一种基于授权信道特性的认知无线电频谱检测算法*

刘允† 彭启琮 邵怀宗 彭启航 王玲

(电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 611731)

(2012 年 6 月 12 日 收到; 2012 年 11 月 26 日 收到修改稿)

针对认知无线电系统中频谱检测的频率直接影响系统容量以及与授权用户产生冲突的概率问题, 分析了授权用户频谱使用的特性, 对授权用户行为进行统计建模, 提出一种自适应频谱检测算法. 引入控制因子, 在保证认知无线电系统稳定性的约束下, 自适应调整频谱感知的频率从而提高频谱利用率并减小系统冲突概率和检测开销, 进而降低了系统的能量消耗. 仿真结果表明, 该算法在保证不对授权用户产生干扰和一定的系统稳定性条件下, 有效地提高了系统的容量, 并且具有良好的实用性和灵活性.

关键词: 认知无线电, 自适应频谱检测, 绿色通信, 最大似然

PACS: 84.40.Ua, 95.85.bh **DOI:** 10.7498/aps.62.078406

1 引 言

随着无线通信技术的发展尤其是 Wi-Fi, 3G 等无线技术的应用频谱资源紧张的问题日趋严重, 以至未来 4G、物联网 [1] 等无线应用推广时, 将面临无频段可用的情况根据美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC)[2] 提供的数据, 已经分配的频谱利用率只有 15%—85%, 这是因为传统的固定分配的频谱不能得到充分利用, 造成了授权频段的浪费. Joseph Mitola 于 1999 年提出的认知无线电 (cognitive radio, CR) 技术在保证授权用户服务质量的条件下, 使得认知用户以机会接入的方式利用授权用户的空闲频段. CR 技术提高了频谱的使用效率, 是解决频谱 "稀缺" 问题的有效方法 [3]; 同时认知无线电也被认为是实现绿色通信的一项重要技术 [4,5], 在近年来受到了人们的广泛关注 [6−13].

频谱感知技术被用来检测当前授权用户的工作状态以寻求频谱空洞和避免对授权用户产生有害干扰, 因此有效的频谱感知是认知无线电存在的前提; 受硬件和能量的限制, 认知用户不可能实现全频段、实时的感知, 如何在 MAC 层合理地控制物理层执行频谱检测引起了国内外研究者普遍关注. 常用的检测机制是周期性检测 [14−18], 即每隔一段固定的时间间隔认知用户就对信道进行一次检测, 如图 1 所示. CR 用户在频谱感知过程均不进行数据传输, 此操作降低了系统容量. 文献 [19, 20] 提出了一种通过减少频谱检测时间提高频谱利用率的方法, 然而检测时间的缩短降低了对主用户微弱信号的有效检测, 降低了频谱检测的可靠性. 文献 [21] 对授权用户占用信道时长的规律进行了分析, 提出了可变检测间隔的周期检测机制, 降低了检测周期对授权用户造成的有害干扰及检测开销, 但文献并没有考虑频谱使用的动态时变性的影响. 实际网络中, 授权用户使用频谱的特性不可避免地随着用户在不同时间段内业务量的不同而变化 [22] 如图 2 所示. 在这种情况下, 上述周期检测机制不能很好地满足频谱使用特性动态时变性的要求, 从而引起系统性能的下降. 因此, 研究如何根据授权频谱的特性自适应的控制频谱检测间隔势在必行.

现有的文献中, CR 系统主要根据授权用户的频谱状态特性实现自适应的频谱检测 [23−25]. 以信道总损失最小为目标 [23] 及以系统吞吐量最大为

* 国家自然科学基金 (批准号: 60901018, 6090202, 611010347)、国家科技重大专项 (批准号: 2010ZX03003-002-01, 2011ZX03001-006-01, 2010ZX03007-003) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: ZYGX2010J003) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liuyun001@uestc.edu.cn

目标的自适应频谱检测 [24,25] 有效地降低了系统冲突概率, 提高了系统容量, 但没有充分考虑通信稳定性的要求. 授权用户的频谱占用度 [22] 一定的情况下, 其行为频率是制约 CR 系统稳定性的重要因素. 有必要研究在充分考虑授权用户行为特性的基础上, 建立数学模型以寻求最优的频谱检测间隔. 上述自适应频谱检测算法都没有对此进行充分的研究.

基于以上考虑, 本文将授权用户的行为频率纳入考虑范围, 提出一种自适应检测算法, 称之为 ASCFSIC (adaptive sensing algorithm based on change frequency and state information of channel) 算法. 首先介绍了 CR 系统所具有的特性, 在对授权用户及认知用户行为分析的基础上, 提出了自适应频谱检测需要解决的问题, 建立了以保证系统稳定性同时以信道容量最大化为目标的最优化频谱检测模型. 分析了任意授权信道特性下的 ASCFSIC 算法的求解, 给出了泊松分布特例下算法的实现. 采用最大似然估计方法实现对授权频谱参数的估计, 通过对空闲频谱时长的预测, 自适应地调整认知用户的频谱检测. 最后仿真分析了 ASCFSIC 算法的性能, 并把该算法与周期检测算法和自适应检测算法进行了对比分析.

2 认知无线电频谱感知的自适应控制

在 CR 系统中, 空闲频谱受到授权用户行为的制约: 当授权用户到达时, 认知用户必须退出该频段以避免对其造成有害干扰, 因而认知用户必须对频谱进行有效的感知. 授权用户使用频谱的时变性要求认知用户需要自适应地控制频谱感知的频率. 本节描述了 CR 系统相对于一般的通信系统所具有的特性, 分别对授权用户和认知用户的行为进行分析, 提出自适应频谱检测需要解决的问题, 建立最优频谱检测的数学模型并对其进行了讨论分析.

