

认知无线电中差值能量检测

唐成凯¹ 廉保旺¹ 张玲玲²

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)¹ (西北工业大学航海学院 西安 710072)²

摘 要 在认知无线电系统中,认知用户需要实时准确地判断频谱的使用情况。研究了能量检测算法的检测性能,发现当噪声波动性较大时,能量检测性能会大幅下降,在低信噪比时尤为明显。因此提出利用噪声不确定性的最大波动范围修正能量检测,并在此基础上提出了一种差值联合能量检测,即通过每次能量检测的差值变化大小校正判决结果,得到最终的融合判决结果。仿真表明,这种改进的能量检测方法的性能在保证传统能量检测优点的情况下有效地提高了认知用户对频谱实时准确的检测性能。

关键词 认知无线电,频谱感知,能量检测,噪声不确定性,差值

中国分类号 TN911.23 文献标识码 A

Difference Value Energy Detection in Cognitive Radio

TANG Cheng-kai¹ LIAN Bao-wang¹ ZHANG Ling-ling²

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)¹

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)²

Abstract In cognitive radio systems, cognitive users need to accurately determine the using of the spectrum by real-time. Studying the performance detection of energy detection, it was found that the larger the noise fluctuations, the sharper the decline in performance of energy detection, especially in low SNR. We used the maximum fluctuations range of the noise uncertainty to amend the energy detection and gave a joint detection of the difference value and the energy which utilize the alteration of the difference value in the every energy detection to amend the judgment result and get the blending final result based on it. Simulation results show that under guaranteeing the advantage of the traditional energy detection the performance of our new energy detection can effectively improve the cognitive users accurate detection performance of spectrum usage in real-time.

Keywords Cognitive radio, Spectrum sensing, Energy detection, Noise uncertainty, Difference value

1 引言

随着无线通信的迅猛发展以及人们对服务质量和数据速率的要求不断提高,未来可分配的无线频谱资源将会越来越少。频谱的稀缺已成为一个严重问题^[1]。认知无线网络通过机会共享的方式,实现了动态频谱接入^[2],在不干扰已有授权用户的情况下,使用那些某时、某地空闲的频谱^[3],提高了频谱利用率,因此可以用来解决上述问题。

在认知无线电系统中,使用授权频段通信的用户称为授权用户或首要用户,它拥有频谱的绝对使用权。非授权用户,又称为认知用户^[4],以不影响授权用户的正常通信为前提,可以选择空闲频段进行通信。认知用户必须通过感知装置监控频谱变化,目前常用的频谱检测方法包括能量检测、循环平稳检测和匹配滤波检测。从文献^[5]中我们可以得到,匹配滤波的检测需要一定量的授权用户的参数信息,在参数越多的情况下结果越准确。但在实际检测中,认知用户不太可能得到主用户的参数。能量检测在所有检测方法中具有检测速度快

但正确检测概率较低的特点。本文根据能量检测的特点,利用噪声的最大波动范围对能量检测进行修正。能量检测的主要误差来源是背景噪声,修正后的能量检测比原先的能量检测的正确检测概率有了很大的提高,但是这种提高又会导致较高的虚警率。为了减少这种情况,本文在噪声修正后的能量检测中加入了差值检验,保证了在主用户信号较弱时差值联合能量检测也能准确地判断主用户对频谱的使用状态。本文最后给出了差值联合能量检测和传统能量检测比较函数的仿真,并对性能进行了对比分析。

2 噪声不确定修正的能量检测

信号的能量检测法是一种有效的信号检测方法^[6],它通过计算信号在一定时间段内的能量,与预先设定的门限值进行比较,做出判决,获得检测结果。认知用户信号检测可以设定为如下的二元假设。

$$\begin{aligned} H_0: y(t) &= n(t) \quad t=1, 2, \dots, N \\ H_1: y(t) &= x(t) + n(t) \quad t=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

到稿日期:2010-09-06 返修日期:2010-12-13 本文受航空基金(20085553016)航空电子系统综合技术国防重点实验室资助。

唐成凯(1985—),男,博士生,主要研究方向为认知无线电, E-mail: angchengkai99@163.com; 廉保旺(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线通信、认知无线电; 张玲玲(1986—),女,博士生,主要研究方向为认知无线电。

