

一种适用于主用户信号随机出现和离开的能量频谱感知方法

陈芬¹ 林洁¹ 叶勋¹ 俞敏杰¹ 王正旺³ 刘婷婷³ 王俊² 束锋³

(1. 国网福建电力有限公司信息通信分公司, 福州, 350003; 2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州, 350116; 3. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京, 210094)

摘要: 针对认知无线电系统中主用户信号随机出现与离开时的频谱感知问题, 提出了一种新型的能量感知方法: 该方法首先假设主用户信号的随机出现和离开服从泊松随机过程, 当认知用户准备接入时, 该方法先将从待测频段上接收到的样本能量按照泊松离开概率进行线性合并, 然后计算相应的判决门限并判断待测频段是否有主用户信号, 如果没有则接入并使用待测频段。当认知用户使用频段时, 将接收到的样本能量按照泊松到达概率进行线性合并同时计算相应的门限, 再判断主用户信号是否随机出现, 如出现则退出当前使用频段。仿真结果表明, 相比传统能量感知方法, 所提新的能量感知方法能够在主用户信号随机出现与离开的工作下有效工作。

关键词: 认知无线电; 主用户; 认知用户; 频谱感知; 能量检测

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

Energy Based Spectrum Sensing Method with Random Presence and Absence of Primary User's Signal

Chen Fen¹, Lin Jie¹, Ye Xun¹, Yu Minjie¹, Wang Zhengwang³, Liu Tingting³, Wang Jun², Shu Feng³

(1. Information and Communication Branch, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou, 350003, China; 2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, 350116, China; 3. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract: In order to address the problem of spectrum sensing with random presence and absence of primary user's signal in cognitive radios, a novel energy based spectrum sensing method is proposed. The method first assumes that the departing process and the arriving process of the primary user's signal are poisson random processes. When a cognitive user tries to access a spectrum, the energy of the collected samples is combined linearly according to the departure rate of Poisson random process and then the corresponding threshold is calculated to decide whether there is a primary user or not. If the primary user is absent, the cognitive user accesses and the spectrum is used. When the cognitive user is using the spectrum, it also combines the energy of the collected samples linearly according to the arrival rate of Poisson random process and calculates the corresponding threshold to test whether the primary user is arriving or not. If the primary user is arriving, the cognitive user vacates this spectrum immediately. Simulation results show that compared with traditional energy based detection method, the proposed method can work

efficiently with random presence and absence of primary user's signal.

Key words: cognitive radio; primary user; cognitive user; spectrum sensing; energy detection

引 言

无线电频谱资源是一种非常重要的不可再生通信资源,随着无线通信业务的快速增长,目前静态分配的无线电频谱资源管理模式在频谱利用率上显得越来越低效。为了解决这个问题,认知无线电技术应运而生。

认知无线电技术的核心思想就是认知用户(Cognitive users, CUs)通过频谱感知实时地监测主用户(Primary users, PUs)也就是授权用户的状态。当认知用户发现主用户不存在时,就可以接入并利用主用户的频段进行数据传输,当认知用户发现主用户存在时,即退出并交还所使用的频段。认知无线电技术就是通过这样一种动态的频谱接入方式实现频谱资源的共享,从而达到提高频谱利用效率的目的^[1-2]。

可见,实现认知无线电的前提是可靠的频谱感知技术。目前的这些感知方法往往都假设在进行频谱感知的时候,主用户信号的状态是固定不变的,即一直都存在或是不存在,但是这样的假设过于理想。为了保证感知的精准度,频谱感知往往要通过一段相对较长的时间来收集数据样本从而做出正确的判决。因此在这段相对较长的时间内,主用户信号极有可能发生改变,即在认知用户进行频谱感知的过程中随机地出现或者离开。这样的随机出现或离开将对上述现有的传统能量频谱感知方法即功率门限检测方法造成性能下降。

