

文章编号:1000-5641(2016)03-0084-08

新型协作频谱感知系统检测性能优化策略

曾英¹, 李志勇², 张春平³, 唐菁敏³

(1. 湖南城市学院 通信与电子工程学院, 湖南 益阳 413000;

2. 湖南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410082;

3. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650051)

摘要: 为了减小隐蔽终端对感知系统性能的影响和降低感知系统的错误率, 提出方法: 在考虑无线信道为瑞利信道和报道信道带有一定错误率的条件下, 对带有 p 次方检测器的协作频谱感知系统, 联合优化 p 次方检测器的次方数 p 和感知门限 λ , 并研究优化协作用户数 K , 使系统总错误率最小. 理论分析与仿真结果表明, 在给定初始条件下, 协作频谱感知系统存在最佳指数 p^* 和最佳感知门限 λ^* , 同时在选择融合准则后, 可以适当选择协作用户数 K 以提高感知系统可靠性.

关键词: 认知无线电; 协作频谱感知系统; p 次方检测器; 融合准则

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-5641.2016.03.010

Performance optimization scheme for a novel cooperation spectrum sensing system

ZENG Ying¹, LI Zhi-yong², ZHANG Chun-ping³, TANG Jing-min³

(1. Department of Communication and Electronic Engineering, Hunan City University,
Yiyang Hunan 413000, China;

2. College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and
Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to reduce effect of hidden terminal on cognitive system performance and the error rate of perceived system, it is proposed that, under the condition of considering wireless Rayleigh fading channel and reported channel with a fixed error probability, joint optimize index p of p power detector, optimal sensing threshold λ and the best number of cooperative users K on multiple antenna sensing system with p power detector to minimize the total error probability. Theoretical analysis and simulation results show that cooperative spectrum sensing system has

收稿日期:2015-05

基金项目:湖南省教育厅一般项目(14C0215);益阳市科技局项目(2013JZ37);2014年湖南城市学院虚拟仿真实验教学资源建设项目(3)

第一作者:曾英,女,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、视频追踪等.

E-mail: zengying20061981@163.com.

第二作者:李志勇,男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能优化算法及应用、模式识别与机器视觉等.

E-mail: zhiyong.li@hnu.edu.cn.

the best index p^* and the best perception threshold λ^* , and when choosing a fusion rule it can improve the reliability for sensing system by choosing appropriate cooperative users K .

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing system; p power detector; optimal fusion rule

0 引言

认知无线电作为一种能提高频谱利用率的关键技术广受关注. 在认知无线网络中, 协作频谱感知能有效减少多径衰落和阴影效应等对检测性能的影响, 从而提高检测概率. 本文研究了改进能量检测器的多天线协作频谱感知, 考虑每根天线上的采样信号数和瑞利信道, 接收机采用选择性合并信号, 融合中心采用半投票准则作最终判决是否有授权用户存在. 文献[1]研究了改进能量检测的多天线协作频谱感知, 但未考虑每根天线上的采样信号数, 并且接收端信号合并采用选择性合并, 而非采用最优合并方式. 文献[2]对比分析了传统能量检测器与改进能量检测器的性能, 证明了在高信噪比条件下改进能量检测器的次幂越高, 总误码率越低. 文献[3]分析了最优协作感知与解码错误率的鲁棒性, 考虑了多种接收信号合并方式, 并提出了最优协作感知, 但未考虑改进能量检测. 文献[4]采用传统能量检测器, 接收机分别采用等增益合并和选择性合并等合并方式, 信道分别为瑞利信道、莱斯信道和 Nakagami 信道并进行了对比分析. 文献[5]使用传统能量检测方法, 采用半投票融合准则, 选择最优检测门限值以优化总错误概率. 本文中, 数学推导其检测概率与虚警概率, 以最优总错误率为目标函数, 得出最优能量检测器的指数 p 和最佳感知门限 λ^* .

