

# 弹载智能天线系统识别干扰源算法研究

武文婧

(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

**摘要:**基于弹载智能天线系统对阵列接收信号的分析处理,运用空间谱估计理论,首先估计出信号源数与信号源角度信息。同时与载机加载目标信号源信息进行对比,分离出干扰源。最后将上述估计信息应用于波束控制理论中,实现天线阵列的主波束控制和方向图零点控制,使天线阵列真正实现智能接收的能力。

**关键词:**智能天线系统;信号源数估计;来波方向估计;波束控制

中图分类号:TN850-34

文献标识码:A

文章编号:1004-373X(2012)03-0011-04

## Identification of interference source by smart antenna system in missile

WU Wen-jing

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** Based on analyzing and processing receiving signal by smart antenna system in missile, the number and angle information of signal source were estimated by using spatial spectrum principle. Compared with the target information which was loaded on missile by plane, the source of interference was divided. The main-beam control and pattern null control can be realized by applying the estimation information to beam control theory. It was obvious that antenna array has function of intelligent receiving.

**Keywords:** smart antenna system; estimation of signal source number; DOA estimation; beam control

## 0 引言

对主动式雷达导引系统而言,导弹脱离载机系统进入自主寻的末制导状态时,截获并跟踪载机系统选定的目标,容易受到空间电磁环境的干扰,尤其当空间中投入大功率、高机动的多个干扰信号时,会导致雷达导引系统错误地跟踪目标,错误地打击目标。

智能天线是能够根据信号环境情况自动形成“最佳”阵列波束的天线。实现的基本方法是在常规天线阵的各个阵元上加上控制权重,并通过调整权重实现噪声抵消、在干扰入射方向上产生零陷以及对有用信号的定位、分离接收和主波束跟踪有用信号等功能。从而使天线阵具有智能接收的能力,有效地解决了传统天线的方向图难以进行变化控制的难题<sup>[1]</sup>。

## 1 信号源识别

在实际应用场合,载机系统给导弹装载的目标信号源信息是瞬态已知的,而干扰信号源信息往往是未知可变的<sup>[2]</sup>。因此智能天线系统需要先估计信号源的数目,然后再估计各信号源来波方向,通过与载机加载的目标信号源信息进行对比才能够区分出目标信号源与干扰信号源。

### 1.1 信号源数估计方法与仿真

本文通过对天线阵列接收的阵列信号进行处理来

估计信号源个数,即通过天线阵列接收数据的相位差来确定一个或几个待估计的参数<sup>[3]</sup>。以下简述各种信号源数的估计方法。

#### 1.1.1 信息论方法

信息论方法有统一的表达形式:

$$J(k) = L(k) + p(k) \quad (1)$$

式中:  $L(k)$  是对数似然函数;  $p(k)$  是罚函数,通过对  $L(k)$  和  $p(k)$  的不同选择就可以得到不同的准则。例如有效检测 EDC 信息论准则:

$$EDC(n) = L(M-n) \ln \Lambda(n) + n(2M-n)C(L) \quad (2)$$

式中:  $n$  为待估计的信号源数(自由度);  $L$  为采样数;  $\Lambda(n)$  为似然函数,且:

$$\Lambda(n) = \frac{1}{M-n} \sum_{i=n+1}^M \lambda_i / \left( \prod_{i=n+1}^M \lambda_i \right)^{\frac{1}{M-n}} \quad (3)$$

式中  $C(L)$  需满足如下条件:

$$\begin{aligned} \lim_{L \rightarrow \infty} (C(L)/L) &= 0 \\ \lim_{L \rightarrow \infty} (C(L)/\ln \ln L) &= \infty \end{aligned} \quad (4)$$

准则 EDC 具有估计一致性。选择  $C(L)$  分别为 1,  $\ln(L)/2$ ,  $\ln \ln L/2$  时,就可以得到 AIC, MDL, HQ 准则。

#### 1.1.2 平滑秩序法

用信息论准则估计信号源数时,只能对独立信号源的总数作出估计,当信号源相干时,则无法正确估计信号源数,而且对信号源的类别和结构不能做出判断,此

时需用源相关结构检测的方法,即平滑秩序列法。平滑秩算法是基于解相干基础的信号源数估计问题,与信息论方法相比有如下优点:当信噪比较大,快拍数较大时,性能较信息论法好;当入射信号包括几个相干源群时,该算法不但可以估计出信号源数,而且还可以估计出信号源结构。