2.1 系统描述

在 CR 系统中, 当授权用户不占用信道时, 认知用户允许接入信道. 当授权用户使用信道而认知用户仍然在传输数据时, 就会产生冲突. 为了避免对授权用户的干扰, 冲突概率必须限制在一定范围内. 因此每帧数据传输必须安排频谱感知时隙, 并且为了频谱检测的可靠性, 认知用户在频谱感知时间内必须保持静默, 否则就会引起认知用户之间的干扰, 提高误警概率. 故 CR 系统必须对认知用户进行集中控制.

2.2 用户行为分析

分别对授权用户和认知用户的行为进行了分析, 在此基础上提出了自适应频谱检测需要解决的问题.

2.2.1 授权用户行为

授权用户使用的频谱 (简称为授权频谱) 具有 “空闲” 和 “占用” 两种状态如图 2 所示, 定义变量 s_t 表示授权频谱在 t 时刻的状态. $s_t = 0$ 代表授权频谱在 t 时刻空闲, $s_t = 1$ 代表该频谱在 t 时刻被授权用户占用, 则授权用户对频谱的占用特性 (也可称为授权频谱的特性) 可以由频谱 “占用度” 和授权用户行为变化的频率来表征. 在观察时间内, “占用度” 越低, 可用性越高; 授权用户行为变化的频率越大, 稳定性越差; 反之亦然.

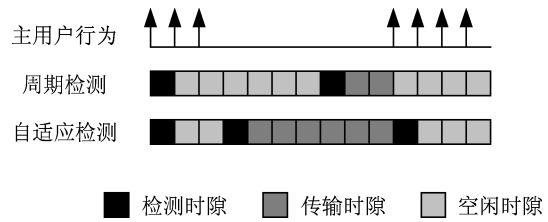

图 1 自适应频谱检测和周期频谱检测

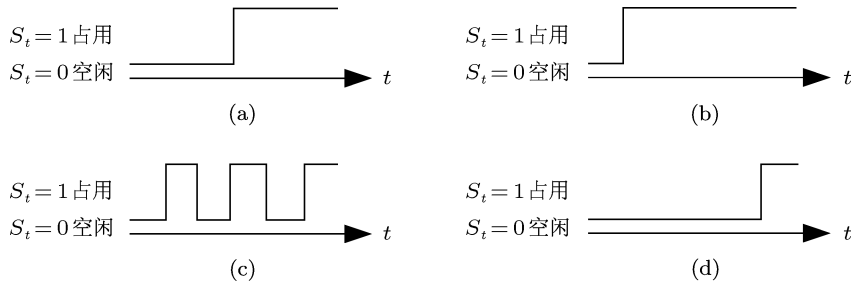

图 2 授权信道 “空闲 - 占用” 情况

授权频谱在观察时间 Δt 内的占用度 [22] 可表示为

$$\bar{U} = E\left[\sum_{k=1}^{L} Y_k \Big/ \Delta t\right], \tag{1}$$

其中 Y_k 则表示授权信道的第 k 次被占用的时长, L 为观察时间 Δt 内授权用户行为变化的次数. 预测未来一段时间 Δt 内, 授权信道空闲的时长为

$$T_{\text{license}} = \left[1-\bar{U}\right] \times \Delta t / L. \tag{2}$$

授权频谱的可靠性定义为

$$S = T_{\text{license}} / \Delta t = \left[1-\bar{U}\right] / L. \tag{3}$$

从 (3) 式可以看出在相同的频谱占用度条件下, 授权用户变化越频繁即 L 越大, S 值越小, 授权频谱的可靠性就越差, 可能产生通信中断或数据丢失, 降低 CR 系统稳定性. 因此, 为了保证系统的稳定性, S 需高于 CR 系统能够容忍的门限值 $S_{\text{thresh}}^{\text{CR}}$.

授权用户频谱占用率 R_{PU} 定义为

$$R_{\text{PU}} = T_{\text{occupy}}/T = 1/(1+T_{\text{vacant}}/T_{\text{occupy}}), \tag{4}$$

其中, T 表示授权用户行为变化一次的时间间隔, T_{vacant} 和 T_{occupy} 分别表示授权用户行为变化一次空出信道和占用信道的时间间隔, 这三个随机变量的概率密度函数可能随着不同的 CR 系统而变化. 从 (4) 式可以看出, R_{PU} 值越小, 授权用户本次行为变化产生的频谱空闲时长越长, 认知用户可以机会接入此信道.

2.2.2 认知用户行为

在 CR 系统中, 认知用户首先进行频谱感知. 在频谱感知过程中认知用户不进行数据传输, 降低了系统容量. 保证频谱检测可靠性的同时, 缩短检测时间是国内外学者研究的一个热点问题. 文献 [13] 给出了在检测概率 P_{d} 和误警概率 P_{f} 的约束下, 频谱感知所需要的最小检测时间 T_{s} 为

$$T_{\text{s}} = \frac{\tau}{\delta^2}\left[Q^{-1}(P_{\text{f}}) - Q^{-1}(P_{\text{d}})\sqrt{2\delta+1}\right]^2, \tag{5}$$

这里, $Q(.)$ 代表标准高斯变量的互补分布函数, δ 表示信噪比, τ 代表采样周期. 在本文以后的分析中, 认知用户选择该检测间隔实现对频谱的感知.