1 系统模型

考虑一个授权网络和一有若干认知用户、 K_p 个授权用户和一个信息融合中心(Fusion Center, FC)的认知无线网络, 假设全部认知用户(Cognitive User, CU)参与协作频谱感知, 其数量固定为 K , 且每个协作用户均选择 M 根天线用于协作频谱感知, 在 n 时刻每个协作用户的每根协作天线均采样 1 次, 则进行频谱感知的 CU 在此时刻接收到来自授权用户的信号有如下假设

$$\begin{aligned} H_0: y_{i,j}(n) &= \eta_{i,j}(n), \quad i = 1, \dots, K; j = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N, \\ H_1: y_{i,j}(n) &= s_{i,j}(n) + \eta_{i,j}(n), \quad i = 1, \dots, K; j = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (1)$$

假设 H_0 表示此时刻授权用户(被检测用户)不存在, 假设 H_1 表示授权用户存在. 式(1)中, K, M, N 分别表示选择最大 CU 数、最大天线数、累计信号采样数; $y_{i,j}(n)$ 表示第 i 个 CU 的第 j 根天线的第 n 个采样接收信号; $s_{i,j}(n) = \sum_{k=1}^{K_p} h_{i,j}(n) \tilde{s}_{i,j,k}(n)$, $h_{i,j}(n)$ 为从授权用户到第 i 个 CU 的第 j 根天线之间的传输信道增益, 一般当频谱检测期间很短时, 所有的 $h_{i,j}(n)$ 都是独立同分布的带有瑞利衰落的标准循环对称信道增益, $h_{i,j}(n) \sim CN(0, \sigma_h^2)$; K_p 代表授权用户数; $\tilde{s}_{i,j,k}(n)$ 表示第 k 个授权用户的发送信号. $\eta_{i,j}(n) \sim CN(0, \sigma_n^2)$, 即服从标准循环对称复加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN), 且所有的 $\eta_{i,j}(n)$ 独立同分布. 为不失一般性, 假设 $s_{i,j}(n)$ 和 $\eta_{i,j}(n)$ 相互独立. 为了分析方便, 假设天线数 M 很小, 近似为单天线. 系统框图如图 1 所示, 其中, LU(Licensed User, LU)表示授

权用户, CU 表示认知用户. 两箭头虚线表示报道信道链路.

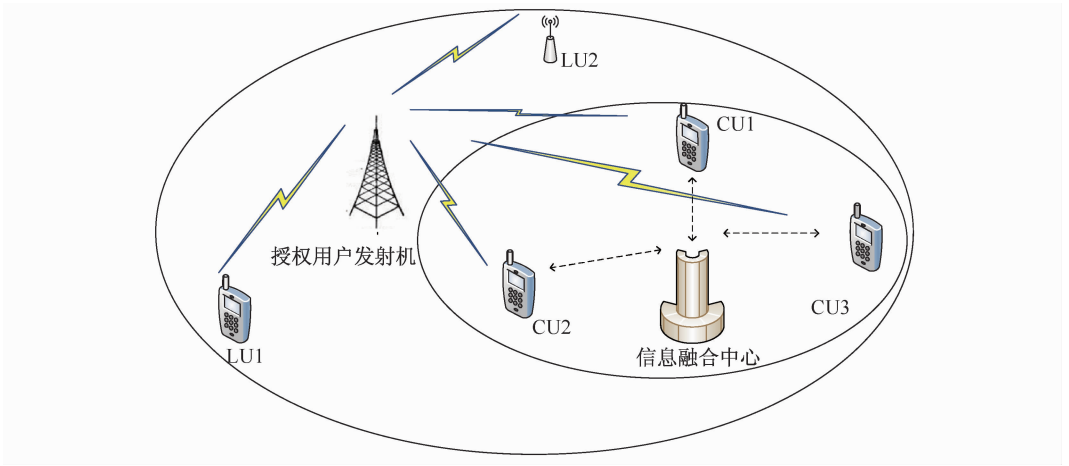


图 1 网络模型

Fig. 1 Network model

经过瑞利衰落信道后的信号 $y_{i,j}(n)$ 服从瑞利分布. 由文献[1]可类似得到单个采样点的统计量 $W_{i,j}(n) = |y_i|^p, p > 0$ 的累计分布函数

