

# 二维矩形阵列天线方向图综合

崔玉国, 李清亮, 闫玉波

(中国电波传播研究所 山东 青岛 266107)

**摘要:**在干扰入射方向,自适应天线阵方向图会产生零陷,从而实现抗干扰的功能。基于最大信噪比准则,将自适应算法应用于二维矩形天线阵方向图的综合问题,假定有大量干扰信号施加到天线阵的副瓣区,通过只对副瓣峰值电平进行控制调整加权值,得到满足设计要求的目标方向图。该算法计算量较小,收敛速度比较快,可以将阵元的方向图特性的影响考虑在内。仿真结果证实了该算法是可行的。

**关键词:**二维矩形阵列;自适应算法;方向图综合;最大信噪比准则

**中图分类号:**TN82

**文献标识码:**B

**文章编号:**1004-373X(2009)03-065-04

## Pattern Synthesis of Two-dimensional Rectangular Antenna Arrays

CUI Yuguo, LI Qingliang, YAN Yubo

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, 266107, China)

**Abstract:** Adaptive antenna arrays are able to form a pattern null in the direction of an interfering signal, which gives them anti-jamming capability. Adaptive algorithm based on maximum Signal-to-Noise Ratio (SNR) criterion is applied to pattern synthesis of two-dimensional (2-D) rectangular antenna arrays. Supposing a large number of interfering signals are incident in the sidelobe region, the pattern is modified to satisfy the design specification by only adjusting the sidelobe peaks level. So the computation is simplified and the convergent speed is improved. The element pattern characteristic is taken into account too. The algorithm is validated through simulation.

**Keywords:** 2-D rectangular array; adaptive algorithm; pattern synthesis; maximum SNR criterion

### 0 引言

天线阵方向图的综合问题是天线阵设计中的核心问题,是指按规定的方向图要求,用一种或多种方法来进行天线阵列的设计,使其产生的方向图与所要求的方向图良好逼近。Dolph<sup>[1]</sup>利用切比雪夫多项式的性质导出了等距线阵的权值,可以在给定最大副瓣电平的情况下使波束宽度最小,或在给定波束宽度的情况下使副瓣电平最低;Villeneuve<sup>[2]</sup>把 Taylor 的方法应用于离散直线阵列的综合,它可以在靠近主瓣的区域产生等幅度副瓣,而在远处的副瓣电平逐渐减小。其他的用于解决直线阵列方向图综合问题的方法在文献[3]中有详细的描述。

二维矩形阵列天线方向图综合最简单的方法是推广直线阵列的方法。如果口径分布是二维可分离的,则平面阵的方向图就等于两个正交直线阵的方向图的乘积。由此得到的方向图在相应主平面内达到所要求的副瓣电平,而在其他平面内副瓣电平低于设计目标,导致主瓣变宽<sup>[4]</sup>。

Tseng 和 Cheng 提出了一种设计切比雪夫矩形平面阵的方法<sup>[5]</sup>,能使平面阵所产生的方向图在每一  $\varphi$  剖面内都是切比雪夫型最佳方向图,但该方法要求行单元数等于列单元数,并且不能把阵元的方向图特性考虑在内。

Stutzman 和 Coffey<sup>[6]</sup>提出了一种用于平面阵列综合的迭代抽样算法。首先根据其他算法或者实验测量数据得到一初始方向图,利用正交函数  $\sin(x)/x$  的性质对其进行采样修正,使方向图在采样点与目标方向图匹配,重复该采样迭代过程直到得到满意的方向图。该方法比较简单,但综合的方向图在采样点之间会有波动,也不能把单元的方向图特性考虑在内。

文献[7]运用一种改进的粒子群优化算法,实现了不等幅激励的二维矩形平面阵列天线的方向图综合。通过采用对全局最优粒子微扰和跳变的惯性权重策略,并使用粒子群算法本身对参数组合进行了优化选择,很好地改善了优化速度和收敛精度,使算法具有普遍的适用性,取得了较好的结果。

