

文章编号 :1000-582X( 2007 )11-0046-04

# 认知无线电中的频谱感知技术

冯文江 郭 瑜 胡志远

( 重庆大学 通信工程学院 重庆 400030 )

**摘 要** :分析了认知无线电中的频谱感知技术。对加性白高斯噪声信道下匹配滤波器检测法和能量检测法进行了研究,并比较了能量检测法下认知用户单独检测、合作检测以及采用多样性技术来检测第一用户的性能。仿真结果表明:在低信噪比情况下,匹配滤波器具有良好的检测性能;当信噪比大于 0 dB 时,采用能量检测法能够检测各种信号,认知无线电用户之间合作检测和采用多样性技术能够提高能量检测法的可靠性。

**关键词** :认知无线电 ;频谱感知 ;匹配滤波器 ;能量检测

**中图分类号** :TN929. 52

**文献标志码** :A

随着无线通信业务的增长,可利用的频带日趋紧张,频谱资源匮乏的问题日益严重,尤其是在频率需求非常紧张的数百兆赫兹到 3 GHz 的无线频带范围内。世界各国现行的频率使用政策除分配极少的 ISM 频段之外,大多采用许可证制度。而获得许可的用户,并非全部都是全天候占用许可频段,一些频带部分时间内并没有用户使用,另有一些偶尔才被占用,即使系统频谱使用率低,仍无法将空间的频谱分配给其他系统使用,即无法实现频谱共享。怎样才能提高频谱利用率,在不同区域和不同时间段里有效地利用不同的空闲频道,成为人们非常关注的技术问题。

认知无线电技术被认为是解决上述无线频谱低利用率的最佳方案。“认知无线电”最早是由 Joseph Mitola 于 1999 年提出来的<sup>[1-2]</sup>,它以软件无线电为扩展平台,是一种新的智能无线通信技术。它能够感知周围的无线环境,通过对环境的理解、主动学习来实时调整传输参数等以适应外部无线环境的变化。一般来说,认知无线电应该具备这些功能。第一,能够对无线传输场景进行分析,有效估计干扰温度和可靠地检测出频谱空穴。第二,信道状态信息的估计及其容量的预测。第三,功率控制和动态频谱管理。认知无线电中,认知用户作为第二用户只能利用法定授权的第一

用户(PU)未使用的频段,一旦发现第一用户时,需要在规定的时间内退出该频段而切换到其他未使用的空白频段,以避免对第一用户造成干扰。由此可知,独立可靠地检测到第一用户,感知到频谱空穴是认知无线电实现的前提和关键技术之一。

## 1 频谱感知技术介绍和系统检测模型

### 1.1 认知无线电中的频谱感知技术

根据国内外的研究情况,一般来说,认知无线电频谱感知技术可以分为基于发射机的检测、合作(协作)检测、基于干扰的检测和基于接收机的检测这几大类,如图 1 所示。当然,在实际的感知算法中,为了提高检测性能,各种方法会有所融合。

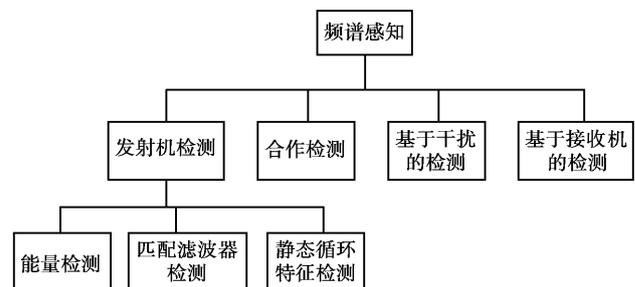


图 1 频谱感知技术的分类

收稿日期 2007-06-30

基金项目 国家自然科学基金资助项目( 60672097 )

作者简介 冯文江( 1963- ) 男 重庆大学教授 主要从事宽带无线接入技术和通信信号处理等方面的研究,  
( Tel ) 023-65106498 ( E-mail ) fwj@ccee.cqu.edu.cn.

