

# 认知无线电中基于感知时间和 $K$ 秩准则的优化

李红, 齐丽娜

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 认知无线电系统中, 通过次用户间的协作频谱感知可以大大增加系统的检测概率, 但同时也增加了系统的能量消耗。为了提高认知无线电系统的综合性能, 文中分别对系统的错误概率和能量效率进行优化。文中次用户采用  $K$  秩融合准则来进行协作, 所以影响系统性能的参数可以是  $K$ 、参与协作的次用户数  $N$  和感知时间  $\tau$ 。而优化问题可以分为两个阶段: 第一阶段, 给定  $\tau$ , 通过使错误概率最小来得到最优的  $K$  和  $N$ ; 第二阶段, 给定  $K$  和  $N$ , 通过使能量效率最小来得到最优的  $\tau$ 。文中利用数学推导, 证明了两个优化问题均存在最优值, 最后再利用联合迭代算法可以得到综合最优的  $K$ 、 $N$  和  $\tau$ 。仿真结果验证了之前的理论分析, 并表明在最优参数下系统的综合性能明显提高。

**关键词:** 认知无线电; 频谱感知; 感知时间; 能量效率

中图分类号: TN911.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)12-0186-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.12.042

## Joint Optimization Based on Sensing Time and $K$ -rank Criteria in Cognitive Radio

LI Hong, QI Li-na

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Although cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks can greatly increase the detection probability, it increases the energy consumption of the system. In order to improve the comprehensive performance of the system, the false probability and the energy efficiency is optimized. In this paper, consider the case where the secondary users cooperatively sense a channel using  $K$ -rank criteria ( $K$ -out-of- $N$  fusion rule) to determine the presence of the primary user, so the performance of the system depends on  $K$ ,  $N$  and sensing time ( $\tau$ ). The process of solving the optimization problem is divided into two stages in this paper. In the first stage, given the sensing time,  $K$  and  $N$  are optimized by minimizing the false probability. In the next stage, given  $K$  and  $N$ , the sensing time is optimized by minimizing the energy efficiency. In this paper, two optimization problems are proved to have the optimum value by employing the mathematical derivation. The optimal  $K$ ,  $N$  and  $\tau$  through the joint iterative algorithm can be obtained. Computer simulations verify the theory analysis and show the significant improvement in the performance of system when the parameters are jointly optimized.

**Key words:** cognitive radio; spectrum sensing; sensing time; energy efficiency

## 0 引言

随着新的无线通信业务的激增, 频谱资源已经成为了一个亟待解决的问题。然而, 目前频谱资源的缺乏在很大程度上是由于低效率的固定频谱分配策略引起的, 这一点已被美国联邦通信委员会 (FCC) 最新的研究证实<sup>[1]</sup>。认知无线电 (CR) 技术<sup>[2]</sup> 是解决目前授权频谱低利用率的有效手段, 其要求在不对主用户 (Primary Users, PUs, 即授权用户) 产生干扰的前提下,

允许次用户 (Secondary Users, SUs, 即未授权用户) 利用频谱空洞接入授权的频段。为了不对次用户通信造成干扰, 次用户在接入信道之前就需要进行频谱检测来识别“频谱空洞”。由于多径效应、阴影衰落和隐藏终端等问题的影响, 单个次用户频谱检测的检测性能不理想, 这使得联合多个次用户的协作频谱感知技术逐渐成为频谱感知的发展方向<sup>[3]</sup>。

协作频谱检测可以分为两个阶段: 本地检测和融

收稿日期: 2015-03-25

修回日期: 2015-07-01

网络出版时间: 2015-11-19

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划项目 (2013CB329005); 国家自然科学基金资助项目 (61471201)

作者简介: 李红 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为认知无线电、宽带频谱通信技术; 齐丽娜, 副教授, 研究方向为认知无线网络中频谱资源相关理论、宽带无线通信技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20151119.1112.064.html>

合阶段。

(1) 每个次用户利用频谱检测,做出本地判决。目前的检测技术有匹配滤波器法、能量检测和循环特征检测等,其中因为能量检测检测时不需要知道用户的先验信息,是一种非相干检测,易于实现,所以使用较普遍。

