

文章编号 1005-0388(2008)04-0792-05

米波圆环天线阵的方向图综合研究

郭建明^{1,2} 刘波²☆ 毛二可¹

(1. 北京理工大学电子工程系,北京 100081; 2. 空军装备研究院雷达所,北京 100085)

摘要 利用通过遗传算法和粒子群优化方法对米波圆环阵列的幅度和相位加权进行设计,实现方向图增益、副瓣电平和方向图凹口的优化综合。以位爬山法和相位局部搜索技术为辅助,得到了较为理想的方向图结果,同时将GA和PSO方法的计算效率进行了比较,后者操作更简单,占用的计算资源更少,方法和结果可作为共形阵方向图设计参考。

关键词 圆环形相控阵;方向图;遗传算法;粒子群算法;位爬山法

中图分类号 TN957 **文献标志码** A

Synthesis of circular array patterns of VHF band

GUO Jian-ming^{1,2} LIU Bo² MAO Er-ke¹

(1. Dept of E. E., Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Radar Research Institute, Air Force Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract Based on Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), appropriate amplitude and phase weights are acquired for realizing the low sidelobe level and array pattern notch of VHF band circular array. Some techniques, including Bit Climbing and narrow dynamic range phase seeking, are adopted to improve the convergence efficiency. Also, the calculating resource of PSO, i. e., memory and CPU time, is less than that of GA in the circular pattern synthesis. The methods and results may be used the reference to similar circular pattern design.

Key words circular phased array; pattern; genetic algorithm (GA); particle swarm optimization (PSO); bit climbing

1 引言

圆环形阵列(以下简称圆环阵)可以采用全向发射、多路接收,形成同时覆盖全方位探测空域的多波束,也容易实现在不同方向灵活可变的增益。此外,传统相控阵扫描过程中波束随角度发生变化,即波束指向偏离阵面法向后,天线有效口径变小,主瓣展宽,副瓣电平增加,而圆环阵利用一段圆弧上阵元进行波束形成彻底避免了该问题。圆环(弧)阵面临的难题是方向图赋形困难^[1,2]。线阵方向图优化设计

可利用经典的方法,如 Dolph-Chebyshev 方法和 Taylor 线源方法等,而对于圆环阵优化设计则没有成熟的方法。若直接采用线阵的加权设计方法显然不是最理想的,副瓣电平等指标不易满足工程要求,同时很难设计阵列方向图的零陷^[2]。目前的阵列智能优化设计多数研究的是线阵和平面阵等简单的阵面,少有涉及复杂阵面的情况。

本文以遗传算法(Genetic Algorithm,GA)和粒子群优化(Particle Swarm Optimization,PSO)等智能算法为基础,通过优化设计阵元的幅度和相位等

参数实现圆环阵的低副瓣电平和高增益,以及具有抗干扰功能的阵列零陷。文中还采用了位爬山法和相位局部搜索技术加速计算过程的收敛,提高了计算效率。

2 算法设计

2.1 圆环阵列的方向图模型

以单层的圆环阵列为例,计算合成方向性图(如图1所示)。参考原点为中心阵元,圆环阵列方向性图的总场表达式为^[3,4]

$$E = 1 + \sum_{i=1}^N A_{L_i} \cdot e^{j(2\pi d_{L_i}/\lambda + \phi_{L_i})} + \sum_{i=1}^N A_{R_i} \cdot e^{j(2\pi d_{R_i}/\lambda + \phi_{R_i})} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式(1)中的 A_{L_i} 和 A_{R_i} 分别为中心阵元左右两侧阵元的激励幅度, d_{L_i} 和 d_{R_i} 为左右两侧阵元与中心阵元的波程差, ϕ_{L_i} 和 ϕ_{R_i} 为相位加权值(通过对中心阵元两侧的阵元进行相位补偿,保证中心对应主瓣方向), N 为单元一侧的单元总数(对称分布)。设入射波传输矢量 k 与水平方向 H_1A 的夹角为 θ 。与波束形成相关各阵元波程差的表达式为

$$d_{L_i} = |AC| \sin\theta + |CL_i| \cos\theta \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2a)$$

$$d_{R_i} = |AC| \sin\theta - |CR_i| \cos\theta \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2b)$$