$$P_{W_{i,j}}(x) = \text{Prob}(W_{i,j}(n) \leq x), \tag{2}$$

其中, $\text{Prob}(\cdot)$ 表示概率. 由瑞利分布的概率密度函数, 对复合函数求导后得在假设 H_0 下统计量 $W_{i,j}(n)$ 的概率密度函数(p. d. f), 则有^[1, 6]

$$f_{W_{i,j}/H_0}(x) = \frac{x^{\frac{1}{p}} \exp\left(\frac{-x^{2/p}}{2\sigma_n^2}\right)}{\sigma_n^2} (x^{1/p})' = \frac{x^{\frac{2-p}{p}} \exp\left(\frac{-x^{2/p}}{2\sigma_n^2}\right)}{p\sigma_n^2}, \tag{3}$$
$$f_{W_{i,j}/H_1}(x) = \frac{x^{\frac{1}{p}} \exp\left(\frac{-x^{2/p}}{2(E_s\sigma_h^2 + \sigma_n^2)}\right)}{E_s\sigma_h^2 + \sigma_n^2} (x^{1/p})' = \frac{x^{\frac{2-p}{p}} \exp\left(\frac{-x^{2/p}}{2(E_s\sigma_h^2 + \sigma_n^2)}\right)}{p(E_s\sigma_h^2 + \sigma_n^2)},$$

其中, 令所有 $\tilde{s}_{i,j,k}(n)$ 的能量相等为 E_s , $\exp(\cdot)$ 代表求 e 的指数. 由式(3)可求得统计量 $W_{i,j}(n)$ 的期望和方差, 分别为

$$E(W_{i,j}(n)/H_0) = \int_0^{+\infty} t^p \cdot f_{W_{i,j}/H_0}(t) dt,$$
$$E(W_{i,j}(n)/H_1) = \int_0^{+\infty} t^p \cdot f_{W_{i,j}/H_1}(t) dt, \tag{4}$$
$$\text{Var}(W_{i,j}(n)/H_0) = \int_0^{+\infty} t^{2p} \cdot f_{W_{i,j}/H_0}(t) dt - E^2(W_{i,j}(n)/H_0),$$
$$\text{Var}(W_{i,j}(n)/H_1) = \int_0^{+\infty} t^{2p} \cdot f_{W_{i,j}/H_1}(t) dt - E^2(W_{i,j}(n)/H_1).$$

由连续随机变量非线性函数的期望和方差的近似求法^[7], 可得在假设 H_0 和假设 H_1 下统计量 $W_{i,j}(n)$ 期望和方差, 分别近似为

$$E(W_{i,j}(n)/H_0) \approx \left(\frac{\sqrt{\pi}\sigma_n}{2}\right)^p + \frac{p(p-1)}{4} \left(\frac{\sqrt{\pi}\sigma_n}{2}\right)^{p-2} \sigma_n^2,$$
$$E(W_{i,j}(n)/H_1) \approx \left(\frac{\sqrt{\pi(E_s\sigma_h^2 + \sigma_n^2)}}{2}\right)^p + \frac{p(p-1)}{4} \left(\frac{\sqrt{\pi(E_s\sigma_h^2 + \sigma_n^2)}}{2}\right)^{p-2} (E_s\sigma_h^2 + \sigma_n^2),$$

$$\begin{aligned}\text{Var}(W_{i,j}(n)/H_0) &\approx p^2 \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_n \right)^{2p-2} \sigma_n^2 / 2, \\ \text{Var}(W_{i,j}(n)/H_1) &\approx p^2 \left(\frac{\sqrt{\pi(E_s \sigma_h^2 + \sigma_n^2)}}{2} \right)^{2p-2} (E_s \sigma_h^2 + \sigma_n^2) / 2.\end{aligned}\quad (5)$$