(2) 所有的次用户将本地的检测结果发送至融合中心(FC),然后 FC 将本地检测结果进行融合,做出最终的判决。

融合时的融合准则主要有三种:“或”、“与”和“ $K$ 秩”准则。其中  $K$  秩准则是指在  $N$  个次用户中,若有  $K$  个或大于  $K$  个次用户判定主用户存在,则融合中心才判定主用户存在,其是一种通用的融合准则,“或”准则和“与”准则是其中的两个特例。

虽然协作频谱感知提高了检测性能,但也产生了较高的能量开销。当次用户的能量有限时,能量效率就成为了通信系统设计的一个重要标准。本地检测的感知时间  $\tau$  是影响能量效率的一个因素<sup>[4-6]</sup>。对于固定长度的帧结构来说, $\tau$  越长,可供次用户用来传输数据的时间就越短,其影响着整个系统的检测概率、吞吐量和能量消耗。同时,融合准则  $K$  秩准则中的  $K$  和  $N$  同时也影响着检测概率、吞吐量和能量消耗。文献[7]研究  $K$  和  $\tau$  对系统吞吐量和虚警概率的影响;文献[8]研究了  $K$  对系统吞吐量和检测概率的影响,但均未考虑能耗;文献[9]中研究了  $N$  和  $\tau$  对系统的错误概率和吞吐量的影响,未考虑参数  $K$  对系统性能的影响也未考虑系统的能耗;文献[10]中研究了  $K$  和  $N$  对错误概率和能量效率的影响,但没有加入  $\tau$  的考虑。

所以为了研究  $K$ 、 $N$  和  $\tau$  对 CR 系统性能的影响,并找出最优的参数来使系统性能最佳,文中联合考虑了错误概率和能量效率两个优化标准,通过使错误概率最小和能量效率最大,求出最优的  $K$ 、 $N$  和  $\tau$ 。

## 1 系统模型

文中考虑的 CR 系统中,存在一个主用户、一个 FC 和  $M$  个次用户。假设实际参加频谱感知的次用户数为  $N$ ,其中每个次用户通过本地的能量检测产生 1 bit 的本地判决结果,然后依次通过控制信道将本地的判决结果发送至 FC 进行数据融合。在文中,FC 采用  $K$  秩融合准则进行数据融合并做出最后的判决。

协作频谱感知的一般模型如图 1 所示。

频谱感知的本质可以表示为一个二元假设检验问题。分别用  $H_0$  和  $H_1$  表示主用户不存在和存在的两种假设。那么第  $i$  个次用户的接收信号可以表示为:

$$y_i(n) = \begin{cases} u_i(n) & H_0 \\ h_i(n)s(n) + u_i(n) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $y_i(n)$  表示第  $i$  个次用户的接收信号; $u_i(n)$  表示信道中的加性高斯白噪声; $s(n)$  表示的是主用户的发射信号; $n$  表示的是每个接收信号的第  $n$  个采样点; $h_i(n)$  表示第  $i$  个次用户与主用户之间信道的信道增益。文中假设感知信道是 AWGN 信道,所以  $h_i(n)$  是常数; $i = 1, 2, \dots, N$ 。

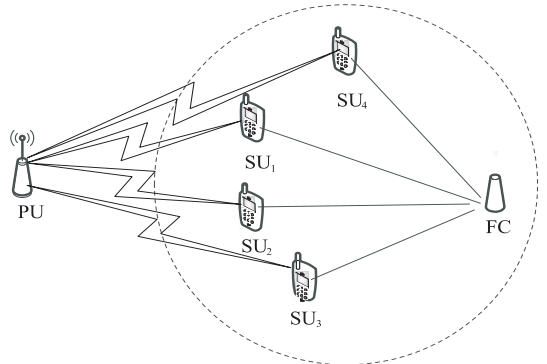


图 1 协作频谱感知模型

因为在 CR 系统中,频谱感知过程通常采用的是周期检测,所以系统的帧结构如图 2 所示。

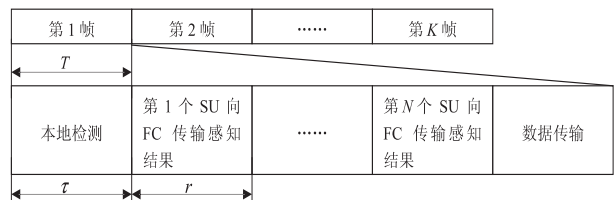


图 2 CR 系统中的帧结构

由图 2 可以看出,CR 系统中每帧的帧结构主要由三部分组成:第一部分是次用户进行本地检测,第二部分是次用户向 FC 传输判决结果,第三部分是次用户占用授权信道进行数据传输。图中, $T$  表示的是每帧的时间长度; $\tau$  表示次用户的本地感知时间; $r$  表示每个次用户向 FC 传输判决结果所用时间。

