



一种基于能量检测的协作式频谱感知算法

付彩梅,李有明,周桂莉,余明宸,童景文,王旭芃

(宁波大学信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:为提高认知无线电系统中频谱检测的可靠性,提出了一种基于能量检测的协作式频谱感知算法。利用授权用户的状态在相邻感知帧之间变化的概率小这一特性,通过将当前感知帧的能量值与相邻值相结合来判断授权用户状态,这样当授权用户使用授权频段时,所提算法能有效减小采样信号能量值骤减时发生误判的概率。另外给出了所提算法检测概率和虚警概率的闭式表达式。理论分析和仿真结果表明,所提算法比传统的协作式频谱检测算法检测性能好。

关键词:协作频谱感知;检测概率;认知用户;授权用户

中图分类号:TN911

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016232

A new cooperation spectrum sensing algorithm based on energy detection

FU Caimei, LI Youming, ZHOU Guili, YU Mingchen, TONG Jingwen, WANG Xupeng

College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: To improve the reliability of spectrum sensing in cognitive radio system, a new cooperation spectrum sensing algorithm was proposed. In this algorithm, the property of the low probability between adjacent frames of the states change was used and then the decision was made by combing the energy value of the current sensing frame with that of the neighboring frame. Therefore, the proposed algorithm could decrease the miss detection probability in case of the instantaneous signal energy dropping when primary user used the licensed spectrum. Furthermore, theoretical expressions for detection probability and false alarm probability were derived. Finally, theoretical analysis and simulation results verify that the detection performance of the proposed algorithm is better than that of cooperative spectrum sensing which is based on the classical energy detection.

Key words: cooperative spectrum sensing, detection probability, secondary user, primary user

1 引言

随着通信技术的发展,人们对频谱的需求量越来越大,目前静态的频谱分配方式导致频谱利用率不高。认知

无线电技术可以通过发现和利用空闲频谱改善频谱紧张的局面^[1]。认知用户只有在授权用户空闲时才能使用授权频段,否则将对授权用户产生干扰,因此频谱检测技术在认知无线电中很重要。

收稿日期:2016-05-03;修回日期:2016-09-06

通信作者:李有明,liyouming@nbu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61571250);宁波市自然科学基金资助项目(No.2015A610121)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61571250), Ningbo Natural Science Foundation of China(No.2015A610121)

认知无线电中常见的单用户频谱感知方法有能量检测法、匹配滤波器法和基于循环平稳的检测方法^[2]等。这些方法虽然容易实现,但是当发生阴影效应和多径效应时,检测性能就会降低,这时就需要多个认知用户协作进行频谱检测。协作式频谱检测是把多个认知用户的感知结果结合起来,从而得到最终的判决结果。参考文献[3]提出了基于循环平稳的协作频谱感知方法,在认知用户接收端信噪比较低时具有较好的检测性能。然而,该方法要求授权用户信号具有循环平稳特性,并且要求其循环频率已知,这在实际应用中有一定的困难。参考文献[4,5]对基于等增益融合(EGC)规则和基于最大比合并(MRC)融合规则的软合并的协作频谱检测算法进行了研究。所有认知用户把本地采样信号的检测统计量传递给数据融合中心后,数据融合中心给予它们一定的权重,再进行最终的判决,EGC是等权重,而MRC则根据信噪比来确定权重。MRC规则区分了不同协作用户的可信度,因此具有更好的检测性能,然而需要知道不同协作用户采样信号的信噪比(SNR),这在实际中也是困难的,且需要传输大量的能量值,占用了较多的带宽。参考文献[6-9]提出了基于双门限能量检测法的协作频谱检测方法,认知用户采样信号能量值在低于较小门限或者高于较大门限时,认知用户将其判决结果发给数据融合中心,而在两个门限之间时,将其能量值发送给数据融合中心,最后由数据融合中心根据这些数据做出最终判决,这样能够较好地提高频谱检测性能。然而在把能量值传给数据融合中心时,系统占用的带宽大、开销大,并且算法的复杂度也较高。参考文献[10,11]提出了一种基于 P 次方检测器的协作式频谱检测方法,在合适的 P 值下能很好地提高检测性能,且能增加认知网络的吞吐量,然而目前并没有具体的实物可以完成可调控的 P 次方检测器件的功能。

参考文献[12]利用授权用户的状态在相邻的感知帧之间变化的概率较小这一性质,提出了一种基于单一认知用户的改进能量检测(improved energy detection, IED)算法,认知用户将当前感知帧的能量值与相邻一些感知帧的能量值相结合来判决授权用户是否正在使用授权频段。考虑到授权用户的状态在相邻感知帧之间是有可能变化的,本文利用授权用户状态的转移概率对IED的检测概率和虚警概率进行了修正。在此基础上,提出了一种协作式频谱检测算法,每个认知用户采用IED的方法对授权用户的状态进行判定,数据融合中心再把每个判决结果按一定的准

