i 在 t 时刻的位置与速度, p_i 为粒子 i 曾经历过的个体最优位置, p_g 为所有邻域个体曾经历过的全局历史最优位置。 ω 为惯性权, c_1, c_2 为加速系数, r_{1d}, r_{2d} 为在 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数。

改进算法中惯性权重 ω 在算法停滞时才进行递减,优化顺利时 ω 值不变。同时在停滞时对全局最优粒子 p_g 之外的粒子重新初始化。惯性权重 ω 的公式如(3), ω_{maxrun} 为固定最大迭代次数^[3], 本文中取 100。

$$\omega = \omega_{\text{max}} - (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \times \\ \text{mod}(\text{iter}, \omega_{\text{maxrun}}) / \omega_{\text{maxrun}} \quad (3)$$

同时改进算法在每次迭代时,检测当前 p_g 是否停滞。如果连续 N 次迭代 p_g 的变化小于一个阈值,就表明种群有可能陷入局部最优,此时的参数可能不太适合,需要按预定策略进行调整,并对当前的 p_g 进行扰动以改变它的位置,其他粒子仍然采用原来的更新方法。这种算法在后面的测试中显示出较好的性能。

改进粒子群算法的流程如下:

- 1) 随机初始化粒子群各粒子位置和速度。
- 2) 初始化 p_i, p_l, p_g , 粒子的 p_i 设为当前位置,根据 p_i 的适应值及粒子邻域结构确定初始的 p_l, p_g 。
- 3) 计算每个粒子的适应值,按照文献[4]中方法更新 p_g, p_l 。如果全局最优粒子 p_g 的适应值累积减小达不到阈值要求,则停滞计数器 FN 加 1, 反之停滞计数器 FN 清零。
- 4) 判断是否满足收敛准则,如果满足,则转到 8)。
- 5) 如果停滞计数器大于等于 N, 转到 7); 反之转到 6)。
- 6) 按照公式(1)和(2)更新粒子速度和位置,转到 3)。
- 7) 清零停滞计数器,按照公式(3)来更新 ω ,重新初始化全局最优粒子 p_g 之外的粒子,转到 3)。
- 8) 输出 p_g , 结束。

2 阵列天线方向图综合

阵列天线方向图综合是对一个由 N 个各向同

性辐射单元组成的等间距直线阵列天线,通过调整每个阵元的激励电流的幅度相位使得天线的远场方向图达到预期的特性指标要求。

由天线阵理论可知,等间距的直线阵天线的远场方向图为

$$F(\varphi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j(nkd \sin \varphi + \varphi_n)} \quad (4)$$

式中, φ 是波束与线阵法线间的夹角; N 为单元个数; I_n 为激励电流幅值; φ_n 为激励电流相位; d 是阵元间距; $k=2\pi/\lambda$, λ 是波长。不考虑阵元间耦合。

适应度函数的选取在文献[11]中目标函数基础上做了改进

$$f = \alpha \times |MSLL - SLVL| + \beta \times |NULL_MAX - NLVL| \quad (5)$$

式中, $MSLL$ 为最高旁瓣电平; $SLVL$ 为设计旁瓣电平; $NULL_MAX$ 为指定角度处零陷深度最大值; $NLVL$ 为设计零陷深度。取 $\alpha=0.8$, $\beta=0.2$ 。

2.1 实例 1

为了比较算法的改进效果,用文献[3]的实例 2 来进行测试。一个 $N=20$ 的天线阵元形成均匀直线阵,阵元间距为 $\lambda/2$,激励电流的相位均为 0(边射阵),电流幅值对称,对电流幅值进行优化。设计指标为,旁瓣电平在 -15 dB 以下,在 -20° 、 -30° 、 -40° 、 -50° 、 -60° 处形成不低于 -95 dB 的零陷,采用 100 个粒子迭代 100 次。实例中使用了 3 种算法:线性递减权重粒子群算法(LDW-PSO)、带全局最优粒子扰动的 PSO^[3]、以及本文的改进 PSO 算法。图 1 是不同算法的 20 次平均收敛曲线,图 2 为不同算法优化后得到的方向图,由图可以看出,本文

