

文章编号:1671-6833(2011)01-0094-05

## 一种认知无线电中自适应感知门限设置方法

杨守义, 徐萌萌, 齐 林, 穆晓敏

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 频谱感知技术是认知无线电(CR)的关键技术, 频谱检测的可靠度和精度决定了是否会影响主用户的正常通信及认知用户能否有效利用频谱. 在频谱检测的众多方法中, 能量检测法是一种常用的方法, 但能量检测器的门限很容易受到噪声功率变化的影响, 影响主用户的正常通信. 笔者提出一种自适应背景噪声的门限设置方法, 通过引入门限评价指数作为衡量频谱感知效率和频谱资源利用率的度量指标, 使得认知用户在不同的应用环境中能自适应地设置频谱感知门限, 达到更充分利用频谱资源和更有效传送信号的目的. 仿真证明, 该方法确定的门限能够随着噪声条件的改变而改变, 显著提高了能量感知方案的性能.

**关键词:** 认知无线电; 频谱感知; 自适应门限; 门限评价函数

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

### 0 引言

随着无线技术的飞速发展, 频谱资源日益紧缺, 而当今无线频谱的固定分配使得绝大多数频谱的利用率为15%~85%. 为了尽量提高现有频谱的利用率, 通过认知无线电技术实现频谱共享是未来无线通信的发展趋势. 认知无线电通过频谱感知方法感知外界环境中空闲或可利用的频谱资源, 实时地改变某些操作参数(比如传输功率、载波频率和调制技术等)实现任何时间任何地点的高度可靠通信, 以及对频谱资源的有效利用<sup>[1-2]</sup>.

频谱感知是认知无线电系统的基本功能, 是实现频谱管理、频谱共享的前提. 由于第一用户网络没有义务改变它的结构来与认知无线网络共享频谱, 认知无线电只能独立地、可靠地、通过连续的频谱感知对法定用户进行探测. 在频谱感知方法中, 当我们无法收集主用户的足够信息时, 能量检测是一种最优的方法, 同时能量检测的实现也十分简单. 然而, 能量检测的性能容易受到噪声功率的影响, 同时, 由于噪声功率不仅包括热噪声, 还包括周围环境中其他发射器的辐射, 以及远处信号发射器的微弱信号, 噪声功率会随着环境发生显著变化.

当背景噪声变化时, 固定的认知用户预设门限无法确保网络性能. 不同认知用户之间内部热噪声及接收灵敏度的差异, 即使在相同的应用场景下用户所适合的门限也不完全相同. 因此, 针对每一用户在不同的环境中如何自适应背景噪声来设置感知门限是一个有待研究的问题. 文献[3]中, 经过多次测量噪声功率, 作者通过经验方法来设置能量检测中的门限值. 然而在实际应用中, 噪声功率是经常发生变动的, 这时再使用这种方法来设置门限就十分困难了. 在文献[4]文献[5]中, 作者分析并仿真了噪声不确定性对频谱感知性能的影响, 前提是假设噪声功率的动态范围是已知的, 但是他们并没有说明如何得到噪声的动态范围. 文献[6]和[7]在无线传感器网络中对自配置载波侦听门限做了研究, 引入代价函数来度量侦听范围对冲突避免性能和网络吞吐的影响, 提出了自配置载波侦听门限的思想. 但是无线传感器网络与认知无线电环境有很大区别, 载波侦听门限设置跟频谱感知门限算法不能混为一谈.

笔者在以上文献的思想基础上提出一种自适应随机噪声的门限设置方法, 通过引入感知性能指数和频谱代价指数分别作为衡量频谱感知效率和频谱资源利用率的度量指标, 认知用户能在不同的环境中自适应地设置频谱感知门限, 从而可

收稿日期:2010-07-09; 修订日期:2010-10-06

基金项目:教育部科学技术重点研究项目[208083]

作者简介:杨守义(1965-), 男, 河南商丘人, 郑州大学教授, 主要研究方向为宽带无线通信和移动通信.

