

# 平滑滤波在卫星导航抗干扰天线中的应用

陈雪峰<sup>1</sup>, 刘洋<sup>2</sup>

(1. 西安航空电子科技有限公司 陕西 西安 710075; 2. 西安爱生技术集团 陕西 西安 710075)

**摘要:** 为解决实际工程中卫星导航抗干扰天线鲁棒性不强的问题, 提出了利用正交多项式平滑滤波算法对抗干扰权值进行滤波修正, 以降低扰动对抗干扰天线的影响。文中建立了平滑滤波的数学模型, 确定了滤波函数的参数, 论述了抗干扰权系数正交多项式平滑滤波的过程, 并给出了试验效果。

**关键词:** 卫星导航; 抗干扰天线; 数据处理; 平滑滤波

中图分类号: TN973.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2014)01-0017-03

## Application of smoothing filtering in the satellite navigation anti-interference antenna

CHEN Xue-feng<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1 Xi'an Avionics Technology Co., Ltd, Xi'an 710075, China;

2 Xi'an ASN Technology Group Co, Ltd, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** In wavelet threshold de-noising method, the traditional hard thresholding function has poor continuity, the traditional soft threshold function is too smooth, this paper proposes a new threshold function based on energy compression thought. According to the simulation results of matlab, this improved method is better than the traditional ones.

**Key words:** wavelet de-noising; new threshold function; energy compression; Matlab

卫星导航抗干扰天线, 一般由阵列天线、方向图形成网络和自适应处理单元3部分组成。阵列天线接收到多路卫星信号后, 经过通道电路同时输入到方向图形成网络和自适应处理单元, 方向图形成网络对各路卫星信号加权并叠加, 作为抗干扰天线的输出, 自适应处理单元对阵列天线送来的信号进行抽样处理并进行自适应权计算后, 给方向图形成网络提供相应的加权量, 再反过来对各路卫星信号进行加权调整, 相当于使各阵元的增益或相位发生改变, 从而在天线阵的方向图中产生对着干扰源方向的零点, 将干扰信号抵消, 从而达到抗干扰的目的<sup>[1-2]</sup>。

在实际使用中发现抗干扰天线的抗干扰性能时好时坏, 抖动较大, 很不稳定, 鲁棒性不强。主要原因是一般都直接把上面自适应处理单元计算的权值更新给方向图形成网络, 而工程中自适应处理单元输出结果不是很平滑, 有时还会出现跳变, 所以就会影响抗干扰天线的性能, 为了克服此问题, 本论文提出自适应处理单元在计算出权值后不直接更新, 而是按多项式平滑滤波算法对滤波器权值进行修正, 然后更新自适应处理单元, 保证抗干扰天线性能的稳定性;

## 1 平滑滤波的数学模型

设实测的遥测数据即滤波器的输入数据  $X_i = P(i) + \varepsilon(i)$   $i =$

1, 2, ..., N, 式中  $p(i)$  为  $p$  阶多项式, 可用一组时间函数的多项式族  $\{p_j(i), j=0, 1, \dots, p\}$  的线性组合来表示,  $p(i) = \sum_{j=0}^p \beta_j p_j(i)$ ;  $\beta_j$  多项式族的系数;  $\varepsilon(i)$  为平稳零均值的相互独立且等方差的白噪声。

用矩阵形式表示为:  $X = P\beta + \varepsilon$

$$P = \begin{bmatrix} p_0(1) & \dots & p_p(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_0(N) & \dots & p_p(N) \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

则  $\hat{\beta} = (P^T P)^{-1} P^T X$

根据最小二乘法求  $\beta_j$  的最小二乘估计  $\hat{\beta}_j$ , 即通过求

$$Q = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=0}^p \beta_j p_j(i) - x_i \right)^2 = \min, \text{ 由 } \frac{\partial Q}{\partial \beta_j} = 0 \text{ 给出 } \hat{\beta}_j = \sum_{i=1}^N$$

$$\frac{x_i p_j(i)}{S(N, j)}, j=0, 1, 2, \dots, p$$

其中  $S(N, j) = \sum_{i=1}^N p_j^2(i)$ ,

得到拟合曲线  $\hat{x}(i) = \sum_{j=0}^p \hat{\beta}_j p_j(i)$  <sup>[3-4]</sup>

设  $x(n)$  中的一组数据为  $X(i), i=-M, \dots, 0, \dots, M$ , 构造计算  $X(i)$  在  $N+a$  处的  $L$  阶 ( $L \geq 0$  的整数) 微商的最优线性无偏

