

基于渐进式最大后验估计的联合频谱感知算法

周国庆¹, 宁雪伟², 杨洪骞³, 郭银景³

(1. 阿肯色大学 电气工程系, 阿肯色 费耶特维尔 72701; 2. 山东省交通运输学校, 山东 泰安 271000;
3. 山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:通过研究初级用户的统计传输模式提出了一种联合频谱感知算法:初级用户的统计传输模式采用含有两状态量的马尔科夫模型;每个二级用户通过对马尔科夫链的监测进行能量检测,并且经含噪信道将检测结果转发给融合中心;然后,融合中心通过使用新的渐进式最大后验估计算法恢复二级用户的判决。在上述过程中,先验概率对于最大后验估计至关重要,它是通过渐进地估计马尔科夫链的传递概率得到的。另外,采用多数数据融合和或逻辑数据融合规则,推导出了虚警概率和漏检概率的解析表达式。理论分析和仿真结果表明,所提出的算法能够提供可靠和有效的频谱感知。

关键词:联合频谱感知;能量检测;最大后验概率判决规则;或逻辑数据融合规则;多数数据融合规则

中图分类号:TN926.1 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2011)05-0083-07

A Cooperative Spectrum Sensing Algorithm Based on Progressive MAP Estimation

ZHOU Guoqing¹, NING Xuewei², YANG Hongqian³, GUO Yinjing³

(1. Department of Electrical Engineering, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas 72701, USA;
2. Shandong School of Transportation, Taian, Shandong 271000, China;
3. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: This paper developed a new cooperative spectrum sensing algorithm by exploiting the statistical properties of the PU's transmission pattern, which was modeled with a Markov chain with two states: busy (1) and idle (0). Each SU performs energy detection based on an observation of the Markov chain, and the detection results are forwarded to a fusion center (FC) through a noisy channel, and the FC recovers the decisions of the SUs by using a new progressive maximum a posteriori (MAP) estimation algorithm, where a priori probability essential to the MAP detection is obtained by progressively estimating the transition probabilities of the Markov chain. Analytical expressions were derived for the probabilities of false alarm and missing detection, with both the majority data fusion rule and the OR data fusion rule. Both theoretical analysis and simulation results indicated that the proposed algorithm could provide reliable and efficient spectrum sensing over a large range of system configurations.

Key words: cooperative spectrum sensing; energy detector; MAP probability decision rule; OR logic data fusion rule; majority data fusion rule

通过对无线电环境的动态感知与适配,认知无线网络能够提供灵活的频谱接入访问,是提高有限频谱资源利用率的最有发展前景的技术手段之一^[1-3]。认知无线电的正确操作依赖于可靠和有效的频谱感知,二级用户通过频谱感知能在时-频平面内检测频谱空穴并且能避免许可用户或初级用户的干扰^[4]。

近年来,许多学者致力于认知无线网络频谱感知算法的研究^[5-9]。文献[5]的结果表明,在检测零均值微弱信号时,能量检测方法是最有效的。具备能量检测的频谱感知性能在允许多个二级用户相互协作方面

收稿日期:2011-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(61071087)。

作者简介:周国庆(1979—),男,山东泰安人,博士研究生,主要从事无线通信技术方面的研究。

E-mail: yang12341221@163.com.

得到了极大的改善。联合频谱感知通常由两个步骤组成：①每个二级用户单独进行能量检测，②融合中心通过收集来自二级用户的检测结果判决信道状态。文献[6]在二级用户和融合中心之间假设了一种无噪信道，而在现实中，无噪信道是不存在的。文献[7]考虑了实际信道，融合中心通过最大后验估计判决规则检测来自二级用户的噪声信号。最大后验估计检测器需要先验概率的信息，用以估计假设一个无限的二级用户数目。在文献[9]中，二级用户用软信息取代二元硬件判决，并将软信息转发到融合中心。软信息转发提高了检测性能，但这是以二级用户和融合中心之间显著增加的带宽为代价的。另外，上述工作没有考虑初级用户的流量模式，而这这对频谱感知性能是至关重要的。