## 2 系统参数优化

### 2.1 基于能量检测的协作频谱感知

每个次用户采用的本地检测算法不同可导致频谱感知性能的不同。当主用户的先验知识未知时,次用户采用能量检测方法进行频谱检测时可以获得较好的性能。此时,第  $i$  个次用户的检测概率  $P_{d,i}$  和虚警概率  $P_{f,i}$  可以表示为:

$$P_{d,i}(\tau) = P(Y_i \geq \lambda_i | H_1) =$$

$$Q\left(\left(\frac{\lambda_i}{\sigma_{u,i}^2} - \gamma_i - 1\right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma_i + 1}}\right) \quad (2)$$

$$P_{f,i}(\tau) = P(Y_i \geq \lambda_i | H_0) = Q\left(\left(\frac{\lambda_i}{\sigma_{u,i}^2} - 1\right) \sqrt{\tau f_s}\right) \quad (3)$$

其中, $\lambda_i$  是每个次用户的能量检测中的阈值; $\sigma_{u,i}^2$

是主用户与第  $i$  个次用户之间信道的加性噪声的方差;  $f_s$  是每个次用户的接收信号的采样频率。

假设次用户之间的距离远远小于主用户和次用户之间的距离。所以每个次用户接收到的信号经过了一样的信道衰落,所以各个次用户接收信号中  $\lambda_i, \gamma_i$  和  $\sigma_{u,i}^2$  分别相同。所以各个次用户的检测概率和虚警概率分别相同,可以用  $P_d$  和  $P_f$  来表示。

每个次用户做出本地检测后,用一个比特来表示判决结果。其中 1 表示检测到主用户,而 0 表示没有检测到主用户。FC 将次用户传送过来的判决结果根据  $K$  秩融合准则进行数据融合并做出最后的判决,当各个次用户的判决结果的和大于  $K$  时,判定主用户存在,否则,判定主用户不存在。采用  $K$  秩融合准则的 CR 系统的全局检测概率和全局虚警概率可以表示为:

$$Q_d(\tau, K, N) = \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} P_d^i (1 - P_d)^{N-i} \quad (4)$$

$$Q_f(\tau, K, N) = \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} P_f^i (1 - P_f)^{N-i} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可以看出,CR 系统中的  $K$ 、 $N$  和  $\tau$  三个参数变量,影响着本地检测的检测精确度,这就导致了它们也影响着系统的各个性能标准,比如,系统的错误概率、吞吐量和能耗等。所以为了提高系统性能,下面根据两个不同的标准分别对三个参数进行优化。

## 2.2 融合准则中 $K$ 和 $N$ 的选择

在 CR 系统中,可以用错误概率来表示系统的感知性能。错误概率是指进行协作感知后系统总的错误概率,其主要由两部分组成:一部分是当主用户存在时,感知判决结果是主用户不存在的概率;另一部分是当主用户不存在时,感知判决结果却是主用户存在的概率。错误概率的表达式为:

$$P_e(K, N) = P(H_0)Q_f + P(H_1)(1 - Q_d) \quad (6)$$

易知错误概率  $P_e$  越小,系统的检测性能越高。而为了保证主用户的通信质量,则需本地检测的检测概率大于一个最低要求。

对于给定的  $\tau$ ,则错误概率只与  $K$  和  $N$  有关。根据文献[11]优化问题可以表示为:

$$\min_{K, N} P_e(K, N) = P(H_0)Q_f + P(H_1)(1 - Q_d) \quad (7)$$

$$\text{s.t. } P_d \geq \delta, 1 \leq K \leq N$$

其中,  $N$  是一个 1 到  $M$  之间的任意整数;  $K$  是一个 1 到  $N$  之间的任意整数。而对于一个给定的  $N$ ,当  $K$  值越大则  $Q_f$  和  $Q_d$  越小,而  $Q_f$  越小导致  $P_e$  越小,  $Q_d$  越小导致  $P_e$  越大。所以可以通过对  $K$  进行优化来得到最小的  $P_e$ 。