1.2 基于发射机检测的基本模型

发射机检测又称为非合作检测。认知无线电应该能够识别被使用的和未被使用的频段。因此,如果第一用户的信号在某一确定频段内出现的话,认知无线电应该具有检测出这个信号的能力。发射机检测正是基于认知无线电对第一用户发射机发出的微弱信号进行检测。发射机检测的基本假设模型为

$$r(t) = \begin{cases} n(t), & H_0; \\ h_s x(t) + n(t), & H_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $r(t)$  是认知无线电接收到的信号;  $x(t)$  是第一用户传输的信号;  $n(t)$  是加性白高斯噪声;  $h$  是信道的增益;  $H_0$  表示信道未被占用的假设, 表明了目前在某一确定频段上没有第一用户;  $H_1$  表示信道被占用, 表明目前存在第一用户。

2 匹配滤波器检测和能量检测

2.1 匹配滤波器检测

匹配滤波器是一种最优的信号检测法, 因为在输出端它能够使信号的信噪比达到最大。匹配滤波器最大的优点就是能够在短时间里获得高处理增益。但是使用匹配滤波器进行信号检测必须知道被检测的第一用户信号的先验知识, 比如调制方式、脉冲波形、数据包格式等, 如果这些信息不准确就会严重影响其性能, 同时匹配滤波器计算量也较大。因此它可以用来检测一些特定的信号, 但是每类第一用户认知无线电都要有一个专门的接收器, 这就增加了系统的资源耗费量和复杂度。

2.2 能量检测

能量检测是一种较简单的信号非相干检测方法。根据第二部分基本假设模型, 笔者在高斯加性白噪声 (AWGN) 信道情况下, 采用能量检测法进行第一用户信号检测的性能。在 AWGN 信道非衰落的环境中, 可知信道增益  $h$  是确定的。在  $H_1$  下, 当接收到的信号超过判决门限  $\lambda$  时, 判断第一用户信号存在。在  $H_0$  下, 当接收信号超过判决门限时, 则会作出错误的判断。分别用  $P_d$  和  $P_f$  来表示检测到第一用户的概率 (检测概率) 和错误判断警报的 (虚警) 概率, 对 H. Urkowitz<sup>[3]</sup> 的研究结果进行简化, 可以得到通过无衰落的 AWGN 信道检测的概率和虚警概率的近似表达式为

$$P_d = \text{Pr}(r > \lambda | H_1) = Q_m \left( \sqrt{\frac{a\gamma}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma^2}} \right), \quad (2)$$

$$P_f = \text{Pr}(r > \lambda | H_0) = \frac{\Gamma \left( m, \frac{\lambda}{2\sigma^2} \right)}{\Gamma(m)}, \quad (3)$$

其中  $\gamma$  是信噪比;  $a$  是一个正数;  $\sigma^2$  是方差;  $\Gamma(\cdot)$ ,

$\Gamma(\cdot, \cdot)$  是完整和不完整 Gamma 函数;  $Q_m$  是普遍马库姆 (Marcum) 函数<sup>[4]</sup>, 其定义为

$$Q_m(a, b) = \int_b^\infty \frac{x^m}{a^{m-1}} e^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{m-1}(ax) dx, \quad (4)$$

$I_{m-1}(\cdot)$  是第  $m-1$  阶修正贝塞尔函数。

由公式 (2) 可以看出如果  $P_d$  很低, 将会导致不能检测第一用户信号的概率很大, 这样反过来就增加了对第一用户的干扰。如果  $P_f$  过高, 则错误警报会使认识无线电用户错过许多频谱利用的机会, 导致频谱利用效率低下。为了提高能量检测的可靠行, 最近关于这方面的研究主要集中在能量检测器上<sup>[5-6]</sup>。