收稿日期: 2013-05-25

稿件编号: 201305250

基金项目: 科技部科技型中小企业技术创新基金 (0106225625269000018608675)

作者简介: 陈雪峰 (1977—), 男, 湖北松滋人, 硕士, 工程师。研究方向: 卫星导航及抗干扰。

估计值<sup>[5]</sup>,得:

$$\hat{x}_{N+a}^{(L)} = \sum_{j=L}^L \hat{\beta}_j p_j^{(L)}(N+a) = \sum_{j=L}^L \frac{x_j p_j(i) p_j^{(L)}(N+a)}{S(N,j)}$$

$$\text{令 } W_{N-i} = \sum_{j=L}^L \frac{p_j(i) p_j^{(L)}(N+a)}{S(N,j)}$$

$$\text{则 } \hat{x}_{N+a}^{(L)} = \sum_{i=1}^N W_{N-i} x_i \quad i=1,2,\dots,N$$

权系数  $W_{N-1}$  的无偏最优估计,与  $P, L$  采样点的个数  $N$  以及  $a$  有关,当  $P, L, N$  和  $a$  给定的情况下,  $W_{N-1}$  是完全确定的量,可看作一个“窗”,常常取固定数量的一段观测值设计“窗”,然后采用移动“窗”的方法来对整段数据进行处理。直观上来看,即是对选取的  $N$  个观测数据进行了  $P$  阶多项式拟合,获得  $N$  个权系数  $W_{N-1}$ ,把它们存贮起来,下一次对一个“新”的观测数据和相应的观测序列相乘相加,即可获得下一时刻的估值,逐步后移,直到全部拟合成为止,这种算法简单易行,同时也提高了计算速度。据此,这种算法称作“移窗法”,“移动”的拟合值为:

$$\hat{x}_{N+s}^{(L)}(N+a+s) = \sum_{i=1}^N W_{N-i} x_{i+s}$$

式中  $s$  为移动步长,为整数,当  $s=1$  时,为逐点移动法。

## 2 抗干扰权系数的平滑应用

### 2.1 平滑滤波原始数据的录取

这里主要完成对自适应抗干扰权值系数原始数据的积累,在抗干扰天线中,自适应处理单元按线性约束最小均方误差(LCMV)准则做自适应权系数的计算,求解空域的自适应权值<sup>[6]</sup>:

$$w_{st} = R_{st}^{-1} a_{st} / a_{st}^H R_{st}^{-1} a_{st}$$

$$\text{其中 } a_{st} = a_t \otimes a_s, \quad a_s = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T, \quad a_t = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$R_{st}$  为接收到的数据协方差阵,根据各阵列天线接收到的数据估计协方差阵  $R_{st}$ ;

$$\hat{R} = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M x(t) x^H(t)$$

式中,  $M$  时间的快拍数,  $x(t)$  为  $t$  时刻的数据向量,上标  $H$  表示共轭操作;

可见在原始权系统的录取中,一次自适应抗干扰权系数计算包括:协方差矩阵计算,耗时约 0.64 us,方差矩阵的求逆计算,耗时约 2.27 ms,自适应权  $W_a$  计算,耗时约 1.45 ms,方向图形成网络计算,耗时约 1.2 ms,一次自适应抗干扰权系数计算时间为 5.56 Ms,考虑到实际情况,本论文中自适应权值计算间隔为 10 ms。

### 2.2 抗干扰权平滑滤波函数的确定

从本论文的第二节可知,在  $P, L, N$  和  $a$  确定后,抗干扰权平滑滤波函数就确定了。因为自适应权值数据在此只需要对其做位置平滑滤波,所以取  $L=0$  ( $L=1$  为速度的平滑滤波; $L=2$  为加速度的平滑滤波)。在实时处理中,为了对下一个时刻进行预测,与实测值比较,取  $a>0$ ,而在事后处理中,常