不同于使用固定频谱分配的授权系统, CR 系统使用的频谱是通过检测得到的. 因此, 认知用户进行数据传输时, 每帧数据必须包含检测时隙. 本文把频谱检测时隙安排在每帧数据的开始, 其后为数据传输时隙. 因此, 帧结构可以统一表示为如下形式:

$$T_{\text{frame}} = T_{\text{s}} + n \times T_{\text{t}}, \tag{6}$$

这里的 n 是动态分配的, T_{t} 为一个数据传输时隙, T_{frame} 为一个数据帧的时长. 需要注意的是当授权频谱 "占用" 或者授权频谱不可靠时, 认知用户必须立即退出该信道或继续保持静默. 因此, 该帧的数据传输时隙为空, 称之为 "虚拟传输时隙".

在数据传输时, 授权用户行为随时可能发生变化, 因此每帧的数据传输时隙不可能无限长. 在 CR 系统中, 当授权用户使用信道即信道由 "空闲" 变为 "占用", 此时认知用户仍然占用信道则可能会对授权用户产生干扰, 本文称之为干扰冲突. 显然, 此概率应小于授权用户能容忍的干扰门限. 当授权用户完成通信即信道由 "占用" 变为 "空闲", 此时认知用户仍然认为授权用户存在而保持静默必然造成空闲频谱的浪费, 本文称之为空闲冲突, 为了提高频谱利用率, 该概率应该小于认知用户能够容忍的频谱浪费门限.

依据以上对授权用户及认知用户行为的描述于分析, 最优频谱检测算法需要解决如下问题: 1) 信道空闲即授权用户不活动时, 把该信道分配给传输速率最大的认知用户. 2) 对信道变化频率做统计估计, 确定数据传输时隙是否为 "虚拟传输时隙". 3) 根据授权用户对于信道的占用特征及系统稳定性的要求, 动态控制每帧的数据传输时隙个数, 实现对频谱检测的自适应控制.

2.3 最优检测模型

由于需求目的不同, CR 系统的最优频谱检测一般是不同的. 本文定义满足 CR 系统稳定性需求的同时, 使系统容量最大化的算法为最优频谱检测算法. 若 CR 系统中的认知用户具有相同的数据传输率, 此时系统容量最大化就转化为数据传输时隙最大化. 基于此物理意义, 最优频谱检测可用下式所示的数学模型表示:

$$\max \gamma = R_{\text{PU}}(t),\ \text{st.}P_{\text{c}}(t) \leqslant P_{\text{c}}^{\text{SU}},\ S \geqslant S_{\text{thresh}}^{\text{CR}}, \tag{7}$$

这里, $R_{\text{PU}}(t)$ 和 $P_{\text{c}}(t)$ 分别代表时间间隔为 t 时数据传输时隙所占的比例和授权用户行为发生变化的概率, P_{c}^{SU} 为授权用户能容忍的冲突概率门限. 由于保证 CR 系统的稳定性是认知用户正常通信的前提, 因此 (7) 式中最优算法的求解就可以转化为不同授权频谱特性条件下 $\gamma = R_{\text{PU}}(t), \text{st.}P_{\text{c}}(t) \leqslant P_{\text{c}}^{\text{SU}}$ 函数的求解. 下面将分别讨论不同情况下的最优准则.

2.3.1 第一种情况: 授权频谱可靠即 $S \geqslant S_{\text{thresh}}^{\text{CR}}$

当信道 "空闲" 即授权用户未占用信道时, 由 (6) 和 (7) 式最优准则可以表示如下:

$$\max_n \gamma_{\text{vacant}}(n) = \frac{n \times T_{\text{t}}}{T_{\text{s}} + n \times T_{\text{t}}}(1 - P_{\text{c0}}(n \times T_{\text{t}})),$$
$$\text{st.} P_{\text{c0}}(n \times T_{\text{t}}) \leqslant P_{\text{c0}}^{\text{PU}}, \quad (8)$$

这里, $\gamma_{\text{vacant}}(n)$ 表示认知用户每帧数据传输的时间比例, $P_{\text{c0}}(n \times T_{\text{t}})$ 表示在时间 $n \times T_{\text{t}}$ 内授权用户占用信道的概率, $P_{\text{c0}}^{\text{PU}}$ 表示授权用户能容忍的最大干扰冲突概率. 显然, 此时数据传输时隙最大化就意味着 CR 系统的容量最大化.

当信道 "占用" 即授权用户使用信道时, 此时认知用户的数据帧为 "虚拟传输时隙" 即每帧数据只有频谱检测时隙, 此时数据传输时隙最大化则代表着检测时隙最小化, 因此最优准则可以表示如下:

$$\min_n \gamma_{\text{occupy}}(n) = \frac{T_{\text{s}}}{T_{\text{s}} + n \times T_{\text{t}}}(1 - P_{\text{c1}}(n \times T_{\text{t}})),$$
$$\text{st.} P_{\text{c1}}(n \times T_{\text{t}}) \leqslant P_{\text{c1}}^{\text{PU}}, \quad (9)$$

其中 $\gamma_{\text{occupy}}(n)$ 表示认知用户每帧数据频谱检测的时间比例, $P_{\text{c1}}(n \times T_{\text{t}})$ 表示在时间 $n \times T_{\text{t}}$ 内授权用户退出信道占用的概率, $P_{\text{c1}}^{\text{PU}}$ 表示认知用户能容忍的最大频谱浪费率. 显然, 此时 "虚拟传输时隙" 最大化则意味着 CR 系统在频谱检测上的开销最小化, 节约了功耗.