式中, $x(t)$ 表示次用户接收到的主用户信号, $n(t)$ 表示次用户检测时所接收到的噪声信号, 我们这里假设噪声信号为高斯白噪声信号, N 为检测时信号的抽样数目。可以构造检验统计量^[7]:

$$G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(t))^2 \quad (2)$$

为了不失一般性, 在信号检测单位时长内, 背景噪声采用的是高斯白噪声, 所以噪声的平均功率是恒定不变的, 那么根据中心极限定理, 可得到如下的近似二元假设判决关系式。

$$H_0: G_0 \sim N(\sigma_n^2, \frac{2}{N}\sigma_n^4) \quad (3)$$

$$H_1: G_1 \sim N(\sigma_s^2 + \sigma_n^2, \frac{2}{N}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2)$$

式中, G_0 表示信道中只存在噪声信号的判决变量, G_1 表示信道中有主用户信号存在的判决变量, σ_s^2 为主用户信号的平均功率, σ_n^2 为噪声方差。根据中心极限定理, 在认知用户端, 接收到的从授权用户发送的信号可以认为是零均值复高斯过程, 同时接收端的信号被零均值的高斯白噪声所干扰, 我们可以得到检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 表达式, 分别为

$$P_d = \Pr(G \geq \gamma) = \Pr(G_1) = Q\left(\frac{\gamma - (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}{\sqrt{1/N}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}\right) \quad (4)$$

$$P_f = \Pr(G < \gamma) = \Pr(G_0) = Q\left(\frac{\gamma - \sigma_n^2}{\sqrt{1/N}\sigma_n^2}\right) \quad (5)$$

式中, γ 为检测判决门限, $Q(\cdot)$ 为标准高斯互补累积函数。在认知用户实际检测信道中, 可以得到先验的虚警概率, 并在此虚警概率下, 计算认知用户所具有的检测概率。如果没有采样点数的限制, 能量检测可以满足任意虚警概率下正确检测的概率, 所以检测门限可以通过虚警概率得到

$$\gamma = (Q^{-1}(P_f) \sqrt{1/N} + 1) \sigma_n^2 \quad (6)$$

在能量检测中, 主要的噪声干扰是由噪声的不确定性造成的^[8]。特别是在低信噪比下, 这种状况更加明显。我们假设噪声不确定的波动范围为 $[\sigma_{nH}^2, \sigma_{nL}^2]$, 其中 σ_{nH}^2 代表噪声不确定性最小时的噪声方差, σ_{nL}^2 代表噪声不确定性最大时的噪声方差。背景噪声服从高斯分布, 我们可以得到如图 1 所示的最大和最小噪声方差分布曲线。将最大噪声方差和最小噪声方差与平均噪声方差进行比较可以得到

$$\begin{aligned} \sigma_{nH}^2 &= \sigma_n^2 10^{\frac{\rho}{10}} \\ \sigma_{nL}^2 &= \sigma_n^2 10^{\frac{\rho}{10}} \end{aligned} \quad (7)$$

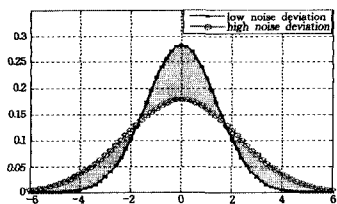


图 1 噪声概率密度分布曲线

式中, ρ 为最大的噪声不确定性的值。我们对在最大噪声方差和最小噪声方差情况下的虚警概率曲线进行仿真, 可以得到在相同条件下的判决门限中, 噪声方差越大对判决结果的影响越大, 而噪声方差的大小又取决于噪声不确定性的值的大小。所以本文将噪声不确定性的影响引入能量检测中对检测结果进行修正, 可以得到新的二元假设判决关系式:

$$P_d = Q\left(\frac{\gamma - (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}{\sqrt{1/N}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}\right) \quad (9)$$

$$P_f = Q\left(\frac{\gamma - \sigma_n^2}{\sqrt{1/N}\sigma_n^2}\right) \quad (10)$$

当给定虚警概率(见图 2)时, 我们可以得到检测概率的判决门限为

$$\gamma = (Q^{-1}(P_f) \sqrt{1/N} + 1) \sigma_n^2 10^{\frac{2\rho}{10}} \quad (11)$$