通过控制幅度和相位加权可以同时形成多波束。

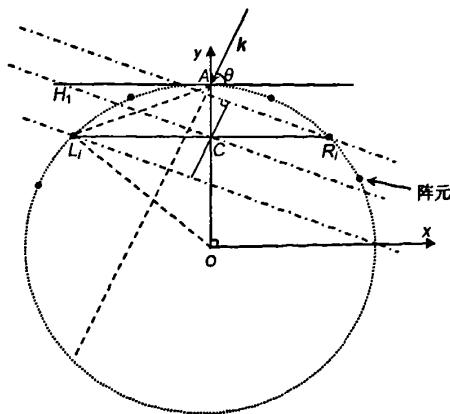


图1 圆环阵波程差计算示意图

相控阵的相位变化主要功能是控制主波束指向,而圆环阵的优势就是通过改变阵列波束形成时的单元组成,即可实现波束指向的控制,对不同方位

进行探测时无须进行相位变化。圆形阵的半径 R 为 5.5 m,利用三角函数的基本定理,可以求出上式中 $|AC|$ 、 $|CL_i|$ 和 $|CR_i|$ 的值,进而得到各个阵元对应的波程差变量如下:

$$\begin{aligned} d_{L_1} &= 0.0067 \sin\theta + 0.860 \cos\theta, \\ d_{R_1} &= 0.0067 \sin\theta - 0.860 \cos\theta \\ d_{L_2} &= 0.269 \sin\theta + 1.698 \cos\theta, \\ d_{R_2} &= 0.269 \sin\theta - 1.698 \cos\theta \\ d_{L_3} &= 0.599 \sin\theta + 2.495 \cos\theta, \\ d_{R_3} &= 0.599 \sin\theta - 2.495 \cos\theta \\ d_{L_4} &= 1.050 \sin\theta + 3.232 \cos\theta, \\ d_{R_4} &= 1.050 \sin\theta - 3.232 \cos\theta \\ d_{L_5} &= 1.611 \sin\theta + 3.889 \cos\theta, \\ d_{R_5} &= 1.611 \sin\theta - 3.889 \cos\theta \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 GA 的应用

GA 通过模拟遗传选择和自然淘汰的生物进化过程来实现优化,其基本原理见文献[5]。群体搜索使 GA 得以突破邻域搜索的限制,从而实现整个解空间上的分布式信息探索、采集和继承,而遗传算子仅仅利用个体适应值作为度量运算结果的指标,使其具有简明性和普适性。该方法所表现出的主要特点是直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性的限定;同时算法内在的隐并行性和更好的全局寻优能力;采用概率化的非线性寻优方法,能自动获取和指导优化的搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要确定性的规则。

GA 的计算步骤大致分为确定方向图目标函数、对参数进行编码、初始化群体、计算个体的适应值,再依据适应值进行遗传操作(选择、交叉、变异等),然后再重新计算个体的适应值,直至迭代计算结束^[5-7]。GA 的宏观探索能力大于局部求精能力,因而带来了进化过程后期效率较低的问题。在实际应用中,经常需要将 GA 与局部搜索方法结合起来,以改善 GA 后期进化的效率。这些方法包括梯度法、模拟退火法等。本文采用位爬山法来加速 GA 进化后期的收敛^[5],该方法原理简单,可信度高。具体讲,当 GA 群体进化到预定代数,或者当前最佳位串的适应值改善低于预定的阈值时,则选择当前群体中最佳位串个体作为初始个体,然后采用位爬山法继续完成局部搜索过程。位爬山法的主要形式是位变异,根据位的多样性来确定是否将其变异,即位的多样性越强,其发生变异的概率越大。对于经典的二进制编码而言,由于末尾的编码权值较低,因而具体操作时可以选择最末的几位编码作为