2.3.2 第二种情况: 授权频谱不可靠即 $S < S_{\text{thresh}}^{\text{CR}}$

授权频谱不可靠意味着授权用户的行为将在未来的一段时间内频繁的变化. 若 CR 系统利用此时的空闲频谱通信则可能导致通信经常中断, 显然对于要求稳定的系统, 此时的频谱是不可用的, 即无论检测到频谱是否 "空闲", 认知用户都不进行数据通信. 因此, 当信道 "空闲" 时, 认知用户的数据帧与信道 "占用" 时完全相同, 都为 "虚拟传输时隙", 此时最优准则转化为检测时隙最小化:

$$\min_n \gamma_{\text{occupy}}(n) = \frac{T_{\text{s}}}{T_{\text{s}} + n \times T_{\text{t}}}(1 - P_{\text{c0}}(n \times T_{\text{t}})),$$
$$\text{st.} P_{\text{c0}}(n \times T_{\text{t}}) \leqslant P_{\text{c0}}^{\text{PU}}. \quad (10)$$

当信道 "占用" 时, 认知用户仍然不进行数据传输, 最优准则仍可用 (9) 式表述.

显然, 当授权频谱可靠性达不到要求时, 为了保证 CR 系统的稳定性, 认知用户不进行数据传输, 从而有效节约了功耗.

3 基于授权信道状态和变化频率的自适应检测 (ASCFSIC)

基于上述最优检测准则, ASCFSIC 算法同时考虑 CR 系统稳定性、冲突概率和系统容量的要求, 通过门限值的设定来实现三者之间的博弈平衡, 达到满足系统要求的最优检测. 从 (8), (9) 和 (10) 式可以看出, 算法主要受 $P_{\text{c}}(n \times T_{\text{t}})$ 的制约, 本质是最优准则下 n 值的求解, 由于 $P_c(t)$ 代表授权用户行为发生变化的概率, 即在正确检测概率 $P_{\text{d}} = 1$ 时随机变量 T_{vacant} 和 T_{occupy} 的概率分布, 因此, 只要知道两随机变量的分布参数即可求得最优检测的 n 值. 本文采用最大似然估计方法 [26] 实现对 T_{vacant} 和 T_{occupy} 参数的估计. 首先给出任意授权信道特性下的 ASCFSIC 算法理论上的求解方法, 其次讨论了基于泊松分布的 ASCFSIC 算法的求解及具体实现流程.

3.1 任意授权信道特性下的 ASCFSIC 算法

由于 ASCFSIC 算法对 T_{vacant} 和 T_{occupy} 采用相同的参数估计方法, 因此本节只讨论其中一个随机变量 T_{vacant} 分布参数的最大似然估计. 假设 T_{vacant} 的分布已知, 其概率密度函数为 $f(t; \theta_1, \theta_2 \cdots, \theta_M)$, 其中分布参数 $(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M)$ 即授权频谱的参数是未知的, 需要通过最大似然算法估计得到.

设 $t_1, t_2, \cdots, t_N$ 为随机变量 T_{vacant} 在 Δt 时间内连续 N 个样本观测值, 则样本中所有观测值的整体概率密度函数 $L(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M)$ 为单个观测值概率密度函数的乘积, 即

$$L(\theta_1, \theta_2 \cdots, \theta_M) = \prod_{i=1}^{N} f(t_i; \theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M), \quad (11)$$

也称 $L(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M)$ 为似然函数. 最大似然估计就是要给出参数 $(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M)$ 的估计量使得 (11) 式最大. 由于 (11) 式为乘积的形式, 直接对其最大化求解最优解比较麻烦. 因为 $\ln L$ 是 L 的增函数, 所以 $\ln L$ 和 L 在 $(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M)$ 的同一值处取得最大值. 此时, 参数的最大似然估计转化为如下公式的最优化问题:

$$\max_{(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M)} \ln L(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M)$$
$$= \sum_{i=1}^{N} \ln f(t_i; \theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M). \quad (12)$$

参数的最大似然估计量 $(\hat{\theta}_1,\hat{\theta}_2,\cdots,\hat{\theta}_M)$ 可下式所示的一组最大似然方程求得 [26]:

$$\begin{aligned}&\left.\frac{\partial \ln L(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_M)}{\partial \theta_1}\right|_{\hat{\theta}_1}=0,\\&\left.\frac{\partial \ln L(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_M)}{\partial \theta_2}\right|_{\hat{\theta}_2}=0,\\&\cdots\\&\left.\frac{\partial \ln L(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_M)}{\partial \theta_M}\right|_{\hat{\theta}_M}=0.\end{aligned}\tag{13}$$

由于得到了随机变量 T_{vacant} 分布参数的最大似然估计值, 进而可以得到其概率分布函数 $F(t;\hat{\theta}_1,\hat{\theta}_2,\cdots,\hat{\theta}_M)$. 文献 [27] 给出了在一定正确检测概率 P_{d} 下, 冲突发生概率的数学表达: $P_{\text{c}}(t)=F(t;\hat{\theta}_1,\hat{\theta}_2,\cdots,\hat{\theta}_M)\times P_{\text{d}}$. 最后, 根据授权频谱的可靠与否选择 2.3 节所述的不同情况下的最优准则, 并根据 (8), (9) 和 (10) 式的不同情况代入正确的 $P_{\text{c}}(t)$, 求解得到实现最优检测控制的 n 值. n 代表了认知用户每帧数据传输时隙的个数, 控制着认知用户频谱检测的频率和系统性能. 因此, 本文也称 n 为 "控制因子".