该文把自适应算法应用于天线阵方向图的综合,给出了一种二维矩形平面阵列的方向图综合方法。通过

对副瓣区峰值电平的控制,综合得到了满足要求的目标方向图,可以把阵列单元的特性考虑在内,具有较强的实际意义。

## 1 算法描述

### 1.1 自适应算法

自适应阵列综合算法是近年来在自适应信号处理理论的基础上发展起来的,文献[8]比较系统地阐述了这种方法的原理:在干扰入射方向,自适应阵列会产生零陷,干扰越强零陷越深;干扰信号个数超过  $N-2$  时 ( $N$  是天线单元个数),自适应阵列将无法在各个干扰方向上形成零陷,而是自适应地调节方向图使干扰信号功率在输出中最小。

在阵列天线方向图的副瓣区域,峰值电平是最高的电平,当峰值电平低于目标副瓣电平时,副瓣区的电平自然就达到了设计要求。通过只对副瓣峰值电平进行控制,把自适应算法应用于二维矩形平面阵列天线方向图的综合。

假定有大量的初始干扰信号施加到阵列的副瓣区,由于干扰的分布特性是已知的,根据最大信噪比准则求解初始自适应权值,得到自适应算法产生的初始方向图,干扰信号方向的电平会降低。在副瓣峰值方向将得到的结果与设计目标相比较,根据自适应算法的原理调整干扰信号的功率,如果副瓣太高,就增加相应角度上的干扰功率,反之,就减少相应角度上的干扰功率,然后再重新计算新的权值。重复进行这个迭代过程,直到得到满足要求的目标方向图。流程图如图1所示。

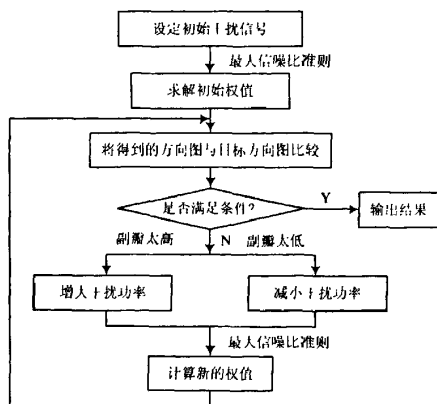


图1 自适应算法流程图

### 1.2 二维矩形阵列的方向图综合

二维矩形天线阵列如图2所示,图中黑点表示天线单元。此阵沿  $x$  轴方向有  $M$  个单元,沿  $y$  方向有  $N$  个单元,  $d_x$  和  $d_y$  分别为行距和列距,  $(\theta, \varphi)$  表示主瓣的指向。天线阵列输出的信号方向矢量和加权值分别为:

$$\mathbf{V}_{2D} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{M1} & v_{M2} & \cdots & v_{MN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{W}_{2D} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & w_{M2} & \cdots & w_{MN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $v_{mn} = f_{mn} e^{jk\varphi_{mn}}$ ,  $f_{mn}$  是阵列单元  $(m, n)$  的方向图,  $k = 2\pi/\lambda$  是波数,  $\varphi_{mn} = md_x \sin(\theta) \cos(\varphi) + nd_y \sin(\theta) \sin(\varphi)$ , 是各单元的空间相位差。阵列输出信号由每个  $v_{mn}$  与相应的复数加权值  $w_{mn}$  (即天线单元馈点电流)相乘并求和得:

$$S_{2D} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} v_{mn} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} f_{mn} e^{jk\varphi_{mn}} \quad (3)$$

将上面两个二维阵列  $\mathbf{V}_{2D}$  和  $\mathbf{W}_{2D}$  表示成一维形式,转化成直线阵来综合,  $\mathbf{V}_{2D}$  和  $\mathbf{W}_{2D}$  中元素要一一对应,  $M$  和  $N$  分别是阵元的行数和列数。

$$\mathbf{V} = [v_{11} \cdots v_{M1}, v_{12} \cdots v_{M2}, \cdots, v_{1N} \cdots v_{MN}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{W} = [w_{11} \cdots w_{M1}, w_{12} \cdots w_{M2}, \cdots, w_{1N} \cdots w_{MN}]^T \quad (5)$$

阵列输出信号可表示为:

$$S = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} v_{mn} = \mathbf{W}^T \mathbf{V} \quad (6)$$

