

认知无线网络中合作频谱感知机制的优化

郭 晨 彭 涛 王文博

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要: 为了提高检测效率和频谱利用率, 该文对认知无线电中合作频谱感知的感知机制进行了优化。针对信道监测和信道搜索两个不同的感知场景, 分别给出了检测周期、检测时间和搜索时间的选取和优化方法, 并提出了新的信道搜索方式。研究分析和仿真结果可以看出, 合作频谱感知和主动感知方式的引入可以提高检测性能和传输速率, 对感知机制和策略的选取和优化有效地提高系统吞吐量, 降低感知时延和开销, 这样可以提高认知无线网络的性能和灵敏性, 在保证授权用户不被干扰的同时最大化空闲频谱的接入机会。

关键词: 认知无线电; 合作频谱感知机制; 信道搜索; 检测周期; 检测时间

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1525-06

Optimization of Cooperative Spectrum Sensing Mechanisms in Cognitive Radio Networks

Guo Chen Peng Tao Wang Wen-bo

(Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In this paper, the optimization of cooperative spectrum sensing mechanisms in cognitive radio networks is investigated to improve the sensing efficiency and spectrum utilization. The optimization algorithms and strategies of detection period, detection time and searching time are proposed respectively for channel monitoring and channel searching scenarios. Analysis and simulations show that exploitation of cooperative sensing and proactive sensing can improve the sensing performance and transmitting rate. The proposed sensing mechanisms can increase the system throughput, reduce the sensing latency, and thus enhance the sensing efficacy and agility significantly under the interference constraints of primary signal.

Key words: Cognitive radio; Cooperative spectrum sensing mechanism; Channel searching; Detection period; Detection time

1 引言

随着无线通信技术的迅猛发展, 频谱资源紧缺和频谱需求扩大之间的矛盾日益凸显。认知无线电^[1]作为解决这一矛盾的主要技术得到了越来越广泛的关注。在认知无线电系统中, 认知用户需要对周围的频谱环境进行准确和快速的感知, 因此频谱感知技术在认知无线网络中非常重要。频谱感知可看作两层感知机制: 物理层感知和 MAC 层感知。物理层感知主要关注如何通过有效的检测方法检测出授权信号或识别出可用的频谱资源。MAC 层感知关注如何设定感知机制来优化感知性能。目前对频谱感知的研究主要集中在物理层检测技术和 MAC 层用户合作感知, 对感知机制的研究相对较少。

认知无线电的频谱感知包括两个不同的场景: 一种是为了寻找可用频谱资源, 建立传输链路的信道搜索; 一种是为了避免干扰到重新出现的授权用

户的信道监测。针对不同的感知场景, 对感知机制的优化主要包括了信道搜索和信道监测的优化。文献[2-7]对感知机制进行了研究。其中文献[2]和文献[5-7]介绍了几种不同的信道搜索方式。文献[4]对搜索时间进行了优化, 但它认为不同信道的检测时间相同。文献[2]中对检测周期进行了优化, 但只最大化发现空闲频谱的机会, 并没有考虑检测周期的大小对授权系统的干扰影响。文献[3, 4]都优化了检测时间, 但这两种方法都只考虑了非合作频谱感知和被动感知方式, 因而频谱利用率和认知用户的吞吐量都非常低。针对上述问题, 本文首先提出了一种检测周期的优化方法, 综合考虑了检测周期对感知开销、漏失频谱机会和对授权信号干扰的影响。接着对主动感知方式下合作频谱感知的检测时间进行优化, 大大提高了频谱利用率和系统吞吐量。最后, 本文提出了一种针对不同信道状况改变搜索时间的方法来优化信道搜索, 降低搜索空闲信道的平均时

延。

文章具体安排如下：第2节对系统模型和授权信道占用模型进行描述；第3、4节分别介绍了检测周期和检测时间的优化；第5节介绍了信道搜索的优化；第6节总结全文。

2 模型描述

2.1 合作频谱感知系统模型

为了有效地提高感知性能和频谱利用率，本文采用集中式合作频谱感知，即认知网络中存在多个普通的认知用户和作为中心控制器的认知基站。每个认知用户独立的感知频谱，然后再把判决结果发送给基站。基站根据所有认知用户的判决信息，最终决定该频谱是否存在授权用户，并广播该判决。假设所有用户同步，认知用户对频谱进行感知时，其接收信号存在两种假设： \mathcal{H}_1 授权用户存在和 \mathcal{H}_0 授权用户不存在。本文采用能量检测，令 $\bar{\gamma}$ 表示平均信噪比，根据文献[8, 9]可知，在 Rayleigh 衰落信道下，检测概率和虚警概率的关系为

$$P_d = P_f + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{1}{2TW\bar{\gamma}^2}\right) \exp\left(-\frac{2}{\sqrt{2TW\bar{\gamma}}} \operatorname{erfc}^{-1}(2P_f)\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2TW\bar{\gamma}}} - \operatorname{erfc}^{-1}(2P_f)\right) \quad (1)$$