本研究通过开发初级用户的统计流量模式，提出了一种新的联合频谱感知算法。假设二级用户的传输模式为马尔可夫链，它有忙碌(1)和空闲(0)两种状态^[10]。那么，二级用户的二进制能量检测结果可以看作是通过一个二进制对称信道传输两个马尔可夫状态，从而建立一个新的马尔可夫链。新算法在马尔可夫链的时域相关性基础上产生。融合中心通过一种新的最大后验估计算法恢复二级用户的二进制能量检测结果，先验概率通过在时域上渐进地估计马尔可夫链的传输概率获得。

多数文献中，融合中心采用或逻辑数据融合规则管理二级用户评估检测。众所周知，或逻辑数据融合规则通过增加更多的虚警降低漏检。本研究运用多数和或逻辑数据融合规则推导出了虚警概率和漏检概率的解析表达式，并且通过分析和仿真结果比较了它们之间的性能差异。

1 系统模型

考虑带有一个初级用户和多个二级用户的认知无线网络的联合频谱感知系统。假设初级用户的流量模式为带有空闲(0)和忙碌(1)两个状态量的马尔可夫链，对应的传递概率分别为 p_{00} 和 p_{10} 。

如图1所示，联合频谱感知是一个“两步骤”的协议。在步骤1中，每一个二级用户进行能量检测去获得初级用户状态，并且基于本地检测结果确定一个二进制判决(忙碌或空闲)。在步骤2中，二级用户将它们各自获得的检测结果发送给融合中心，然后，融合中心通过对所有来自二级用户的含噪系数进行数据融合，确定一个最终的初级用户状态的判决。

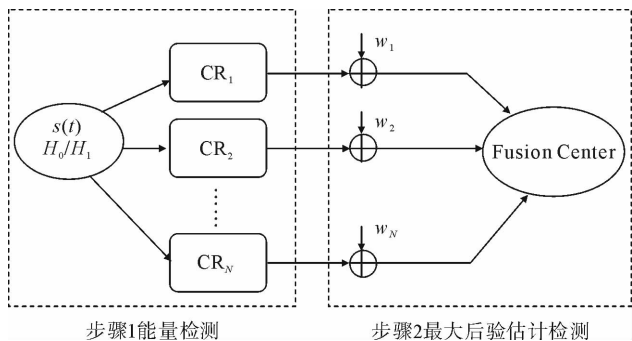


图1 认知无线网络的联合频谱感知模块框图

Fig. 1 Block diagram of a cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks

步骤1中，第N个二级用户的能量检测假设检验由文献[11]、文献[12]提出：

$$H_0: r_n(t) = v_n(t), \quad H_1: r_n(t) = s(t) + v_n(t). \tag{1}$$

其中， $s(t)$ 是来自单边带宽为W的初级用户的有限带宽信号， $v_n(t)$ 是单边带能量谱密度为 N_{ow} 的高斯白噪声， $r_n(t)$ 是第n个二级用户观测到的信号。

能量检测是通过使用在一个时间间隔T内观测到的信号来进行的。选择一个足够小的时间T，假设在时间T内信道状态不发生改变。如图2所示，在第k个检测区间 $R_n(k)$ ，第n个二级用户的统计量由穿过能量检测器的接收信号 $r_n(t)$ 获得。在能量检测器中，低通滤波器有一个带宽为W的截止频率，用于限制白噪声的频带宽度。经过一个平方器和一个有限时间积分器，能量检测输出结果为^[11]

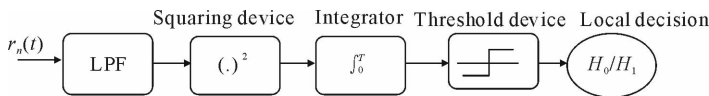


图2 二级用户的能量检测模块框图

Fig. 2 Block diagram of the energy detector employed at the SU

$$R_n(k) = \frac{1}{N_{ow}} \int_{(k-1)T}^{kT} |r_n(t)|^2 dt = \sum_{i=1}^{2u} \left(\frac{s_i + v_{ni}}{\sqrt{N_{ow}W}} \right). \tag{2}$$

