

文章编号:1002-8692(2011)11-0080-04

# 瑞利信道下多天线能量检测性能研究

曹慧

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

**[摘要]** 研究了认知无线电中能量检测的实现,并针对能量检测性能相对较差的缺点,提出采用天线分集提高能量检测的性能。通过数值分析以及瑞利信道下分集能量检测的仿真,对几种方案在瑞利信道下的性能进行了比较,结果表明几种天线分集方案对能量检测性能都有所改善,其中平方率合并方案性能最优。

**[关键词]** 认知无线电;频谱感知;能量检测

**[中图分类号]** TN92

**[文献标识码]** A

## Study of Multiple Antenna-aided Energy Detection over Rayleigh Fading Channels

CAO Hui

(College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guangxi Guilin 541004, China)

**[Abstract]** In this paper, the application of energy detection is studied, and a multiple antenna-aided energy detection is introduced to improve the comparatively poor performance of energy detection. The detection capability of several diversity schemes in rayleigh fading channels are compared through numerical analysis and simulation. Results show that antenna diversity can improve the capability of energy detection, and the SLC scheme is the best.

**[Key words]** cognitive radio; spectrum sensing; energy detection

## 0 引言

根据美国通信委员会(FCC)光谱政策工作小组的测量显示<sup>[1]</sup>,总是存在一定的时间和地理范围授权频谱的效率低。认知无线电<sup>[2]</sup>的提出为提高频谱效率提供了新的方法和途径。根据FCC的定义<sup>[3]</sup>,认知无线电是无线终端利用与周围无线电磁环境进行交互所获取的无线环境信息,调整传输参数(如载波频率、调制方式等),实现无线传输的能力。其最大的特点在于智能性,自适应的感知“频谱空洞”,并在不影响授权用户的情况下,提高频谱利用率。

在特定的频段检测第一用户的有无是认知无线电需要解决的首要问题。D. Cabric<sup>[4]</sup>介绍了几种常用的基于发射机的频谱感知方法。其中能量检测不需要了解第一用户的任何先验知识,以信号能量作为唯一的检测参数,相对于其他算法实现要简单,但是当信道存在衰落、阴影和噪声不确定性等影响时能量检测的性能较差<sup>[4-6]</sup>。D. Cabric<sup>[4]</sup>指出当信道存在频率选择性衰落时,针对不同的频率触点很难进行门限设置。A. Tkachenko<sup>[5]</sup>通过测量结果发现,能量检测存在信噪比阈值,并且当采样点数由256增加到1 024时,能量检测的门限阈值改善了6 dB,但这是以3倍的观测时间为代价的。F. F. Digham<sup>[6]</sup>分析了衰落信道下能量检测的性能,发现只要信道存在衰落,

其能量检测的性能相对于高斯信道都有一定的下降。综上,虽然能量检测有算法简单、不需要先验知识等优点,但其缺点也十分的明显。笔者针对能量检测的不足分析了多天线能量检测在瑞利信道下的实现,推导了部分分集方案能量检测概率和虚警概率的公式,并对结果进行了仿真验证。通过多天线分集接收,在保证算法复杂度和检测时间的前提下,提高了能量检测的性能。

## 1 能量检测模型

传统的能量检测算法<sup>[4]</sup>如图1所示。先将信号通过一个带通滤波器滤除带外噪声和邻近信号,然后经过模/数转换求出信号功率得到检测统计量Y,将其与预设门限值进行比较。当Y大于门限值时,判定该频段存在第一用户,感知用户不能使用该频段;否则,判定该频段上仅有噪声,感知用户可以使用该频段。

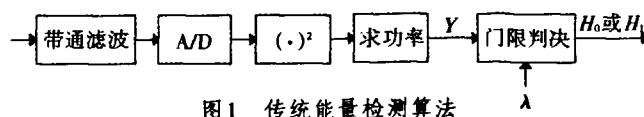


图1 传统能量检测算法

判决统计量即为下面两种假设

$$y(t) = \begin{cases} n(t) & , H_0 \\ h \cdot s(t) + n(t) & , H_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:n(t)是信道的加性高斯白噪声;s(t)是第一用户信号;h是第一用户到感知用户的信道幅度增益系数;H<sub>0</sub>表

基金项目:国家自然科学基金项目(60962001);广西自然科学基金项目(0731025);广西自然科学基金项目(0991018Z)