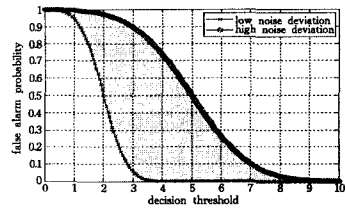


图 2 噪声不确定下的虚警概率曲线

3 差值联合能量检测

在修正后的能量检测中, 当噪声不确定性的波动范围很大时, 还是会产生较大的判决误差。在这种情况下, 需要通过几次能量检测的差值判决对判决结果做进一步的修正。噪声在很短的时间内的波动具有一定的平稳性, 并在较长的时间内呈现周期性波动, 这种波动和无线通信的使用情况息息相关。而主用户占用频谱后, 会在很短的时间内产生很大的能量变化, 通过这种变化对能量检测的判决结果进行修正。差值联合能量检测的流程图如图 3 所示。我们取 g_i 为第 $i+1$ 次能量检验统计量 G_{i+1} 与能量检验统计量 G_i 的差值, M 为检验统计量差值的总数目, 采用上次主用户出现的时间间隔到本次检测时间间隔, 得到

$$g_i = G_{i+1} - G_i \quad i=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

通过式(12), 可以得到 M 个时间间隔的平均能量变化量:

$$\Delta g = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{i+1} - G_i \quad (13)$$

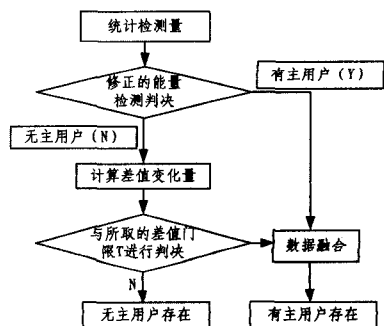


图 3 差值联合能量检测的流程图

由于 Δg 是在一段时间内的能量检测统计量的差值平均, 并且背景噪声的波动范围服从高斯白噪声分布, 因此在某一个采样时间间隔产生一个大的噪声信号的概率很低。当出现大的能量统计检测量差值变化时, 基本认为主用户出现只是由于背景噪声太强, 导致主用户信号相对较弱, 这种差值修正可以减小虚警概率。判决式如下。

$$\begin{cases} H_1: g_i \geq \rho \Delta g \\ H_0: g_i < \rho \Delta g \end{cases} \quad (14)$$

式中, ρ 为差值判决系数。根据背景噪声分布态势, 差值判决系数取值范围为大于 1 的数。当取值过大时, 会导致判决门

(下转第 114 页)

参考文献

- [1] 黎锁平,蔡志鹏,何继爱.降低 OFDM 系统峰均比的选择性映射算法研究[J]. 信号处理,2008,24(4):640-643
- [2] Negi R, Cioffi J. Pilot tone selection for channel estimation in a mobile OFDM system [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(3): 1122-1128
- [3] Rinne J, Refors M. Pilot spacing in orthogonal frequency division multiplexing systems on practical channels [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1996, 42(4): 959-962
- [4] Choi J-W. Design of the optimum pilot pattern for channel estimation in OFDM systems[C]// IEEE Communications Society Globecom. 2004:3661-3665
- [5] Chen B-C, Lin Wen-jeng. Pilot-assisted channel estimation for STBC-based wireless MIMO-OFDM systems[C]// IWCWC07. Honolulu, Hawaii, USA, August 2007
- [6] 黎锁平,李敏,田秀丰. OFDM 系统基于导频的信道多径时延估计[J]. 信号处理,2009,25(12):1972-1976
- [7] Barhumi I, Leus G, Moonen M. Optimal training design for MIMO-OFDM systems in mobile wireless channels [J]. IEEE Trans. Signal Processing(S0916-8516), 2003, 5(6): 1615-1624
- [8] Hsieh M-H, Wei C-H. Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective adapting channels [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 1(44): 215-217
- [9] Caban S, Mehlhruer C, Mayer L W, et al. 2x2 MIMO [C]// Variable Antenna Distances Vehicular Technology Conference. VTC Spring IEEE, 2008: 1311-1315
- [10] Minn H, AL-Dhahir N. Optimal training signals for MIMO-OFDM channel estimation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication (S1536-1284), 2006, 5: 1158-1168

(上接第 110 页)