其中: $u = WT$, 表示时域带宽系数; W 是信号的单边带宽; $v_{ni} = v_n(\frac{i}{2W})$ 和 $s_i = s(\frac{i}{2W})$ 分别是噪声取样和信号取样, 噪声取样 v_{ni} 是一个零均值高斯随机变量, $v_{ni} \sim N(0, N_{ow}W)$ 。

统计量 $R_n(k)$ 遵从如下分布^[11-12]:

$$R_n(k) \sim \begin{cases} \chi_{2u}^2, & H_0 \\ \chi_{2u}^2(2\gamma_s), & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中: χ_{2u}^2 表示自由量为 $2u$ 的中心卡方分布; $\chi_{2u}^2(2\gamma_s)$ 表示自由量为 $2u$ 和非中心参数为 $2\gamma_s$ 的非中心卡方分布; $\gamma_s = \frac{E_0}{N_{ow}}$, 表示信噪比, $E_0 = \int_0^T s^2(t)dt$, 是信号能量。

在第 k 个检测区间, 二级用户通过将 $R_n(k)$ 与预定阈值 λ 对比确定初级用户的状态: 如果 $R_n(k) > \lambda$, 则 $b_n(k) = 1$; 否则, $b_n(k) = 0$ 。

定义虚警概率 P_{f_n} , 作为当初级用户空闲时, 第 n 个二级用户检测到初级用户的概率, 漏检概率 P_{m_n} 的定义与 P_{f_n} 相反, 由式(1)的假设检定, 可以得到^[12]:

$$P_{f_n} = P_r(R_n > \lambda | H_0) = \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)}, P_{m_n} = P_r(R_n < \lambda | H_1) = 1 - Q_u(\sqrt{2\gamma_s}, \sqrt{\lambda}) \quad (4)$$

其中: $\Gamma(a, b)$ 是不完全伽马函数, $Q_u(a, b)$ 是广义马库姆 Q 函数。通过选择判决阈值 λ , 满足 P_{m_n} 和 P_{f_n} 的要求。

为了避免融合中心的通信冲突, 来自二级用户的本地判决经过一个正交介质访问控制模块后被传输给融合中心。融合中心接收来自第 n 个二级用户的信号

$$y_n(k) = \sqrt{E_s}x_n(k) + w_n(k), \quad (5)$$

其中: $x_n(k) = 2b_n(k) - 1$; E_s 是一个符号的传输能量; $w_n(k)$ 是单边带能量频谱密度为 N_{ow} 的高斯白噪声。在式(1)和式(5)所描述的模型可扩展到平坦衰落信道系统。融合中心通过接收来自二级用户的信息确定初级用户的状态。

2 一种新的联合频谱感知算法

2.1 逐步更新先验信息的最大后验估计检测

融合中心使用最大后验估计方法检测第 n 个二级用户发送过来的信息:

$$\hat{x}_n(k) = \arg \max_{b \in \beta} p(y_n(k) | x_n(k) = b)P(x_n(k) = b), \quad (6)$$

其中, $\beta = \{-1, 1\}$, $p(y_n(k) | x_n(k) = b) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_{ow}}} \exp\{-\frac{1}{N_{ow}} | y_n(k) - \sqrt{E_s}b |^2\}$ 。

式(6)的检测规则也可描述为: 如果 $y_n(k) \geq \tau_n(k)$, 则 $\hat{x}_n(k) = 1$; 否则, $\hat{x}_n(k) = -1$ 。此处, 阈值 $\tau_n(k)$ 可表示为

$$\tau_n(k) = \frac{N_{ow} \ln(\frac{1 - P_n(k)}{P_n(k)})}{4 \sqrt{E_s}} \quad (7)$$

其中, $P_n(k) = P(x_n(k) = 1) = P(b_n(k) = 1)$, 表示第 n 个二级用户检测到初级用户的概率。

最大后验估计判决规则需要先验概率 $P_n(k)$ 的信息, 此先验概率在接收端通常是不可用的。建议采用一个平滑窗口渐进地估计先验概率, 此窗口包含接收信号、先前 K 个检测间隔的判决以及马尔可夫链的统计属性。