针对这一问题,文献[3]首先证实了当主用户随机出现的时候,在 Femtocell 网络中的频谱感知性能将受到极大影响。文献[4]则在假设主用户随机出现的时间点服从均匀分布的时候,提出了一种贝叶斯频谱感知方法。文献[5]则在假设主用户随机出现的时间点服从正态随机分布的时候,提出了一种广义似然比频谱感知方法。此外,还有部分研究者将主用户的状态变化建模成马尔科夫状态转移过程,文献[6]基于此种假设研究了主用户随机出现时频谱感知和功率分配进行联合优化的方案。文献[7]则针对宽带条件下,多个主用户随机出现的情况,分析比较了一些传统的谱分析算法的性能及复杂度。文献[8]为保证主用户的通信质量,提出了一种联合优化能量效率和碰撞概率的感知方法。文献[9]则针对认知系统中可能随机出现的恶意主用户,提出了一种增强型 Dempster-Shafer(D-S)协作感知算法。文献[10]分析了目前认知传感网频谱感知的安全问题,尤其是针对可能有恶意主用户随机出现的情况,研究了不同安全威胁及其解决方法,同时展望了未来频谱感知安全问题的发展趋势。文献[11]在 Adhoc 网络当中,针对随机出现的主用户,提出了一种信噪比加权共识合作频谱感知方法。文献[12]则针对存在多个随机出现主用户的宽带情况,提出了一种针对感知周期进行优化的多信道感知算法。总的来说,这一类研究方法需要将主用户的活动情况建模成马尔科夫随机过程,需要对主用户活动情况进行较多的假设。

在无线通信当中,泊松随机过程是经常被用来描述随机事件单位时间内发生次数以及发生时刻的一类增量计数随机过程。不同于已有的针对主用户随机出现与离开这样的状态变化时间点服从均匀分布或正态随机分布的情况,本文在假设主用户随机出现与离开的时间点服从泊松随机到达过程的情况下,提出了一种新型的能量频谱感知方法,更具有实际意义。该方法首先假设主用户信号的随机出现和离开服从泊松随机过程,当认知用户准备接入时,该方法先将从待测频段上接收到的样本能量按照泊松离开概率进行线性合并,然后计算相应的判决门限并判断待测频段是否有主用户信号,如果没有则接入并使用待测频段;当认知用户使用频段时,将接收到的样本能量按照泊松到达概率进行线性合并并计算相应的门限,再判断主用户信号是否随机出现,如出现则退出当前

使用频段。本文利用似然比原则推导了该方法的最优判决量,然后基于纽曼-皮尔逊准则推导了该方法的判决门限,并分析了本方法的具体性能,最后用仿真结果验证了所提方法的有效性和优越性。

1 系统模型

在认知无线电系统中,为了检测到信噪比较低的主用户信号,认知用户往往会耗费较长的一段时间去搜取大量的数据样本,主用户信号的状态可能会在这个相对较长的时间里发生改变,会出现如图 1 所示的两类情况:(1) 认知用户在进行频谱感知的时候,原本没有主用户信号,但在某个时刻,主用户信号随机出现了;(2) 认知用户在进行频谱感知的时候,原本存在主用户信号,但在某个时刻,主用户信号随机消失了。这两种情况都会对传统能量频谱感知方法即功率门限检测方法的性能造成影响。本文根据图 1,提出主用户信号状态发生变化时的数学模型。

1.1 主用户信号随机出现时的模型

当主用户信号随机出现时,该问题可以被建模为二元假设检验问题,则

$$x(n) = \begin{cases} \omega(n) & n = 1, 2, \dots, J_1 \\ s(n) + \omega(n) & n = J_1 + 1, J_1 + 2, \dots, N \end{cases} \begin{matrix} H_0 \\ H_1 \end{matrix} \quad (1)$$