通过目标函数  $P_e(K, N)$  对  $K$  求偏导,从而得到最

优的  $K(K_{\text{opt}})$ 。

$$\frac{\partial P_e}{\partial K} = P_e(K+1) - P_e(K) =$$

$$P(H_1) \binom{N}{K} P_d^K (1 - P_d)^{N-K} -$$

$$P(H_0) \binom{N}{K} P_f^K (1 - P_f)^{N-K} \quad (8)$$

当  $\frac{\partial P_e}{\partial K} = 0$  时的  $K$  是最优的  $K_{\text{opt}}$ ,通过数学推导可以求解出最优值。当给定  $N$  时  $K$  的最优值如下式:

$$K_{\text{opt}} = \frac{\ln \frac{P(H_0)}{P(H_1)} + M \ln \left( \frac{1 - P_f}{1 - P_d} \right)}{\ln \left( \frac{P_d(1 - P_f)}{P_f(1 - P_d)} \right)} \quad (9)$$

而当给定  $K$  时,参与协作的次用户  $N$ ,同样影响着错误概率的变化。但是由于  $N$  只取 1 到  $M$  之间的整数,所以可以通过遍历搜索的方法,使  $N$  遍历 1 到  $M$  中的所有整数,然后从中找出最小的  $P_e$  以及取得此值的  $N$ (即  $N_{\text{opt}}$ ),再根据式(9)得出对应的  $K_{\text{opt}}$ 。

## 3 基于感知时间和 $K$ 、 $N$ 的联合优化

CR 系统的能量效率是指吞吐量和能耗的比值。其中系统吞吐量是指单位时间内传输的比特数,而系统能耗由感知能耗和数据传输能耗构成,其中的数据传输能耗又包括次用户向 FC 传送判决结果的能耗和次用户占用授权信道传输信息的能耗。当  $K$  和  $N$  给定时,系统的吞吐量和能耗只与感知时间  $\tau$  有关,其表达式分别为:

$$R(\tau) = P(H_0)(1 - Q_f)(T - Nr - \tau)C \quad (10)$$

$$E(\tau) = N(E_s\tau + E_t r) + (P(H_0)(1 - Q_f) + P(H_1)(1 - Q_d))(T - Nr - \tau)E_l \quad (11)$$

其中,  $C$  是授权信道的信道容量;  $E_s$  是每个次用户进行频谱感知时单位时间内所消耗的能量;  $E_l$  是次用户传输数据时单位时间内所消耗的能量。

系统的能量效率的表达式为:

$$\eta(\tau) = \frac{R(\tau)}{E(\tau)} \quad (12)$$

由式(2)和式(3)可以发现,随着感知时间的增大,检测概率和虚警概率逐渐减小。CR 系统中,必须保证主用户可以正常通信,所以检测概率越大越好,此时则要求感知时间足够小。而为了使系统的吞吐量增大,则是虚警概率越小越好,此时则要求感知时间足够大。由式(11)也可以看出,要想能耗减小,需要全局虚警概率和检测概率增大,此时则要求感知时间足够小。为了在上面几点作出折中,给出了下面的优化模型:

$$\begin{aligned} & \max_{\tau} \eta(\tau) \\ & \text{s. t. } P_d \geq \delta, 0 \leq \tau \leq T - Nr \end{aligned} \quad (13)$$

通过对能量效率函数进行分析, 可以得出:

定理:  $\eta(\tau)$  在区间  $[0, T - Nr]$  范围内是一个单峰函数, 其在范围内一定存在最大值。

根据文献[7]上述定理的证明可以等价对下列三个条件的证明。

- (1)  $\nabla \eta(0) > 0$ 。
- (2)  $\nabla \eta(T - Nr) < 0$ 。
- (3)  $\eta(\tau)$  是单峰函数。

由式(12)可以推导出  $\eta(\tau)$  的导数为:

$$\nabla \eta(\tau) = \frac{(\nabla R)E - R \nabla E}{E^2} \quad (14)$$

(1) 当  $\tau = 0$  时, 对于任意的  $K$  和  $N$ , 有:

$$P_f(0) = Q_f(0) = \frac{1}{2}, \nabla P_f(0) = -\infty,$$

$$Q_f(0) = \frac{1}{2^N} \sum_{i=K}^N C_N^i, \nabla Q_f(0) = \nabla P_f \frac{N}{2^{N-1}} \sum_{i=K}^N C_N^i = -\infty$$