由于通过马尔可夫链的独立观察结果可以得到 $x_n(k)$ 的值, 故容易得到 $x_n(k)$ 也是一个包含两个状态的马尔可夫链: $0(x_n(k-1) = -1)$ 和 $1(x_n(k) = 1)$ 。定义 $x_n(k)$ 的传输概率为 $q_{n00} = P(x_n(k) = -1 | x_n(k-1) = -1)$ 和 $q_{n10} = P(x_n(k) = 1 | x_n(k-1) = -1)$ 。当马尔可夫链进入稳定状态时, 先验概率可以表示为^[14]

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_n(k) = \frac{1 - q_{n00}}{1 + q_{n10} - q_{n00}} \quad (8)$$

建议采用式(8)估计 $P_n(k)$ 的值。考虑一个滑动窗口,其窗口大小为 K , $\{y_n(i)\}, \{\hat{x}_n(i)\}, i = k - K, k - K + 1, \dots, k - 1$ 。传输概率 q_{n00} 可由式(9)估计得到:

$$\hat{q}_{n00}(k) = \frac{\sum_{i=k-K}^{k-2} I(\hat{x}_n(i+1) = 0 \ \& \ \hat{x}_n(i) = 0)}{\sum_{i=k-K}^{k-2} I(\hat{x}_n(i) = 0)} \quad (9)$$

其中, $a \& b$ 表示逻辑与运算,如果 a 为真,则 $I(a) = 1$, 否则为 0。概率 P_{n10} 的得到方法类似于 q_{n00} 。

通过采用预判决可以估计传输概率。为了得到较好的估计值,使用软信息 $\{y_n(i)\}, i = k - K, k - K + 1, \dots, k - 1$, 并定义 $\Delta_k = \frac{1}{K} \sum_{i=k-K}^{k-1} y_n(i)$, 然后基于大数定理得到:

$$P_n(k) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{E_s} \lim_{K \rightarrow \infty} \Delta_k + 1} \right) \quad (10)$$

结合式(8)和式(10),可以得到含有两个独立方程和一个未知变量的超定系统 $P_n(k)$ 。采用最小二乘法得到:

$$\hat{P}_n(k) = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta_k}{\sqrt{E_s}} + \frac{2(1 - \hat{q}_{n00})}{1 + \hat{q}_{n10} - \hat{q}_{n00}} + 1 \right] \quad (11)$$

式(6)通过估算的先验概率 $\hat{P}_n(k)$ 可以得到判决 $x_n(k)$ 。式(11)为采用渐进估计方法得到的先验概率公式。基于这种新的渐进式最大后验估计检测算法在融合中心的实现,在第 n 个二级用户和初级用户之间定义了两个错误概率: $e_{n01} = P\{\hat{x}_n(k) = 1 \mid x_n(k) = -1\}$, $e_{n10} = P\{\hat{x}_n(k) = -1 \mid x_n(k) = 1\}$ 。在 2.2 中,将对 e_{n01} 和 e_{n10} 进行分析。

一旦融合中心获得所有来自二级用户判决的估计值,此结果将被整合在一起用以估计初级用户的状态值。许多现存的联合频谱感知算法采用或逻辑数据融合规则,基于此规则,所有的二进制判决均采用或逻辑操作^[6-7]。或逻辑数据融合规则能够使漏检概率最小化,但这是以提高虚警概率为代价的。

为了较好地实现虚警和漏检之间的权衡,将或逻辑数据融合规则和多数数据融合规则进行性能对比。融合中心将支持收到二级用户信息最多的状态。若出现二级用户信息相同,无法判决的情况,融合中心选择支持状态 1(忙碌)从而减少漏检概率。基于上述假设,只有满足 $\sum_{n=1}^N I(\hat{x}(k) = 1) \geq [N/2]$, 其中, $[a]$ 为取整运算, $[a] \leq a$ 。采用多数判决规则的融合中心才会判决初级用户在第 k 个检测区间忙碌。