假设网络中有 N 个独立同分布的认知用户，每个用户 $\bar{\gamma}$ 相同。因此每个认知用户的检测概率和虚警概率相同。根据文献[9]，OR 融合准则在 k-out-of-n 中性能最优。认知基站利用 OR 准则进行数据融合，则系统虚警概率、检测概率和漏警概率分别为

$$Q_f = 1 - (1 - P_f)^N \quad (2)$$

$$Q_d = 1 - (1 - P_d)^N \quad (3)$$

$$Q_m = 1 - Q_d \quad (4)$$

2.2 授权信道占用模型

认知无线电中，频谱感知方式分为被动感知和主动感知两种。被动感知方式中，认知用户通常只使用一个空闲信道，当该信道不可用时才去搜索其它信道。主动感知方式中，认知用户通常对多个信道进行周期的感知，这些信道组成一个新的逻辑信道，我们称这些信道为子信道。认知用户可以同时使用逻辑信道上所有空闲的子信道进行数据传输，当所有子信道都处于忙状态，认知用户才终止传输并切换到信道搜索状态。虽然主动感知方式需要检测多个子信道，能量和时间开销比被动感知方式有所增大，但它可以提高传输速率并减少认知用户被迫搜索空闲信道的概率^[2]，因此，本文主要考虑主

动感知方式下的感知优化问题。

频谱感知的目的是为了检测授权信道的可用性，通常定义授权信道占用为 ON/OFF 随机过程，其中 ON 表示信道忙，OFF 表示信道空闲，ON 过程和 OFF 过程独立同分布。ON 过程和 OFF 过程交替出现，ON 过程时认知用户退避以避免干扰到授权信号；OFF 过程时它就可以使用该授权信道。假设共有 M 个授权信道，每个信道 ON 过程和 OFF 过程的持续时间 T_{ON} 和 T_{OFF} 独立同分布。通常情况下，假设第 i 个授权信道 ($i = 1, \dots, M$) 的 T_{ON}^i 和 T_{OFF}^i 是服从均值为 $1/\mu_{\text{ON}}^i$ 和 $1/\mu_{\text{OFF}}^i$ 的指数分布。令 u_i 表示第 i 个授权信道忙的概率，则

$$u_i = \frac{E(T_{\text{ON}}^i)}{E(T_{\text{ON}}^i) + E(T_{\text{OFF}}^i)} = \frac{\mu_{\text{OFF}}^i}{\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i} \quad (5)$$

在实际系统中，认知用户可以通过很多方法得到 u_i 。文献[2]中介绍了最大似然估计法和置信区间估计法。由于篇幅问题，这里不再介绍信道参数的估计方法。

3 检测周期优化

本文采用主动感知方式对每个子信道进行周期的感知。检测周期太大，可能造成对授权信号的干扰或者浪费一些可能接入的频谱机会；检测周期太短，又会造成感知开销较大。因此每个子信道检测周期的选择非常重要。显然每个子信道检测周期的选择跟该信道上授权信号的活动有很大的关系，因此，我们先分析授权信号的活动对检测周期的影响。

令 $T_I^i(t)$ 表示子信道 i 在当前时刻 t' 为 0(OFF) 状态，在 $(t', t' + t)$ 内信道忙的平均时间，即子信道 i 在 t 时间内因未及时检测而对再次出现的授权用户造成干扰的平均时间。同样，令 $T_M^i(t)$ 表示子信道 i 在当前时刻 t' 为 1(ON) 状态，在 $(t', t' + t)$ 内信道空闲的平均时间，即子信道 i 在 t 时间漏失的接入机会的平均时间。则根据更新理论^[10]和拉氏变换可以得到

$$T_I^i(t) = u_i \left(t - \frac{1 - e^{-(\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i)t}}{\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i} \right) \quad (6)$$

$$T_M^i(t) = (1 - u_i) \left(t - \frac{1 - e^{-(\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i)t}}{\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i} \right) \quad (7)$$