### 1.1.3 盖氏圆方法

上述两种方法都需要得到矩阵或修正后矩阵的特征值,然后再利用特征值来估计信号源数。而盖氏圆方法则不需要具体知道特征值数值,仅利用 Gershgorin 圆盘定理,即可估计出各特征值的位置,进而估计出信号源数。在利用盖氏圆盘估计信号源时,通常需要对数据协方差矩阵进行酉变换,目的是使信号和噪声的圆盘分开,从而分辨出信号源的个数。

### 1.1.4 正则相关技术

当噪声中有色成分加大时,上述三种算法对入射信号源数进行估计的性能都会下降很快。此时需要采用针对色噪声情况下的信号源数估计方法,即正则相关技术(CCT)。

**实验一:**接收天线为 8 元均匀线阵,阵元间距为半波长(Ka 波段),接收数据快拍数为 500,设目标信号源的入射方向为  $10^\circ$ (天线阵中心点的法线方向为  $0^\circ$ ),干扰信号源的入射方向分别为  $-30^\circ$  和  $30^\circ$ ,独立试验 20 次,设定虚警概率为 0.005。仅针对白噪声,仿真结果如图 1 所示。

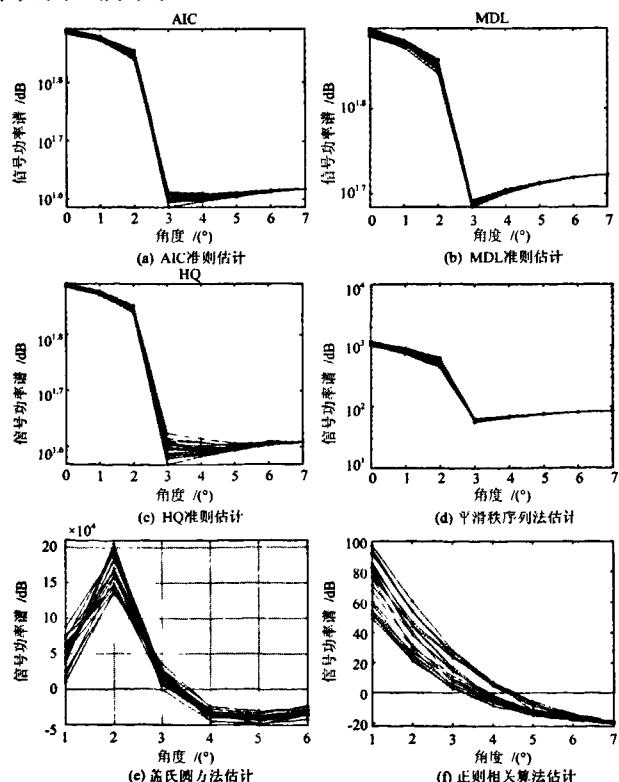


图 1 信号源数估计仿真(信噪比为  $-20$  dB)

由图可见,信息论方法(图 1(a)~图 1(c))和平滑秩序列法(图 1(d))估计信号源数时,取最小值对应的横坐标为估计信号源的个数,其中信息论方法仅对独立信号源判断性能较好,而平滑秩序列法不但可以判断信号源个数,还能确定信号源性质;盖氏圆方法(图 1(e))和正则相关算法(图 1(f))是取第一个负数对应的横坐标减 1 为估计信号源数,其中盖氏圆方法稳定性欠佳,而以上仿真是针对白噪声进行的,并没有显示出正则相关技术算法对色噪声的优势。因此,信号源数估计方法要根据实际情况而选取。

### 1.2 信号源来波方向(DOA)估计与仿真

本文采用经典的 MUSIC 谱估计算法对各信号源来波方向进行估计。MUSIC 谱估计算法的基本思想是将阵列输出数据的协方差矩阵进行特征分解,从而得到与信号分量相对应的信号子空间和与信号分量相正交的噪声子空间,然后利用这两个子空间的正交性来估计信号的参数,找出信号入射方向的角度<sup>[4]</sup>。