3.2 基于泊松分布的 ASCFSIC 算法及实现

以上给出的是授权信道特性任意分布下的 ASCFSIC 算法的描述, 本节将以授权用户传输过程服从泊松过程为例给出具体的 ASCFSIC 优化算法及实现. 文献 [28] 将 WLAN 网络中授权用户的行为建模为连续时间马尔可夫过程, 即认为授权用户流的到达间隔和用户流的持续时间均服从指数分布; 文献 [29, 30] 的研究结果表明 802.11 无线网络中的授权用户的传输过程服从泊松分布. 因此, 本文后续的算法实现及仿真中均采用基于泊松分布的 ASCFSIC 算法进行分析.

由于授权用户的传输过程服从泊松分布, 所以随机变量 T_{vacant} 和 T_{occupy} 服从参数分别为 λ_0 和 λ_1 的指数分布, 即:

$$\begin{aligned}T_{\text{vacant}}&\propto f(t;\lambda_0)=\lambda_0\,\mathrm{e}^{-\lambda_0 t},\\T_{\text{occupy}}&\propto f(t;\lambda_1)=\lambda_1\,\mathrm{e}^{-\lambda_1 t}.\end{aligned}$$

这里 $f(t;\lambda)$ 表示概率密度函数. 显然, 上述随机变量代表着授权信道的特性.

本文采用最大似然算法实现对参数 λ_0 和 λ_1 的估计. 因两个随机变量均服从的指数分布, 所以根据 (11) 式似然函数均可采用下式所示的形式:

$$L(\lambda)=\prod_{i=1}^{N}\lambda\,\mathrm{e}^{-\lambda t_i}=\lambda^N\mathrm{e}^{-\lambda\sum\limits_{i=1}^{N}t_i}=\lambda^N\mathrm{e}^{-N\lambda\bar{t}},\tag{14}$$

其中 $\bar{t}=\dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{N}t_i$ 是随机变量观测样本的均值. 因估计参数只有一个, (13) 式所示的最大似然方程可以转化为对似然函数对数的求导:

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\lambda}\ln L(\lambda)=&\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\lambda}(N\ln(\lambda)-N\lambda\bar{t})=\frac{N}{\lambda}\\&-N\bar{t}\begin{cases}>0, & 0<\lambda<1/\bar{t},\\=0, & \lambda=1/\bar{t},\\<0, & \lambda>1/\bar{t},\end{cases}\end{aligned}\tag{15}$$

得到参数 λ 的最大似然估计为

$$\hat{\lambda}=\frac{1}{\bar{t}}=N\Big/\sum_{i=1}^{N}t_i.\tag{16}$$

冲突发生的概率 $P_{\text{c}}(t)$ 可表示为 $P_{\text{c}}(t)=F(t)\times P_{\text{d}}=(1-\mathrm{e}^{-t/\hat{\lambda}})\times P_{\text{d}}$, 其中 $F(t)=1-\mathrm{e}^{-t/\hat{\lambda}}$ 表示随机变量 T_{vacant} 和 T_{occupy} 的概率分布函数. 根据授权频谱的可靠与否选择 2.3 节所述的不同情况下的最优准则, 代入正确的 $P_{\text{c}}(t)$, 进而求得到实现最优检测控制的 n 值, 具体讨论如下:

1) 当信道 "空闲" 且授权频谱可靠时, 根据 (8) 式 ASCFSIC 算法可表示为

$$\begin{aligned}\max_n\gamma_{\text{vacant}}(n)=&\frac{n\times T_{\text{t}}}{T_{\text{s}}+n\times T_{\text{t}}}\left(1-\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{n\times T_{\text{t}}}{\hat{\lambda}_0}}\right)\times P_{\text{d}}\right),\\&\text{st.}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{n\times T_{\text{t}}}{\hat{\lambda}_0}}\right)P_{\text{d}}\leqslant P_{\text{c0}}^{\text{PU}}.\end{aligned}\tag{17}$$

2) 当信道 "空闲" 而授权频谱不可靠时, 根据 (10) 式算法可表示为

$$\begin{aligned}\min_n\gamma_{\text{occupy}}(n)=&\frac{T_{\text{s}}}{T_{\text{s}}+n\times T_{\text{t}}}\left(1-\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{n\times T_{\text{t}}}{\hat{\lambda}_0}}\right)\times P_{\text{d}}\right),\\&\text{st.}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{n\times T_{\text{t}}}{\hat{\lambda}_0}}\right)P_{\text{d}}\leqslant P_{\text{c0}}^{\text{PU}}.\end{aligned}\tag{18}$$

3) 当信道 "占用" 即授权用户使用信道时, 无论授权频谱是否可靠, 算法都表示为

$$\begin{aligned}\min_n\gamma_{\text{occupy}}(n)=&\frac{T_{\text{s}}}{T_{\text{s}}+n\times T_{\text{t}}}\left(1-\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{n\times T_{\text{t}}}{\hat{\lambda}_1}}\right)\times P_{\text{d}}\right),\\&\text{st.}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{n\times T_{\text{t}}}{\hat{\lambda}_1}}\right)P_{\text{d}}\leqslant P_{\text{c1}}^{\text{PU}}.\end{aligned}\tag{19}$$

ASCFSIC 算法通过对 (17)—(19) 式求解, 得到满足要求的数据传输时隙数 n, 自适应调整频谱检测频率, 从而有效提高频谱利用率并减小系统冲突概率和检测开销, 节约了功耗.

本文提出的基于泊松分布的 ASCFSIC 算法实现流程如下:

1) 初始化, 认知用户此时开始准备接入授权信道, 假定授权频谱此时 "占用" 且可靠, 依 (5) 式计算得到检测时隙 $T_{\rm s}$. 初始化 n 和授权用户占用或空出信道时经历的帧数 m.