示在特定频段不存在第一用户;  $H_0$  则表示在特定频段存在第一用户。经过滤波处理后的判决统计量  $Y$  服从如下分布<sup>[7]</sup>

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2TW}^2 & , H_0 \\ \chi_{2TW}^2(2\gamma) & , H_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\chi_{2TW}^2$  表示自由度为  $2TW$  的中心卡方分布;  $\chi_{2TW}^2(2\gamma)$  表示自由度为  $2TW$ 、非中心参数为  $2\gamma$  的非中心卡方分布;  $\gamma$  是信噪比;  $TW$  表示观测时间与感兴趣频带带宽的乘积。

当为 AWGN 信道时, 能量检测下的虚警概率和检测概率<sup>[7]</sup>的表达式分别为

$$\begin{cases} P_f = p\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \\ P_d = p\{Y > \lambda | H_1\} = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $u = TW$ ;  $\Gamma(\cdot)$  表示不完整的伽马函数;  $Q(\cdot)$  为一般的 Marcum Q 函数。

当信道为衰落信道<sup>[6,8]</sup>时, 信道幅度增益  $h$  随着信道衰落变化, 信噪比的概率密度函数为  $f_\gamma(x)$  时, 平均检测概率为

$$\bar{P}_d = \int_x Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) f_\gamma(x) dx \quad (4)$$

式中: Nakagami 信道下信噪比  $\gamma$  的概率密度函数为

$$f(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \gamma^{m-1} \exp(-\frac{m}{\bar{\gamma}}\gamma), \quad \gamma \geq 0 \quad (5)$$

式中:  $m$  为 Nakagami 参数;  $\bar{\gamma}$  是平均信噪比。则联合式(4)和式(5)可以得到 Nakagami 信道下平均检测概率<sup>[9]</sup>

$$\bar{P}_{d,Nak} = \alpha \left[ G_1 + \beta \sum_{n=1}^{u-1} \frac{(\lambda/2)^n}{2(n)!} F_1(m; n+1; \frac{\lambda}{2} \frac{\bar{\gamma}}{m+\bar{\gamma}}) \right] \quad (6)$$

式中:  $\alpha = \frac{1}{\Gamma(m) 2^{m-1}} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m$ ;  $G_1 = \int_0^\infty x^{2m-1} \exp(-\frac{mx^2}{2\bar{\gamma}}) x Q(x, \sqrt{\lambda}) dx$ ;  $F_1(\cdot)$  为合流超几何公式。当  $m=1$  时, 信号包络服从瑞利分布, 所得到的检测概率为瑞利信道下的平均检测概率。

## 2 多天线能量检测

这里分析几种多天线能量检测方法的性能<sup>[10]</sup>。设天线分集中天线间隔等于或大于半个波长, 实现不同天线上接收的信号包络基本非相关。总框图如图 2 所示。

图 2 中,  $L$  为天线数目,  $G_i$  为天线增益。对各天线信

号进行的处理方法如下:

1) 平方律合并(Square Law Combining, SLC)<sup>[10]</sup>  
如同等增益合并, 将每根天线上得到的检测统计量(经过平方、积分的)  $\{y_i\}_{i=1}^L$  以相等的权重合并成新的检测统计量  $y_{SLC} = \sum_{i=1}^L y_i$ , 再进行判决。F. F. Digham<sup>[8]</sup>给出了此时的虚警概率和检测概率

$$P_{f, SLC} = \frac{\Gamma(Lu, \lambda/2)}{\Gamma(Lu)} \quad (7)$$

$$P_{d, SLC} = Q_{Lu}(\sqrt{2\gamma_L}, \sqrt{\lambda}) \quad (8)$$

式中:  $\sum_{i=1}^L \gamma_i = \gamma_L$ 。由式(4)可以推导出在各种信道下平方律合并的平均检测概率。

2) 平方律选择分集(Square Law Selection, SLS)<sup>[10]</sup>

在平方律选择分集方案中, 首先, 将每根天线接收的信号进行平方、积分, 求得信号的平均功率; 然后, 对比所有天线得到的统计量, 选择出最大的检测统计量, 作为第一用户有无的判决依据, 即  $y_{SLS} = \max(y_1, y_2, \dots, y_L)$ 。此时虚警概率和检测概率为

$$P_{f, SLS} = 1 - F_{y_{SLS}}(\lambda | H_0) = 1 - \left[ 1 - \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \right]^L \quad (9)$$

$$P_{d, SLS} = 1 - \prod_{i=1}^L [1 - Q_u(\sqrt{2\gamma_i}, \sqrt{\lambda})] \quad (10)$$