采用中心平滑技术  $a=-(N-1)/2$ 。为了保证自适应权值的更新时间不超过 0.1 s,本论文中自适应权值采样点的个数  $N=10$ 。由于数据的多样性,综合考虑偶然误差和方法误差,在工程中拟合多项式一般选 4~6 阶,在考虑到本应用的实时性,拟合多项式定为 4 阶,即  $p=4$ 。

当确定了窗的大小  $N, p, L$  及  $a$  后,滤波系数就确定了,但滤波系数会带来对实测数据的放大或缩小,因此需对权系数做归一化处理。而后采用移窗技术,对整段遥测数据进行平滑滤波处理。

### 2.3 抗干扰权系数的平滑

论文前面已经对北斗天线前端接收的数据按自适应滤波准则计算出了抗干扰权系数,并确定了抗干扰权平滑滤波函数,这里将对这些原始的抗干扰权系数按照平滑函数进行平滑,抗干扰权系数平滑滤波可按处理可按以下算法流程进行,如图 1 所示。

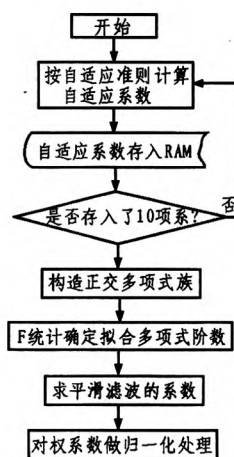


图1 抗干扰权系数的平滑流程

Fig.1 The smooth flow of anti-jamming coefficient

## 3 应用效果

我们对上述平滑算法在抗干扰天线样机上进行了效果测试,测试的场景图如图 2 所示,测试在暗室内进行,卫星信号通由卫星信号源通过天线向抗干扰天线辐射,同时通过 3

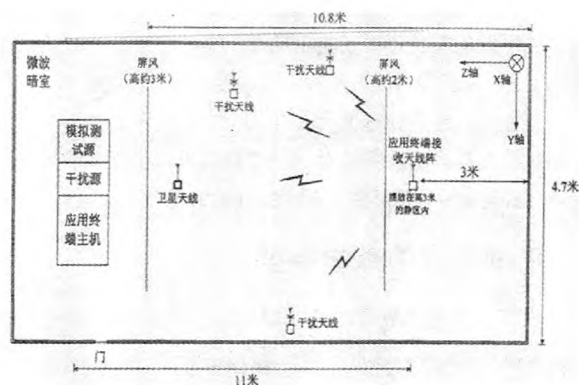


图2 测试场景

Fig.2 The test scenario

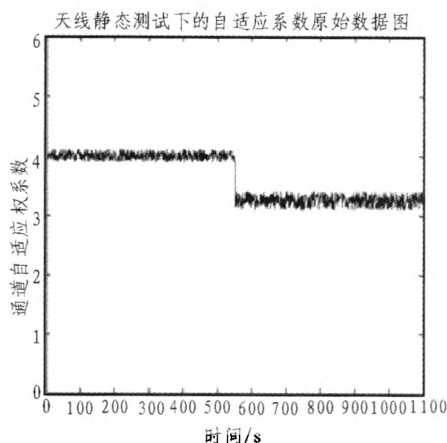


图3 静态没有平滑的抗干扰权系数  
Fig.3 Static not smooth anti-jamming coefficient

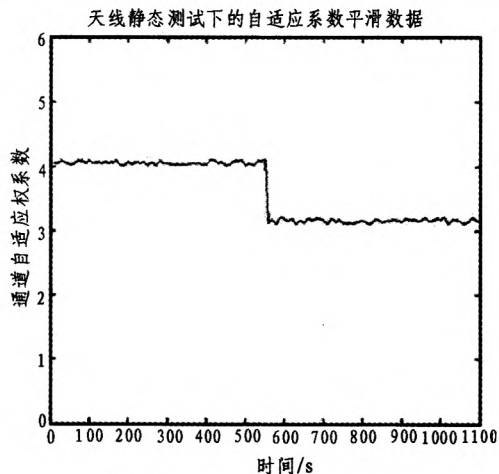


图4 静态加平滑后的抗干扰权系数  
Fig.4 Static smooth anti-jamming coefficient

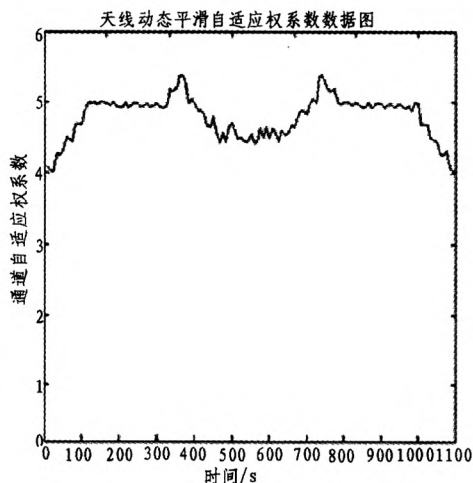


图5 动态没有平滑的抗干扰权系数  
Fig.5 dynamic not smooth anti-jamming coefficient

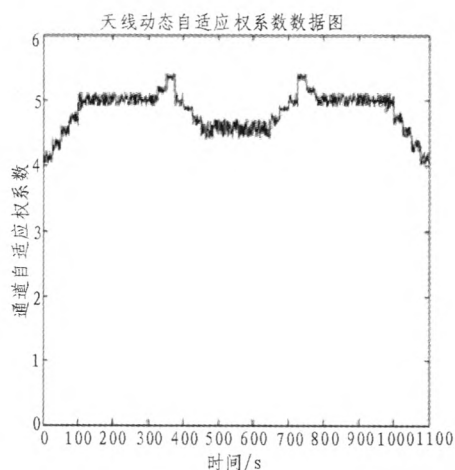


图6 动态加平滑后的抗干扰权系数  
Fig.6 dynamic smooth anti-jamming coefficient