**实验二:**实验条件同实验一。根据信号参数范围,由谱估计理论找出极大值点对应的角度就是信号入射方向,仿真结果如图 2 所示。

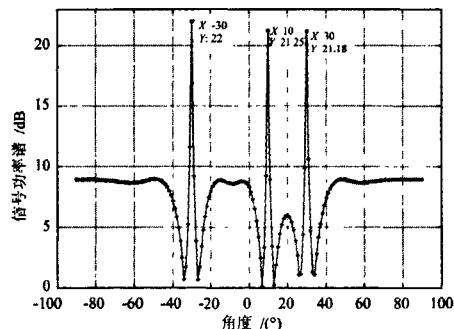


图 2 MUSIC 算法 DOA 估计(信噪比为  $-20$  dB)

通过 MUSIC 算法对各信号源的来波方向进行估计,得到各信号源的角度信息。通过与载机加载的目标信号源的角度信息进行对比,可以将偏离目标信号源角度方向上的信号源判断为干扰信号源,从而达到分辨目标信号源和干扰信号源的目的<sup>[5]</sup>。

### 2 波束控制

智能天线能够根据信号输出最大准则实时准确地形成指向期望方向的主波束,同时保证不破坏主波束的指向,兼顾信号输出最大、干扰输出最小准则,实时调整天线方向图零点对准干扰的来波方向(或者不需要方向)。本文将信号源识别理论中的信号源数估计和信号源来波方向估计相结合,能实现目标信号源和干扰信号源的有效识别与分离,结合波束控制理论调整天线阵元的幅相分布,使天线阵列形成具有如下功能的波束:主波束对准

目标信号源,同时在干扰信号源所在方向上产生零陷<sup>[6]</sup>。

## 2.1 主波束控制

在相似辐射元条件下,天线阵总的方向函数为辐射元方向函数与阵方向函数的乘积,称作方向性乘积定理。特别是一般天线阵的辐射元方向函数是弱变化的,所以天线总的方向函数常用阵方向函数近似<sup>[7]</sup>。

$$f_{\text{阵}}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^M w_i e^{j k \rho_i \cdot e_r(\theta, \varphi)} = \mathbf{W}^T \mathbf{b} = \mathbf{b}^T \mathbf{W} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= [w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_M]^T, \\ \mathbf{b} &= [e^{j k \rho_1 \cdot e_r(\theta, \varphi)} \quad e^{j k \rho_2 \cdot e_r(\theta, \varphi)} \quad \cdots \quad e^{j k \rho_M \cdot e_r(\theta, \varphi)}]^T \end{aligned} \quad (6)$$

$\mathbf{W}$  称作加权向量; $\mathbf{b}$  称作程差相位向量; $M$  为阵元个数,其各阵元坐标用向径  $\rho_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 表示; $e_r(\theta, \varphi)$  表示阵元接收的来波方向。因此,如果期望方向或有用信号的来波方向为  $(\theta_d, \varphi_d)$ , 则使该方向最大或同相叠加的加权向量为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = p \mathbf{b}_d^* = p \mathbf{b}^*(\theta_d, \varphi_d) \quad (7)$$

式中: $p$  为任意常数,由于它对方向性相对关系无影响,不妨令  $p = 1$ , 于是:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{b}_d^* \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{b}_d = [e^{j k \rho_1 \cdot e_r(\theta_d, \varphi_d)} \quad e^{j k \rho_2 \cdot e_r(\theta_d, \varphi_d)} \quad \cdots \quad e^{j k \rho_M \cdot e_r(\theta_d, \varphi_d)}] \quad (9)$$

$\mathbf{b}_d$  为期望方向程差相位向量,或称作有用信号方向程差相位向量; $\mathbf{W}_{\text{opt}}$  称作主波束优化加权向量。当满足式(8)时,有:

$$\begin{aligned} f(\theta_d, \varphi_d) &= \mathbf{W}_{\text{opt}}^T \mathbf{b}_d = M \\ f(\theta, \varphi) &= \mathbf{W}_{\text{opt}}^T \mathbf{b} = \sum_{i=1}^M e^{j k \rho_i \cdot [e_r(\theta, \varphi) - e_r(\theta_d, \varphi_d)]} \end{aligned} \quad (10)$$

可见,在  $(\theta_d, \varphi_d)$  方向上各阵元信号加权后同相叠加,实现了控制主波束指向  $(\theta_d, \varphi_d)$  的目的。