则结合,做出总判决。本方法不仅易于实现、复杂度低、能够减小系统开销,而且对认知用户的接收信号没有要求,因此具有较广泛的适用范围。

2 系统模型

集中式协作频谱感知是指每个认知用户把感知量发送给数据融合中心,再由数据融合中心根据某种准则将各认知用户的感知量相结合,然后对授权用户是否占用授权频段做出最终判决。数据融合中心再把最终判决广播给每一个次用户或直接控制各个认知用户的通信业务。若这个感知量为认知用户的判决结果,则称为硬判决的集中式协作频谱感知,其模型如图1所示。

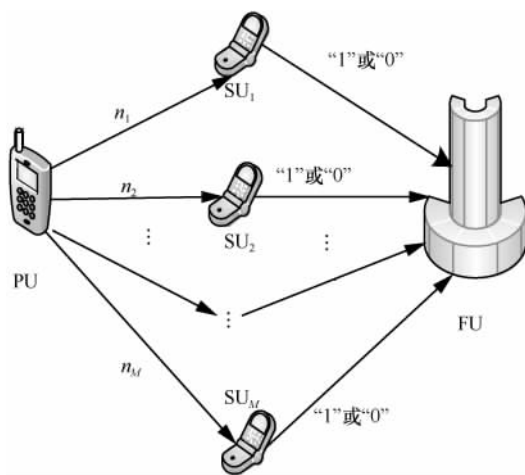


图1 硬判决的集中式频谱检测模型

H_1 表示授权用户占用目标频段时的状态, H_0 表示不占用目标频段时的状态。假设信道为加性高斯白噪声的连续信道,有 M 个认知用户参与协作式频谱检测,则每个认知用户接收到的信号为:

$$x_i(t) = \begin{cases} n_i(t), & H_0 \\ s_i(t) \cdot h_i(t) + n_i(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $n_i(t)$ 是噪声,平均值为0、方差为 σ_w^2 , $s_i(t)$ 表示主用户发出的信号, $h_i(t)$ 为无线信道的增益。数据融合中心采用的硬判决准则一般有“AND判决”“OR判决”和“K秩判决”^[13]。每个认知用户根据能量检测法对其接收信号进行判决,假设第 i 个认知用户判决结果为 u_i ,则:

$$u_i = \begin{cases} 1, & H_1 \\ 0, & H_0 \end{cases} \quad (2)$$

那么数据融合中心对这 M 个认知用户做出的最终判



决 U 如下:

$$U = \begin{cases} \sum_{i=1}^M u_i \geq 1, \text{OR 判决} \\ \sum_{i=1}^M u_i = M, \text{AND 判决} \\ \sum_{i=1}^M u_i \geq K, K \text{ 秩判决} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

假设第 i 个次级用户的检测概率是 $p_{d,i}$, 虚警概率是 $p_{f,i}$ 。采用硬判决算法后协作的检测概率为 P_D , 协作检测的虚警概率是 P_F , 则 3 种判决方式下的检测概率和虚警概率表示如下。

OR 判决:

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_{d,i}), P_F = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_{f,i}) \quad (4)$$

AND 判决:

$$P_D = \prod_{i=1}^M p_{d,i}, P_F = \prod_{i=1}^M p_{f,i} \quad (5)$$

K 秩判决:

$$P_D = \sum_{i=k}^M C_M^i \prod_{j=1}^i p_{d,j} \prod_{n=1}^{M-i} (1 - p_{d,n}),$$

$$P_F = \sum_{i=k}^M C_M^i \prod_{j=1}^i p_{f,j} \prod_{n=1}^{M-i} (1 - p_{f,n}) \quad (6)$$

若每个认知用户判决时的检测概率和虚警概率都相同, 即:

$$p_{d,i} = p_d, p_{f,i} = p_f, i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

则式(5)可写成:

OR 判决:

$$P_D = 1 - (1 - p_d)^M, P_F = 1 - (1 - p_f)^M \quad (8)$$

AND 判决:

$$P_D = p_d^M, P_F = p_f^M \quad (9)$$

K 秩判决:

$$P_D = \sum_{i=k}^M C_M^i (p_d)^i (1 - p_d)^{M-i},$$

$$P_F = \sum_{i=k}^M C_M^i (p_f)^i (1 - p_f)^{M-i} \quad (10)$$

在式(7)成立的情况下, 有最佳检测效果的认知用户的个数为 $K=M/2^{[14]}$ 。

3 基于 IED 的协作式频谱检测算法

在协作式频谱检测中, 认知用户一般采用传统的能量检测法(classical energy detection, CED)对其接收信号进行判决, 但是当授权用户状态不变而某一认知用户接收信号的能量值发生突变时, 其判决结果会非常不可靠, 这就会导致数据融合中心的判决结果也不可靠, 特别是当数据融合中心使用“OR 判决”和“AND 判决”准则的时候。为解决这一问题, 本文提出了一种基于改进的能量检测法的协作式频谱检测算法, 即每个认知用户利用 IED 算法进行判决, 从而在本地得到更可靠的判决结果, 再由数据融合中心做出总判决。