式中: H_0 和 H_1 分别为主用户信号出现和不出现的假设, $x(n)$ 表示接收到的信号, $s(n)$ 表示主用户信号, $\omega(n)$ 表示高斯白噪声,且具有零均值和方差 σ_w^2 , 噪声方差 σ_w^2 在进行频谱感知时是一个不变的确定的常量, N 表示样本总数, J_1 表示主用户信号出现之前的那一个时刻,且 J_1 的出现是一个到达率为 λ_a 的泊松随机过程。 J_1 在 0 和 $N-1$ 之间,这是因为当 J_1 为 0 的时候,表示主用户信号一直出现,这是可以发生的,当 J_1 为 N 的时候表示主用户信号一直不出现,这样的假设与 H_0 假设重合,这是不能发生的,所以 J_1 的取值范围在 0 和 $N-1$ 之间。

1.2 主用户信号随机离开时的模型

同样,当主用户信号随机离开的时候,有

$$x(n) = \begin{cases} s(n) + \omega(n) & n = 1, 2, \dots, J_2 \\ \omega(n) & n = J_2 + 1, J_2 + 2, \dots, N \end{cases} \begin{matrix} H_0 \\ H_1 \end{matrix} \quad (2)$$

式中:所有符号含义与式(1)相同,只有 J_2 表示主用户信号离开之前的那一个时刻,且 J_2 的离开是一个离开率为 λ_d 的泊松随机过程。 J_2 的取值范围在 1 和 N 之间,这是因为当 J_2 为 0 时,表示主用户信号一开始就不存在,这样的假设与与 H_0 假设重合,这是不能发生的,而当 J_2 为 N 时,表示主用户信号一直都未离开,这是可以发生的,所以 J_2 的取值范围在 1 和 N 之间。

2 频谱感知方法

2.1 主用户信号随机出现时的频谱感知

根据式(1)中所描述的系统模型,利用似然比法则,可得判决统计量 $L(x)$ 为

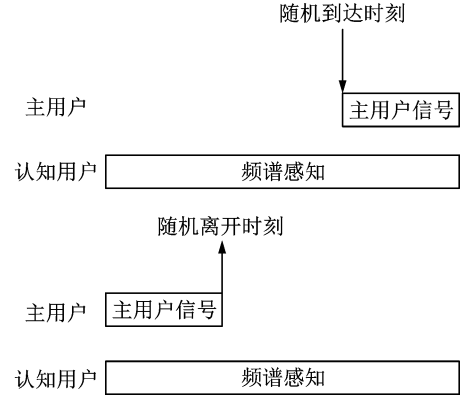


图 1 主用户信号状态变化示意图

Fig.1 Diagram of state changes of PU's signal

$$L(x) = \frac{f(x | H_1)}{f(x | H_0)} = \frac{(2\pi\sigma_w^2)^{-\frac{N}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=1}^{J_1} x^2(n) - \frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=J_1+1}^N (x(n) - s(n))^2\right]}{(2\pi\sigma_w^2)^{-\frac{N}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=1}^N x^2(n)\right]} \quad (3)$$

欲求 $s(n)$ 的最大似然估计, 令 $\frac{\partial \ln L(x)}{\partial s(n)} = 0$, 可得

$$\frac{\partial \ln L(x)}{\partial s(n)} = \frac{\partial \left(\sum_{n=J_1+1}^N x^2(n) - \sum_{n=J_1+1}^N (x(n) - s(n))^2 \right)}{\partial s(n)} = 0 \Rightarrow 2(x(n) - s(n)) = 0 \Rightarrow \hat{s}(n) = x(n) \quad (4)$$

因此, 在式(3)中用 $s(n)$ 的最大似然估计 $x(n)$ 去代替 $s(n)$ 并取对数, 可得

$$\ln L(x) = \frac{f(x | H_1)}{f(x | H_0)} = \frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=J_1+1}^N x^2(n) \quad (5)$$

忽略掉无关项, 可得判决统计量 Δ^T

$$\Delta^T = \sum_{n=J_1+1}^N x^2(n) \quad (6)$$

由于 J_1 是服从参数为 λ_w 的泊松随机过程, 因此对于每个样本来讲, 主信号到达的概率是 $1 - e^{-\lambda}$, 不到达的概率是 $e^{-\lambda}$, 那么在第 $J_1 + 1$ 个时刻主信号出现的概率就是 $(1 - e^{-\lambda})e^{-\lambda, J_1}$, 因此判决统计量 Δ^T 需要对 J_1 求平均, 即最终判决统计量 Δ 为

$$\Delta = \sum_{J_1=0}^{N-1} \left[(1 - e^{-\lambda}) e^{-\lambda, J_1} \sum_{n=J_1+1}^N x^2(n) \right] = \sum_{n=1}^N (1 - e^{-\lambda, n}) x^2(n) \quad (7)$$