接下来分析统计量 $u_{i,j}$ 的分布特性. 根据中心极限定理^[8], 每根天线的采样信号数 N 较大, 统计量 $u_{i,j}$ 近似服从正态分布, 即 $u_{i,j} \sim N(N \cdot E(W_{i,j}(n)), N \cdot \text{Var}(W_{i,j}(n)))$. 各采样信号独立同分布, 由式(4)和式(5)可得统计量 $u_{i,j}$ 在假设 H_0 和假设 H_1 下的期望与方差分别为

$$\begin{aligned}E(u_{i,j}) &= \begin{cases} E(u_{i,j}/H_0) \approx N \cdot E(W_{i,j}(n)/H_0), & H_0, \\ E(u_{i,j}/H_1) \approx N \cdot E(W_{i,j}(n)/H_1), & H_1, \end{cases} \\ \text{Var}(u_{i,j}) &= \begin{cases} \text{Var}(u_{i,j}/H_0) \approx N \cdot \text{Var}(W_{i,j}(n)/H_0), & H_0, \\ \text{Var}(u_{i,j}/H_1) \approx N \cdot \text{Var}(W_{i,j}(n)/H_1), & H_1. \end{cases}\end{aligned}\quad (6)$$

考虑每个 CU 多个采样的频谱感知值, 根据线性合并(如最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)、选择性合并(Selection Combining, SC))和等增益合并(Equal Gain Combining, EGC)对频谱检测^[9]的要求不同, 本文选择不需要所有感知天线原始数据和信道状态信息的 SC 方式. 与 EGC 相比, SC 需要的计算相对简单, 因此广受关注.

本文每个 CU 都装有一个选择合并器, 对每个 CU 的 M 根天线经过改进能量检测器后的接收信号采用选择性合并. 则选择性合并器的检测统计量为 $Z_i = \max_{1 \leq j \leq M}(u_{i,j})$, ($i = 1, \dots, K$). 一般地, 每个 CU 的 M 根天线之间干扰很小或无干扰, 其统计相互独立且同分布. 由式(2)可得 Z_i 在假设 H_0 下的累计分布概率为

$$\begin{aligned}P_{Z_i}(z/H_0) &= \text{Prob}(Z_i \leq z/H_0) = \text{Prob}(\max_{1 \leq j \leq M}(u_{i,j}) \leq z/H_0) \\ &= \prod_{j=1}^M \text{Prob}(u_{i,j} \leq z/H_0) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{M/2} \sqrt{\prod_{j=1}^M \text{Var}(u_{i,j}/H_0)}} \int_0^z \exp\left(\sum_{j=1}^M \frac{(z - E(u_{i,j}/H_0))^2}{2\text{Var}(u_{i,j}/H_0)}\right) dz.\end{aligned}\quad (7)$$

对式(7)求导可得 Z_i 在假设 H_0 下的概率密度函数为

$$f_{Z_i/H_0}(z) = \frac{1}{(2\pi \text{Var}(u_{i,j}/H_0))^{M/2}} \exp\left(M \frac{(z - E(u_{i,j}/H_0))^2}{2\text{Var}(u_{i,j}/H_0)}\right).\quad (8)$$

每个 CU 独立检测 LU 是否使用授权信道, 在以上两种假设下会产生虚警概率和漏警概率^[10], 即第 i 个 CU 的虚警概率和检测概率分别为

$$\begin{aligned}P_{f_i} &= \text{Prob}(Z_i > \lambda_i/H_0) = \int_{\lambda_i}^{+\infty} f_{Z_i/H_0}(x) dx, \\ P_{d_i} &= \text{Prob}(Z_i > \lambda_i/H_1) = \int_{\lambda_i}^{+\infty} f_{Z_i/H_1}(x) dx.\end{aligned}\quad (9)$$

2 协作感知

在本地感知后, 融合中心将各本地感知结果, 按照某融合准则融合, 并对结果做出判断.