3.1 IED 算法及其修正

3.1.1 IED 算法

通常当认知用户接收信号的能量受到某些突发事件的影响时, 就会与正常情况发生很大的偏差, 导致错判的发生。如图2所示的第10个感知帧(事件A)和第41个感知帧(事件B), 用 CED 方法都会发生误判。事件B的误判只是导致频谱利用率有所降低, 但是事件A却会导致授权用户与认知用户同时使用授权频段, 这会对授权用户造成极大的干扰。

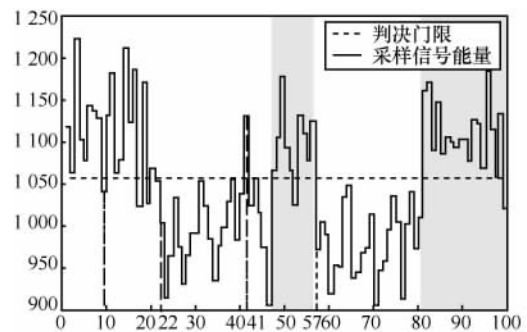


图2 采样信号能量变化情况

为了在事件A发生时做出正确的判断, 参考文献[12]提出了 CED 的改进算法——IED 算法, 利用授权用户的状态在相邻感知帧间变化概率较小这一特性, 当认知用户的某一帧采样信号的能量值低于门限值时, 采用图3所示的算法进行频谱检测。

其中, λ 表示判决时的门限值。平均能量为:

$$T_i^{\text{ave}}(T_i) = \frac{1}{L} (T_{i-L+1}(y_{i-L+1}) + T_{i-L+2}(y_{i-L+2}) + \dots + T_{i-1}(y_{i-1}) + T_i(y_i)) \quad (11)$$

采用这种算法后, 其虚警概率和检测概率如下所示:

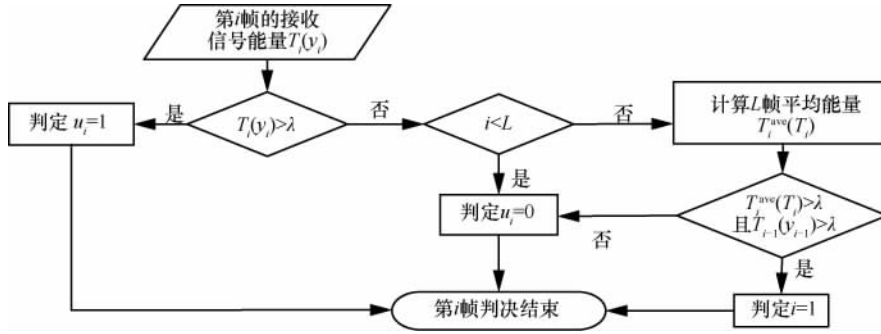


图3 IED算法的流程

$$\begin{cases}
 p_d = P\{T_i(y_i) > \lambda\}_{H_1} + P\{T_i(y_i) \leq \lambda\}_{H_1} \cdot \\
 \quad P\{T_i^{\text{ave}}(T_i) > \lambda\} \cdot P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{H_1} \\
 = p_d^{\text{CED}} + p_d^{\text{CED}}(1 - p_d^{\text{CED}})Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \\
 p_f = P\{T_i(y_i) > \lambda\}_{H_0} + P\{T_i(y_i) \leq \lambda\}_{H_0} \cdot \\
 \quad P\{T_i^{\text{ave}}(T_i) > \lambda\} \cdot P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{H_0} \\
 = p_f^{\text{CED}} + p_f^{\text{CED}}(1 - p_f^{\text{CED}})Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right)
 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $T_i^{\text{ave}}(T_i)$ 服从 $N(\mu_{\text{ave}}, \sigma_{\text{ave}})$ 的正态分布, μ_{ave} 和 σ_{ave} 的表达式如下:

$$\begin{aligned}
 \mu_{\text{ave}} &= \frac{X}{L} N(\sigma_s^2 + \sigma_w^2) + \frac{L-X}{L} N\sigma_w^2, \\
 \sigma_{\text{ave}}^2 &= \frac{X}{L^2} 2N(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2 + \frac{L-X}{L^2} 2N\sigma_w^4 \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中, X 表示 L 个感知帧中授权用户实际状态为 H_1 的感知帧个数。

IED 算法可以避免采样信号能量骤减时发生漏检, 从式(16)可以看出, 它增加了检测概率, 虽然同时也增加了一点虚警概率, 但是这种牺牲却使得检测概率提高了很多, 从而也使整体的检测性能变好了。