对比式(4)和式(5), 可以看出  $Q_d$  和  $Q_f$  是类似的。所以可以知道  $Q_d$  在  $\tau = 0$  处的函数值和导数值分别与  $Q_f$  的相同。从而有:

$$(\nabla R)E - R \nabla E = -P_0 C \{ N(1 - Q_f) [ E_f r + E_s (T - Nr) ] + P_1 E_f (T - Nr - \tau)^2 (1 - Q_f) (\nabla Q_f - \nabla Q_d) + N(E_f r + E_s \tau) (T - Nr) \nabla Q_f \}$$

$$\text{式中, } \nabla Q_f - \nabla Q_d = \frac{N}{2^{N-1}} \sum_{i=K}^N C_N^i (\nabla P_f - \nabla P_d), \nabla P_f$$

$$- \nabla P_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f_s}{2\pi\tau}} \left[ \sqrt{\frac{1}{2\gamma + 1}} \left( \frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1 \right) - \left( \frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1 \right) \right],$$

而  $\sqrt{\frac{1}{2\gamma + 1}} \left( \frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1 \right) - \left( \frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1 \right) < 0$ , 所以  $\nabla Q_f - \nabla Q_d = -\infty$ , 那么  $(\nabla R)E - R \nabla E = \infty$ , 再根据式(13)可知,  $\nabla \eta(0) = \infty$ 。即第一个条件满足。

(2) 当  $\tau = T - Nr$  时,  $R = 0, E = \infty, \nabla R = -P_0(1 - Q_f), \nabla E = NE_s - (1 - Q_f)E_f$ , 所以可知  $(\nabla R)E - R \nabla E < 0$ , 根据式(13)可知,  $\nabla \eta(T - Nr) < 0$ 。即第二个条件满足。

(3) 由文献[12-13]可知, 对于任意给定的  $K$  和  $N$ , 目标函数  $\eta(\tau)$  是一个单峰函数。

所以对于给定的  $K$  和  $N$ , 有且仅有一个最优的  $\tau$  使得 CR 系统的能量效率达到最大。为了对式(7)和式(13)两个优化问题做出折中的考虑, 文中采用联合迭代算法<sup>[14]</sup>来求得折中的  $\tau$ 、 $K$  和  $N$ 。联合迭代算法的核心思想是经过迭代后每次的能量效率  $\eta$  有所提高, 算法的详细过程如下所示:

- ① 给定  $\tau$  初始值  $\tau_{(1)}$  ( $\tau_{(1)} \in [0, T - Nr]$ ),  $j = 1$ 。
- ② 将  $\tau_{(j)}$  带入优化问题(7), 通过遍历搜索法和式

(9), 求出  $N_{\text{opt}}$  和  $K_{\text{opt}}$ 。

③ 令  $n_{(j)} = N_{\text{opt}}$  和  $k_{(j)} = K_{\text{opt}}$ 。

④ 将  $n_{(j)}$  和  $k_{(j)}$  带入优化问题(13), 用黄金分割法搜索最优的  $\tau_{\text{opt}}$ 。

⑤ 令  $\tau_{(j+1)} = \tau_{\text{opt}}, j = j + 1$ 。

⑥ 若  $j < 3$ , 返回步骤②, 否则转到步骤⑦。

⑦ 若  $\tau_{(j)} \neq \tau_{(j-1)}$  或  $n_{(j-1)} \neq n_{(j-2)}$ , 返回步骤②, 否则终止搜索。

通过联合迭代算法, 可以使得每一次迭代后得到更大的能量效率。

### 4 仿真结果及性能分析

文中仿真假设 CR 系统环境中共有 20 个次用户, 帧长为 10 ms, 主用户不存在的先验概率  $P(H_0)$  为 0.8, 系统中的单位能耗分别有两种: 频谱感知消耗  $E_s = 12$  mJ 和数据传输消耗  $E_f = 1$  J, 系统中的信道容量  $C$  为 6.658 2。为了使主用户受到足够的保护, 所以仿真中设本地检测概率  $P_d = 0.9$ 。