令 T_p^i 表示第 i 个子信道的检测周期， $MO_i(T_p^i)$ 和 $I_i(T_p^i)$ 分别表示第 i 个子信道在一个检测周期 T_p^i 内平均漏失频谱机会和干扰授权用户的时间比例。则

$$\begin{aligned}
MO_i(T_P^i) &= \frac{1}{T_P^i} \left(u_i Q_{d,i} T_M^i(T_P^i) \right. \\
&\quad \left. + (1 - u_i) Q_{f,i} (T_P^i - T_I^i(T_P^i)) \right) \\
&= (1 - u_i) \left(Q_{f,i} + u_i (Q_{d,i} - Q_{f,i}) \right) \\
&\quad \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-(\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i) T_P^i}}{(\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i) T_P^i} \right) \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_i(T_P^i) &= \frac{1}{T_P^i} \left((1 - u_i) (1 - Q_{f,i}) T_I^i(T_P^i) \right. \\
&\quad \left. + u_i (1 - Q_{d,i}) (T_P^i - T_M^i(T_P^i)) \right) \\
&= u_i \left(Q_{m,i} + (1 - u_i) (Q_{d,i} - Q_{f,i}) \right) \\
&\quad \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-(\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i) T_P^i}}{(\mu_{\text{ON}}^i + \mu_{\text{OFF}}^i) T_P^i} \right) \quad (9)
\end{aligned}$$

从式(8)和式(9)可以看出, $MO_i(T_P^i)$ 和 $I_i(T_P^i)$ 均是 T_P^i 的单调递增函数。因此平均漏失频谱机会和干扰授权用户的时间比例随着检测周期的增大而增大。

认知用户必须服从“传输前监听”原则, 因此当某个子信道进行感知时, 其它子信道必须停止传输。假设有 K 个子信道的检测周期向量为 $\mathbf{T}_P = (T_P^1, T_P^2, \dots, T_P^K)$, T_d^i 是子信道 i 的检测时间。令 $SO_i(\mathbf{T}_P)$ 表示子信道 i 在 T_P^i 内因感知而浪费的空闲频谱机会时间比例, 则

$$\begin{aligned}
SO_i(\mathbf{T}_P) &= \left((1 - u_i) (1 - Q_{f,i}) + u_i Q_{m,i} \right) \\
&\quad - MO_i(T_P^i) \sum_{k=1}^K \left(\frac{T_d^k}{T_P^k} \right) \quad (10)
\end{aligned}$$

为提高频谱利用率并降低对授权用户的干扰, 我们综合考虑了漏失频谱机会, 感知开销和干扰时间, 通过对检测周期的优化得到最小的检测代价。信道检测周期的优化方程为

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_P^* &= \arg \min \left(\lambda_1 \sum_{i=1}^K (MO_i(T_P^i) + SO_i(\mathbf{T}_P)) \right. \\
&\quad \left. + \lambda_2 \sum_{i=1}^K (I_i(T_P^i)) \right) \quad (11)
\end{aligned}$$

其中 λ_1 和 λ_2 是权重因子, 由系统设定。由于 $\sum_{i=1}^K (MO_i(T_P^i) + SO_i(\mathbf{T}_P))$ 项表示平均浪费的频谱机会, $\sum_{i=1}^K (I_i(T_P^i))$ 项表示对授权信号的平均干扰时间。因此 λ_1 和 λ_2 的选择与系统的要求有关, λ_1 较大可以提高系统的频谱利用率, λ_2 较大可以降低对授权信号的干扰。

设有 10 个认知用户合作, 感知 3 个子信道, 每个子信道的平均信噪比为 -10 dB, 系统虚警概率设为 0.1。子信道占用参数分别为 $(\mu_{\text{OFF}}^i, \mu_{\text{ON}}^i)_{i=1, \dots, 3} = (1.5, 0.8; 0.5, 2.5; 2.0, 1.0)$ 。每个子信道的带宽和检测时间设为 $W = 100$ kHz 和 $T_d = 3$ ms, $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ 。图 1 给出了不同检测周期下, 固定检测周期的方法得到的检测代价(即式(11)中优化函数值)与本文提出的最优检测周期产生的检测代价的比较。由图 1 可知不同的检测周期下, 固定周期的检测代价均大于本文方法的检测代价。还应该注意, 固定周期方法得到的最低代价也高于优化方法得到的检测代价。这是由于固定方法对每个子信道都设定相同的检测周期, 因此无法得到最低的检测代价。