在 H_0 的情况下, 即 $x(n) \sim N(0, \sigma_w^2)$ (N 表示正态分布), 因此 $x^2(n) \sim \sigma_w^2 \chi_1^2$ (χ_n^2 表示自由度为 n 的卡方分布), 故有

$$E[x^2(n) | H_0] = \sigma_w^2 \quad D[x^2(n) | H_0] = 2\sigma_w^4 \quad (8)$$

当 N 比较大时, 判决统计量可以看成是一个近似的高斯变量, 且其均值方差分别为

$$E[\Delta | H_0] = \left[N - \frac{e^{-\lambda} - e^{-\lambda(N+1)}}{1 - e^{-\lambda}} \right] \sigma_w^2$$

$$D[\Delta | H_0] = 2\sigma_w^4 \left[N + \frac{e^{-2\lambda} - e^{-2\lambda(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda}} - 2 \frac{e^{-\lambda} - e^{-\lambda(N+1)}}{1 - e^{-\lambda}} \right] \quad (9)$$

因此, 给定虚警概率 P_{fa} , 根据纽曼-皮尔逊准则, 可以得到门限 γ 为

$$\gamma = \left[N - \frac{e^{-\lambda} - e^{-\lambda(N+1)}}{1 - e^{-\lambda}} \right] \sigma_w^2 + 2\sigma_w^2 \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{fa}) \times \sqrt{N + \frac{e^{-2\lambda} - e^{-2\lambda(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda}} - 2 \frac{e^{-\lambda} - e^{-\lambda(N+1)}}{1 - e^{-\lambda}}} \quad (10)$$

在 H_1 的情况下, 即 $x(n) \sim N(s(n), \sigma_w^2)$, 因此 $\frac{x^2(n)}{\sigma_w^2} \sim \chi_1^2 \left(\frac{s^2(n)}{\sigma_w^2} \right)$, 用高斯分布来逼近, 就可以得到

$\frac{x^2(n)}{\sigma_w^2} \sim N\left(1 + \frac{s^2(n)}{\sigma_w^2}, 2 + 4 \frac{s^2(n)}{\sigma_w^2}\right)$, 故此有

$$E[x^2(n) | H_1] = \sigma_w^2 + s^2(n) \quad D[x^2(n) | H_1] = 2\sigma_w^4 + 4\sigma_w^2 s^2(n) \quad (11)$$

进一步可以得到判决统计量 Δ 在 H_1 下的均值和方差分别为

$$E[\Delta | H_1] = \left[N - \frac{e^{-\lambda} - e^{-\lambda(N+1)}}{1 - e^{-\lambda}} \right] \sigma_w^2 + \sum_{n=1}^N (1 - e^{-\lambda, n}) s^2(n) \quad (12)$$

$$D[\Delta | H_1] = 4\sigma_w^2 \sum_{n=1}^N (1 - e^{-\lambda, n})^2 s^2(n) + 2\sigma_w^4 \left[N + \frac{e^{-2\lambda} - e^{-2\lambda(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda}} - 2 \frac{e^{-\lambda} - e^{-\lambda(N+1)}}{1 - e^{-\lambda}} \right] \quad (13)$$

所以此时, 检测概率为

$$P_d = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{2 \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{fa}) \sqrt{N + \frac{e^{-2\lambda_d} - e^{-2\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda_d}} - 2 \frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} - \frac{\sum_{n=1}^N (1 - e^{-\lambda_d}) s^2(n)}{\sigma_w^2}}}{2 \sqrt{N + \frac{e^{-2\lambda_d} - e^{-2\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda_d}} - 2 \frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} + \frac{2 \sum_{n=1}^N (1 - e^{-\lambda_d})^2 s^2(n)}{\sigma_w^2}}} \right] \quad (14)$$