变化的范围,将编码在0和1之间转换,实现最末几位的遍历,完成局部搜索。

2.3 PSO 的应用

同GA类似,作为一种进化计算技术,PSO也是在一组随机解的基础上进行迭代的优化算法,但没有GA采用的交叉和变异,而是在解空间追随最优解进行搜索。PSO算法最早用于对鸟群捕食的行为研究,设想这样一个场景:一群鸟在随机搜索食物,在这个区域里只有一块食物,所有的鸟都不知道食物在那里,但是他们知道当前的位置离食物还有多远,最简单有效的办法就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域。PSO模型中的每个解都是搜索空间中的一只鸟(称为“粒子”)。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值(Fitness value),每个粒子还有一个速度决定他们飞翔的方向和距离。粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己,多次迭代后找到最优解。第一个就是粒子本身所找到的最优解。这个解叫做个体极值Pbest;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值Gbest。在找到这两个最优值时,粒子根据特定的公式来更新自己的速度和新的位置。具体的迭代公式如下^[8,9]:

$$\begin{aligned} v_{k+1} = & c_0 v_k(i, j) + 2c_1(Pbest_k(i, j) - \\ & x_k(i, j)) + 2c_2(Gbest_k(i, j) - x_k(i, j)) \end{aligned} \quad (4a)$$

$$x_{k+1} = x_k(i, j) + v_{k+1}(i, j) \quad (4b)$$

式中, v_k 是粒子的速度向量; x_k 是当前粒子的位置, 此处用来表示阵元的幅度和相位参数; $Pbest_k$ 表示粒子本身所找到的最优解的位置; $Gbest_k$ 表示整个种群当前已找到的最优解的位置; 二维矩阵的元素标号 j 表示个体的序号, i 表示个体的位置; c_0, c_1 和 c_2 表示群体认知系数, 一般 c_0 取(0,1)之间的随机数, c_1 和 c_2 取(0,2)之间的随机数。 v_{k+1} 是 $v_k, Pbest_k$ 和 $Gbest_k$ 的矢量和。同时, 若粒子在搜索过程中越界, 后则将其拉回到原来的位置重新进行位置更新。

与GA类似, 在迭代计算的后期PSO也存在其收敛减慢, 搜索效率低下的问题, 此处采用减速搜索的策略, 具体讲, 速度的最大值随计算过程的进行不断减小, 使得计算后期时个体在逼近最优值时运行速度逐渐缓慢, 一定程度避免了在最优值附近“振荡”, 尽早收敛到最优解^[9,10]。综合以往的计算经验, 初步认为计算末期的速度极值可以取为初始速度极值的1/5~1/10左右较为合适。

3 计算实例

阵列方向图设计实例为优化单层圆环阵在水平面内的方向图。

以图1中的阵列中水平放置的11个阵元为例, 对天线方位波瓣图进行综合优化, 其中阵元的方向图为余弦函数。

以副瓣电平, 主瓣波束宽度以及零陷(凹口)综合指标为优化目标。假设天线工作频率为200 MHz。同时假设激励源幅度变化范围是10dB。

11个阵元组成阵列后的方向图公式表达式为

$$\begin{aligned} E = & 1 + \sum_{i=1}^5 A_{Li} \cdot e^{j(2\pi d_{Li}/\lambda + \theta_{Li})} |\cos(\theta + \\ & 90^\circ + 9^\circ \cdot i)| + \sum_{i=1}^5 A_{Ri} \cdot e^{j(2\pi d_{Ri}/\lambda + \theta_{Ri})} \\ & |\cos(\theta + 90^\circ - 9^\circ \cdot i)| \end{aligned} \quad (5)$$

3.1 低副瓣与高增益的综合设计

离线性能 $P_{off-line}$ 反映的是群体中最佳个体适应值经平滑处理后的变化情况, 其表达式为

$$P_{off-line}(T) = \frac{1}{T+1} \sum_{t=0}^T f(a^*, t) \quad (6)$$

式中, T 是进化代数, $f(a_j, t)$ 为当前个体的适应值或所求参数^[6,7]。

考虑到控制GA迭代过程中的收敛速度, 避免过早的收敛, 此处设定适应值函数(用 F_1 表示)为

$$\begin{aligned} F_1 = & -w_1 \times 10 \times \log_{10}(FSLL/MLL) + \\ & w_2 \times (60.0 - 2.0 \times HPBW) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中, 加权系数为 $w_1 = 0.45$, $w_2 = 0.55$ 。第一项的负号是为保证目标函数成为正数, 式中FSLL为副瓣电平的最大值, MLL为主瓣电平, HPBW为半功率波瓣宽度, 求适应值函数的最大值。假设工作频率为200 MHz。采用二进制编码, 每个单元的振幅由8位数字表示, 对应的误差范围由式(8)可得:

$$\Delta x = (1 - 0.1) / (2^8 - 1) = 0.0143 \quad (8)$$

在种群数量为80, 进化代数为300的情况下, 以不同单元数目综合出的水平方向(仰角为零)归一化方向图。图2为取3次不同初始值的计算结果。

在应用PSO方法的过程中, 为兼顾收敛速度和搜索位置的遍历性, 采用粒子变速搜索的办法。假设幅度最大值为1, 初始速度为0.2, 在搜索过程中速度成线性降低到0.02, 从而既保证最终的计算精度, 又能够较快地收敛。由于两个相邻阵元沿阵面法向投影的间距小于波长的四分之一, 根据工程经

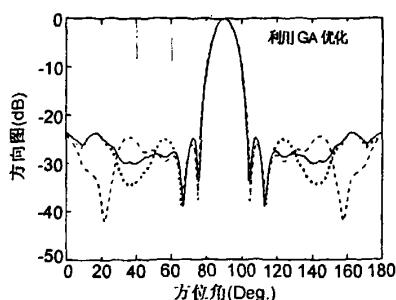


图2 GA进行3次不同随机初始值的优化设计

验,为优化方向图,只需使相位在0到 $\pi/4$ 之间进行局部搜索即可,不必在0到 2π 搜索。

图3中取不同初始值的优化结果差异较小,趋势相同,证明了算法的鲁棒性。计算程序运行于主频为2.6 GHz的Pentium(R)IV PC机,PSO算法占用计算时间与内存空间约为GA的一半。实际外场初步测试第一副瓣电平与理论值相差不大于2 dB。

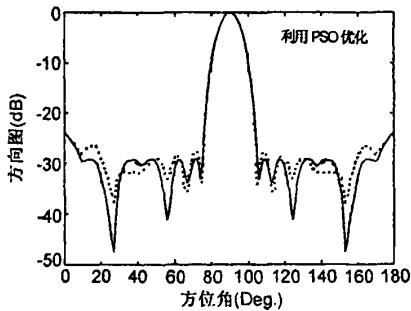


图3 利用PSO进行3次不同随机初始值的优化设计

3.2 低副瓣与零陷的综合设计

此处选择的适应值(用 F_2 表示)函数为

$$F_2 = -w_1 \times 10 \times \log_{10}(FSLL/MLL) + w_2 (60.0 - 2.0 \times HPBW) - w_3 \times \sum N_i \quad (8)$$

式(8)中, $w_1 = 0.3$, $w_2 = 0.4$, $w_3 = 0.3$ 。较式(7)增加的 $\sum N_i$ 为所有零陷深度的分贝值求和(N_i 为零陷深度的分贝值, i 为以度为单位的离散零陷位置)。为了避免在 360° 相位内进行大范围的搜索,而造成不易收敛。此处考虑采用相位局部搜索的方法,按照计算经验,只要在 60° 相位内进行搜索,就能够得到较为满意的结果。图4和图5分别为GA和PSO优化计算的方向图结果。表1为图4对应的幅度和相位(弧度)加权值,中心阵元为参考(单位幅度,零相位),由于方向图对称,故左右两侧

加权值相等。表2为图4对应的幅度和相位(弧度)加权值。采用Dolph-Chebyshev等解析方法难以获得圆环阵理想的低副瓣和零陷特性^[3]。此处由GA与PSO得到的优化结果较好,且两者相差不多。事实上,对于数值迭代构成的优化方法而言,即使是同一种方法,初始值不同时,结果也会发生变化,因而优化后的结果有一定差异属正常现象^[10]。对于GA和PSO两种方法,分别进行了3次初始值不同的仿真计算,以保证取得较满意的优化结果。在外场以稳定方向图后观测空中飞行目标的外场试验的结果表明:在采用表1和表2中的幅相加权后,在相应方向确实出现了方向图的凹口。