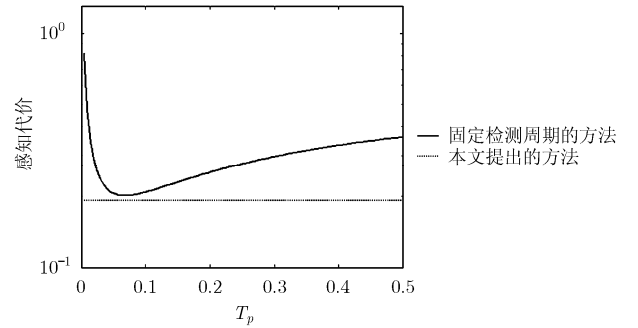


图 1 固定检测周期与最优检测周期的检测代价比较

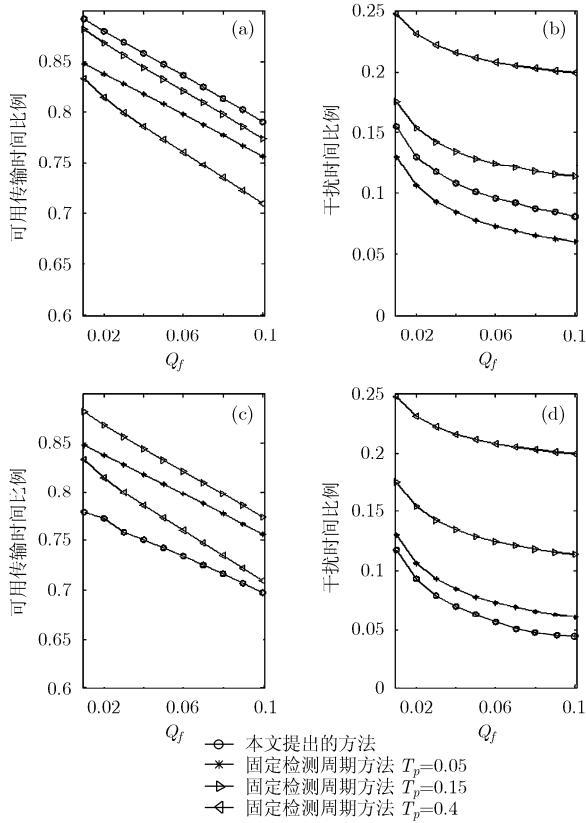
考虑 λ_1 和 λ_2 对系统的影响, 先定义两个度量: 有效传输时间比例 AR 和干扰时间比例 IR, AR=

$$\begin{aligned}
AR &= \frac{\sum_{i=1}^K (1 - u_i Q_{d,i} - (1 - u_i) Q_{f,i} - MO_i(T_P^i) - SO_i(T_P))}{\sum_{i=1}^K (1 - u_i Q_{d,i} - (1 - u_i) Q_{f,i})} \quad (12)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
IR &= \frac{\sum_{i=1}^K I_i(T_P^i)}{\sum_{i=1}^K (1 - u_i Q_{d,i} - (1 - u_i) Q_{f,i})} \quad (13)
\end{aligned}$$

图 2 给出了不同 λ_1 和 λ_2 下, AR 和 IR 与系统虚警概率 Q_f 的关系。本文提出的优化方法与不同 T_P 的固定检测周期方法在图中进行比较。

图 2(a), 2(b)考虑的是频谱利用率需求较高的系统, $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0.1$ 。可以看出, 本文提出的优化方法可以得到最大的有效传输时间比例, 干扰时间也相对较小。图 2(c), 2(d)考虑的是干扰约束较紧的系统, $\lambda_1 = 0.1$, $\lambda_2 = 1$ 。可以看出, 本文提出的优化方法可以得到最小的干扰时间比例, 但只能

图2 AR和IR与 Q_f 的性能曲线

牺牲有效传输时间来降低对授权信号的干扰时间。从图2我们可以看出，干扰时间比例随着检测周期的增大而增大，但有效传输时间比例并不随着检测周期的变化而单调变化。这是因为有效传输时间考虑了频谱机会漏失和感知开销的折衷。另外，AR和IR随着 Q_f 的增加而下降，因为 Q_f 增加意味着干扰约束变紧，因此AR和IR都会下降。