式中: $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 为互补误差函数。

2.2 主用户信号随机离开时的频谱感知

根据式(2)中所描述的系统模型,利用似然比法则,可得式(15)所示的判决统计量 $L(x)$ 。进一步地,同式(4),在式(15)中用 $s(n)$ 的最大似然估计 $x(n)$ 去代替 $s(n)$ 并取对数,可得

$$L(x) = \frac{f(x | H_1)}{f(x | H_0)} = \frac{(2\pi\sigma_w^2)^{-\frac{N}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=1}^{J_2} (x(n) - s(n))^2 - \frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=J_2+1}^N x^2(n) \right]}{(2\pi\sigma_w^2)^{-\frac{N}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=1}^N x^2(n) \right]} \quad (15)$$

$$\ln L(x) = \frac{f(x | H_1)}{f(x | H_0)} = \frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=1}^{J_2} x^2(n) \quad (16)$$

忽略掉无关项,可得判决统计量 Δ^T 为

$$\Delta^T = \sum_{n=1}^{J_2} x^2(n) \quad (17)$$

由于 J_2 服从参数为 λ_d 的泊松随机过程,因此对于每个样本来讲,主信号离开的概率是 $1 - e^{-\lambda_d}$,不离开概率是 $e^{-\lambda_d}$,那么在第 $J_2 + 1$ 个时刻主信号离开的概率是 $(1 - e^{-\lambda_d})e^{-\lambda_d J_2}$,因此判决统计量 Δ^T 需要对 J_2 求平均,即最终判决统计量 Δ 为

$$\Delta = \sum_{j_2=1}^N \left[(1 - e^{-\lambda_d}) e^{-\lambda_d j_2} \sum_{n=1}^{j_2} x^2(n) \right] = \sum_{n=1}^N (e^{-\lambda_d n} - e^{-\lambda_d(N+1)}) x^2(n) \quad (18)$$

在 H_0 的情况下, $x(n) \sim N(0, \sigma_w^2)$, 因此 $x^2(n) \sim \sigma_w^2 \chi_1^2$, 故有

$$E[x^2(n) | H_0] = \sigma_w^2 \quad D[x^2(n) | H_0] = 2\sigma_w^4 \quad (19)$$

当 N 比较大时,判决统计量可以看成是一个近似的高斯变量,且其均值方差分别为

$$E[\Delta | H_0] = \left[\frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} - N e^{-\lambda_d(N+1)} \right] \sigma_w^2 \quad (20)$$

$$D[\Delta | H_0] = \sum_{n=1}^N (e^{-\lambda_d n} - e^{-\lambda_d(N+1)})^2 2\sigma_w^4 = \left[\frac{e^{-2\lambda_d} - e^{-2\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda_d}} + N e^{-2\lambda_d(N+1)} - 2e^{-\lambda_d(N+1)} \frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} \right] 2\sigma_w^4 \quad (21)$$

因此,给定虚警概率 P_{fa} , 门限 γ 为

$$\gamma = \left[\frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} - N e^{-\lambda_d(N+1)} \right] \sigma_w^2 + 2\sigma_w^2 \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{fa}) \times \sqrt{\left[\frac{e^{-2\lambda_d} - e^{-2\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda_d}} + N e^{-2\lambda_d(N+1)} - 2e^{-\lambda_d(N+1)} \frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} \right]} \quad (22)$$