2.2 性能分析

考虑到二级用户和融合中心之间为有噪信道,融合中心在接收二级用户发送的数据时可能产生判决错误。引理 1 给出了在融合中心进行二级用户信号检测的错误概率。

引理 1 如果先验概率 $P_n(k)$ 是理想的,则错误概率 e_{n01} 和 e_{n10} 为

$$e_{n01} = Q\left(\frac{4E_s - \eta}{\sqrt{8N_{ow}E_s^2}}\right), e_{n10} = Q\left(\frac{4E_s - \eta}{\sqrt{8N_{ow}E_s^2}}\right) \quad (12)$$

其中: $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-\frac{u^2}{2}) du$, 为高斯 Q 函数; $\eta = N_{ow} \cdot \ln\left(\frac{P_n(k)}{1 - P_n(k)}\right)$ 。

证明: 如果 $|y_n(k) - \sqrt{E_s}\hat{b}|^2 - |y_n(k) - \sqrt{E_s}b|^2 < \eta$, 则由式(6)的最大后验估计判决规则得到

$$\hat{x}_n(k) = \hat{b} \quad (13)$$

其中: $\eta = N_{ow} \cdot \ln\left(\frac{P(x_n(k) = \hat{b})}{P(x_n(k) = b)}\right)$; $b, \hat{b} \in \beta$, 且 $b \neq \hat{b}$ 。

如果传输的是 $x_n(k) = b$, 上述判决规则也可以表示为

$$Z < \eta - E_s |d|^2 \quad (14)$$

其中, $Z = 2d \sqrt{E_s} R\{\omega_n(k)\}$, 并且 $d = b - \hat{b} \in \{-2, 2\}$ 。判决变量 Z 是一个高斯随机变量, 并且均值 $E(Z) = 0$, 方差 $\sigma_Z^2 = 2N_{\text{ow}} E_s^2 |d|^2$ 。采用 $e_{nb} = P(Z < \eta - E_s | d|^2)$ 计算错误概率, 可以推导出式(12)。

在融合中心检测后, 对于第 n 个二级用户在融合中心的虚警和漏检的概率可由式(15)表示:

$$\hat{P}_{f_n} = P_{f_n} (1 - e_{n10}) + (1 - P_{f_n}) e_{n10}, \hat{P}_{m_n} = P_{m_n} (1 - e_{n01}) + (1 - P_{m_n}) e_{n01} \quad (15)$$

其中, P_{f_n} 和 P_{m_n} 在式(4)中定义, e_{n01} 和 e_{n10} 在引理 1 中定义。

基于上述结果, 对于多数判决系统规则, 能够推导出虚警和漏检总体概率。结果由命题 1 阐述。

命题 1 如果二级用户都采用相互独立且相同的信道, 则本研究提出的采用多数判决规则的联合频谱感知系统的总体虚警概率和漏检概率分别为:

$$P_f^{(M, J)} = \sum_{M=\lfloor a \rfloor}^N \binom{N}{M} \hat{P}_{f_n}^M (1 - \hat{P}_{f_n})^{N-M}, \quad (16)$$

$$P_m^{(M, J)} = 1 - \sum_{M=\lfloor a \rfloor}^N \binom{N}{M} \hat{P}_{m_n}^M (1 - \hat{P}_{m_n})^{N-M} \quad (17)$$

其中, $\binom{N}{M}$ 是二项式系数, \hat{P}_{f_n} 和 \hat{P}_{m_n} 在式(16)中定义。

证明: 多数判决规则下, 在融合中心检测之后, 如果大于等于 $\lfloor a \rfloor$ 的二级用户含有虚警, 则虚警发生。在融合中心, 含有虚警的二级用户的数目由一个以 N 和 \hat{P}_{f_n} 为参数的二项式分布建模表示。基于二进制随机变量的概率质量分布函数, 得到了总体虚警概率, 如式(16)所示, 漏检概率可由同样的方法计算得到。

将式(16)中的 $\lfloor a \rfloor$ 替换为 1, 能够得到或逻辑判决规则的概率, 这是因为融合中心足以做出决定支持 $\hat{x}_n(k)$ 的值为 1。结果如推论 1 所述。