天线方向图与  $\mathbf{V}$  和  $\mathbf{W}$  相关,取其模值为:

$$p(\theta, \varphi) = |\mathbf{W}^T \mathbf{V}| \quad (7)$$

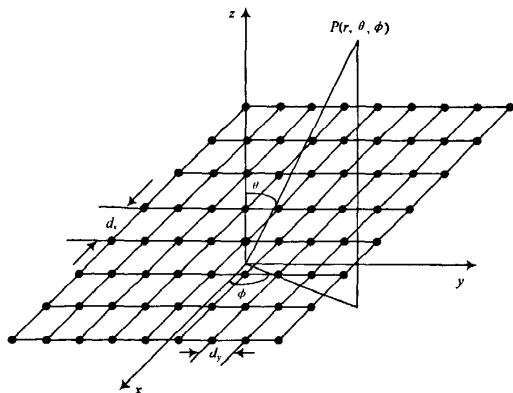


图2 平面阵示意图

假设阵列的副瓣区有  $A \times B$  个二维干扰信号  $X_{ab}$  ( $a = 1, 2, \cdots, A, b = 1, 2, \cdots, B$ ),  $A$  和  $B$  远大于阵列的行数  $M$  和列数  $N$ , 其入射角为  $(\theta_a, \varphi_a)$ , 幅度为  $A_{ab}$ ;  $X_n$  是各阵元中存在的功率为  $\delta^2$  的高斯热噪声, 取干扰噪声比为  $(k$  表示第  $k$  次迭代):

$$\epsilon_{ab}(k) = A_{ab}(k)^2 / \delta^2, \epsilon \gg 0 \quad (8)$$

天线阵列接收的非期望信号为:

$$X_n = X_n + \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^B X_{ab} \quad (9)$$

假定第  $k$  次迭代时主瓣的最大值为  $P_0(k)$ , 如果要求的旁瓣电平低于主瓣电平  $R(\text{dB})$ , 则目标副瓣电平为:

$$d(k) = P_0(k)/10^{R/20} \quad (10)$$

主瓣区不施加干扰信号, 即干扰信号功率为 0。由上文可知, 第  $k+1$  次迭代时干扰信号强度为:

$$\epsilon_{ab}(k+1) = \begin{cases} 0, & (\theta_a, \varphi_b) \in \text{主瓣区} \\ h(k), & (\theta_a, \varphi_b) \in \text{副瓣峰值方向} \\ \epsilon_{ab}(k), & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

$$h(k) = \max\{0, \epsilon_{ab}(k) + f[p(\theta_a, \varphi_b, k) - d(k)]\}$$

其中:  $p(\theta_a, \varphi_b, k)$  为第  $k$  次迭代后方向图的实际电平;  $d(k)$  为由式(10)求得的目标副瓣电平;  $f$  为迭代步长。目标副瓣电平越低,  $f$  取值越大;  $f$  取值较小可以保证收敛, 但会使迭代过程收敛速度比较慢, 增大  $f$  的值可以加快收敛速度, 但  $f$  过大会影响收敛过程的稳定性, 在实际应用中可参考文献[8]给出的副瓣电平分别为  $-30 \text{ dB}$ ,  $-35 \text{ dB}$ ,  $-40 \text{ dB}$  时  $f$  的最大取值, 通过试探法确定合适的  $f$  值。

主瓣最大值  $P_0(k)$  在迭代过程中是不断变化的, 每次迭代前需重新确定。副瓣峰值所在方向在迭代过程中也是不断变化的, 即需要调整的干扰信号的方向是不断变化的, 所以在每次迭代前也要重新确定, 可以通过比较相邻区域电平值的相对大小得到。

根据最大输出信噪比准则, 由文献[9]可知最佳权值为:

$$W = \mu \Phi_u^{-1} V_0^* \quad (12)$$

其中:  $V_0$  为期望主瓣方向, 用于确定方向图主瓣的指向;  $\Phi_u$  为非期望信号的协方差矩阵;  $\mu$  为任意常数。

$$\Phi_u = E[X_u X_u^T] = \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^B \epsilon_{ab}(k) V_{in}^* V_{in}^T \quad (13)$$

其中:  $I$  为单位矩阵;  $V_{in}$  为干扰信号所在方向的方向矢量, 将  $(\theta_a, \varphi_b)$  代入式(4)即可求得;  $*$  表示共轭,  $T$  表示转置。

可设定  $\epsilon_{ab}$  的初始值为 0, 把根据式(12)和式(13)求得的权值  $W_0$  代入式(7)得到初始方向图, 将其与设计目标相比较, 根据式(11)调整干扰信号强度, 由式(12)和式(13)求得新的权值  $W_1$ , 代入式(7)得到新的方向图, 重复上面的迭代过程, 直到得到满意的方向图, 具体流程如图 1 所示。