以更充分地利用频谱资源和更有效地传送信号。

## 1 系统模型分析

### 1.1 圆盘模型假设

考虑这样一个认知系统,认知用户的发送方和接收方,以及一个位于认知用户感知范围内可能存在的主用户,通过分析他们之间的相互关系来得到自适应的能量感知门限。

假设通信距离是信号路径损耗的重要原因,信号随距离衰减因子为  $\gamma$ ,所有用户以相同功率发送,网络各处的噪声和衰减模型相同,考虑包含一个认知用户和一个主用户通信网络模型。将认知用户的发送范围、感知范围、以及对其他用户的干扰范围都等效为与距离有关的规则圆域,即使用圆盘模型来描述研究的系统<sup>[6]</sup>。如图1所示,该模型中,用  $R_t$  表示认知用户的发送半径,  $R$  表示认知用户的感知半径,在半径  $R$  内,如果存在主用户就可以被感知到,  $R_i$  表示认知用户接收端的干扰半径,即在  $R_i$  范围内存在的其他用户都会对认知用户接收端产生干扰。合理设置认知用户的认知半径,一方面要保证尽可能大地提高频谱利用率,另一方面又要确保处在接收端干扰半径范围内的用户能尽量多地处于认知用户的认知半径范围内。图1中A表示认知用户的发送端,B表示主用户的接收端,C表示主用户。

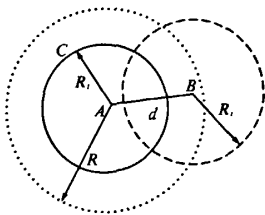


图1 圆盘模型

Fig.1 The disc model

### 1.2 信道模型及相关参数

认知用户接收端处的信号强度可以用式(1)来表达<sup>[7-8]</sup>,式中: $d$ 表示收发端的距离; $\gamma$ 表示路径衰减因子; $\bar{P}_r$ 为距离  $\bar{d}$  处参考接受节点测得的信号强度。

$$P_r(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot (h_t \cdot h_r)^2}{d\gamma \cdot L} = \bar{P}_r \cdot (\bar{d}/d)^\gamma \quad (1)$$

接收端要以允许的误码率接受信号,需要满足:

$$\begin{cases} P_r(d) \geq P_R \\ \frac{P_r(d)}{P_N + \sum P_i} \geq S_0 \end{cases} \quad (2)$$

式(1),(2)中: $P_R$ 为接收机灵敏度; $S_0$ 为接收端信噪比; $P_N$ 为背景噪声强度; $P_i$ 为干扰信号强度。

基于圆盘模型,假设认知用户的感知范围半径为  $R$ ,感知门限为  $P_r$ ,则

$$\bar{P}_r \cdot (\bar{d}/d)^\gamma + P_N \geq P_r, \quad d \in [0, R] \quad (3)$$

用户发送范围  $R_t$  满足:

$$\begin{cases} P_r(R_t) \geq P_R \\ \frac{P_r(P_r)}{P_N} \geq S_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$R_t = (\bar{d}) \cdot \left( \frac{\bar{P}_r}{\max(P_R \cdot S_0 P_N)} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (5)$$

设干扰范围半径为  $R_i$ ,则意味距离接收端  $[0, R_i]$  范围内其他用户的发送都会导致接收端无法以可接受的误比特率接受发送端的信号。表示为

$$\frac{P_r(d)}{P_N + P_r(R_i)} = S_0 \quad (6)$$

$$R_i(d) = \frac{d}{\left[ \frac{1}{S_0} - \left( \frac{d}{\bar{d}} \right)^\gamma \frac{P_N}{P_r} \right]^{1/\gamma}} \quad (7)$$

在认知环境中,认知用户在自身的发送范围内都可能造成对主用户的干扰,而主用户并不主动检测认知用户的存在,为了能有效地感知到主用户,避免对主用户的干扰,感知半径必须满足  $R > R_i$ 。

## 2 确定最优自适应门限的方法

在认知无线环境中,频谱感知算法的门限设置直接影响认知网络资源的利用率和认知用户通信的可靠性,只有合理设置自适应的门限值,认知用户才能在最合适的时机进行退避,既能准确感知到主用户的空闲状态,做到充分利用资源,又能做到不对主用户形成干扰,不影响主用户的正常通信。

### 2.1 门限评价指标(Threshold Evaluation Index)

为了分析感知门限对认知网络的影响,引入认知效率指数和频谱代价指数。定义认知效率指数(CEI)为频谱感知算法实际达到认知效果的范围与需要认知到的范围之比。即图2(a)中的  $(S2 + S3)/(S2 + S3)$ ,图2(b)中的  $(S2 + S3)/(S2 + S3 + S4)$ ,即:

$$CEI = \begin{cases} 1, & R \geq d + R_i \geq R_i \\ \frac{(\pi - \alpha_2)R_i^2 + (\beta_1 - \beta_2)R_i^2 + \alpha_1 R^2 + \frac{1}{2}(S_2 - S_1)}{(\pi - \beta_2)R_i^2 + (\pi - \alpha_2)R_i^2 + \frac{1}{2}S_2}, & d + R_i \geq R \geq R_i \\ 1, & R \geq R_i \geq d + R_i \end{cases} \quad (8)$$