推论 1 如果二级用户采用相互独立且硬件完全相同的信道, 那么本研究提出的采用或逻辑判决规则的联合频谱感知系统的总体虚警概率和漏检概率为:

$$P_f^{(OR)} = 1 - (1 - \hat{P}_{f_n})^N, \quad (18)$$

$$P_m^{(OR)} = \hat{P}_{m_n}^N \quad (19)$$

其中, $\binom{N}{M}$ 是二项式系数, \hat{P}_{f_n} 和 \hat{P}_{m_n} 在式(15)中定义。

3 数值仿真与计算

仿真中, 时域带宽积 $u=5$ 。初级用户的流量模式包含有两个状态量的马尔可夫链, 此马尔可夫链的传输概率为 $p_{00}=0.8, p_{10}=0.3$ 。假定初级用户和二级用户之间的信噪比 $\gamma_s=10$ dB。在渐进式最大后验估计判决规则中, 滑动窗口的大小为 $K=100$ 。

图 3 显示了 P_f 和 P_m 随阈值 λ 变化的情况。网络中有 $N=5$ 个二级用户, 二级用户和融合中心之间的信噪比为 $\gamma_s=5$ dB。融合中心采用新的渐进式最大后验估计算法对来自二级用户的信号进行检测。分析和仿真结果极其一致。应该指出的是, 分析结果

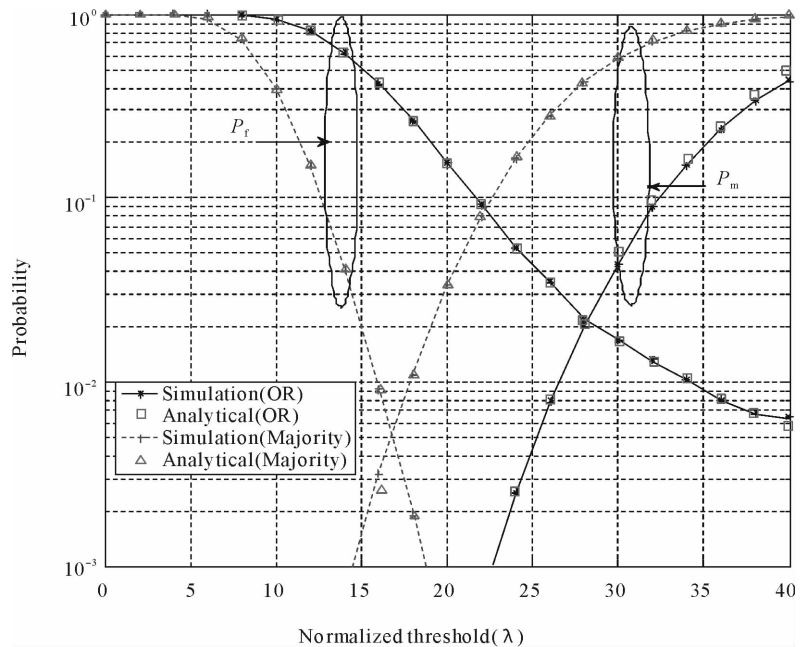


图 3 P_f 和 P_m 分析仿真对比图

Fig. 3 Comparisons between the analytical and simulated P_f and P_m

是在完美的先验信息假设下获得的。分析结果表明,本文提出的渐进式算法能获得一个极其准确的先验概率估计。此外,正如预期的,多数数据融合规则在 P_f 方面优于或逻辑数据融合规则,而在 P_m 方面,两者的性能恰恰相反。

图 4 对本文提出的渐进式最大后验估计算法与文献[7]提出的算法进行了性能对比,在文献[7]中,其先验概率是通过对所有来自二级用户的信号在空间域求平均值估计得到的。图 4 以接收机工作特性的形式列出了仿真结果,在网络中有 2 个二级用户,因此,或逻辑融合规则和多数融合规则是一样的。在第二步,信噪比 γ_T 的取值范围在 -10 dB 到 10 dB 之间,当信噪比小于或等于 0 dB 时,在大多数 P_m/P_f 区域内($P_m \approx P_f$ 除外),本文算法优于空间最大后验估计算法;当 $P_m \approx P_f$ 时,空间最大后验估计略优于渐进式最大后验估计。随着 γ_T 的增加,两种算法的差异逐渐减少。为了减少对初级用户的干扰,二级用户通常采用非常低的发射功率,故推测第二步的信噪比通常也比较低。因此,本文提出的渐进式最大后验估计算法在大多数操作区域内能达到一个较好的均衡。