个辐射线向抗干扰天线辐射3个干扰,此时抗干扰天线接收信号并进行抗干扰处理后,输出到卫星接收机进行卫星信号的解算。为了分析平滑算法在北斗抗干扰天线中的应用效果,我们在同一个场景下,分别记录了算法应用前后的数据,测试分静态和动态,具体情况如下。

#### 1) 静态测试

在卫星导航抗干扰天线和干扰源都静止不动的情况下进行抗干扰测试,在测试中把自适应抗干扰权系数从抗干扰天线中导出,使用平滑滤波前后数据分别如图3和图4所示,很明显平滑效果很好,并且对干扰的突变,滤波算法也能很好还原变化中的权值;另外从卫星接收机上观察导航解算在加入平滑滤波后变的十分稳定。

#### 2) 动态测试

在卫星导航抗干扰天线在转台上以每秒5度的速度转动的情况下进行动态抗干扰性能测试,在测试中把自适应抗干扰权系数从抗干扰天线中导出,使用平滑滤波前后数据分别如图5和图6所示,平滑效果也很好,整个滤波算法也能很好

还原权值变化,没有失真;另外从卫星接收机上观察导航解算在加入平滑滤波后比没加前抗干扰性能稳定了很多。

## 4 结论

试验证明本论文所确定的抗干扰权平滑滤波函数及滤波处理过程是种有效,对抗干扰权值有良好的平滑效果,本论文成功利用正交多项式平滑滤波算法解决了,北斗抗干扰天线在实际使用中抗干扰性能时好时坏,鲁棒性不强的问题。

#### 参考文献:

- [1] 费华连. 导航战中的GPS干扰与抗干扰技术[J]. 航空电子技术 2001, 32(1): 18-22.  
FEI Hua-lian .GPS interference and anti-interference technology in Navigation War[J].Avionics Technology,2001, 32(1): 18-22.
- [2] 仇智权, 朱畅. 功率倒置法在北斗抗干扰天线中的应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(4):42-46.

(下转第23页)

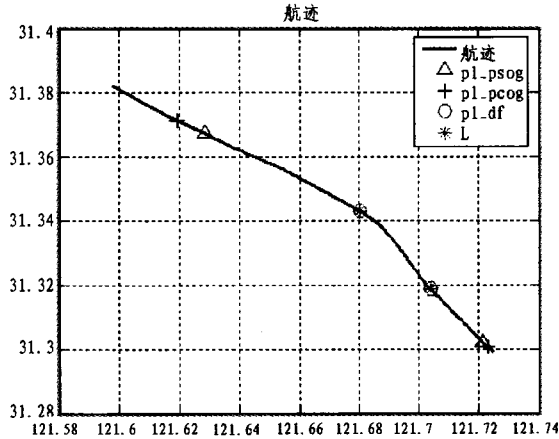


图6 预测结果的图比较

Fig.6 Map comparison of the prediction results

的问题水域,即图中两个加号之间的航迹区间,pl\_df是航速(航向)权重法预测的问题水域,即图中两个圆圈之间的航迹区间,L是实际的问题水域,即图中两个星号之间的航迹区间。由表2和图6知,航速(航向)变化率法预测结果的完整度很高,但是其冗余度也很高;航速(航向)权重法预测结果极大的降低了预测冗余度,同时又具有很高的完整度,所以预测结果非常理想。