3.1.2 IED 算法检测性能的修正

考虑到在相邻感知帧授权用户的状态可能不一样, 本文利用相邻帧之间状态的转移概率对 IED 的检测概率和虚警概率进行修正。假设 $p_{xy}^* \triangleq P\{z_i = y | z_{i-1} = x\}$ ($x, y \in \{1, 0\}$), 表示某一帧授权用户状态为 H_y 时, 其前一帧状态为 H_x 时的概率, 因此有 $p_{00}^* + p_{10}^* = 1$, $p_{01}^* + p_{11}^* = 1$ 。由于感知帧的时长远远小于授权用户每一次占用或离开授权频段的时间, 所以通常有 $p_{00}^* \gg 0.5$, $p_{10}^* \ll 0.5$, $p_{11}^* \gg 0.5$, $p_{01}^* \ll 0.5$ 。由此可以得到:

$$\begin{cases}
 P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{z_i=H_1} = P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{z_{i-1}=H_1} \cdot \\
 P\{z_{i-1} = H_1\}_{z_i=H_1} + P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{z_{i-1}=H_0} \cdot \\
 P\{z_{i-1} = H_0\}_{z_i=H_1} = p_{01}^* p_f^{\text{CED}} + p_{11}^* p_d^{\text{CED}} \\
 P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{z_i=H_0} = P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{z_{i-1}=H_1} \cdot \\
 P\{z_{i-1} = H_0\}_{z_i=H_0} + P\{T_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda\}_{z_{i-1}=H_0} \cdot \\
 P\{z_{i-1} = H_0\}_{z_i=H_0} = p_{10}^* p_d^{\text{CED}} + p_{00}^* p_f^{\text{CED}}
 \end{cases} \quad (14)$$

基于此得到:

$$p_d^{\text{IED}} = p_d^{\text{CED}} + (1 - p_d^{\text{CED}})(p_{01}^* p_f^{\text{CED}} + p_{11}^* p_d^{\text{CED}})Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \quad (15)$$

由于 p_{01}^* 和 p_f^{CED} 都是比较小的, 可以利用近似值 $p_{01}^* p_f^{\text{CED}} \approx 0$, 由此得到:

$$p_d^{\text{IED}} = p_d^{\text{CED}} + p_{11}^* p_d^{\text{CED}}(1 - p_d^{\text{CED}})Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{avg}}}{\sigma_{\text{avg}}}\right) \quad (16)$$

同样可以得到修正之后的虚警概率为:

$$p_f^{\text{IED}} = p_f^{\text{CED}} + (1 - p_f^{\text{CED}})(p_{00}^* p_f^{\text{CED}} + p_{10}^* p_d^{\text{CED}})Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{avg}}}{\sigma_{\text{avg}}}\right) \quad (17)$$

由图3可知, 认知用户在某一帧的判决结果与其前一帧的能量值是有关联的。式(12)仅考虑了授权用户相邻感知帧状态相同的情况。而式(16)、式(17)也考虑它们不一样时的情况, 通过加入授权用户的状态转移概率提高准确性。

其门限值可以用恒虚警概率法得到, 与 CED 的门限设置是相同的:

$$\lambda = (Q^{-1}(p_{\text{f,target}}) \sqrt{2N} + N) \sigma_w^2 \quad (18)$$

该门限又被称为保守门限。

IED 算法是一种单一认知用户的频谱检测算法, 检测



性能虽然提高了很多,但当遇到隐藏终端这一问题时,单个认知用户的检测性能仍然很差。为解决这一问题,本文提出了基于 IED 的协作式频谱检测算法。

3.2 基于 IED 的协作式频谱检测算法

本文所提出的基于 IED 的协作式频谱检测算法如下。

输入:门限值 λ 、 L ,采样点数 N ,认知用户的个数 M 。

输出:数据融合中心的判决结果 U 。

(1)在第 i 个感知帧,收集每个认知用户的采样信号能量 $T_{1,i}(y_{1,i}), T_{2,i}(y_{2,i}), \dots, T_{M,i}(y_{M,i})$;

(2)每个认知用户根据 IED 算法对授权用户的状态进行判断,得到 $u_1, u_2, \dots, u_M, m \in [1, M]$;

(3)数据融合中心根据式(3)对授权用户的状态进行判断,得到最终的判决结果 U 。

根据式(4)、式(16)和式(17),可以得到基于 IED 的协作式频谱检测算法的虚警概率和检测概率,分别如下所示:

OR 判决:

$$\begin{cases} P_D = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_{d,j}^{\text{IED}}) \\ = 1 - \prod_{j=1}^M \left(1 - p_{d,j}^{\text{CED}} - p_{11}^* p_{d,j}^{\text{CED}} (1 - p_{d,j}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \\ P_F = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_{f,j}^{\text{IED}}) \\ = 1 - \prod_{j=1}^M \left(1 - p_{f,j}^{\text{CED}} - (1 - p_{f,j}^{\text{CED}}) (p_{00}^* p_{f,j}^{\text{CED}} + p_{10}^* p_{d,j}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \end{cases} \quad (19)$$