4 检测时间优化

检测时间的优化本质上是对检测性能和检测开销的折衷。由于主动感知方式下认知用户需要对多个子信道进行周期检测，因此又要考虑检测子信道个数的优化。增加子信道个数可以提高传输速率，但会增加感知开销。本文通过最大化平均吞吐量，对检测子信道个数和每个子信道检测时间进行优化。在本文中，检测开销只由认知用户检测信道产生，用户合作开销忽略不计。假设一个信道上绑定了 K 个子信道，对第 i 个子信道，合作感知下宣称忙的概率 $Q_{b,i} = u_i Q_{d,i} + (1 - u_i) Q_{f,i}$ ，因此 K 个子信道全宣称忙的概率为 $Q_{\text{search}} = \prod_{i=1}^K Q_{b,i}$ 。令 r_i 表示认知用户第 i 个子信道上传输数据的吞吐量。则优化目标函数为

$$\left. \begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^K r_i \left(\left(1 - Q_{b,i}(T_d^i) \right) \left(1 - \sum_{k=1}^K \frac{T_d^k}{T_P^k} \right) \right) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K T_d^k \leq T_P^i, \quad i = 1, \dots, K \\ & Q_{\text{search}} = \prod_{i=1}^K Q_{b,i}(T_d^i) \leq \beta \\ & Q_{d,i}(T_d^i) \geq \Gamma_i, \quad i = 1, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中 T_P^i 避免检测总时间超过检测周期。 β 避免认知用户频繁搜索新空闲信道的发生。 Γ_i 是检测性能约束，确保了授权用户的QoS。 β 和 Γ_i 均与系统要求有关，由系统设定。

由于 $Q_{d,i}(T_d^i)$ ， $Q_{f,i}(T_d^i)$ 均是关于 T_d^i 的增函数，即 $Q_{b,i}(T_d^i)$ 对 T_d^i 单调递增，因此式(14)中的优化目标函数对 T_d^i 单调递减，与子信道个数 K 无关。因此，联合优化问题可以分为两个独立的优化问题，首先对 T_d^i 进行优化，然后对 K 进行优化。首先，在满足每个子信道 Γ_i 要求的前提下，检测时间越小越好。因此每个子信道的最佳检测时间为

$$T_{d_opt}^i = \min(Q_{d,i}^{-1}(\Gamma_i), T_P^i) \quad (15)$$

$Q_{d,i}^{-1}(\cdot)$ 是 $Q_{d,i}(\cdot)$ 的反函数。确定子信道的最佳检测时间后，再对子信道个数进行优化，即

$$K_{\text{opt}} = \arg \max_{\substack{Q_{\text{search}}^{-1}(\beta) \leq K \\ \sum_{k=1}^K T_d^k \leq T_P^i}} \sum_{i=1}^K r_i \left(\left(1 - Q_{b,i} \right) \left(1 - \sum_{k=1}^K \frac{T_{d_opt}^k}{T_P^k} \right) \right) \quad (16)$$

由式(16)可以看出，优化目标函数是感知开销和可用频谱资源的折衷。子信道个数的增加会增加感知开销，但也会增加可用信道个数。通常子信道为相邻信道，情况较为相似。为了方便分析，假设每个子信道的各个参数均相同，则式(16)可以近似为

$$\begin{aligned} K_{\text{opt}} &= \arg \max_{\substack{\frac{\ln \beta}{\ln Q_b} \leq K \leq \frac{T_P}{T_d} \\ \sum_{k=1}^K T_d^k \leq T_P^i}} Kr \left(\left(1 - Q_b \right) \left(1 - K \frac{T_d}{T_P} \right) \right) \\ &= \max \left(\left\lfloor \frac{T_P}{2T_d} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{\ln \beta}{\ln Q_b} \right\rfloor \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。因此在满足约束条件下，当子信道情况相同时，最佳子信道个数只与 T_P/T_d 有关。这种情况下，检测周期的一半时间用来感知子信道可得到最大的平均吞吐量。

假设认知网络是饱和网络，即始终需要发送数据。子信道占用率随机给定。图3(a)和3(b)分别给出了检测时间和子信道个数与吞吐量效率的曲线。 $\Gamma = 0.99$ ， $\beta = 0.01$ ， K 表示子信道个数。从图3(a)可以看出，不同子信道个数条件下，吞吐量效率随着检测时间的增加而减小。 t_d 很小时曲线没有变化