改进优化算法得到的方向图中,各零陷位置的零陷深度均低于 -95 dB,旁瓣电平为 -20.4 dB,达到了设计要求。激励电流幅值见表 1,电流幅值 1 为本文改进 PSO 优化结果,电流幅值 2 为 LDW-PSO 优化结果,电流幅值 3 为带扰动 PSO 优化结果。

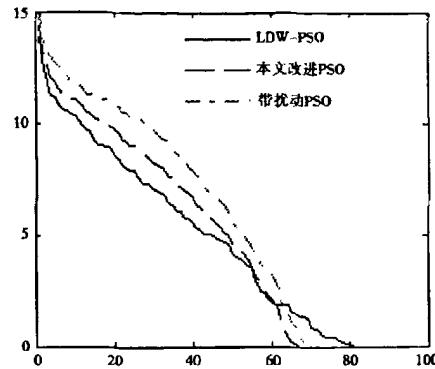


图 1 不同 PSO 算法收敛曲线

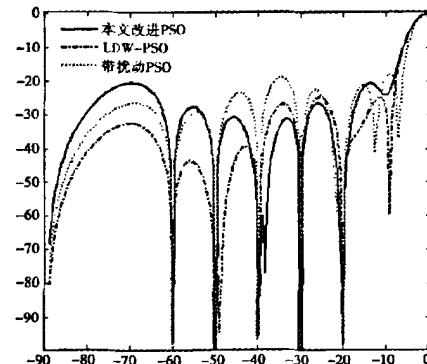


图 2 不同算法得到的 20 阵元均匀线阵方向图

表 1 阵元电流幅值

阵元号	1,20	2,19	3,18	4,17	5,16	6,15	7,14	8,13	9,12	10,11
电流幅值 1	0.2305	0.1363	0.3176	0.2216	0.4311	0.4342	0.5371	0.6056	0.8081	0.8717
电流幅值 2	0.1732	0.2221	0.2612	0.3783	0.7116	0.8062	0.834	0.879	0.9662	0.985
电流幅值 3	0.266	0.7564	0.4281	0.6798	0.9597	0.8778	0.6826	0.873	0.9665	1

2.2 实例 2

一个 $N=20$ 的天线阵元形成均匀直线阵,阵元间距为 $\lambda/2$,激励电流的相位均为 0(边射阵),电流幅值对称,对电流幅值进行优化。设计指标为,旁瓣电平在 -15 dB 以下,在 -20° 、 -25° 、 -30° 、 -35° 、 -40° 、 -45° 、 -50° 处形成不低于 -85 dB 的零陷,采用 400 个粒子迭代 200 次。图 3 是不同算法的 20 次平均收敛曲线,由图可以看出,由于设计指标很高,所有算法都不能全部收敛。

一个 $N=20$ 的天线阵元形成均匀直线阵,阵元间距为 $\lambda/2$,激励电流的相位均为 0(边射阵),电流幅值对称,对电流幅值进行优化。设计指标为,旁瓣电平在 -15 dB 以下,在 -20° 、 -25° 、 -30° 、 -35° 、 -40° 、 -45° 、 -50° 处形成不低于 -85 dB 的零陷,采用 400 个粒子迭代 200 次。图 3 是不同算法的 20 次平均收敛曲线,由图可以看出,由于设计指标很高,所有算法都不能全部收敛。

表 2 阵元电流幅值

阵元号	1,20	2,19	3,18	4,17	5,16	6,15	7,14	8,13	9,12	10,11
电流幅值 1	0.0593	0.1007	0.3194	0.4086	0.7359	0.7466	0.9789	0.8539	0.9214	0.834
电流幅值 2	0.0872	0.2963	0.2656	0.7118	0.3815	0.9908	0.4469	0.983	0.5501	0.7613
电流幅值 3	0.0222	0.1244	0.2618	0.5293	0.7107	0.9505	0.9631	0.999	0.8796	0.8434