2.3 能量法中的多样性技术检测

为了提高检测的可靠性, 在 AWGN 信道下, 采用对各路接收到的信号进行平方然后求和的处理, 即平方律合并方式来检测第一用户信号。假定接收信号的分集数为  $L_i$ , 在  $H_1$  下,  $r_c$  自由度为  $LN$ , 非中心参数为  $\sum_{i=1}^L a\gamma_i \triangleq a\gamma$ , 方差为  $\sigma^2$ , 由式 (2) 检测概率为<sup>[7]</sup>

$$P_{d,e} = \text{Pr}(r > \lambda | H_1) = Q_{Ln} \left( \sqrt{\frac{a\gamma}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma^2}} \right). \quad (5)$$

在  $H_0$  下,  $L_i$  是相互独立且均服从自由度为  $N$  方差为  $\sigma^2$  的中心卡方变量。那么接收到的信号  $r_c = \sum_{i=1}^L r_i$  自由度就为  $LN$ , 方差仍然是  $\sigma^2$  的中心卡方变量。由式 (3) 得到虚警概率

$$P_{f,e} = \text{Pr}(r > \lambda | H_0) = \frac{\Gamma \left( Ln, \frac{\lambda}{2\sigma^2} \right)}{\Gamma(Ln)}. \quad (6)$$

2.4 能量法中的协作检测

认知无线电必须具备可靠的检测法定第一用户的能力, 以免对法定用户造成干扰, 否则法定用户是不愿意与其分享频谱的。为了保证认知无线电对检测概率的高要求, 提高认知无线电频谱感知的能力, 允许多个认知节点同时进行检测。为了便于分析, 假定  $n$  个认知用户之间相互独立并且均匀分布在第一用户周围, 同时各个能量检测器的判决门限  $\lambda$  相同。一个认知用户获得来自其他  $n-1$  个用户的判决信息。当有第一用户存在时, 根据式 (2)、(3) 可以得到合作检测概率  $P_{d,c0}$  和虚警概率  $P_{f,c0}$  分别为

$$P_{d,c0} = 1 - (1 - P_d)^n, \quad (7)$$

$$P_{f,c0} = 1 - (1 - P_f)^n. \quad (8)$$

设协作方式和单独检测相比获得的增益为  $G$ , 则

$$G = \frac{P_{d,c0}}{P_d}. \quad (9)$$

如果  $n$  个认知用户之间相互独立但并不是均匀地分布, 那么各自接收到信号的信噪比  $\gamma_i$  并不一定相

同。则合作检测的概率为

$$Q_{d,Co} = 1 - \prod_{i=1}^n \left[ 1 - Q_m \left( \sqrt{\frac{a\gamma_i}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma^2}} \right) \right]. \quad (10)$$

### 3 仿真实验结果及分析

#### 3.1 匹配滤波器检测仿真结果及分析

频率调制信号广泛地应用于 FM 广播、TV 音频广播等领域。假定需要检测的第一用户信号是线性调频信号,定义为

$$s(t) = e^{j\pi\omega t^2/T}; -\frac{1}{2}T \leq t \leq \frac{1}{2}T. \quad (11)$$

信号脉宽为 25 μs,扫频带宽为 2 MHz,取样频率为 20 MHz 时频积为 50。用匹配滤波器检测信号仿真结果如图 2、3。

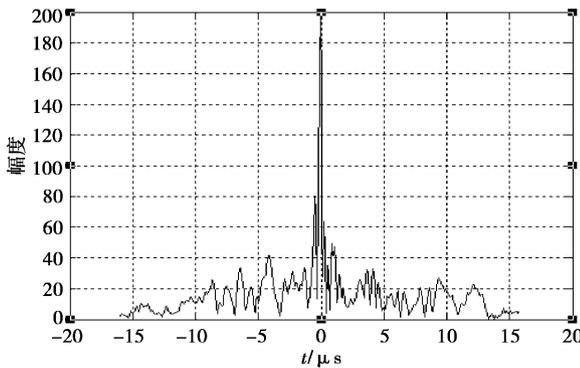


图2 匹配滤波器检测(SNR = -5 dB)