同样由式(4)可以得到各种信道下平方律选择分集的平均检测概率。

3) 独立联合判决(Multiple Antenna-aided Energy Detection, MA)<sup>[10]</sup>

在该方案中, 天线数要求为奇数, 在每根天线上都有自己的判决器。首先, 在每根天线(共  $L$  根)使用传统能量检测方法进行首次判决, 如果第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 检测到信号存在, 记为  $H_1^i$ , 反之, 被测频段处于空闲状态记为  $H_0^i$ , 统计检测到第一用户的天线数目记为  $K$ ,  $0 \leq K \leq N$ 。然后, 利用“多数判决原则”将首次判决结果的数目  $K$  与参考值  $G$  ( $1 \leq G \leq N$ , 通常设为  $(L+1)/2$ ) 进行比较, 如果  $K < G$ , 则确定被测频段为一个“频谱空洞”, 表示为  $H_0$ , 感知用户可以使用; 否则确定被测频段不是“频谱空洞”, 表示为  $H_1$ , 感知用户不能使用。假设各天线相互独立, 此时可以推得虚警概率和检测概率的表达式为

$$P_{f, MA} = \sum_{i=(L+1)/2}^L \left( \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \right)^i \left( 1 - \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \right)^{L-i} \quad (11)$$

$$P_{d, MA} = \sum_{i=(L+1)/2}^L P_d^i P_d^{L-i} \quad (12)$$

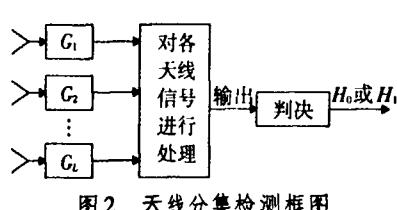


图 2 天线分集检测框图

### 3 仿真及性能分析

#### 3.1 数值分析

通过描绘相对于虚警概率 $P_f$ 的检测概率 $P_d$ 或漏检概率 $P_m$ 的值来衡量检测方案的性能,其中 $P_m=1-P_d$ 。取感兴趣的时间与带宽的乘积 $u=5$ ;平均信噪比 $\bar{\gamma}=20\text{ dB}$ ;并且设信噪比概率密度函数服从式(5),并设 $m=1$ ,即信道为瑞利信道,则可画出几种能量检测方法下漏检概率 $P_m$ 相对于虚警概率 $P_f$ 的关系(见图3~图5)。