频谱代价指数(SCI)为频谱感知算法导致的频谱资源浪费的面积加上可能影响成功通信的面积与需要达到频谱感知效果的面积之比。即图2(a)中的 $S_1/(S_2 + S_3)$ , 图2(b)中的 $(S_1 + S_4)/(S_2 + S_3 + S_4)$ , 即:

$$SCI = \begin{cases} \frac{\pi R^2}{(\pi - \alpha_2)R_i^2 + (\pi - \beta_2)R_i^2 + \frac{1}{2}S_2}, & R \geq d + R_i \geq R_i \\ \frac{(\pi - 2\alpha_1)R^2 - (\pi - \alpha_2)R_i^2 + (\pi - 2\beta_1 + \beta_2)R_i^2 + \frac{1}{2}S_2}{(\pi - \alpha_2)R_i^2 + (\pi - \beta_2)R_i^2 + \frac{1}{2}S_2}, & d + R_i \geq R \geq R_i \\ \frac{R^2}{R_i^2} - 1, & R \geq R_i \geq d + R_i \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{R^2 + d^2 - R_i^2}{2Rd}\right)$$

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{d^2 + R_i^2 - R^2}{2R_i d}\right)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{R_i^2 + d^2 - R_i^2}{2R_i d}\right)$$

$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{d^2 + R_i^2 - R_i^2}{2R_i d}\right)$$

$$S_1 = \sqrt{(R+d+R_i)(R_i+d-R)(R+R_i-d)(R+d-R_i)}$$

$$S_2 = \sqrt{(R_i+d+R_i)(R_i+d-R)(R_i+R_i-d)(R_i+d-R_i)}$$

频谱感知门限为了达到较高的频谱感知性能和较小的频谱资源代价,必须综合考虑这两个指数,使得感知性能尽可能好的时候资源代价尽可能小。根据两个指数对系统性能的影响,感知效率指数越大,表示系统性能越好,而对于频谱代价指数来讲,越大意味着系统性能下降,因此定义门限评价指数时综合考虑两个指数的影响,定义:

$$TEI = w_1 \cdot CEI / (w_2 \cdot SCI) \quad (10)$$

式中: $w_1$ 和 $w_2$ 分别表示SPI和SCI的影响因子,将两个影响因子统一,定义常数 $\eta = w_1/w_2$ ,于是有

$$TEI = \eta CEI / SCI \quad (11)$$

## 2.2 目标函数求解

对于载波感知范围为 $R$ 的认知系统,若感知门限为 $P_i$ ,存在以下关系:

$$\bar{P}_{rx} \cdot (\bar{d}/d)^r + P_N \geq P_i, \quad d \in [0, R]$$

式中: $P_N$ 表示背景噪声,侦听的信号为接收到的发射信号和背景噪声信号之和,当 $d$ 等于 $R$ 时,

上式的等号成立,因此侦听半径 $R$ 和 $P_i$ 之间

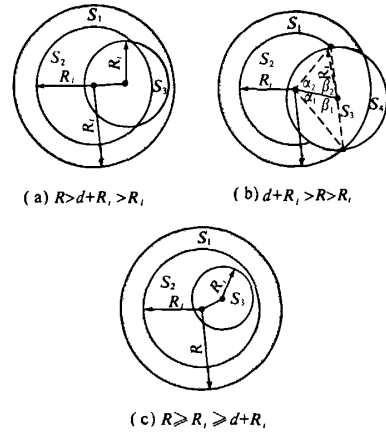


图2 不同的感知半径

Fig. 2 Different cognitive radius

存在以下关系:

$$R = \bar{d} \cdot \left( \frac{\bar{P}_{rx}}{P_i - P_N} \right)^{\frac{1}{r}} \quad (13)$$

当综合评价函数取得最大值 $P_i$  (Optimized)  $\Leftrightarrow TEI$  (Biggest) (14)