在 H_1 的情况下, $\frac{x^2(n)}{\sigma_w^2}$ 服从 $N(1 + \frac{s^2(n)}{\sigma_w^2}, 2 + 4 \frac{s^2(n)}{\sigma_w^2})$ 的正态分布,因此有

$$E[\Delta | H_1] = \sum_{n=1}^N (e^{-\lambda_d n} - e^{-\lambda_d(N+1)}) s^2(n) + \left[\frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} - N e^{-\lambda_d(N+1)} \right] \sigma_w^2 \quad (23)$$

$$D[\Delta | H_1] = 4\sigma_w^2 \sum_{n=1}^N (e^{-2\lambda_d n} + e^{-2\lambda_d(N+1)} - 2e^{-\lambda_d(N+1)} e^{-\lambda_d n}) s^2(n) +$$

$$\left[\frac{e^{-2\lambda_d} - e^{-2\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda_d}} + Ne^{-2\lambda_d(N+1)} - 2e^{-\lambda_d(N+1)} \frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} \right] 2\sigma_w^4 \quad (24)$$

所以此时,检测概率为

$$P_d = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{2\sigma_w^2 \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{fa}) \sqrt{\frac{e^{-2\lambda_d} - e^{-2\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda_d}} + Ne^{-2\lambda_d(N+1)} - 2e^{-\lambda_d(N+1)} \frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} - \sum_{n=1}^N (e^{-\lambda_d n} - e^{-\lambda_d(N+1)}) s^2(n)}}{2\sqrt{\left[\frac{e^{-2\lambda_d} - e^{-2\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-2\lambda_d}} + Ne^{-2\lambda_d(N+1)} - 2e^{-\lambda_d(N+1)} \frac{e^{-\lambda_d} - e^{-\lambda_d(N+1)}}{1 - e^{-\lambda_d}} \right] \sigma_w^4 + 2\sigma_w^2 \sum_{n=1}^N (e^{-2\lambda_d n} + e^{-2\lambda_d(N+1)} - 2e^{-\lambda_d(N+1)} e^{-\lambda_d n}) s^2(n)}} \right] \quad (25)$$

至此,本文所提主用户信号随机出现及离开时的频谱感知算法步骤总结为:

(1) 当一个认知用户准备接入一个主用户频段时,先依据从待测频段接收到的 N 个信号样本,例如可用式(18)构建判决统计量 Δ 。

(2) 根据给定虚警概率 P_{fa} ,如式(22)构建门限 γ 。

(3) 将判决统计量 Δ 与门限 γ 进行对比,当 $\Delta > \gamma$ 时判决主用户信号还存在于当前频段,反之则判为主用户信号已经离开当前频段,此时认知用户可以接入并使用该空闲频段。

(4) 在认知用户使用空闲主用户频段的时候,依然需要进行实时频谱感知以判断主用户信号是否已经出现,如果出现则须交还正在使用的频段。此时,认知用户根据接收到的 N 个信号样本,可以按照式(7)构建判决统计量 Δ 。

(5) 根据给定虚警概率 P_{fa} ,如式(10)构建门限 γ 。

(6) 将判决统计量 Δ 与门限 γ 进行对比,当 $\Delta > \gamma$ 时判决主用户信号已经出现,此时认知用户退出当前频段,反之则判主用户信号尚未出现,认知用户可以继续使用当前频段。

在复杂度上,由于 $e^{-\lambda_d(N+1)}$ 是一常量,因此对于本文所提方法,无论是主用户随机出现还是随机离开,都需要 N 次指数运算, $2N$ 次乘法运算和 $3N-1$ 次加法运算,相比只需要 N 次乘法运算和 $N-1$ 次加法运算的传统能量检测方法,本方法的复杂度有所增加,但是从后面的仿真可以看到,本方法能很好地针对主用户随机出现和离开的情况。

3 仿真与结果分析

图 2—5 为当授权用户信号随机出现和离开时本文所提新型能量感知法与传统能量感知法的性能曲线对比图。为了简便起见,图 2—5 中,主用户信号为一个服从高斯分布的随机信号,噪声为功率为 1 的高斯白噪声,虚警概率为 0.01。所有的结果皆由 10 000 次蒙特卡洛实验得到。

图 2 为主用户信号随机出现时,所提能量感知法与传统能量感知法样本数量与检测概率性能曲线图。假定主用户信号的到达率分别为 0.1 和 1。从图 2 中可看到,无论在哪个到达率下,在主用户信号随机出现的时候,所提能量感知法比传统能量感知法要优越,在相同的检测概率下,大约节省 8%~10% 的样本数量。