其中,根据实际应用情况,考虑 FC 与每个 CU 之间的报道信道是非理想的,错误率为 q ,进一步假设所有认知用户有相同检测门限值 $\lambda_i = \lambda$, 则 $P_{f_i} = P_f, P_{m_i} = P_m$. FC 对每个 CR 发送来的二进制判决数据采用最优融合准则进行融合.

定义 1 b 中选 c (b out of c) 准则中的 c 定义为最小决定用户数. 最优融合准则:在最优融合准则中,至少有 c 个认知用户检测到授权用户存在,则融合中心判为授权用户存在,否则融合中心判为授权用户不存在. 则在 FC 处的虚警概率 Q_f 和漏警概率 Q_m 分别为^[11-12]

$$Q_f = \sum_{l=c}^K \binom{K}{l} ((1-P_f)q + P_f(1-q))^l (1 - ((1-P_f)q + P_f(1-q))^{K-l}),$$

$$Q_m = 1 - \sum_{l=c}^K \binom{K}{l} ((1-P_d)q + P_d(1-q))^l (1 - ((1-P_d)q + P_d(1-q))^{K-l}).$$
(10)

3 总错误率优化方案

定义总错误率函数 $Z(\lambda, p, c)$. 假设虚警概率 Q_f 和漏警概率 Q_m 对总错误率同等重要,即等权值^[1], 则总错误率函数可表示为^[1]

$$Z(\lambda, p, c) \triangleq P(H_0)Q_f + P(H_1)Q_m. \quad (11)$$

通常情况下,优化问题可表示为

$$\min Z(\lambda, p, c) = 0.5 \times (Q_f + Q_m),$$

使得 $p > 0, K \geq c, K \in \mathbf{N}^*$.

(12)

3.1 确定最佳门限 λ^* 和最佳次方数 p^*

当认知用户数 K 、信噪比 SNR 和最优 c 确定后,可确定最佳门限 λ^* 和最佳次方数 p^* , 以使总错误率最低.

解式(12)的优化问题, $Z(\lambda, p, c^*)$ 可表示为

$$Z(\lambda, p, c^*) = P(H_0) \sum_{l=c}^K \binom{K}{l} (P_{ff}^l (1 - P_{ff})^{K-l})$$

$$- P(H_1) \left(1 + \sum_{l=c}^K \binom{K}{l} (P_{dd}^l (1 - P_{dd})^{K-l}) \right). \quad (13)$$

式(13)中, Z 关于 λ, p 的函数在定义 $p \in (0, +\infty), \lambda \in (-\infty, +\infty)$ 内是连续函数. $P_{ff} = (1 - P_f)q + P_f(1 - q)$ 表示考虑报道信道错误概率时的虚警概率,即广义虚警概率. $P_{dd} = (1 - P_d)q + P_d(1 - q)$, 表示考虑报道信道错误概率时的检测概率,即广义检测概率.

结论:初始条件在一定范围内时,式(12)方程组存在最佳值 λ^* 和最佳值 p^* , 使得总错误率 $Z(p^*, \lambda^*, c^*)$ 最小. 证明见文献[12].

3.2 确定最佳融合准则

在不考虑报道信道错误率条件下,当认知用户数 K 、信噪比 SNR、最佳值 λ^* 和 p^* 确定后,能确定最优融合准则^[1,6].