2) 根据当前帧和上一帧的检测结果, 计算得到授权用户一次行为占用或空出频谱的时间 $m\times(T_{\rm s}+n\times T_{\rm t})$ 即 $t^i_{\rm occupy}$ 或 $t^i_{\rm vacant}$. 由 (16) 式得到参数 λ_0 和 λ_1 的估计值, 即

$$\hat{\lambda}_1 = N\Big/\sum_{i=1}^{N} t^i_{\rm occupy},\quad \hat{\lambda}_0 = N\Big/\sum_{i=1}^{N} t^i_{\rm space};$$

由 (1) 和 (3) 式得到授权频谱可靠性参数 S 的估计值, 即

$$\hat{S} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} t^i_{\rm space}}{\left(\sum\limits_{i=1}^{N} t^i_{\rm space}+\sum\limits_{i=1}^{N} t^i_{\rm occupy}\right)N}.$$

3) 通过比较 $\hat{S}$ 和 $S^{\rm CR}_{\rm thresh}$ 的大小判断授权频谱是否可靠. 当 $\hat{S}\geqslant S^{\rm CR}_{\rm thresh}$ 时, 将 $\hat{\lambda}_0$ 代入 (17) 式得到满足条件的 $\tilde{n}_{\rm vacant}$, 它代表频谱 "空闲" 且可靠的情况下认知用户正常通信时每帧的数据传输时隙数; 当 $\hat{S}<S^{\rm CR}_{\rm thresh}$ 时, 将 $\hat{\lambda}_0$ 代入 (18) 式求解得到 $\tilde{n}_{\rm vacant}$, 它代表频谱 "空闲" 但不可靠的情况下认知用户每帧的 "虚拟传输时隙" 数; 同理将 $\hat{\lambda}_1$ 代 (19) 式中求得 $\tilde{n}_{\rm occupy}$, 它代表频谱 "占用" 时每帧的 "虚拟传输时隙" 数.

4) 判断授权用户行为是否发生改变, 当授权用户行为不变时, 令 $m=m+1$, 根据求解得到的 $\tilde{n}_{\rm vacant}$, $\tilde{n}_{\rm vacant}$ 和 $\tilde{n}_{\rm occupy}$ 动态的分配每帧中的数据传输时隙数, 自适应的控制频谱检测的频率: 否则, 跳至步骤 2), 重新求解更新 n.

4 仿真分析

对基于泊松分布的 ASCFSIC 算法进行仿真并给出分析结果. 在周期检测算法中, 文献 [18] 给出了检测性能较好的周期算法, 被大多文献引用作为比较的对象, 因此仿真也将提出的算法性能与该检测算法做出比较; 同时在自适应频谱检测算法中, 文献 [25] 提出了基于授权频谱的状态和信道状态以最大化系统吞吐量为目标的 QCST 算法, 因其较好的检测性能也被作为本文算法比较的对象.

从前面的分析可以看出, 本文提出的 ASCFSIC 算法主要受授权用户的行为特性的影响, 而信噪比和授权频谱带宽等对其几乎没有影响, 具体仿真时设定信噪比 $\delta=-10$ dB, 授权频谱包含 10 个带宽为 1 MHz 信道, 一个数据传输时隙为 $T_{\rm t}=10$ ms. 为了分析验证 ASCFSIC 算法的性能, 本节主要分析系统稳定性的要求对三种算法下 CR 系统达到的实际稳定程度和频谱利用率的影响 (如图 3 和图 4 所示), 以及冲突概率对频谱利用率的影响 (如图 5 所示), 最后分析了基于泊松分布的 ASCFSIC 算法在不同分布参数下系统稳定性的要求对 CR 系统能够达到的实际稳定程度的影响 (如图 6 所示).

从图 3 可以看出当系统稳定性要求较低时, 三种算法下的 CR 系统稳定性都能达到门限要求; 随着门限值的增大, QCST 算法和周期算法逐渐不能满足系统需求, 而 ASCFSIC 算法在门限值小于 0.7 时仍能很好地满足系统的要求.

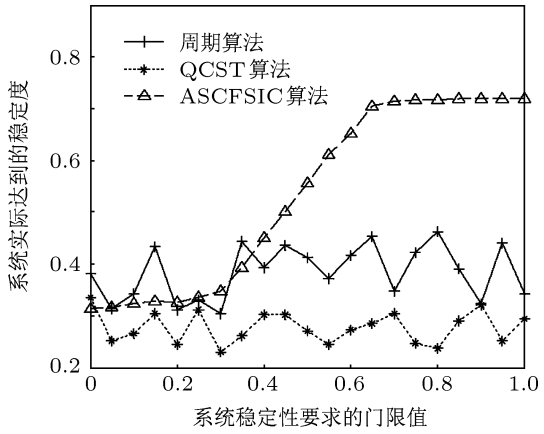

图 3 $S^{\rm CR}_{\rm thresh}$ 变化时, CR 系统实际的达到的稳定程度 ($\lambda_0=3$ s, $\lambda_1=1$ s)

频谱利用率随系统稳定性要求的变化曲线如图 4 所示. 从图中可以看出, ASCFSIC 算法下的 CR 频谱利用率随着门限值的增大而稍有下降, 而周期算法和 QCST 算法几乎不受系统稳定性要求的影响, 且周期算法的频谱利用率明显低于 ASCFSIC 算法和 QCST 算法.