AND 判决:

$$\begin{cases} P_D = \prod_{j=1}^M p_{d,j}^{\text{IED}} \\ = \prod_{j=1}^M \left(p_{d,j}^{\text{CED}} + p_{11}^* p_{d,j}^{\text{CED}} (1 - p_{d,j}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \\ P_F = \prod_{j=1}^M p_{f,j}^{\text{IED}} \\ = \prod_{j=1}^M \left(p_{f,j}^{\text{CED}} + (1 - p_{f,j}^{\text{CED}}) (p_{00}^* p_{f,j}^{\text{CED}} + p_{10}^* p_{d,j}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \end{cases} \quad (20)$$

K 秩判决:

$$\begin{cases} P_D = \sum_{l=k}^M C_M^l \prod_{j=1}^l p_{d,j}^{\text{IED}} \prod_{n=1}^{M-l} (1 - p_{d,n}^{\text{IED}}) \\ P_F = \sum_{l=k}^M C_M^l \prod_{j=1}^l p_{f,j}^{\text{IED}} \prod_{n=1}^{M-l} (1 - p_{f,n}^{\text{IED}}) \end{cases} \quad (21)$$

其中,“K 秩判决”的表达式如下:

$$\begin{cases} P_D = \sum_{l=k}^M C_M^l \prod_{j=1}^l \left(p_{d,j}^{\text{CED}} + p_{11}^* p_{d,j}^{\text{CED}} (1 - p_{d,j}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \\ \prod_{n=1}^{M-l} \left(1 - p_{d,n}^{\text{CED}} - p_{11}^* p_{d,n}^{\text{CED}} (1 - p_{d,n}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \\ P_F = \sum_{l=k}^M C_M^l \prod_{j=1}^l \left(p_{f,j}^{\text{CED}} + (1 - p_{f,j}^{\text{CED}}) (p_{00}^* p_{f,j}^{\text{CED}} + p_{10}^* p_{d,j}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \\ \prod_{n=1}^{M-l} \left(1 - p_{f,n}^{\text{CED}} - (1 - p_{f,n}^{\text{CED}}) (p_{00}^* p_{f,n}^{\text{CED}} + p_{10}^* p_{d,n}^{\text{CED}}) Q\left(\frac{\lambda - \mu_{\text{ave}}}{\sigma_{\text{ave}}}\right) \right) \end{cases} \quad (22)$$

从式(19)~式(22)与式(4)的比较可以看出,本文所提算法检测概率较高,检测性能有所提升。

在本方法中,选取门限值时应该使协作后融合中心处的目标虚警概率 $P_{F,\text{target}} \leq 0.1$ 。在此设 $P_{F,\text{target}} = 0.1$,如果再利用式(7)的判决门限,那么对于“OR 判决”来说,协作后的虚警概率 P_F 就会比 0.1 大很多,这样就会导致频谱利用率低。同样对于“AND 判决”,协作后的检测概率比协作之前小,这样授权用户和认知用户发生冲突的可能性更高。因此在本文求门限值时,固定协作后的虚警概率 $P_{F,\text{target}} = 0.1$,然后由式(8)~式(10)求出不同判决方法下单个认知用户的目标虚警概率,再由式(18)求门限值,可得:

OR 判决:

$$\lambda_{\text{OR}} = (Q^{-1} \left(1 - (1 - P_{F,\text{target}})^{\frac{1}{M}} \right) \sqrt{2N} + N) \sigma_{\omega}^2 \quad (23)$$

AND 判决:

$$\lambda_{\text{AND}} = (Q^{-1} \left(P_{F,\text{target}}^{\frac{1}{M}} \right) \sqrt{2N} + N) \sigma_{\omega}^2 \quad (24)$$

K 秩判决:

$$\lambda_K = (Q^{-1} (P_{f,\text{target}}^*) \sqrt{2N} + N) \sigma_{\omega}^2 \quad (25)$$

其中, $P_{f,\text{target}}^*$ 是方程 $\sum_{l=k}^M C_M^l (P_{f,\text{target}}^*)^l (1 - P_{f,\text{target}}^*)^{M-l} = P_{F,\text{target}}$

在 $[0, 1]$ 上的解。

4 仿真结果及分析

通过计算机仿真,重点比较了传统的协作式频谱检测算法^[15](“K 秩判决(CED)”“AND 判决(CED)”和“OR 判决(CED)”法)、单一认知用户基于 IED 的频谱感知算法^[12]以及本文提出的协作式频谱检测算法 (“K 秩判决(IED)”“AND 判决(IED)”和“OR 判决(IED)”法)。在仿真过程中,所有认知用户的采样长度为 $N=1\ 000$,每个认知用户接收

端信噪比相同,感知帧时长设为 $TF=10\text{ ms}$,每种情况下进行 10 000 帧的检测。表 1、图 4~图 7 中仅考虑了加性高斯白噪声信道,而图 8 考虑了 3 种典型的无线传输衰落信道^[16]。