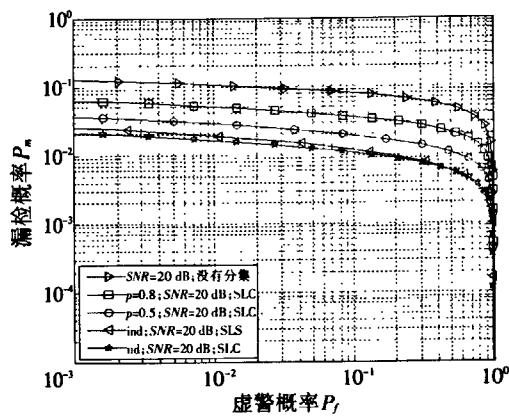


图3  $L=2$ 时不同分集方式性能对比

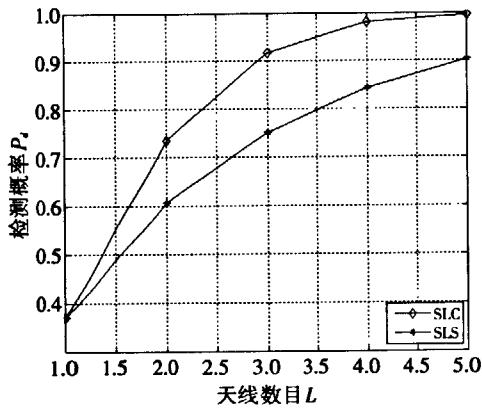


图4 随天线数增加检测概率图

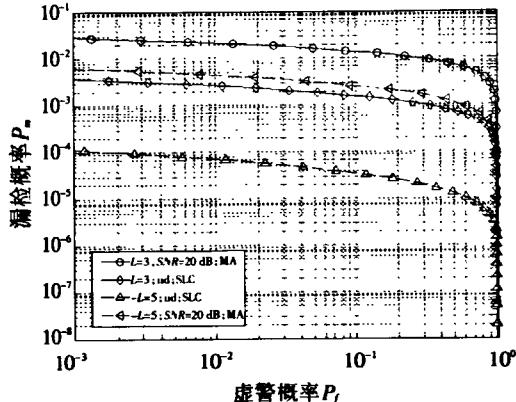


图5 SLC和MA的性能对比

由图3可知,不论哪种分集方案,在同一虚警概率下,其漏检概率都要小于单天线没有分集的方案,也就

是说采用分集之后,检测概率有所提高,检测性能有所改善。同时,当信道存在相关时( $\rho \neq 0, \rho \in [0, 1]$ ),对于SLC,其检测性能要比信道非相关的情况要差,并且相关度越大( $\rho$ 越接近1),其检测性能越差;当信道非相关时,2根天线分集时的SLC和SLS性能相近。

由图4可知,在存在分集的情况下,SLC的检测概率要明显高于SLS的,表明SLC的性能要优于SLS方案。这是因为采用SLS方案未被选择的支路信号弃之不用,从能量接收的角度可见,有些浪费,因此抗衰落不如SLC方式。

由图5可知,不论哪种分集方案,随着天线数目的增加,其检测性能都会越来越好。同时,天线数 $L=3$ 时的SLC与天线数 $L=5$ 时的MA性能相近, $L=5$ 时的SLC性能最好,表明平方律合并方案的检测性能要优于独立联合判决,这是因为单次独立判决的不稳定性要高于SLC联合后判决的不稳定性。

#### 3.2 仿真及分析

对几种能量检测方法在瑞利信道下的实现进行仿真<sup>[11]</sup>。设检测环境是市内(宏小区),服从瑞利分布,其多普勒扩展取典型值120 Hz。第一用户信号是QPSK调制信号,其带宽为1 kHz。首先,在检测时间为1 ms的情况下,仿真出了不同检测方法的检测概率。然后,根据虚警概率值为0.01所对应的门限值,仿真出了增加检测时间后,没有传统能量检测概率图。最后,根据虚警概率为0.01所对应的门限值,仿真出了检测时间为1 ms(保证 $u=5$ )的不同能量检测方法下的检测概率图。具体结果如图6~图8。

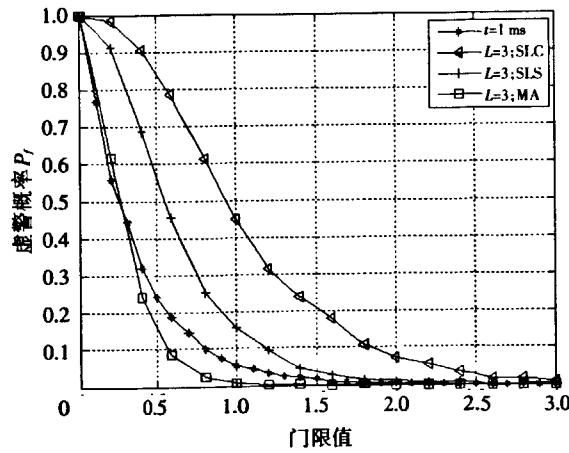


图6 虚警概率图

图6显示,随着门限值的增加,其虚警概率都不断下降,并且SLC方案的虚警概率最大,SLS方案的次之,MA的虚警概率最小,下降速度也最快,这是因为SLC提供的功率增益最大,SLS次之,相较于传统能量检测所接收的