图 5 为当 CR 系统稳定性大于 0.5 即 $S^{\rm CR}_{\rm thresh}=0.5$ 时, 三种算法的频谱利用率在不同冲突概率下的变化曲线. 从图中可以看出: 三种算法的频谱利用率随着冲突概率的增大都有一定程度的增加, 且在冲突概率较小时 ($P_{\rm c}\leqslant 0.01$), 频谱利用率受冲突概率的影响很大; 当冲突概率达到一定程度后 ($P_{\rm c}\geqslant 0.015$) 频谱利用率几乎不受冲突概率的影响; 在相同冲突概率条件下, QCST 算法的频谱利用率

最大, ASCFSIC 算法由于受到系统稳定性的制约而使得其性能略次于 QCST 算法.

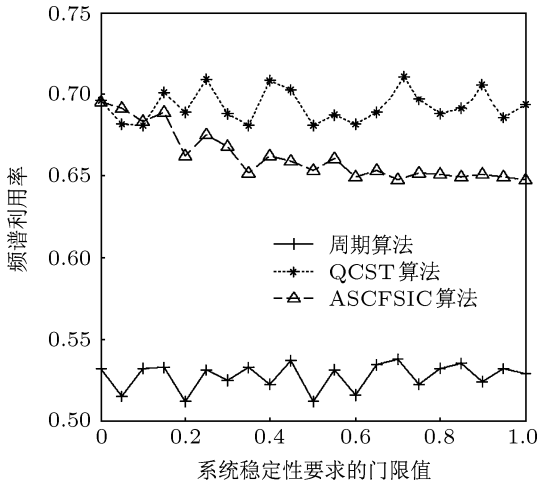

图 4 不同稳定性要求下的 CR 系统容量 ($\lambda_0 = 3$ s, $\lambda_1 = 1$ s)

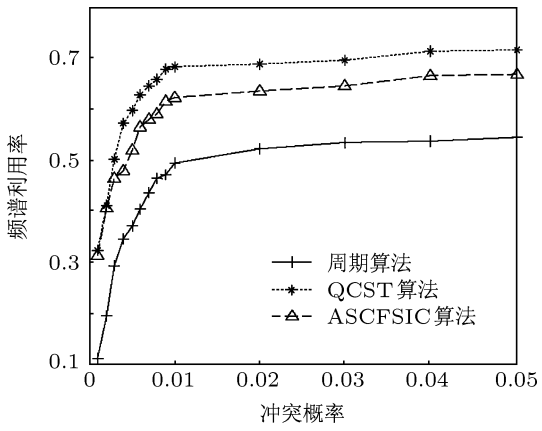

图 5 不同冲突概率下的频谱利用率 (CR 系统的稳定度 $S > 0.5$, $\lambda_0 = 3$ s, $\lambda_1 = 1$ s)

参数 λ_0 和 λ_1 不同时, 采用 ASCFSIC 算法的 CR 系统能够达到的实际稳定程度随稳定性要求门限的变化曲线如图 6 所示. 从图中可以看出门限值 $S_{\text{thresh}}^{\text{CR}}$ 的选择需要同时考虑 CR 系统本身稳定性要求和授权用户对于频谱的占用特性, 例如 $\lambda_0 = 2$ s 和 $\lambda_1 = 2$ s, 时, CR 系统理论上可以达到的最大稳定度为 0.5, 若要求此系统的稳定度大于 0.5 显然是不可能实现的, 因此, $S_{\text{thresh}}^{\text{CR}}$ 应该小于该理论值.

综合上述仿真结果分析可知: QCST 算法以牺牲系统的稳定性来实现频谱利用率的最大化, 从而使其不能很好地满足系统稳定性的要求; ASCFSIC 算法则是以减小很小的频谱利用率为代价来满足系统稳定性的要求, 对于必须满足稳定性要求的 CR 系统, ASCFSIC 算法具有明显的优势; 系统稳定性要求的门限值直接影响 ASCFSIC 算法的性能, 本文在门限值已定的假设下分析算法的性能, 根据实际 CR 系统的需求, 选取最优的门限值需要进一步的研究.

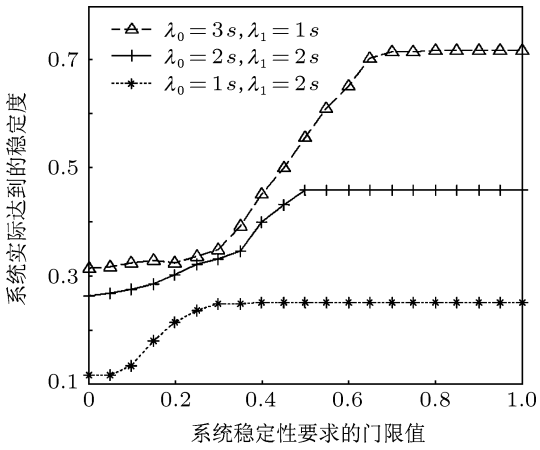

图 6 不同参数值下系统实际的稳定性

5 结 论

在分析授权频谱特性的基础上, 提出一种自适应的频谱检测算法. 同时考虑了通信稳定性和频谱利用率的要求, 以牺牲很小的系统容量为代价换取 CR 系统的稳定性. CR 用户采用最大似然方法估计授权频谱的参数, 自适应的改变频谱检测频率. 在系统稳定性约束条件下, 有效地提高了频谱利用率并减小了授权用户和 CR 用户之间的冲突概率和检测开销. 从理论上证明了该算法具有良好的实用性和灵活性. 通过仿真验证, 提出的算法广泛适用于授权用户流的到达间隔服从指数分布的认知无线电系统, 例如 WLAN 无线认知系统.