一般阵列方向图为阵元方向图和阵因子的乘积, 上述方法是在没考虑互耦的情况下, 对天线方向图进行的综合。在阵元间互耦较强需要考虑其影响时, 由文献[10]可知, 可以先按照本文算法综合出不考虑互耦时的激励, 再对耦合矩阵求逆, 得到所需要的实际激励。

## 2 仿真示例与分析

示例 1: 计算一个  $6 \times 8$  矩形平面阵, 阵元行距和列距均为  $\lambda/2$  ( $\lambda$  为波长), 主瓣指向侧射方向, 目标副瓣电平取为  $-30 \text{ dB}$ ,  $f=2$ , 仿真结果如图 3 所示, 取坐标值  $u_1 = \sin(\theta)\cos(\varphi)$ ,  $u_2 = \sin(\theta)\sin(\varphi)$ 。加权值以最大值为基准进行了归一化, 如表 1 所示。

示例 2: 计算一个  $7 \times 7$  矩形平面阵, 阵元行距和列距均为  $\lambda/2$  ( $\lambda$  为波长), 阵列单元是电偶极子, 其方向图<sup>[11]</sup>为  $\cos(\theta)$ , 主瓣指向侧射方向, 目标副瓣电平取为  $-30 \text{ dB}$ ,  $f=2$ , 仿真结果如图 4 所示, 取坐标值  $u_1 = \sin(\theta)\cos(\varphi)$ ,  $u_2 = \sin(\theta)\sin(\varphi)$ 。加权值以最大值为基准进行了归一化, 如表 2 所示。

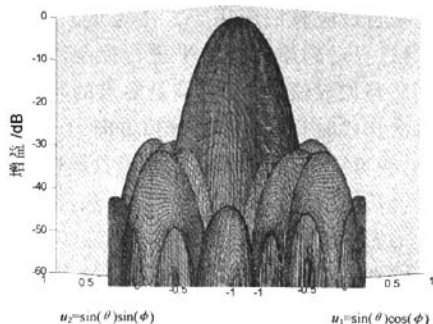


图 3 示例 1 中  $6 \times 8$  阵列的方向图

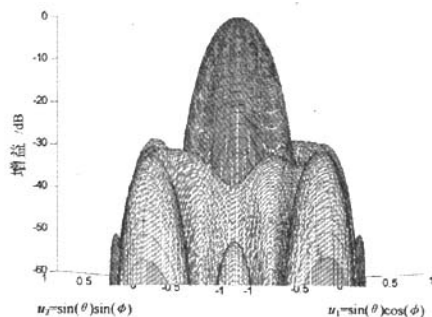


图 4 示例 2 中  $7 \times 7$  阵列的方向图

表 1 示例 1 平面阵的归一化加权值

列单元	行单元					
	1	2	3	4	5	6
1	0.051 8	0.206 1	0.264 4	0.264 4	0.206 1	0.051 8
2	0.147 7	0.354 9	0.526 7	0.526 7	0.354 9	0.147 7
3	0.276 6	0.529 9	0.802 6	0.802 6	0.529 9	0.276 6
4	0.294 6	0.684 6	1.000 0	1.000 0	0.684 6	0.294 6
5	0.294 6	0.684 6	1.000 0	1.000 0	0.684 6	0.294 6
6	0.276 6	0.529 9	0.802 6	0.802 6	0.529 9	0.276 6
7	0.147 7	0.354 9	0.526 7	0.526 7	0.354 9	0.147 7
8	0.051 8	0.206 1	0.264 4	0.264 4	0.206 1	0.051 8

表2 示例2平面阵的归一化加权值

列单元	行单元						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.051 9	0.188 1	0.356 3	0.362 7	0.356 4	0.188 1	0.051 9
2	0.201 1	0.348 5	0.511 8	0.501 8	0.511 9	0.348 5	0.201 2
3	0.385 9	0.534 7	0.834 1	0.900 6	0.834 1	0.534 7	0.385 9
4	0.350 3	0.497 9	0.882 9	1.000 0	0.882 9	0.497 9	0.350 3
5	0.385 9	0.534 7	0.834 1	0.900 6	0.834 1	0.534 7	0.385 9
6	0.201 2	0.348 5	0.511 9	0.501 8	0.511 8	0.348 5	0.201 1
7	0.051 9	0.188 1	0.356 4	0.362 7	0.356 3	0.188 1	0.051 9