## 2.2 方向图零点控制

引入干扰矩阵  $\mathbf{J}$ ,根据 S. P. Applebaum 提出信号干扰噪声比最大准则,寻求最优加权向量<sup>[8]</sup>。最大信干噪比准则下加权向量的优点:不需要已知各个干扰向量;干扰噪声协方差  $R_H$  可以在有用信号间断时由阵元响应采集并通过计算机运算求得;防止正交化加权向量可能导致的信号噪声比下降的缺陷<sup>[9]</sup>。定义信号干扰噪声功率比 SINR 为:

$$\text{SINR} = \frac{P_s}{P_i + P_n} = \frac{P_s}{P_i} \quad (11)$$

因为干扰与噪声独立无关,有信号功率  $P_s = \mathbf{w}^H R_s \mathbf{w}$ ;干扰噪声功率  $P_i = \mathbf{w}^H R_H \mathbf{w}$ ;信号协方差  $R_s = \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^T$ ;干扰噪声协方差  $R_H = \mathbf{I}^* \mathbf{I}^T = R_m + R_H$ ;噪声信号协方差  $R_m = \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}^T$ ;干扰信号协方差  $R_H = \mathbf{J}^* \mathbf{J}^T$ ;得到:

$$\text{SINR} = \mathbf{w}^H R_s \mathbf{w} / \mathbf{w}^H R_H \mathbf{w} \quad (12)$$

通过推导得到:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = R_H^{-1} \mathbf{b}_d^* \quad (13)$$

即最大信号干扰噪声比准则的加权向量。没有外来干扰(寂静情况)的方向函数:

$$f_a(\theta, \varphi) = (R_H^{-1} \mathbf{b}_d^*)^T \mathbf{b} \quad (14)$$

当有外来干扰时的方向函数:

$$f_s(\theta, \varphi) = (R_H^{-1} \mathbf{b}_d^*)^T \mathbf{b} = \mathbf{b}^T (R_H^{-1} \mathbf{b}_d^*) \quad (15)$$

可见,阵列方向函数被分解成寂静方向函数(无干扰时)和几个对消方向函数(有干扰时),它们都具有相同的函数形式,合成方向函数为寂静方向函数和诸对消方向函数之差,合成方向图在有用信号方向上近乎寂静方向图最大值,在诸干扰方向上形成相应的方向图凹口(近乎 0)<sup>[10]</sup>。

## 2.3 波束控制仿真

采用波束控制理论中主波束控制和方向图零点控制理论,应用到以下实验中观察实施效果。

实验三:试验条件同实验一。期望主波束出现在  $10^\circ$ ,在  $-30^\circ$  和  $30^\circ$  两个干扰方向进行零点抑制,仿真结果如图 3 所示。

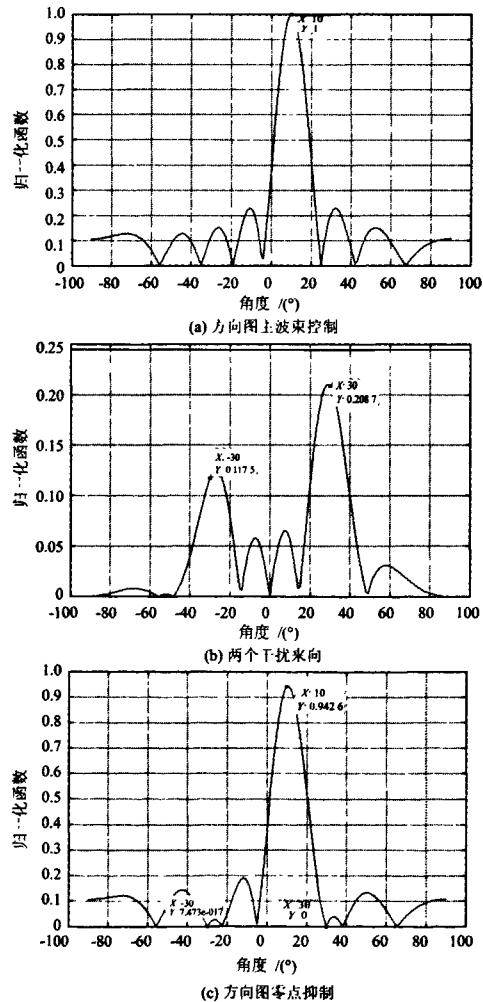


图 3 波束控制仿真

由图3可见,由主波束控制理论得到主波束指向期待方向(图3(a)),由方向图零点控制理论得到干扰信号来波方向(图3(b)),将上述两个图形进行加权叠加,得到最终所期望的方向图(图3(c))。可见图3(c)保留了图3(a)中主波束的指向,同时在图3(b)所示的两个干扰方向上实现零陷,很好地得到了试验所期望的结果。通过以上实验验证了波控理论的实用性。