定理 1 在协作频谱感知系统中,当给定使总错误率最小的融合准则、信噪比 SNR、最佳值 λ^* 和最佳值 p^* , 可以得出协作用户数 K 的表达式

$$K = \begin{cases} c, & \alpha \leq 0, \\ \lceil c(1 + \alpha) \rceil, & \alpha > 0, \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\alpha = \frac{\ln \frac{P_{ff}}{P_{dd}}}{\ln \frac{1-P_{dd}}{1-P_{ff}}}$. $|x|$ 表示取不大于 x 的最大整数. 证明可以参考文献[6,13]的部分

内容,再通过数学相关变换能够得出式(14).

总错误率最低优化算法如下.

- (1) 初始化. 设置 $E_s, q, \sigma_h^2, \sigma_n^2, N, c, Z_0$.
- (2) 依次取整数 K 值. 根据式(13)利用数值计算,求得 λ_c^*, p_c^* 使 $Z_c(\lambda_c^*, p_c^*)$ 最小,并记录数据组 $K^*, \lambda_c^*, p_c^*, Z_c$.
- (3) 比较 $Z_K(\lambda_K^*, p_K^*)$ 和 $Z_{K-1}(\lambda_{K-1}^*, p_{K-1}^*)$ 大小,保留较小值,重新记录数据组为 $K^*, \lambda_K^*, p_K^*, Z_K$.
- (4) 当 $Z_K(\lambda_K^*, p_K^*) \leq Z(\lambda, p), \forall K$ 时停止循环,否则取 $K = K + 1$,返回步骤(2);当循环结束时,最后保留下来的数据组 $c^*, \lambda_K^*, p_K^*, Z_K^*$ 为最优数据组.

4 仿真结果

基于文献[1,6,13]仿真部分的描述,本文参数设置见表 1 所示.

表 1 几组仿真结果
Tab. 1 Some simulation results

参数图例	采样点数	报道信道错误率	天线数	信噪比	最小决定用户数	协作用户数
图 2 和图 3 参数	$N = 2$	$q = 0.001$	$M = 2$	$\text{SNR}_i = E_s \sigma_h^2 / \sigma_n^2 = 10$	有最优值	$K = 5$
图 4 参数	$N = 20$	$q = 0.001$	$M = 2$	$\text{SNR}_i = E_s \sigma_h^2 / \sigma_n^2 = 10$	$c = 5$	有最佳值

图 2 所示是最优融合准则下,门限值 λ 、次方数 p 与总错误率 Z 的三维图. 图中,门限值是指平均门限值 λ ,即每个协作用户本地检测时的门限值. 在 p 取不同值时,平均门限值 λ 对总错误率 $Z(\lambda)$ 的对比,可以看到 $p = 2.3$ 处有最佳值,此时 Z 值最小. 在 λ 取不同值时, p 对 $Z(p)$ 的对比. 由图可以看出 $\lambda = 13.156, p = 2.3$ 时, $Z(\lambda, p) = 0.0036$ 是总错误率最小值,如图 2 中用红色小点标出. 由此证明,当给出初始参数时,式(12)的最佳解是存在的,即式(12)方程组是有解的. 由式(14)的理论推导,取与图 2 相同参数, $\lambda = 13.156, p = 2.3$ 得 $\alpha = 5.2349$, 结果与图 2 的实际仿真的结果一致. 图 3 是在相同参数下,本文算法与文献[1]在单天线情况下的比较,显然,当如本文所考虑同时优化 3 个参量时,能比文献[1]得到更低的检测总错误率;并且,采用本文最佳融合准则比文献[1]得到更低的检测错误率.

因此,本文在采用所提方法的基础上进一步研究了协作用户数对检测总错误率的影响,并通过下面仿真对理论推导进行了辅证. 图 4 给出了不同协作用户数 K 下,次方数 p 与总错误率 Z 的二维图. 由图可以看出,协作用户数越大,总错误率越小,这与事实符合. 但当协作用户数达到 120 左右时,总错误率不再随协作用户数增加而减少,在图 4 中,显然当协作用户数 $K = 120$ 时,总错误率处于相对最小. 从而,反映出协作用户数 K 不再对总错误率大小起决定作用.