通过迭代算法求出当  $M = 20$  时, 参与协作感知的最优次用户数目  $N_{\text{opt}}$  的理论值为 18, 对应的  $K_{\text{opt}}$  的理论值为 15, 最优的感知时间  $\tau_{\text{opt}}$  理论值为 0.6 ms。

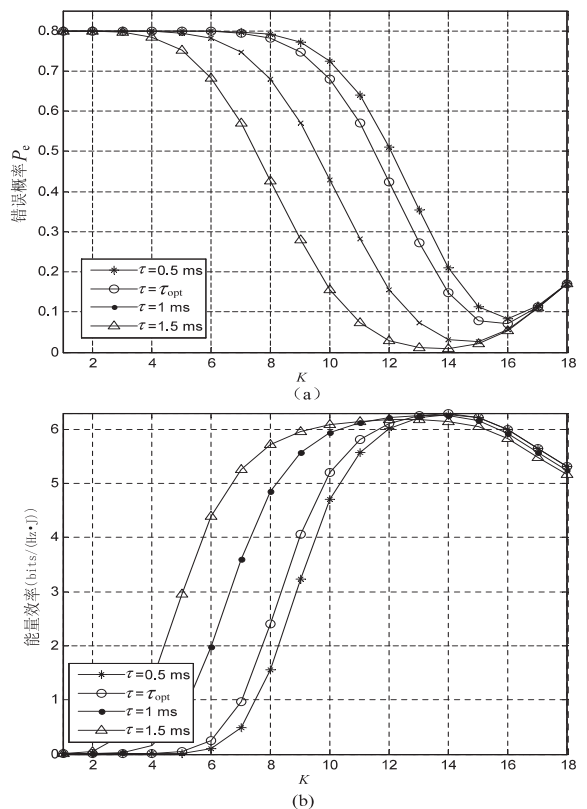


图 3 系统的错误概率和能量效率随  $K$  的变化曲线 ( $N = 18$ )

在图 3 的两幅图中, 给定  $N = 18$ , 从图 3 中可以看出在不同的  $\tau$  值下, 函数  $P_e(K, N)$  是  $K$  的凸函数, 存在最小值。即在给定  $N = 18$  和不同  $\tau$  的情况下, 一定

存在一个  $K_{opt}$  使得式(8)为0,同时验证了此种情况下式(8)的正确性。从图(a)中可以看出,随着感知时间的增加,所对应的最小错误概率逐渐减小;而从图(b)中可以看出,当感知时间  $\tau = \tau_{opt}$  时,系统的能量效率最大。综合可知,当  $\tau = \tau_{opt}$  时,系统的综合性能最好。

随着感知时间  $\tau$  的变化,能量效率函数  $\eta(\tau)$  也随之变化,在给定  $N$  为  $N_{opt} = 18$  时,通过仿真得到图4。

从图4(a)中可以看出,当  $\tau$  取值为 0.6 ms 左右时,系统取得较大的能量效率,能量效率最大的两条曲线对应的  $K$  值是  $K_{opt}$  和 14。结合图(a)中  $\tau$  值最优的范围,在图(b)中可以看出,当  $\tau$  取值为 0.5 ms 左右时,错误概率最小的两条曲线对应的  $K$  值是  $K_{opt}$  和 16。综合可知,最优的感知时间  $\tau$  为 0.6 ms 即理论上的最优值  $\tau_{opt}$ ,最优的  $K$  值是  $K_{opt}$ 。