限过高,减小正确检测的概率。当取值过小时,判决门限的影响过小,导致正确检测的概率不会增加。最后,我们用差值检测的结果对修正的能量检测结果进行完善,得到新的判决式为

$$\begin{cases} H_1: g_i \geq \rho \Delta g \text{ or } G_i \geq \gamma \\ H_0: g_i < \rho \Delta g \text{ and } G_i < \gamma \end{cases} \quad (15)$$

4 结果仿真与分析

首先对差值判决系数 ρ 的取值变化进行分析。假设差值统计量总数目 M 的取值在没有主用户出现的情况下最大为 10, 最小为 1。主用户出现的概率为 50%, 主用户信号采用 BPSK 信号, 噪声信号采用高斯白噪声信号。

从图 4 可以看出, 当差值判决系数取值在 2 周围时, 正确检测的概率最大。当差值判决系数取值变大时, 造成判决门限变高。主用户信号强度较弱时, 也会产生无主用户存在的判决。而当差值判决系数取值较低时, 造成判决门限较低。当背景噪声变化大时, 也会使本时间间隔内的差值变化大于判决门限而导致虚警概率增加。从背景噪声服从高斯白噪声分布也可以得出, 当判决门限为均值的 2 倍关系时, 门限位于最优位置。这个结论符合我们的仿真结果。

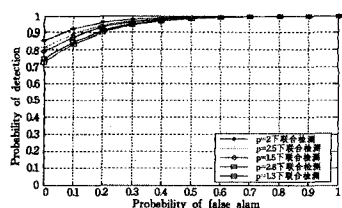


图 4 不同差值判决系数下的正确检测概率曲线

我们将本文的检测判决方法和原有的能量检测判决方法进行比较, 假设差值判决系数为 2, 其余条件保持不变。

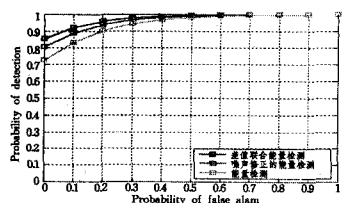


图 5 正确检测概率曲线

从图 5 可以看到, 普通的能量检测方法在虚警概率为

10% 的最大容许范围内, 可以达到 85% 的正确检测概率。但本文提出的差值联合能量检测可以在增加很小的计算量的情况下, 使正确检测概率有一定的提高, 而所需增加的计算量仅为 2M 次加法运算, 对整体的运算速度只产生微小的影响。本文所设计的方法在虚警概率降低时也能很好地满足所需的正确检测概率。

结束语 本文对能量检测进行了研究, 发现噪声干扰是能量检测的主要误差来源, 提出利用最大噪声波动范围对能量检测进行修正, 使正确判决的概率增加。由于采样点的限制, 当主用户信号过于衰弱时, 主用户信号就会被淹没在背景噪声中。为此, 本文在噪声不确定性修正的能量检测基础上, 提出了一种差值联合能量检测, 即计算每次能量检测与前一次能量检测的差值, 将此值与前 M 次平均差值进行比较, 最后将此判决结果和部分噪声不确定性能量检测结果进行数据融合, 得到最终的判决结果。本文所提出的能量检测方法与传统能量检测相比, 有效地提高了认知用户对频谱实时检测的能力。

参考文献

- [1] Haykin S. Cognitive Radio: Brain Empowered Wireless Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220
- [2] Devroye N, Rick P, Tran M, et al. Limit S on communications in a cognitive radio channel [J]. IEEE Communications Magazine, June 2006: 44-49
- [3] Abhayapala T D, Bhatta H. Coherent broadband source localization by modal space processing [C]// International Conference on Telecommunication. French Polynesia: Tahiti, 2003: 100-105
- [4] Pascal C, Wang Yi-de. A root-MUSIC-like direction finding method for cyclostationary signals [J]. IEEE ICASSP, 2004(2): 225-228
- [5] Wang Q, Zheng H. Route and spectrum selection in dynamic spectrum networks [C]// IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC). Volume 1, January 2006: 625-629
- [6] Akyildiz I F, Won-yeol L, Mehmet C V. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. IEEE
- [7] Hoven N K. On the feasibility of cognitive radio [D]. Berkeley: University of California, Spring 2005
- [8] 丁汉清, 杨家玮, 赵志远. 认知无线网络中频谱感知性能分析 [J]. 计算机科学, 2010, 37(3): 125-127