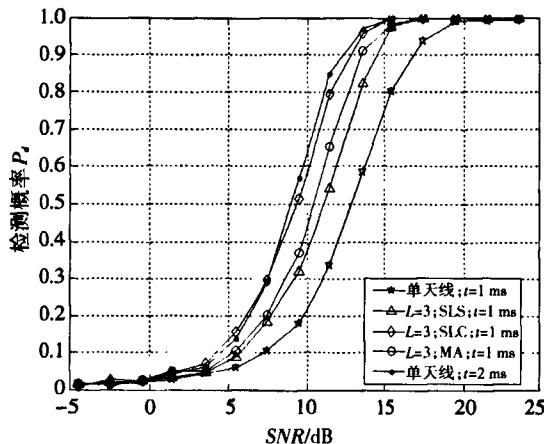


图7 分集检测概率图

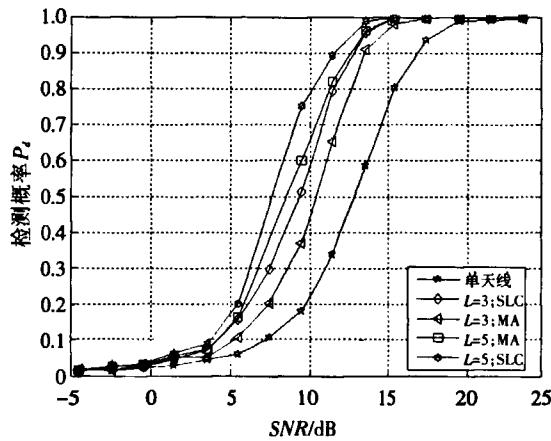


图8 改变天线数目检测概率图

能量要高。而MA方案采用三天线独立判决,提高了判决的准确度,因此下降得最快。

图7显示,保证虚警概率为0.01时,几种分集方案对检测性能都有一定的提高。与理论数值分析结论相同,SLC的性能是最优的。同时,以检测时间为2 ms的检测概率曲线做对比,发现增加检测时间可以增大检测概率,并且检测时间为2 ms的检测概率与SLC的相当,但这是以2倍于原来的检测时间为代价的。

图8显示,当增加天线数目时,几种分集方案对检测性能都有一定的提高,与理论数值分析相同,分集增益越大,检测性能越好。同时,进一步验证平方律合并方案的性能是最优的。

采用天线分集可以对抗信道衰落和延时提供功率增益,从而可以在较少的感知时间,获得较高的检测概率,使感知用户快速实现对第一用户的检测,这对频谱空洞的及时发现利用,以及对授权用户的保护都十分重要。同时,采用天线分集提供的功率增益可以在一定程度上改善因噪声不确定性造成的信号不可检测的现象。

## 4 小结

研究了认知无线电中能量检测的实现,同时针对能

量检测性能相对较差的缺点,对能量检测采用天线分集,并分析了在瑞利信道下几种分集方案对能量检测性能的影响。引入天线分集,可以对抗信道衰落,在一定程度上提高了能量检测的性能,以较短的检测时间获得较高的检测概率,并且天线数目越多,检测性能越高,其中平方律合并方案性能最优。

## 参考文献:

- [1] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force report [EB/OL].[2010-12-23].<http://www.fcc.gov/sptf/files/E&UWGFinalReport.pdf>.
- [2] MITOLA J, GERALD Q, MAGUIRE J R. Cognitive radios: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-18.
- [3] ADELSTEIN J S. Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing spectrum agile radio technologies (ET Docket No.03 108)[R]. Washington D C, USA: FCC, 2003.
- [4] CABRIC D, MISHRA S M, BRODERSEN R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios[C]//Proc. 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004. [S.l.]: IEEE Press, 2004: 772-776.
- [5] CABRIC D, TKACHENKO A, BRODERSEN R W. Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection[C]//Proc. IEEE Military Communications Conference.[S.l.]: IEEE Press, 2006: 1-7.
- [6] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[C]//Proc. IEEE International Conference on Communications.[S.l.]: IEEE Press, 2003: 3575-3579.
- [7] 潘建国.认知无线电技术的研究和进展[J].电视技术,2007,31(10):7-9.
- [8] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1):21-24.
- [9] HWANG S H, BAEK J H, DOBRE O A. Spectrum sensing using multiple antenna-aided energy detectors for cognitive radio[C]//Proc. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. [S.l.]: IEEE Press, 2009: 209-211.
- [10] HWANG S H, BAEK J H, DOBRE O A. Spectrum sensing using multiple antenna-aided energy detectors for cognitive radio[C]//Proc. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. [S.l.]: IEEE Press, 2009: 209-211.
- [11] 杨大成.移动传播环境理论基础分析方法和建模技术[M].北京:机械工业出版社,2003.



## 作者简介:

曹慧,硕士生,主要研究方向为认知无线电。

责任编辑:许盈

收稿日期:2011-02-10

## 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>