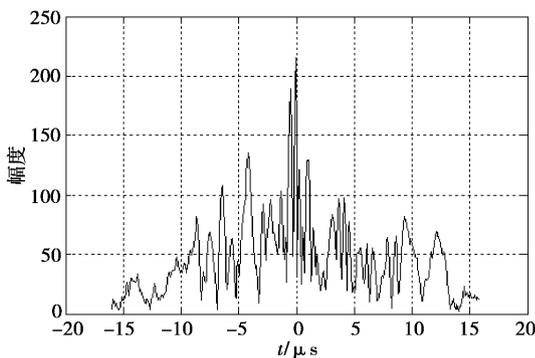


图3 匹配滤波器检测(SNR = -15 dB)

从图 2、3 可以看出匹配滤波器具有较强的检测微弱信号的能力,在 SNR = -5 dB 时对信号的区分度很大。随着信噪比的降低,性能随之下降。

#### 3.2 能量检测仿真结果及分析

实验中取参数  $a=2$ ,  $\sigma^2=1$ ,  $m=5$ 。根据式(2)、(3)AWGN 信道下单个认知无线电节点独立检测的实验仿真结果如图 4、图 5。

图 4 说明随着信噪比的增大,能量检测法的检测概率会得到明显改善。对比图 4、5,可以看出在同一信噪比下,判决门限  $\lambda$  的选择对  $P_d$  和  $P_f$  均有影响,  $\lambda$

越大  $P_d$  越高但同时也会导致  $P_f$  增大。在实际中,应该根据具体的要求来合理选择判决门限值。

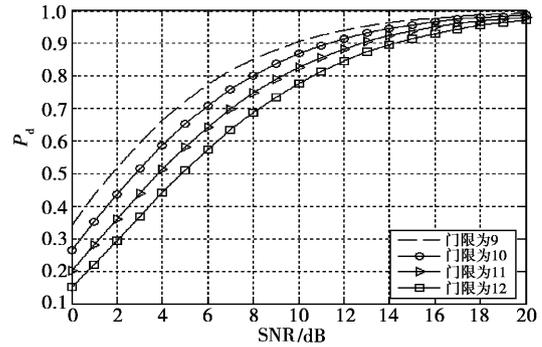


图4 认知无线电独立检测

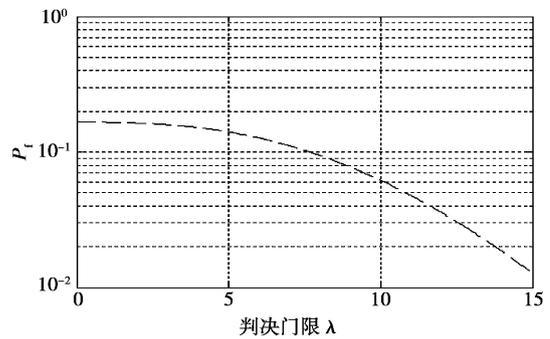


图5 检测的虚警概率

在采用多样性技术和合作检测的仿真实验中,参数  $m=2$ ,  $L$  分别取 1 2 3,合作的认知用户数  $n$  分别取 1 2 3,仿真结果如图 6、7 所示。

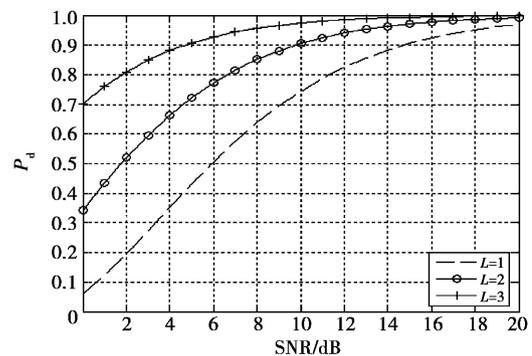


图6 多样性技术下的检测

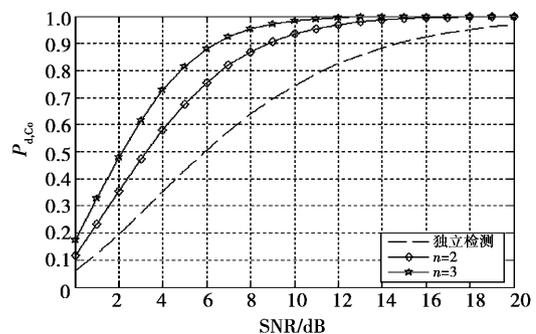


图7 认知无线电的协同检测

从图 6、7 可以看出这两种方法能够大大改善认知无线电检测的可靠性。通过对比可以发现多样性技术更利于低信噪比情况下检测性能的提高,但在通信环境相对较好的情况下,合作检测方法的性能与其相差不多,甚至更好一些,如图 8 所示。根据式(9)可以得到协作检测的增益  $G$ ,如图 9 所示。