或逻辑和多数融合规则的性能在图 5 中做了对比。网络中有 3 个二级用户,融合中心采用新的渐进式最大后验概率估计算法检测来自二级用户的信号。对于第二步信噪比 γ_T 的给定值,当 P_f 小于某一阈值(或 P_m 高于某一阈值)时,多数判决规则的性能优于或逻辑判决规则;当 P_f 高于这一阈值时,其性能恰恰相反。因此,对或逻辑和多数融合规则的选择依赖于 P_f (或 P_m)。当参数 P_f 的值较小时,优先考虑多数融合规则;当参数 P_m 的值较小时,则优先考虑或逻辑融合规则。此外, P_f 的阈值随着信噪比 γ_T 的增加而减小。当 $\gamma_T = 10$ dB 时,对于图 5 中的所有操作范围,多数融合规则优于或逻辑融合规则。因此,当第二步的信噪比较高时,多数判决规则通

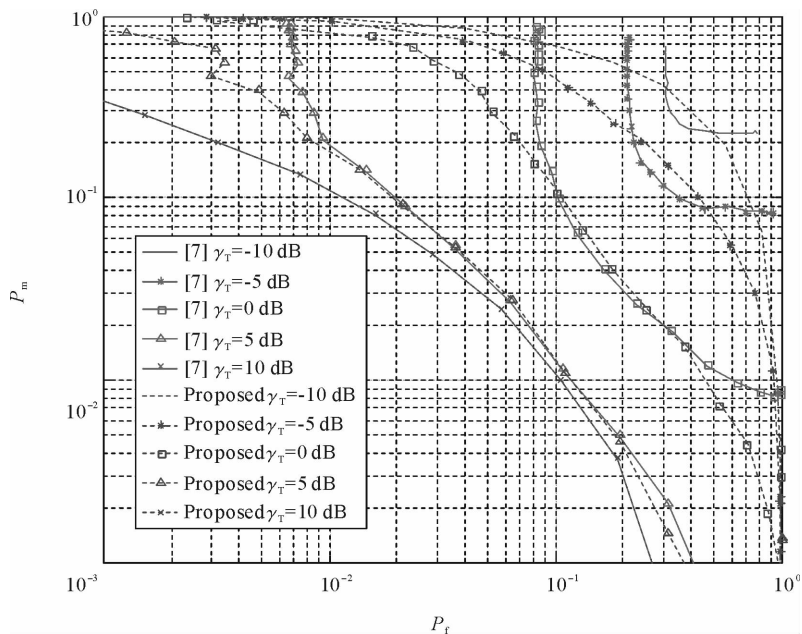


图 4 采用渐进式最大后验估计算法系统的接收机工作特性仿真图

Fig. 4 ROC performance of the system with the progressive MAP estimation algorithm