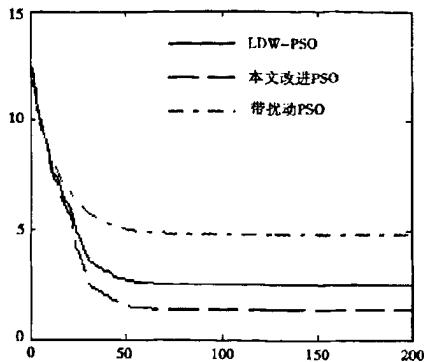


图 3 不同 PSO 算法收敛曲线

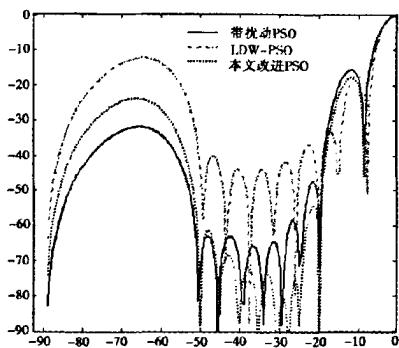


图 4 不同算法得到的 20 阵元均匀线阵方向图

相比之下,LDW-PSO 很早就陷入早熟收敛,收敛成功率最低;带扰动的 PSO 优化成功率有所提高;改进 PSO 算法效果比较满意,在 60~80 迭代可以得到满意的效果。图 4 为不同算法的最好优化结果对应的方向图,由图可以看出,本文改进优化算法得到的方向图各零陷位置的零陷深度均低于-85 dB,最高副瓣电平为-17.7 dB,达到比较满意的结果。激励电流幅值见表 2,电流幅值 1 为本文改进 PSO 优化结果,电流幅值 2 为 LDW-PSO 优化结果,电流幅值 3 为带扰动 PSO 优化结果。从图 4 中可以看出,由于本文改进算法采用了停滞检测,使得 ω 在必要时才减小,尽量保持全局搜索能力,较其余 2 种算法更容易跳出局部极值点,避免早熟收敛。

3 结 论

PSO 算法作为一种新兴的智能算法,在解决多维非线性、不可微以及多峰值的复杂问题上表现出了良好的效果。基本 LDW-PSO 算法实现简单,全局收敛效果较基本 PSO 算法更好,但也仍存在着早熟收敛的缺陷。本文提出了一种改进的 PSO 算法,粒子种群采用 Ring 型邻域结构和 LocalBest 策略。

当算法优化进展顺利时,使用基本 PSO 粒子更新策略;当检测到算法可能陷入停滞后,采用 LDW 的策略来改变惯性权值,通过对非全局最优粒子进行扰动。算法降低了全局最优粒子的影响,同时惯性权值的跳变以及对非全局最佳粒子的扰动更具针对性,降低了陷入局部极值的可能,较好地解决了早熟收敛的问题。为说明改进 PSO 算法的实用性和有效性,本文将此方法用于对阵列天线多零点低旁瓣方向图的综合,取得了良好的效果,体现了该算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] DENNIS J E. Nonlinear least squares[C]// JACOBS D. State of Art in Numerical Analysis, New York: Academic Press, 1977: 269-312.
- [2] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]// Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks. IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [3] 金荣洪,袁智皓,耿军平,等. 基于改进粒子群算法的天线方向图综合技术[J]. 电波科学学报, 2006, 21(6): 873-878.
JIN Rong-hong, YUAN Zhi-hao, GEN Jun-ping, et al. The pattern synthesis of antennas based on a modified PSO algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 873-878. (in Chinese)
- [4] KENNEDY J, MENDES R. Neighborhood topologies in fully-informed and best-of-neighborhood particle swarms[C]// Proceedings of the 2003 IEEE International Workshop on Soft Computing in Industrial Applications(SMCia03), 2003: 45-50.
- [5] STACEY A, JANCIC M, GRUNDY I. Particle swarm optimization with mutation[C]// Evolutionary Computation, 2003, 2: 1425-1430.
- [6] 林川, 冯全源. 基于微粒群本质特征的混沌微粒群优化算法[J]. 西南交通大学学报, 2007, 47(6): 665-669.
LIN Chuan, FENG Quan-yua. Chaotic particle swarm optimization algorithm based on the essence of particle swarm[J]. Journal of SouthWest JiaoTong University, 2007, 47(6): 665-669. (in Chinese)
- [7] 林川, 冯全源. 一种新的自适应粒子群优化算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(7): 181-183.
LIN Chuan, FENG Quan-yua. New adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering, 2008, 34(7): 181-183. (in Chinese)
- [8] 马云辉. 阵列天线的遗传算法综合[J]. 电波科学学报