### 3 结束语

文中对AIS作了简单的介绍,文章第二部分在基于解码出的AIS数据的基础上,分析了基于AIS的现有航道通航环境评估方法航速(航向)变化率法的缺陷,对其进行优化,提出了评估效果更好的航速(航向)权重法。同时文中提出了评估结果的量化指标,使得实验结果具有更高的客观性和科学性。本文提出的航速(航向)权重法的实验结果虽然较航向(航速)变化率法的实验结果有更高的精度,但是理论依据不充分,有待进一步完善。量化指标中的实际问题水域

的长度L的提出仅是从船舶的航向变化来反应船舶航行状况,此研究有待进一步深入。

#### 参考文献:

- [1] 刘天喜,黄秋赢.对影响沿海海域主航道通航环境因素的评估[J].航海工程,2011(4):23-25.  
LIU Tian-xi, HUANG Qiu-ying. Research on comprehensive assessment of navigational environment of the fairway in sea areas[J]. Marine Engineering, 2011(4):23-25.
- [2] 吴国栋,姚堃烟台港航道通航环境模糊综合评估[J].中国水运,2011,11(1):8-9.  
WU Guo-dong, YAO Kun. Navigation environment fuzzy assessment in Yantai port[J]. China Water Transport, 2011, 11(1):8-9.
- [3] 刘永强.深圳港西部航道水域引航安全评估[J].中国水运,2011,11(6):13-15.  
LIU Yong-qiang. Safety assessment in west channel of Shenzhen port[J]. China Water Transport, 2011, 11(6):13-15.
- [4] 潘家财,邵哲平,姜青山.数据挖掘在海上交通特征分析中的应用研究[J].中国航海,2010,33(2):60-62.  
PAN Jia-cai, SHAO Zhe-ping, JIANG Qing-shan. Application of data mining technology in analysis of marine traffic characteristics[J]. Navigation of China, 2010, 33(2):60-62.
- [5] 黄丽卿,胡穗才,邵哲平.AIS输出数据包的解包技术研究[J].集美大学学报,2005,10(1):37-41.  
HUANG Li-qing, HU Wen-cai, SHAO Zhe-ping. Study on techniques of decoding output data packages from AIS[J]. Journal of Jimei University, 2005, 10(1):37-41.
- [6] 莫红飞,张勇.AIS数据解码分析[J].计算机光盘软件及应用,2012(6):60-61.  
MO Hong-fei, ZHANG Yong. Decoding and analysis of AIS data[J]. Computer CD Software and Application, 2012(6):60-61.

(上接第19页)

ZHANG Zhi-quan, ZHU Chang. Application of power inversion algorithm in Compass anti-jamming antenna system[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(4):42-46.

- [3] 胡峰,孙国基.基于多项式拟合的容错平滑与容错微分平滑[J].工程数学学报,2000(17):28-31.

HU Feng, SUN Guo-ji. Fault-tolerant smoothing and tolerant differential smoothing based on polynomial fitting[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2000(17):28-31.

- [4] Thornley DJ. Anisotropic multidimensional Savitzky Golay kernels for smoothing, differentiation and reconstruction[J].

Departmental Technical Reports, 2006(7):45-49

- [5] WIKIPEDIA. SavitzkyGolay smoothing filter[EB/OL](2010-02-15). [http://en.wikipedia.org/wiki/savitzky-Golay\\_smoothing\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/savitzky-Golay_smoothing_filter).

- [6] 张琳,初海彬.卫星导航用户机空时滤波抗干扰技术[J].

北京航空航天大学学报,2007,33(1):76-80.

ZHANG Lin, CHU Hai-Bin. Space-time interference suppression technology of satellite navigation receiver[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(1):76-80.

## 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>