表 1 比较了修正前理论值(式(12))和修正后的理论值(式(16)、式(17))在不同情况下的虚警概率和检测概率。仿真实验中目标虚警概率为 0.1,转移概率分别为 $p_{00}^*=0.952\ 4$, $p_{10}^*=0.047\ 6$, $p_{11}^*=0.952\ 4$, $p_{01}^*=0.047\ 6$, $L=3$ 。表 1 中小括号内的数据表示理论值与仿真值之间的误差。

由表 1 可知,检测概率都随着信噪比的增加而增加,虚警概率几乎不随着信噪比的变化而变化。修正后虚警概率和检测概率的理论值与实验值之间的误差虽然依然存在,但是与修正前理论值与实验值之间的误差相比,都有所减小,更接近于实验值。

图 4 表示在 $P_{F,\text{target}}=0.1$, 认知用户个数为 3, $K=2, L=3$ 时,本文所提算法和传统算法在各种合并准则下的检测概

率随信噪比的变化曲线。图 4 说明两类方法的检测概率均随着信噪比的增加而增大。在同样的信噪比下,本文所提算法的检测性能明显优于传统算法的检测性能。例如,对于“AND 判决”合并准则来说,在 $SNR=-13\text{ dB}$ 时,本文所提算法的检测概率为 0.91, 而传统算法的检测概率为 0.67。虽然本文所提算法的实际虚警概率比传统的大,但是这一点的牺牲却能使检测概率提高很多。

图 5 表示在认知用户个数为 3, $K=2, L=3$, 信噪比为 -11 dB 时,传统算法和本文所提算法的检测概率随着实际的虚警概率变化曲线的对比,即 ROC(receiver operating characteristic curve)。由图 5 可以看出,当虚警概率较低时,传统算法和与本文所提算法的检测概率都较低;随着虚警概率的提高,检测概率都逐渐增大。图 5 也说明了在同一较小的虚警概率下,本文所提算法 3 种合并准则的检测概率都比传统算法任何一种合并准则的检测概率高。比如目标虚警概率为 0.1 时,本文所提方法的“K 秩”“AND”

表 1 虚警概率和检测概率的仿真值和理论值

条件		信噪比/dB		
		-13	-10	-8
实验值	检测概率	0.532 4	0.935 3	0.998 2
	虚警概率	0.104 4	0.106 3	0.108 9
修正前	检测概率	0.579 0(8.75%)	0.962 6(2.92%)	0.999 4(0.12%)
	虚警概率	0.101 4(2.87%)	0.100 7(5.27%)	0.101 1(7.16%)
修正后	检测概率	0.567 3(6.55%)	0.955 1(2.12%)	0.998 3(0.001%)
	虚警概率	0.101 6(2.68%)	0.101 1(4.89%)	0.101 6(6.70%)