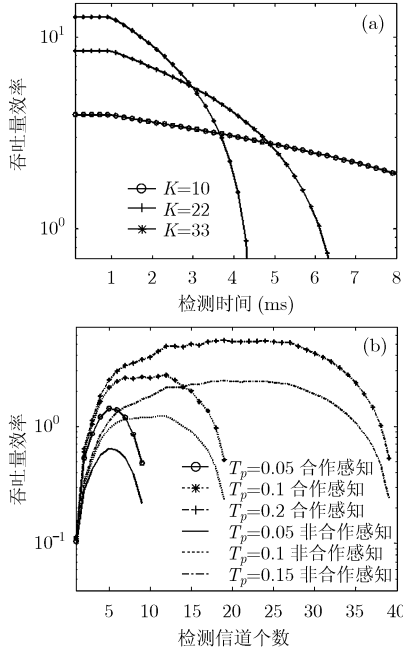


图 3 检测时间和子信道个数与吞吐量效率性能曲线

是 Γ 约束的影响。图 3(b) 是检测时间优化之后, 检测子信道个数与吞吐量效率的曲线。图中同时给出了非合作方式的曲线作为比较。可以看出, 存在最佳的子信道个数使得吞吐量效率最大。不同检测周期下最佳子信道个数大约都是一个检测周期内允许的最多子信道个数的 1/2。此外, 合作频谱感知的吞吐量效率明显高于非合作感知。

5 信道搜索过程的优化

前文中介绍过, 当所有子信道被检测出全忙时, 认知用户就不得不停止传输而去搜索新的空闲信道, 这个过程称为信道搜索过程。认知用户一旦搜索到空闲信道, 信道搜索过程就停止。目前对信道搜索的研究主要集中于对搜索方式的研究, 但并没有考虑对每个搜索信道的检测时间进行优化。本文通过对每个搜索信道检测时间的优化, 来最小化平均搜索时间。我们采用一般常见的连续搜索方式, 即认知用户依次选择信道进行检测, 如果当前选择的信道被检测出忙, 那么再选择下一个信道进行检测。

在文献[4]中, 作者通过最小化平均搜索时间来优化信道检测时间, 其优化函数为

$$\begin{aligned} \bar{T}_s &= \arg \min \left\{ \frac{T_s}{(1 - P_f(T_s))(1 - u)} \right\} \\ \text{s.t. } T_s &\geq t_0; P_d \geq \Gamma \end{aligned} \quad (18)$$

其中 u 表示信道的占用率, 约束条件保证了检测性能以及搜索的信道至少有一个空闲。但文献[4]中并

没有考虑认知用户的合作感知, 并且每个信道的检测时间也相同。但对每个授权信道来说, 信道占用概率和其它条件并不相同, 对每个信道检测时间的选取也应不同, 因此, 本文对每个信道的检测时间乘以一个权值来进行优化, 即

$$T_s^i = w_i T_s \quad (19)$$

其中 T_s^i 和 w_i 分别表示第 i 个授权信道的检测时间和检测时间权值。则平均搜索时间为

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{search}} &= \sum_{k=1}^{M-1} \left(\sum_{i=1}^k T_s^i (1 - Q_{b,k}(T_s^k)) \prod_{j=1}^{k-1} (Q_{b,j}(T_s^j)) \right) \\ &= T_s \sum_{k=1}^{M-1} \left(\sum_{i=1}^k w_i (1 - Q_{b,k}(w_k)) \prod_{j=1}^{k-1} (Q_{b,j}(w_j)) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

则最优的 T_s 为

$$\begin{aligned} \hat{T}_s &= \arg \min T_s \sum_{k=1}^{M-1} \left(\sum_{i=1}^k w_i (1 - Q_{b,k}(w_k)) \prod_{j=1}^{k-1} Q_{b,j}(w_j) \right) \\ \text{s.t. } \prod_{j=1}^{M-1} Q_{b,j}(w_j) &\leq \xi; Q_{d,i}(w_i) \geq \Gamma_i, i = 1, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (21)$$

其中 ξ 保证至少有一个授权信道空闲的概率足够高; Γ_i 确保了第 i 个授权信道的 QoS。

考虑每个信道 w_i 的选择与该信道的占用率有关, 令 $w_i = 1 - u_i$, 即检测时间权值等于信道空闲的概率。这是因为, 当 u_i 较小时说明该信道经常处于空闲状态, 这种情况下增加检测时间可以降低虚警概率, 从而提高该信道被检测为空闲的概率; 反之当 u_i 较大时说明该信道经常处于忙状态, 因此降低检测时间以避免搜索时间的浪费。