图 3 为主用户信号随机出现时,所提能量感知法与传统能量感知法信噪比与检测概率性能曲线图。假定主用户信号的到达率分别为 0.1 和 1。根据图 3 的结果,同样可以看到所提能量感知法比传统能量感知法提高 0.3~0.5 dB。

图 4 为主用户信号随机离开时,所提能量感知法与传统能量感知法样本数量与检测概率性能曲线图。假定主用户信号的离开率分别为 0.01 和 0.1。从图 4 中看到,主用户信号随机离开时,传统能量感知法几乎完全检测不到,即使把样本数量增加到 5 000。而所提能量感知法可以有效地工作。

图 5 为主用户信号随机出现时,所提能量感知法与传统能量感知法信噪比与检测概率性能曲线图。假定主用户信号的离开率分别为 0.01 和 0.1。同样地,从图 5 中可以看到,主用户信号随机离开时,所提能量感知比传统能量感知在性能上提高 5~6 dB 左右。

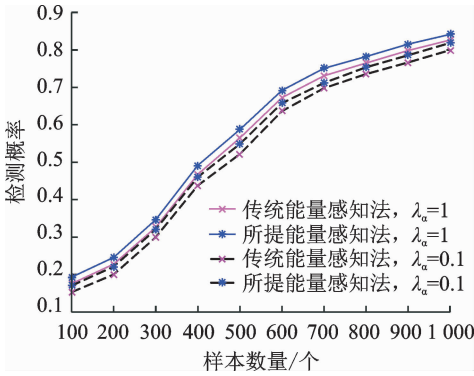


图2 主用户信号随机出现时样本数量与检测概率曲线图
Fig. 2 Sample number versus detection probability curves with random presence of PU's signal

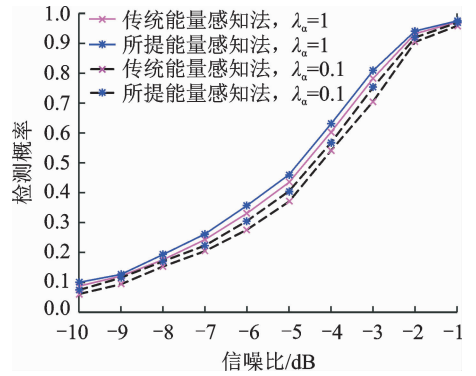


图3 主用户信号随机出现时信噪比与检测概率曲线图
Fig. 3 SNR versus detection probability curves with random presence of PU's signal

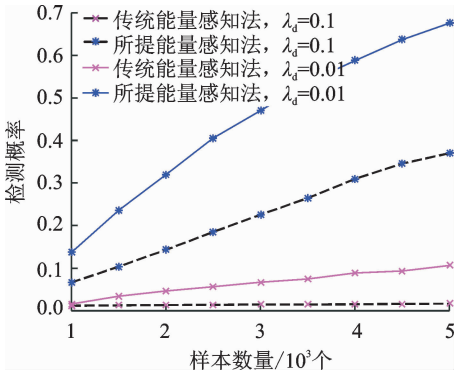


图4 主用户信号随机离开时样本数量与检测概率曲线图
Fig. 4 Sample number versus detection probability curves with random departure of PU's signal

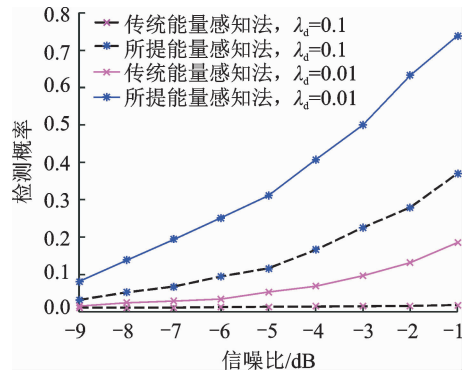


图5 主用户信号随机离开时信噪比与检测概率曲线图
Fig. 5 SNR versus detection probability curves with random departure of PU's signal