[1] Conti J P 2006 *Communications Engineer* **4** 20
[2] FCC 2003 *FCC Document ET Docket* 3 108
[3] Haykin S 2005 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **23** 201
[4] Zheng S L, Yang X N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148402 (in Chinese) [郑仕链, 杨小牛 2012 物理学报 **61** 148402]
[5] He A, Amanna A, Tsou T, Chen X, Datla D, Gaeddert J, Newman T, Hasan S M, Volos H, Reed J H, Bose T 2011 *J. Commun.* **6** 340
[6] Zu Y X, Zhou J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079501 (in Chinese) [俎云霄, 周杰 2011 物理学报 **60** 079501]
[7] Zhao Z J, Xu S Y, Zheng S L, Yang X N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5118 (in Chinese) [赵知劲, 徐世宇, 郑仕链, 杨小牛 2009 物理学报 **58** 5118]
[8] Sun B, Jiang J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 110701 (in Chinese) [孙彪, 江建军 2011 物理学报 **60** 110701]
[9] Chai Z Y, Chen L, Zhu S F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 058801 (in Chinese) [柴争义, 陈亮, 朱思峰 2012 物理学报 **61** 058801]
[10] Huang L Y, Liu C, Wang S P 2010 *Journal on Commun.* **31** 136 (in Chinese) [黄丽亚, 刘臣, 王锁萍 2010 通信学报 **31** 136]
[11] Zheng S L, Lou C Y, Yang X N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3611 (in Chinese) [郑仕链, 楼才义, 杨小牛 2010 物理学报 **59** 3611]
[12] Sun B, Hua J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 110701 (in Chinese) [孙彪, 江建军 2011 物理学报 **60** 110701]
[13] Zhou J, Zu Y X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7508 (in Chinese) [周杰, 俎云霄 2010 物理学报 **59** 7508]
[14] Liang Y C, Zeng Y, Peh E, Hoang T 2008 *IEEE Trans. Commun.* **7** 1326
[15] Zhao Q, Krishnamachari B, Liu K 2008 *IEEE Trans. Wireless Commun* **7** 5431
[16] Hoang A T, Liang Y C, Wong D T C, Zeng Y, Zhang R 2009 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **8** 1206
[17] Zhao Q, Geirhofer S, Tong L, Sadler B M 2008 *IEEE Trans. Signal Process.* **56** 785
[18] Kim H, Shin K G 2008 *IEEE Trans. Mobile Computing* **7** 533
[19] Han N, Shon S H, Chung J H, Kim J M 2006 *The 8th International Conference on Advanced Communication Technology* Phoenix Park Feb. 20–22, 2006 p1770
[20] Zeng Y H, Liang Y C 2009 *IEEE Trans. Commun.* **57** 1784
[21] Zhang Y, Feng C Y, Guo C L 2008 *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications* **31** 128 (in Chinese) [张宇, 冯春燕, 郭彩丽 2008 北京邮电大学学报 **31** 128]
[22] Su X, Shen S Q, Feng Z Y, Chen X 2009 *Journal of Electronics & Information Technology* **31** 2801 (in Chinese) [苏曦, 沈树群, 冯志勇, 陈星 2009 电子与信息学报 **31** 2801]
[23] Guo C L, Zeng Z M, Feng C Y, Liu Z Q 2009 *Journal of Electronics & Information Technology* **31** 920 (in Chinese) [郭彩丽, 曾志民, 冯春燕, 刘子琦 2009 电子与信息学报 **31** 920]
[24] Choi K W 2010 *IEEE Trans. Vehicular Technology* **59** 992
[25] Hoang A T, Liang Y H, Zeng Y H 2010 *IEEE Trans. Commun.* **58** 235
[26] Brillinger D 1985 *IEEE Trans. Signal Process* **33** 1076
[27] Lee W Y, Akyildiz I F 2008 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **7** 3845
[28] Zhao Q, Tong L, Swami A, Chen Y X 2007 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **25** 589
[29] Sriramk, Whitt W 1986 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **4** 833
[30] Willkomm D, Machiraju S, Bolot J, Wolosz A *IEEE Symposium in Dy SPAN* Chicago, IL, USA 2008 p1

A novel spectrum detecting algorithm for cognitive radio based on the characteristics of authorized channel*

Liu Yun† Peng Qi-Cong Shao Huai-Zong Peng Qi-Hang Wang Ling

(*School of Communication and Technology Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 610054*, China*)

(Received 12 June 2012; revised manuscript received 26 November 2012)

Abstract

In a cognitive radio (CR) network, the system throughput and the probability of collision between primary users (PUs) and CR users are directly influenced by the frequency of spectrum sensing. This paper focuses on adaptively scheduling spectrum sensing such that negative impacts to the performance of the CR network are minimized. Based on an in-depth analysis into the spectral usage patterns of PUs, an adaptive spectrum detecting algorithm is proposed. By introducing a "control factor", the proposed algorithm can adaptively schedule the spectrum sensing, while maintaining the CR system stability, so as to increase spectral utilization efficiency, as well as reducing the probability of collision between PUs and CR users. Therefore, the energy consumption of the CR system is reduced. Simulations show that the proposed algorithm can effectively increase the system throughput, with minimal interference to primary users while ensuring the system stability. Meanwhile, it is shown that the proposed algorithm has low implementation complexity for practical applications.

Keywords: cognitive radio (CR), adaptive spectrum sensing, green communications, maximum likelihood

PACS: 84.40.Ua, 95.85.bh **DOI:** 10.7498/aps.62.078406

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60901018, 6090202, 611010347), the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2010ZX03003-002-01, 2011ZX03001-006-01, 2010ZX03007-003), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. ZYGX2010J003).

† Corresponding author. E-mail: liuyun001@uestc.edu.cn