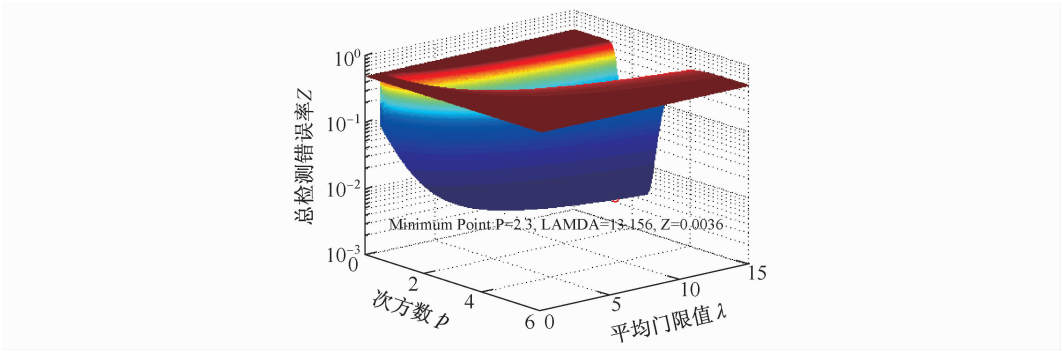


图 2 最优准则下,次方数 p 、平均门限值 λ 与总错误率 Z 三维图

Fig. 2 The three-dimensional figure of p , threshold λ and the total error rate Z under the optimal criterion

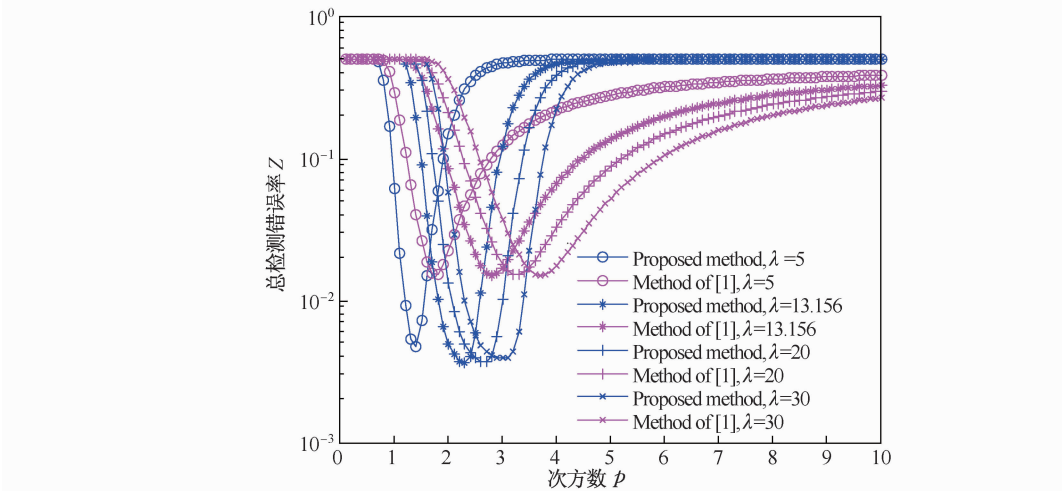


图 3 考虑 3 参数的本文算法与文献[1]对比

Fig. 3 Proposed method with considering three parameter VS method of [1]