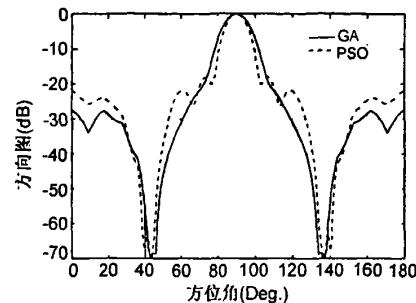


图4 在40度到50度方位之间形成零陷的优化设计

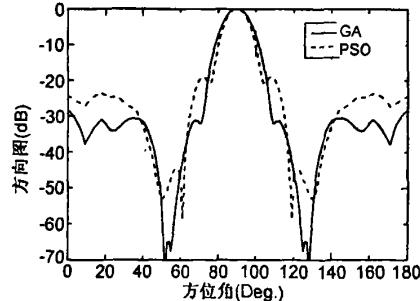


图5 在50度到60度方位之间形成零陷的优化设计

表1 图4对应的幅度相位加权值(幅度/相位)

单元	1	2	3	4	5
GA	0.940/0.103	0.763/0.288	0.435/0.467	0.251/0.566	0.100/0.115
PSO	0.971/0.224	0.901/0.428	0.735/0.411	0.622/0.487	0.276/0.332

表2 图5对应的幅度相位加权值(幅度/相位)

单元	1	2	3	4	5
GA	0.992/0.492	0.721/0.591	0.505/0.263	0.237/0.369	0.103/0.536
PSO	0.915/0.172	0.975/0.135	0.650/0.214	0.512/0.512	0.212/0.418

4 结论

为解决圆环阵列天线难以采用经典方法进行方

向图优化设计的问题,利用GA和PSO方法设计了单层米波圆环阵列的幅度和相位加权,对方向图增益、副瓣电平和方向图凹口进行优化设计。对于多层次阵列方法同样有效,而且还可以利用本文的方法进一步在仰角方向进行幅相加权设计。未来需要考虑阵元互耦和幅相量化对方向性的影响。在波瓣形成的算法中,PSO算法较GA实现容易,且占用资源较少,通常算法收敛更快。当然,针对不同的问题,两种算法的适应性也会有所不同,对于具体问题应该有针对性地选择使用。此外,圆环阵波束形成时,除中心阵元外,其它阵元辐射功率的极大值方向均不是阵面的法向,因而阵面增益水平较低,不及相同数目阵元的线阵。例如,若圆环阵360°圆周上均匀布置40个阵元,有11个阵元参与波束形成时,最两端的阵元的最大辐射方向分别偏离阵面法向+45°和-45°。微机电器件的发展有望提供可以瞬时重构阵元角度的天线,改变阵元增益指向,从而解决圆环阵增益较小的问题。

参考文献

- [1] Mailloux R J. *Phased array antenna handbook* [M]. London: Artech House, 1994.
- [2] Kumar B P, Branner G R. Generalized analytical technique for the synthesis of unequally spaced arrays with linear, planar, cylindrical or spherical geometry [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2005, 53 (2): 621-634.
- [3] Vu B. Sidelobe control in Circular Ring Array [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1993, 41 (8): 1143-1145.
- [4] 李敏强,寇纪松,林丹等.遗传算法的基本理论与应用.北京:科学出版社,2002.
- [5] Weile D S, Michielssen E. Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: a review [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1997, 45(3): 343-353.
- [6] Johnson M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithm in engineering electromagnetics [J]. *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, 1997, 39(4): 7-21.
- [7] Robinson J, Rahmat-Samii Y. Particle swarm optimization in electromagnetics [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2004, 52 (2): 397-407.
- [8] 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): 16-20.
- [9] Jiao Y C, Yang K, Chen S B, et al. Application of particle swarm optimization in antenna array pattern synthesis [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21 (1): 16-20.
- [10] 陈腾博,焦永昌,张福顺.基于改进粒子群优化算法的阵列天线综合[J].微波学报,2006,22(增刊): 40-43.
- [11] Boeringer D W, Werner D H. Particle swarm optimization versus genetic algorithm for phased array synthesis [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2004, 52(3): 771-779.



郭建明 (1965—),男,山西人,高级工程师,北京理工大学信号与信息处理专业博士生,主要从事雷达系统论证和验证方法研究。



刘波 (1974—),男,黑龙江人,博士,高级工程师,从事雷达信号处理,阵列天线设计及目标特性等方面的研究。

毛二可 (1936—),男,教授,中国工程院院士,主要从事雷达信号处理和雷达系统方面的研究工作。

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>