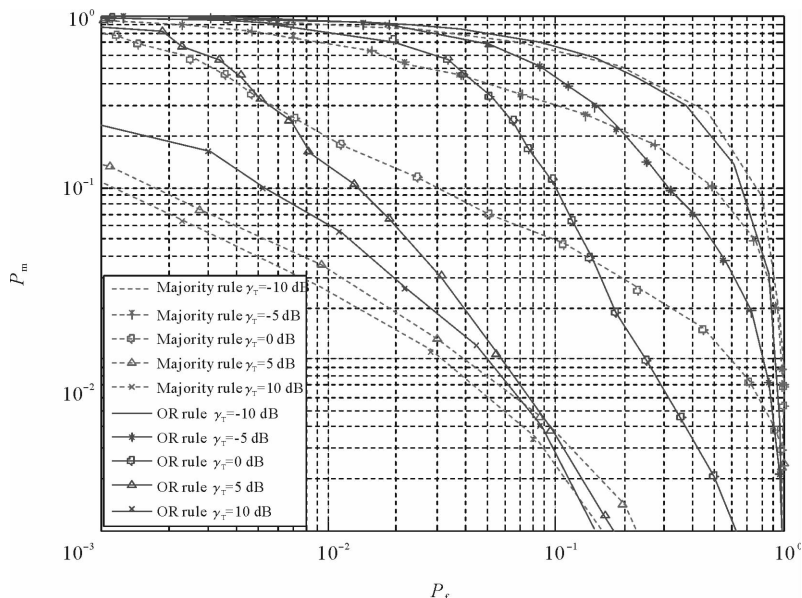


图 5 采用或逻辑数据融合规则和多数数据融合规则系统的接收机工作特性仿真图

Fig. 5 ROC performance of the system with the OR data fusion rule and the majority data fusion rule

过。当参数 P_f 的值较小时,优先考虑多数融合规则;当参数 P_m 的值较小时,则优先考虑或逻辑融合规则。此外, P_f 的阈值随着信噪比 γ_T 的增加而减小。当 $\gamma_T = 10$ dB 时,对于图 5 中的所有操作范围,多数融合规则优于或逻辑融合规则。因此,当第二步的信噪比较高时,多数判决规则通

常能实现比较好的性能。

4 结论

基于认知无线网络,提出了一种新的联合频谱感知算法。其中,初级用户的统计传输模式采用了两状态的马尔科夫模型。通过渐进式估计马尔科夫链传输概率得到了来自二级用户信息的先验概率,在此基础上产生了渐进式最大后验概率检测算法,推导出渐进式最大后验估计检测的错误概率,以及采用多数和或逻辑两种数据融合规则的虚警和漏检总体概率。通过观察数值发现,新的渐进式最大后验估计检测改善了现有的频谱感知算法的性能。此外,融合中心端的信噪比较高时,在降低虚警概率和漏检概率两个方面,多数数据融合规则优于或逻辑数据融合规则。

参考文献:

- [1]ENGELMAN R,ABROKWAH K,DILLON G,et al. Federal communications commission spectrum policy task force[R/OL]. The Spectrum Efficiency Working Group,Nov,2002. [2011-05-23]. http://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWG_Final_Report_1.pdf.
- [2]MITOLA J. MAGUIRE G. Cognitive radio: Making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999,6(4):13-18.
- [3]MITOLA J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology,2000.
- [4]HAYKIN S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2005,23(2):201-220.
- [5]SAHAI A,HOVEN N,TANDRA R. Some fundamental limits on cognitive radio[C]//42nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello Illinois, USA, Sep. ,2004:1-11.
- [6]GHASEMI A,SOUSA E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments[C]//Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, USA. Nov. ,2005:131-136.
- [7]AYSAL T C,KANDEEPAN S,PIESIWICZ S. Cooperative spectrum sensing over imperfect channels[C]//Proceedings of the First IEEE International Symposium on. New Orleans, USA, Nov. ,2008:1-5.
- [8]CABRIC D,TKACHENKO A,BRODERSEN R W. Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation[C]//2nd Annual International Wireless Internet Conference (WICON), TAPAS Workshop. New York, USA: ACM Press,2006:1-8.
- [9]QUAN Zhi,CUI Shuguang,SAYED A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2008,2(1):28-40.
- [10]LIU Keqin,ZHAO Qing. Indexability of restless bandit problems and optimality of whittle index for dynamic multichannel access[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2010,56(11):5547-5567.
- [11]URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of the IEEE,1967,55(4):523-531.
- [12]DIGHAM F F,ALOUINI M S,SIMON M K. On the energy detection of unknown signal over fading channels[C]//IEEE International Conference on Communications. Anchorage, Alaska, USA, May,2003:3575-3579.
- [13]WU Jingxian,ZHOU Guoqing. A new ultra-low power wireless sensor network with integrated energy harvesting, data sensing,and wireless communication [C/DB]//2011 IEEE International Conference on Communications. Kyoto, Japan, June,2011.
- [14]ROSS S M. Introduction to probability models[M]. 7th ed. New York: Academic Press,2007.