### 3 结 语

该文把自适应算法应用于二维矩形天线阵方向图的综合,通过只对副瓣峰值电平进行控制,根据最大信噪比准则调整加权值,得到了满足要求的目标方向图。由于在每次迭代时只调整副瓣峰值方向的干扰信号,计算量较小,使算法得到了简化,加快了收敛速度,在具体应用中更灵活,更易于编程实现。此算法考虑了阵元方向图特性的影响,在已知阵列的耦合系数矩阵时可以将互耦的影响考虑在内,克服了传统算法的不足。可以拓展应用于阵元分布不规则的平面阵列的方向图综合问题,同时副瓣区电平的包络可根据实际需要设定。仿真示例证实了该算法是可行的。

作者简介 崔玉国 男,1984年出生,山东人,硕士研究生。主要研究方向为电离层加热、阵列天线的理论与设计等。

(上接第64页)

### 4 结 语

通过分析 QPSK,16QAM,16APSK 系统所存在相位模糊问题,并给出了各自基于独特码检测的解决方法。从而实现了在不使用差分编码调制的情况下,克服相位模糊,提高了通信系统的可靠性和有效性。

文中基于独特码检测来解决相位模糊的方法不仅限于以上3种系统,还可以广泛应用于采用相干正交支路解调的其他相位调制通信系统(如64QAM等)。

### 参 考 文 献

- [1] 曹志刚,钱亚生.现代通信原理[M].北京:清华大学出版社,1992.
- [2] Bennett W R, Davy J R. Data Transmissions [M]. New

### 参 考 文 献

- [1] Balanis C A. Antenna Theory Analysis and Design[M]. 3rd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [2] Milligan T A. Modern Antenna Design[M]. 2nd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [3] Mailloux R J. Phased Array Antenna Handbook [M]. Norwood: Artech House Inc., 2005.
- [4] 汪茂光,吕善伟,刘瑞祥.阵列天线分析与综合[M].成都:电子科技大学出版社,1989.
- [5] 林昌禄.天线工程手册[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [6] Stutzman W L, Coffey E L. Radiation Pattern Synthesis of Planar Antennas Using the Iterative Sampling Method[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagat., 1975, 23 (6): 764-769.
- [7] 袁智皓,耿军平,金荣洪,等.基于改进的粒子群算法的二维阵列天线方向图综合技术[J].电子与信息学报,2007,29(5):1 236-1 239.
- [8] Olen C A, Compton R T. A Numerical Pattern Synthesis Algorithm for Arrays [J]. IEEE Trans. on Antennas Propagat., 1990, 28(10): 1 666-1 676.
- [9] Applebaum S P. Adaptive Arrays [J]. IEEE Trans. on Antennas Propagat., 1976, 24(5): 585-598.
- [10] 束咸荣,何炳发,高铁.相控阵雷达天线[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [11] Kong J A. 电磁波理论[M]. 吴季,译.北京:电子工业出版社,2003.
- York: McGraw-Hill, 1965.
- [3] Cacciamani E R, Wolejsza C J. Phase-Ambiguity Resolution in a Four-Phase PSK Communications System [J]. IEEE Trans. on Communication Technology, 1971, Com-19(6): 1 200-1 210.
- [4] Tsuji Y. Phase Ambiguity Resolution in a 4-Phase PSK Modulation System with Forward-Error-Correcting Convolutional Codes [J]. Comsat Technical Review, 1976, 6(2): 357-377.
- [5] 雷菁,黄英,刘志新.非线性卫星信道中 APSK 信号星座优化设计研究[J].武汉理工大学学报,2006,28(8):117-121.
- [6] 李薰春,刘廷军,施玉海.高阶调制在 DVB-S2 中的应用[J].广播与电视技术,2005,32(12):20-23.
- [7] 熊静华,杨战平.独特码及其编码原理研究[J].信息与电子工程,2003,1(2):26-30.

作者简介 王 岳 男,1984年出生,天津市人,硕士研究生。主要从事卫星通信方向的研究。

熊蔚明 男,1963年出生,北京市人,研究员。主要从事空间通信系统方向的研究。

## 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](http://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](http://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](http://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>