- 报,2001,16(2):172-176.
- MA Yun-hui. Synthesis of the array antennas using genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science,2001,16(2):172-176. (in Chinese)
- [9] 焦永昌,杨科,陈胜兵,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(1):16-25.
- JIAO Yong-chang, YANG Ke, CHEN Sheng-bing, et al. Application of particle swarm optimization in antenna array pattern synthesis[J]. Chinese Journal of Radio Science,2006,21(1):16-25. (in Chinese)
- [10] 高波,金荣洪,耿军平.基于一种新的粒子群算法的天线方向图综合技术[J].电子与信息学报,2007,29(12):3015-3019.

(上接第 674 页)

为来波极化从主极化(偏角为 0°)变到交叉极化(偏角为 90°)时,5 个天线上的幅度和相位响应。

表 2 发射源姿态变化引起的接收天线相位响应变化

偏角	天线号				
	1	2	3	4	5
0.00	141.17	101.41	85.87	101.41	141.17
10.00	140.74	101.17	85.87	101.63	141.51
20.00	140.16	100.87	85.87	101.83	141.81
30.00	139.25	100.47	85.87	102.03	142.09
40.00	137.50	99.85	85.87	102.24	142.37
45.00	135.74	99.37	85.87	102.36	142.51
50.00	132.09	98.68	85.87	102.48	142.66
60.00	16.87	95.27	85.87	102.78	142.99
70.00	-29.88	1.02	85.87	103.18	143.40
80.00	-33.79	-71.89	85.87	103.78	143.93
90.00	-35.26	-75.09	37.05	104.91	144.74

从表 1 和表 2 可看出:当电波正好从 3 号天线正前方来时,3 号天线两侧天线主极化幅度和相位响应都对称,但随着交叉极化分量的增加,对称性受到越来越严重的破坏,测向精度也越来越差。

3 结论

从远区发射点辐射的线极化电磁波,经各向异性的电离层传输信道后,到达接收点时变成相关性比较低、相干性受到破坏的椭圆极化波,同时,一个天线对两种极化的相位响应有很大的差异,因此,对水平接收天线感应电压产生随机扰动,从而对方向

GAO Bo, JIN Rong-hong, GEN Jun-ping. Pattern synthesis of antenna array using a novel quasi pso algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2007,29(12):3015-3019. (in Chinese)



刘东 (1978—),男,四川人,西南交通大学电气学院教师,西南交通大学信息科学与技术学院在职博士生,主要研究方向为阵列信号处理、智能天线技术。

冯全源 男,教授,博士生导师。IEEE 高级会员 (IEEE Senior member),西南交通大学微电子研究所所长,研究方向:移动天线与智能天线系统,集成电路设计,微波及毫米波技术,电磁兼容与环境电磁学,微波器件及材料等。

信息产生扰动。

在短波水平极化测向中,交叉极化是影响测向精度的关键因素。在设计短波水平极化天线测向系统时,应该通过测向算法,设法有效分离在接收电压中的主极化和交叉极化分量,或选择能有效抑制交叉极化分量的定向天线单元。

参考文献

- [1] АЛПЕРЯ Л Т. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДОВОЛН И ИОНОСФЕРА [M]. MockBa, 1960.
- [2] Recommendation ITU-R P. 372-6 “radio Noise”[S]. ITU-R Recommendations Volume 2000 P Series-Part1.
- [3] 熊皓,等.无线电波传播[M].北京:工业出版社,2000.
- [4] CCIR-R327. Diversity Reception[R]. 1966.

曹倩 (1965—),男,安徽人,高级工程师,现在中国电波传播研究所工作,主要研究领域包括天线理论与设计等。

金元松 (1941—),男,吉林人,研究员,中国电子学会会士。主要研究领域包括电磁场数值计算、天线理论与设计、有耗媒质中的电磁问题以及雷达目标散射问题等。

王子华 (1983—),男,黑龙江人,2006 年毕业于电子科技大学电磁场与微波技术专业,同年于中国电波传播研究所攻读硕士学位,主要从事天线理论与设计、电磁场数值计算。

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>