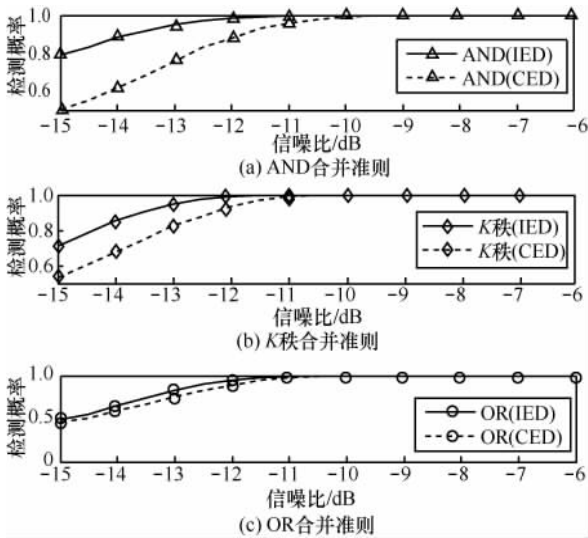


图 4 检测概率随信噪比的变化情况

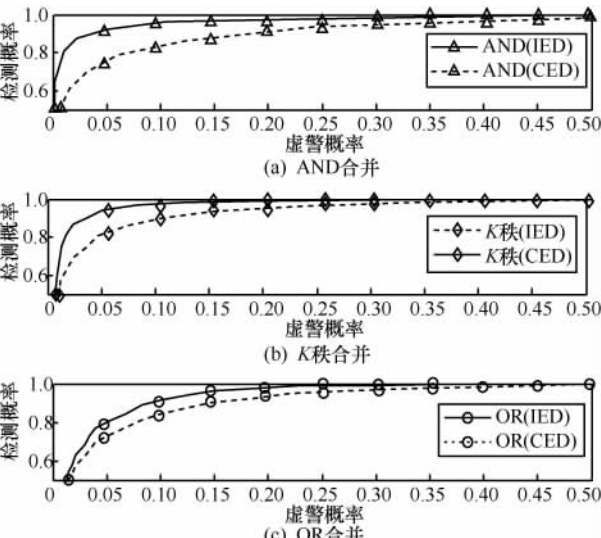


图 5 不同合并准则的 ROC 曲线对比



“OR”的检测概率分别为 0.96、0.95、0.92,而传统方法“K 秩”“AND”“OR”的检测概率分别为 0.89、0.84、0.85。

图 6 表示 $L=3$ 时,在不同的认知用户数目 M 下,本文所提算法检测概率随信噪比的变化曲线。图 6 只比较了两类方法在“K 秩”合并准则下的检测性能。由图 6 可以看出,当协作用户数量增加时,系统的检测性能有较明显的提升。例如,在信噪比为 -15 dB 时, M 为 1、3、5、7 时的检测概率分别为 0.34、0.51、0.68、0.80。这说明了所提算法的检测性能与参与协作感知的认知用户数量有较大的关系。图 6 中 $M=1$ 代表了单一认知用户的检测性能,即参考文献[12]的方法。图 6 也说明了本文所提协作式频谱检测算法的检测性能比单一认知用户 IED 检测算法的性能好很多。

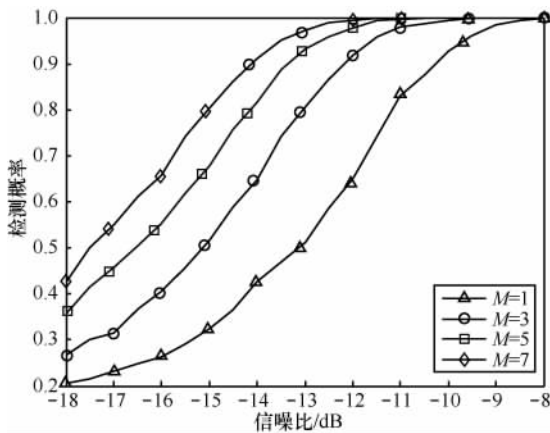


图 6 不同认知用户数目时检测概率随信噪比的变化曲线

图 7 表示本文所提方法取不同的 L 时,检测概率随 SNR 的变化曲线。这时取 $M=3, K=2$,图 7 只比较了本文所提算法在“K 秩”合并准则下的检测性能。由于实际中要求 $P_d \geq 0.9$,从图 7 可以看出,不同 L 时都可以在 $SNR = -12$ dB 时达到这一要求,所以在信噪比较高时 L 的增加对性能的改善作用并不明显,实际中要根据需求选取较为合理的 L 值。

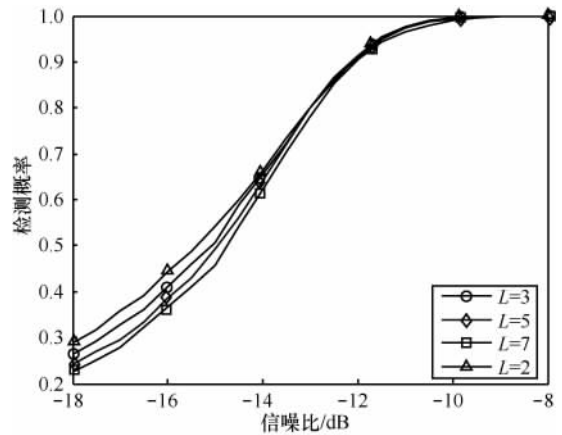


图 7 检测性能随 L 的变化情况

为了比较不同信道环境下,本文所提算法的性能,做了如下仿真分析。此处考虑了 3 种经典的无线传输信道,即 Nakagami、Rayleigh(瑞利)、Ricean(莱斯)3 种信道^[9],阴影衰落都服从对数正态分布,小尺度衰落分别服从 Nakagami 分布或瑞利分布或莱斯分布,信道参数设置见表 2。

图 8 表示不同信道模型下本文所提算法和传统的协

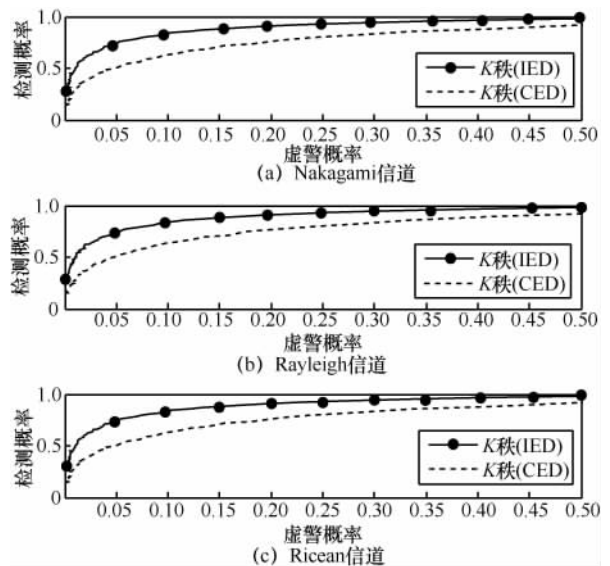


图 8 3 种不同的无线信道下的 ROC 曲线

表 2 衰落信道的参数设置

典型信道种类	Nakagami 对数正态分布	Rayleigh 对数正态分布	Ricean 对数正态分布
形状因子	0.7	1	1.3
阴影衰落标准偏差/dB	6	6	6
区域均值/dB	0	0	0
小尺度衰落部分均值	1	1	1