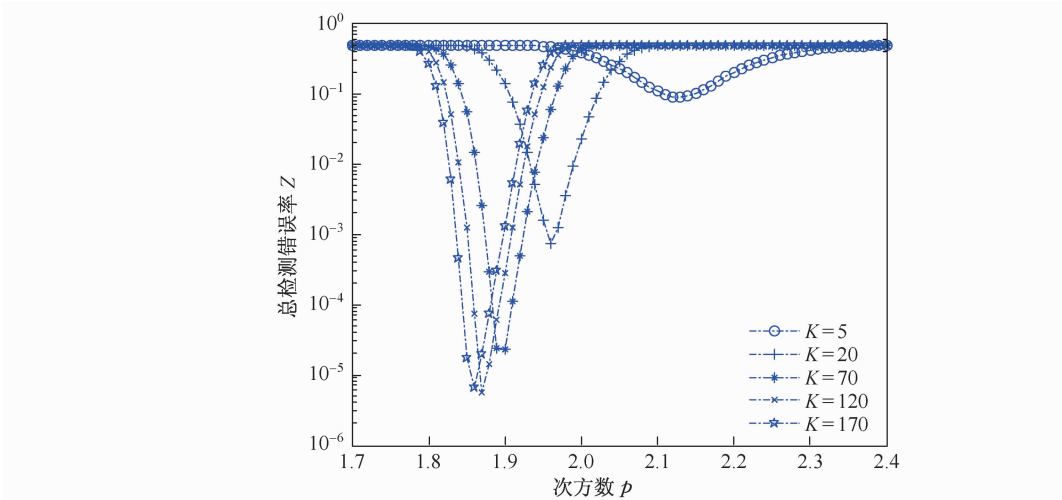


图 4 不同协作用户数 K 下,次方数 p 与总检测错误率 Z 的二维图

Fig. 4 The two-dimensional figure of p and the total error rate Z under different coordination number K

5 结 论

本文在协作频谱感知系统中引入 p 次方检测器,在考虑多天线上的采样信号数、瑞利信道和报道信道错误率的新系统模型下,通过天线选择策略,联合优化 p 次方检测器的次方数 p 和感知门限 λ ,在给定某融合准则后,讨论最佳协作用户数 K . 推导证明了最佳次方数 p^* 和最佳感知门限 λ^* 的存在,以及协作用户数 K 的表达式. 仿真结果表明此协作感测系统能使系统误码率最低.

[参 考 文 献]

- [1] SINGH A, BHATNAGAR M R, MALLIK R K. Cooperative spectrum sensing in multiple antenna based cognitive radio network using an improved energy detector[J]. Communications Letters, IEEE, 2012, 16(1): 64-67.
- [2] CHEN Y F. Improved energy detector for random signals in gaussian noise[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(2): 558-563.
- [3] ZENG Y H, LIANG Y C, ZHENG S K, et al. Optimal cooperative sensing and its robustness to decoding errors [C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2011: 1-5.
- [4] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(5): 3575-3579.
- [5] 朱军龙, 邵玉斌, 李静叶, 等. 认知无线电中合作频谱感知的性能优化[C]//2009年研究生学术交流会通信与信息技术论文集. 北京: 中国学术期刊电子工程出版社, 2009: 414-417.
- [6] TANG J M, ZHANG C P, CAO J S. Performance optimization scheme for cooperation spectrum sensing system [J]. Journal of Information and Computational Science, 2014: 2039-2048.
- [7] 张松林, 张昆. 连续随机变量非线性函数的期望和方差的近似求法[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 107-110.
- [8] 徐利治, 邓永录, 史树中, 等. 数学辞海: 第四卷[M]. 北京: 中国科学出版社, 2002: 326-336.
- [9] 赵树杰, 赵建勋. 信号检测与估计理论: 第二版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 452-4851.
- [10] EL-SALEH A A, ISMAIL M, ALI M A M. Optimizing spectrum sensing parameters for local and cooperative cognitive radios[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology. 2009 (3): 1810-1815.
- [11] CHAIR Z, VARSHNEY P K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(1): 98-101.
- [12] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. 2008: 3411-3415.
- [13] 张春平, 曹金石, 唐菁敏, 等. p 次方检测器的协作频谱感知系统性能优化[J]. 云南大学学报, 2014, 36(1): 26-31.

(责任编辑: 李 艺)