假设共有 20 个授权信道, 信道带宽均为 500 kHz。图 4 给出了不同 Γ 和 ξ 约束条件下, 本文提出的优化方法, 文献[4]中给出的优化方法以及固定检测时间的方法 ($T_s = 0.4$ ms) 得到的平均搜索时间性能曲线。其中对固定检测时间方法不存在约束。从图中可以看出, 本文给出的方法的平均搜索时间小于文献[4]和固定方法。优化检测时间的方法又优于固定检测时间的方法。由此可见, 优化检测时间并且根据信道占用率的不同改变检测时间的搜索方法可以更快地搜索出空闲信道。另外随着 Γ 的增大或 ξ 的缩小, 平均搜索时间都会增加, 这是因为约束条件越紧就需要越长的检测时间来保证检测的可靠性。

6 结束语

本文对认知无线网络中合作频谱感知机制进行了优化, 包括信道监听过程中的检测周期和检测时间的优化以及信道搜索过程中检测时间的优化。

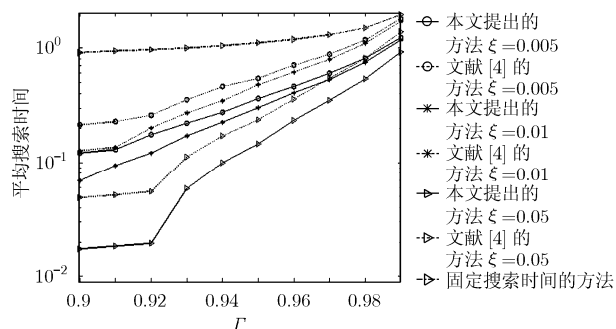


图4 检测概率门限与平均搜索时间性能曲线

文中利用合作感知来提高检测性能和频谱利用率，并采用主动感知方式提高传输速率。对检测周期的优化综合考虑了感知开销、漏失频谱机会和对授权信号干扰三方面。对检测时间的优化考虑了对每个子信道检测时间和子信道个数的联合优化。最后，本文提出了一种根据信道占用率改变检测时间的信道搜索方法来降低平均搜索时间。通过理论分析和仿真表明，本文提出的优化算法在保护授权信号不被干扰的前提下，可以提高空闲频谱的利用率，缩短寻找空闲频谱的时延，从而提高频谱感知的性能。

参考文献

- [1] Mitola J and Maguire G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal [J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
 - [2] Kim H and Shin K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(5): 533-545.
 - [3] Wang P, Xiao L, and Zhou S, *et al.* Optimization of detection time for channel efficiency in cognitive radio systems [C]. WCNC 2007. Hong Kong, China, Mar. 11-15, 2007: 111-115.
 - [4] Ghasemi A and Sousa E S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks [C]. Consumer Communications and Networking Conference, 2007, CCNC 2007. Las Vegas, NV, USA, Jan. 11-13, 2007: 1022-1026.
 - [5] Luo L and Roy S. Analysis of search schemes in cognitive radio [C]. Networking Technologies for Software Define Radio Networks, 2007. Vancouver, British Columbia, Canada, 2007: 647-654.
 - [6] Zhao Q and Tong L, *et al.* Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework [J]. *IEEE Journal on Selected Area in Communication*. 2007, 25(3): 589-600.
 - [7] Luo L and Roy S. A two-stage sensing technique for dynamic spectrum access[C]. ICC 2008. Beijing, China, May 19-23, 2008: 987-991.
 - [8] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. *Proc. IEEE*, 1967, 55(4): 523-531.
 - [9] Ghasemi A and Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: The cooperation-processing tradeoff [J]. *Special issue of Wireless Communications and Mobile Computing on Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*, 2007, 7(9): 1049-1060.
 - [10] Ross S M. Introduction to Probability Models [M]. 9th edition, New York, Academic Press, 2006: 417-492.
- 郭晨: 女, 1981年生, 博士生, 研究方向为认知无线电频谱感知技术等。
- 彭涛: 男, 1976年生, 讲师, 博士, 研究方向为3G网络及其长期演进系统(LTE)、认知无线电技术、软件无线电技术等。
- 王文博: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学电信工程学院院长, 研究方向为未来移动通信系统的关键技术、通信信号处理等。