4 结束语

本文针对认知无线电系统中主用户信号随机出现与离开时的频谱感知问题,提出了一种新的能量感知方法。该方法首先假设主用户信号的随机出现和离开服从泊松随机过程,当认知用户准备接入时,该方法先将从待测频段上接收到的样本能量按照泊松离开概率进行线性合并,然后计算相应的判决门限并判断待测频段是否有主用户信号,如果没有则接入并使用待测频段。当认知用户使用频段时,将接收到的样本能量按照泊松到达概率进行线性合并同时计算相应的门限,再判断主用户信号是否随机出现,如出现则退出当前使用频段。仿真结果表明,相比传统能量感知方法,在主用户信号随机出现与离开时,根据不同的到达率和样本数量,在性能上大约有 0.5~5 dB 的提升。

参考文献:

[1] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
 [2] Stephen M D, William C H, Marc L, et al. Practical issues for spectrum management with cognitive radio [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3): 242-264.
 [3] David L P, Alvaro V, Guillaume D, et al. OFDMA femtocells: A roadmap on interference avoidance [J]. IEEE

Communication Magazine, 2009, 47(9): 41-48.

- [4] Wu J Y, Wang C H, Wang T Y. Performance analysis of energy detection based spectrum sensing with unknown primary signal arrival time [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2011, 59(7): 1779-1784.
- [5] Wu J Y, Wang C H, Wang T Y. Low-complexity energy detection for spectrum sensing with random arrivals of primary users [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2016, 65(2): 947-952.
- [6] Deng M, Hu B J, Li X. Adaptive weighted sensing with simultaneous transmission for dynamic primary user traffic [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 992-1004.
- [7] Chen B, Liu T, Shu F, et al. On performance comparison of wideband multiple primary user detection methods in cognitive radios[C]//*International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. [S. l.]:IEEE, 2009: 1-5.
- [8] 倪丹艳, 包志华, 张士兵. 能量效率和碰撞概率联合优化的协作频谱感知算法 [J]. *数据采集与处理*, 2017, 32(5): 988-996.
Ni Danyan, Bao Zhihua, Zhang Shibing. Cooperative spectrum sensing algorithm jointly optimized for energy efficiency and collision probability [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2017, 32(5): 988-996.
- [9] Liu T, Shu F. Research on hidden malicious user detection problem [M]. New Jersey, American: John Wiley & Sons, Inc. 2014: 958-963.
- [10] 刘婷婷, 束锋, 刘传清, 等. 认知传感网中频谱感知安全问题的研究进展[J]. *网络安全技术与应用*, 2015(8): 31-33.
Liu Tingting, Shu Feng, Liu Chuanqing, et al. Research progress on spectrum sensing security in cognitive sensor networks [J]. *Network Security Technology and Application*, 2015(8): 31-33.
- [11] 杜智勇, 陈浩南, 宋绯. 一种基于信噪比加权共识的合作频谱感知算法 [J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(2): 184-189.
Du Zhiyong, Chen Haonan, Song Fei. A cooperative spectrum sensing algorithm based on signal-to-noise ratio weighted consensus [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(2): 184-189.
- [12] Fan R, Jiang H. Optimal multi-channel cooperative sensing in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 1128-1138.

作者简介:



陈芬(1983-),女,高级工程师,研究方向:电力系统通信技术,E-mail: 13950398810@139.com.



林洁(1976-),女,高级工程师,研究方向:电力系统通信技术。



叶勋(1982-),男,高级工程师,研究方向:电力系统通信技术。



俞敏杰(1982-),男,高级工程师,研究方向:电力系统通信技术。



王正旺(1995-),男,硕士研究生,研究方向:无线网络与移动通信。



刘婷婷(1982-),女,副教授,研究方向:博弈论、支持缓存的系统、设备到设备网络和认知无线网络。



王俊(1982-),男,副教授,研究方向:无线网络与移动通信、雷达信号处理及无线定位。



束锋(1973-),男,研究员,博士生导师,研究方向:无线网络与移动通信、雷达信号处理及无线定位。

(编辑:陈珺)