根据半径 $R$ 和 $P_i$ 之间关系,上式也可以表示为:

$$R(\text{Optimized}) \Leftrightarrow TEI(\text{Biggest}) \quad (15)$$

上面的关系也是容易理解的,因为感知半径的大小直接影响到系统的资源利用效率和认知用户通信的可靠性。当感知范围半径较大时,认知用户既能有效地感知到主用户的存在,避免对主用户的干扰,也能保证认知用户收发端的可靠通信。但是过大的感知范围使得 $S_1$ 区域内的频谱资源不能有效利用。改变感知门限使感知范围半径变小时,频谱资源得到更有效的利用( $S_1$ 区域变小),但认知用户:的通信可靠性变差( $S_4$ 区域内的潜在用户会干扰用户的通信)。

由以上分析可知,求解最优门限其实是一个优化问题,TEI对应的函数可以作为优化的目标函数。由于综合评价函数取得最大值时所对应感知门限即为最优感知门限,根据式(10),评价函数与感知范围和收发距离有关,在实际认知系统中,收发距离 $d$ 按概率在 $(0, R)$ 取值,可以认为 $d$ 平均分布,折合不同收发距离 $d$ 对综合评价函数的影响,从而将函数简化为门限评价指数(TEI)和感知范围 $R$ 的二维函数。这样,根据式(14),求得TEI达到最大时对应的最优感知半径 $R$ ,然后根据式(12),得到最优的门限值 $P_i$ 。

### 3 仿真及分析

算法的仿真基于 matlab 平台,仿真条件设置如下: $\varphi=1$ ,每个用户无线收发机接收灵敏度  $P_R=5$ ,用户接收机信噪比门限  $S_0=10$ . 网络各处路径衰减指数相同  $\gamma=2$ . 用户收发距离在  $(0, R_i)$  内均匀分布. 其中:

$$\varphi = \bar{P}_r \cdot \bar{d} \gamma \quad (16)$$

#### 3.1 求解自适应阈值 PS

根据上面的叙述,当系统的性能最好时,即门限评价指数最大时,对应的门限既是最优门限,我们可以通过寻找最大 TEI 的方法得到自适应的最优门限值  $P_i$ , 仿真过程如下:首先设定一个瞬时样本功率集合  $N=(N_1, N_2, \dots, N_m)$  和一个频谱感知范围集合  $R=(R_1, R_2, \dots, R_k)$ . 对应每一噪声  $N=1, 2, \dots, m$ , 根据式(10), 求解频谱感知范围集合中  $R_i (i=1, 2, \dots, m)$  对应的门限评价指数  $TEI_i(N_i)$  值, 在仿真过程中我们取  $\eta=1$ . 然后通过比较得到一个最大评价指数  $\max TEI(N_i)$ . 因此对于每一随机噪声, 所对应的最优感知范围即为  $\max TEI(N_i)$  对应的感知范围. 由于随着随机噪声实时的调整门限是不现实的, 只能找出待选的感知范围中最能综合噪声样点的感知范围值. 在这里笔者采用最小均方误差准则, 求解

$$h(R_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\max TEI(N_i) - TEI_j(N_i))^2$$

并搜索其中的最小值  $\min h(R_i)$ . 所对应的  $R_i$  即为最优频谱感知范围. 最后根据式(12)即可求得对应的最优感知门限.

#### 3.2 仿真结果及分析

如图3所示, 根据 SPI, SCI, TEI 的表达式, 在认知用户收发距离  $d$  取不同值时, 感知范围与 SPI, SCI, SEI 的关系曲线. 从图中可以看出, 随着感知范围的增大, 感知性能越来越好, 与此同时, 所带来的频谱代价也越来越大. 综合评价函数 SEI 的最优值所对应的感知范围在不同的收发距离  $d$  情况下取得不同值.

在求解最优门限的过程中, 笔者综合了不同的收发距离  $d$  对 TEI 的影响, 得到在不同的噪声背景下各个噪声样点的最优 TEI 函数值与每个感知范围的 TEI 的最小均方误差值. 即  $h(R_j)$ . 图4即为  $h(R_j)$  与感知门限的关系曲线. 其中  $h(R_j)$  的最小值对应的门限即为最优门限. 从图中可以看出, 不同的噪声方差对应的最优门限各不相同. 这也是笔者要根据不同的背景噪声来改变的感知

门限的原因.