### 3 结 论

本文针对弹载智能天线系统对阵列接收信号的分析判断,首先估计出信号源的个数和干扰源的角度信息,然后与载机加载目标信号源角度信息进行对比,分离出干扰源,将上述估计信息应用于波束控制理论中,实现天线系统的主波束控制和方向图零点控制,使天线系统真正实现智能接收的能力。本文将信号源识别理论中的信号源数估计和信号源来波方向估计相结合,能实现目标信号源和干扰信号源的有效识别与分离,结合波束控制理论调整天线阵元的幅相分布,使天线阵列形成具有如下功能的波束:主波束对准目标信号源,同时在干扰信号源所在方向上产生零陷。

**作者简介:**武文婧 女,1981年出生,山西陵川人,硕士,工程师。主要从事微波通信以及微波电路方面的设计以及仿真工作。

(上接第10页)

及前景进行了分析,然后提出了一种改进的最优门限恒虚警检测算法。

该算法是基于改进型的模拟退火算法,能够有效地选取恒虚警门限,提高了恒虚警检测器的性能,具有一定的参考应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 窦林涛,程建庆,李素民.基于Matlab的雷达信号处理系统仿真[J].指挥控制与仿真,2006,28(2):78-82.
- [2] 邢孟道,王彤,李真芳.雷达信号处理基础[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [3] 吴顺君,梅晓春.雷达信号处理和数据处理技术[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [4] 刘立东.相干雷达恒虚警检测算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2005.
- [5] 刘盼芝,韩崇昭.分布式自动删除平均恒虚警率检测技术[J].自动化学报,2009,35(7):903-910.
- [6] 郝程鹏,李军,侯朝焕.加权平均模糊恒虚警检测方法研究

### 参 考 文 献

- [1] 彭卫东,左继章.智能天线射频前端频率合成器的设计与实现[J].电讯技术,2001,41(2):70-72.
- [2] 金荣洪.无线通信中的智能天线[M].北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [3] 邱天爽.通信中的自适应信号处理[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [4] 汪晋宽.空间自适应信号处理[M].沈阳:东北大学出版社,2003.
- [5] 潘士先.谱估计和自适应滤波[M].北京:北京航空航天大学出版社,1999.
- [6] 王永良.空间谱估计理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 吴顺君.近代谱估计方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,1994.
- [8] 刘德树.空间谱估计及其应用[M].合肥:中国科技大学出版社,1997.
- [9] 曹志刚,钱亚生.现代通信原理[M].北京:清华大学出版社,1992.
- [10] 陈国瑞.工程电磁场与电磁波[M].西安:西北工业大学出版社,1998.

[J].现代雷达,2009,31(9):44-46.

- [7] 李军,王雪松,王涛.基于分数阶矩估计的非参量CFAR检测[J].电子与信息学报,2011,33(3):642-645.
- [8] 张维.复杂杂波背景恒虚警检测技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [9] FARROUKI A, BARKAT M. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments[J]. IEEE. rc-R, 2005, 152(1): 43-51.
- [10] 吴旖.雷达信号恒虚警检测处理研究[D].南京:南京理工大学,2009.
- [11] 赵树杰.雷达信号处理技术[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [12] 刘峰,谢永亮,毛德广,等.基于慢门限与快门限的雷达回波恒虚警处理算法研究[J].火控雷达技术,2009(12):49-52.
- [13] 谢云.模拟退火算法综述[J].微计算机信息,1998,14(5):66-68.
- [14] 余湛,马浩统,杜少军.基于模拟退火算法的自适应近场光束整形[J].光学学报,2011,31(3):155-159.

**作者简介:**任新涛 男,陕西兴平人,在读硕士研究生。主要从事雷达信号处理方面的研究。

张宏伟 男,硕士生导师。主要从事武器装备故障检测和雷达信号处理等方面的研究。

## 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](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](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>