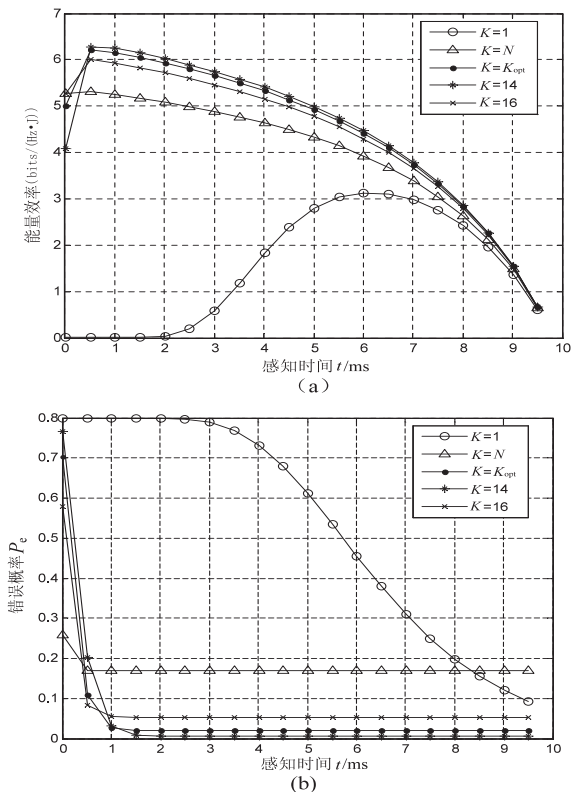


图4 系统错误概率和能量效率随  $\tau$  的变化曲线

## 5 结束语

在CR系统中,既要保证系统检测的准确性又要使系统吞吐量最大、能耗最小,所以文中通过对系统检测概率最优化可以求得最优  $K$  和  $N$ ,再通过对能量效率进行优化,可以得到对应的最优的  $\tau$ 。最后通过对检测概率和能量效率联合最优化,从而得到最终的  $\tau_{opt}$ 、 $K_{opt}$  和  $N_{opt}$ 。

从仿真结果可以看出,通过文中的联合迭代算法,最后可以得到使得系统错误概率和能量效率达到综合最优的三个系统参数。

## 参考文献:

- [1] Spectrum policy task force report[R]. [s. l.]: Federal Communications Commission, 2002.
- [2] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radios: making software radio more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [3] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments[C]//Proc of 2005 first IEEE international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access networks. Baltimore: IEEE, 2005: 131-136.
- [4] 刘婷婷, 王建新, 束 锋. 合作频谱感知吞吐量和感知时间关系的研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(5): 75-78.
- [5] 王金刚, 程云鹏, 张 弦. 认知无线电多信道下的感知时间优化[J]. 通信技术, 2012, 45(1): 25-28.
- [6] 丁汉清, 杨家玮, 赵志远. 认知无线电系统中感知时间的优化[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(8): 84-87.
- [7] Peh E C Y, Liang Yingchang, Guan Yongliang, et al. Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: a sensing-throughput tradeoff view[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5294-5299.
- [8] Maleki S, Chepuri S P, Leus G. Optimal hard fusion strategies for cognitive radio networks[C]//Proc of 2011 IEEE wireless communications and networking conference. Cancun, Quintana Roo: IEEE, 2011: 1926-1931.
- [9] Bhowmick A, Das M K, Biswas J, et al. Throughput optimization with cooperative spectrum sensing in cognitive radio network [C]//Proc of 2014 IEEE advance computing conference. Gurgaon: IEEE, 2014: 329-332.
- [10] Althunibat S, Di R M, Granelli F. Optimizing the K-out-of-N rule for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proc of 2013 IEEE global communications conference. Atlanta, GA: IEEE, 2013: 1607-1611.
- [11] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]//Proc of IEEE international communications conference. [s. l.]: IEEE, 2003: 3575-3579.
- [12] Li Xiaohui, Cao Jianlong, Ji Qiong, et al. Energy efficient techniques with sensing time optimization in cognitive radio networks[C]//Proc of 2013 IEEE wireless communications and networking conference. Shanghai, China: IEEE, 2013: 25-28.
- [13] Pei Y, Liang Y C, The K C. Energy-efficient design of sequential channel sensing in cognitive radio networks: optimal sensing strategy, power allocation, and sensing order[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1648-1659.
- [14] 张 雯, 杨家玮, 闫 琦, 等. 采用软合并合作检测的认知无线电系统的吞吐量优化[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2010, 37(6): 988-992.

## 认知无线电中基于感知时间和K秩准则的优化

作者: [李红](#), [齐丽娜](#), [LI Hong](#), [QI Li-na](#)  
作者单位: [南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京, 210003](#)  
刊名: [计算机技术与发展](#)   
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)  
年, 卷(期): 2015, 25(12)

引用本文格式: [李红](#). [齐丽娜](#). [LI Hong](#). [QI Li-na](#) 认知无线电中基于感知时间和K秩准则的优化 [期刊论文] - [计算机技术与发展](#) 2015(12)