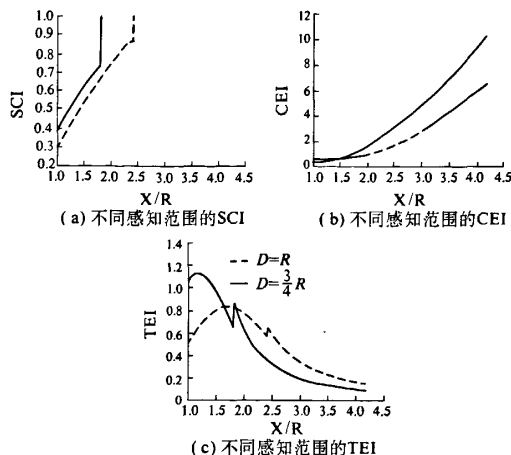


图3 不同感知范围下的性能指数

Fig.3 The performance with different cognitive

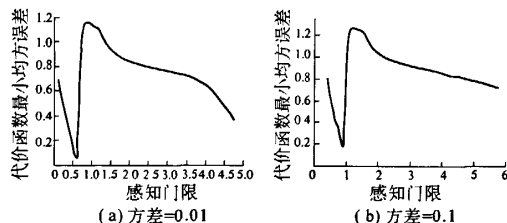


图4 感知门限与代价最小均方误差值的关系

Fig.4 Relationship between threshold and mmse of cost function

### 4 结论

首先引入了感知效率指数 CEI 和频谱代价指数 SCI, 分别作为评价认知系统感知效率和频谱代价的指标, 然后我们提出了门限评价指数 TEI, 通过 TEI 从整体上表征系统的性能, 从而得到了一个关于认知半径  $R$  的 TEI 的表达式. 这样就可以把 SEI 作为一个目标函数, 求得最大的 SEI (Optimized) 也就求得了最优的认知半径  $R$  (Optimized), 根据认知半径  $R$  和感知门限  $P_i$  的关系, 同时也就得到了最优的感知门限  $P_i$  (Optimized). 通过仿真可以看出, 通过该方案得到的  $P_i$  门限能够随着噪声条件的改变而改变, 改善了能量感知方案的性能受噪声变化影响大的弱点, 并且我们选取的门限值可以使得门限评价指数最大, 即系统性能最优, 笔者的方案可以显著提高能量感知方案的性能.

## 参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 201 - 220.
- [2] QING Z, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007 (24): 79 - 89.
- [3] SHELLHAMMER S, SHANKAR S, DANDRA R. Performance of power detector sensors of DTV signals in IEEE 802. 22 WRANs [C]. ACM 1st International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS), 2006: 123 - 140.
- [4] CABRIC D, TKACHENKO A, BROADERSEN R. Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation [C]. ACM 1st International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS), 2006: 15 - 19.
- [5] 刘阿娜. 无线传感器网络能量有效 MAC 协议研究 [D]. 解放军信息工程大学信息工程学院, 2008.
- [6] HALE W K. Frequency assignment: Theory and applications [J]. Proceeding of IEEE, 1980, 68(12): 1487 - 1514.
- [7] SUNG H S, NING H, JAE M K, et al. OFDM signal sensing method based on cyclostationary detection [C]. Of the 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007: 146 - 149.
- [8] NING H, SUNG H S, JONG O J, Jae moun kim. spectrum sensing method for increasing the Spectrum Efficiency in Wireless Sensor network [J]. Ubiquitous Computing Systems, 2006: 478 - 488.

## A Self Adaptive Threshold Setting Method for Spectrum Sensing in CR

YANG Shou-yi, XU Meng-meng, QI Lin, MU Xiao-min

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Spectrum sensing technology is the key technology of the cognitive radio (CR), the reliability and accuracy of the spectrum detection decides whether it will affect the normal communication of the main users and the utilization of spectrum of the cognitive users. Among the many methods of spectrum detection, energy detection is a commonly used method. However, in practice, the uncertainty of noise interference makes the setting of the threshold difficult, causing an interruption of the communication of the main users. In this paper, a random noise adaptive threshold setting strategy is proposed, which uses threshold evaluation index as a measurement of the efficiency of spectrum sensing and the utilization of spectrum resource. The cognitive user can come up with an adaptive setting of spectrum sensing threshold to utilize the spectrum resources more fully and make signal transmission more effectively in different interference environments. The simulation proves that the threshold decided by the algorithm can vary with noise condition, and the performance of energy detection scheme is remarkably improved.

**Key words:** cognitive radio; spectrum sensing; adaptive threshold; threshold evaluation index