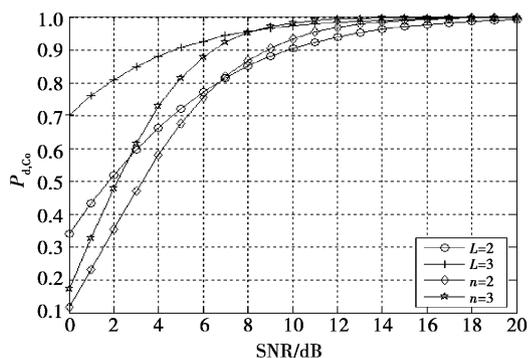


图 8 多样性技术与协作检测的对比

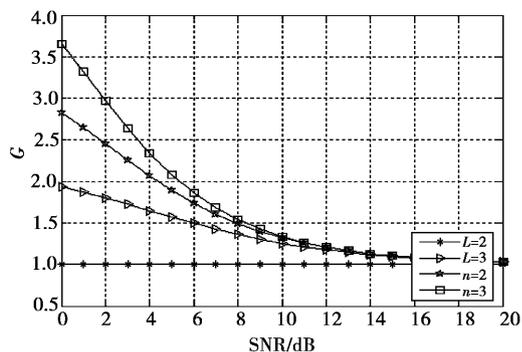


图 9 协作检测的增益  $G$

## 4 结 论

对认知无线电在 AWGN 信道中第一用户检测的

匹配滤波器检测法和能量检测法进行了较为详细的分析和研究,并对其进行了仿真实验验证。但是认知无线电使用的无线环境是复杂的,针对匹配滤波器可以采用与高阶累积量相结合的方法来进一步提高其检测性能。而对于能量检测的方法在衰落和多径情况下的性能将是进一步研究的内容。

## 参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communication Magazine, 1999, 4(4): 13-18.
- [2] MITOLA J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication [J]. 1999 IEEE International Work-shop on Mobile Multimedia Communications, 1999, 15-17: 3-10.
- [3] URKOWITZ H. Energy detection of unknown detection signal [J]. Proceedings of IEEE, 1967, 55: 523-231.
- [4] NUTTALL A H. Some integrals involving the  $Q_m$  function [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1975, 21(1): 95-96.
- [5] GANESAN G, LI Y G. Cooperation spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. Proceedings of IEEE DySPAN, 2005, 2005: 137-143.
- [6] CABRIC D, MISHRA S M, BRODERSEN R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radio [J]. Asilomar Conference on Signals (Systems and Computers), 2004, 2004: 772-776.
- [7] GHASEMI SOUSA E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environment [J]. Proceedings of IEEE DySPAN 2005, 2005: 131-136.

## Spectrum Sensing Technologies in Cognitive Radio

FENG Wen-jiang, GUO Yu, HU Zhi-yuan

(College of communication Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400030, P R China)

**Abstract:** Spectrum sensing technologies in cognitive radio are minutely analyzed. By adding white gauss noise (AWGN) channels, matched filtering and energy detection are studied. The detection performance and the improvement of sensing spectrum are compared by cooperation and diversity schemes. Computer simulation results show that matched filtering can detect weak signals when SNR is lower. Energy detection is simple and efficient when SNR exceeds 0 dB. Cognitive radio users collaborated with each other could improve reliability of energy detection.

**Key words:** Cognitive radio; spectrum sensing; matched filtering; energy detection

(编辑 张 苹)