作式频谱检测算法的 ROC 曲线对比。这里认知用户的个数为 5, 这里只对“K 秩”合并的性能进行仿真, $K=3$, 信噪比为 -13 dB, $L=3$ 。由图 8 可以看出 3 种不同的信道下, 检测概率均随着虚警概率的增加而增加, 且同一虚警概率下, 本文所提算法的检测概率比传统算法的高, 即本文所提算法的检测性能比传统算法好。同时本文所提算法与传统的协作频谱检测算法一样, 检测性能在 3 种不同的无线传输信道中比较稳定, 这说明本文所提算法对无线传输信道的适应性也比较好。

5 结束语

本文提出了一种基于能量检测的协作式频谱检测方法, 利用授权用户状态在相邻感知帧间变化的概率较小这一性质。所提算法能防止认知用户的接收信号能量发生骤减时引起误判, 从而大大提高检测概率。同时基于授权用户状态的转移概率, 给出了所提算法的检测概率和虚警概率的闭式表达式。理论分析和仿真结果证明了本文所提的算法具有更好的性能。此外, 所提算法既不需要授权用户的先验知识, 也使得认知用户无需传输授权用户的能量值从而节省了网络开销, 实现起来比较简单, 因此本算法具有较广的适用范围。

参考文献:

- [1] FILIN S, HARADA H, MURAKAMI H, et al. International standardization of cognitive radio systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 82-89.
- [2] AXELL E, LEUS G, LARSSON E G, et al. Spectrum sensing for cognitive radio: state-of-the-art and recent advances[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(3): 101-116.
- [3] LIU Y, ZHONG Z, WANG G, et al. Cyclostationary detection based spectrum sensing for cognitive radio networks[J]. Journal of Communications, 2015, 10(1): 74-79.
- [4] MA J, LI Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 7(11): 4502-4507.
- [5] HAMZA D, AISSA S, ANIBA G. Equal gain combining for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4334-4345.
- [6] XU S, SHANG Y, WANG H. Double thresholds based cooperative spectrum sensing against untrusted secondary users in cognitive radio networks [C]//Vehicular Technology Conference(VTC), July 3-7, 2009, Barcelona, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [7] RABIEE R, LI K H. Throughput optimization of double-threshold based improved energy detection in cooperative sensing over imperfect reporting channels [C]//Information, Communications and Signal Processing (ICICS), March 3-5, Tainan, Taiwan, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [8] LIU S Q, HU B J, WANG X Y. Hierarchical cooperative spectrum sensing based on double thresholds energy detection[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(7): 1096-1099.
- [9] 李闯. 一种基于双门限能量检测的协作频谱感知优化算法[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- LI C. An optimized cooperative spectrum sensing technology algorithm based on double-threshold energy detection [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [10] BANJADE V R S, TELLAMBURA C, JIANG H. Spectrum sensing performance of p-norm detector in random network interference [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015: 7474-7479.
- [11] 张春平. 基于 P 次方检测器协作式频谱感知系统性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- ZHANG C P. Performance of collaborative spectrum sensing system based on P norm detector [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [12] LÓPEZ-BENÍFÉZ M, CASADEVALL F. Improved energy detection spectrum sensing for cognitive radio [J]. IET Communications, 2012, 6(6): 785-796.
- [13] 董彩萍. 认知无线电中协作频谱感知技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- DONG C P. Collaborative spectrum sensing technologies in cognitive radio[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [14] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[C]//International Conference on Communications(ICC), January 3-7. 2008, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2008: 3411-3415.
- [15] 罗曼. 认知无线电协作频谱感知技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LUO M. Research of collaborative spectrum sensing in cognitive radio[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [16] 王晓东, 卜智勇, 陈允峰. 复合衰落信道的衰落统计分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 643-647.
- WANG X D, BU Z Y, CHEN Y F. Fade statistics in composite fading channels [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(3): 643-647.



[作者简介]



付彩梅(1990-),女,宁波大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为认知无线电中的频谱检测技术。



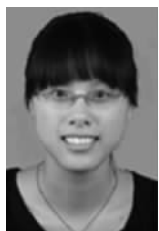
余明宸(1991-),男,宁波大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为电力线通信系统脉冲干扰。



李有明(1963-),男,宁波大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信、电力线通信、协作中继、认知无线电等。



童景文(1991-),男,宁波大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为认知无线电中的频谱检测技术。



周桂莉(1992-),女,宁波大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为水声通信系统中的资源分配。



王旭芃(1966-),女,宁波大学工程师,主要从事信息检测工作。