

6-8-2020

## Optimization Sensing Slot under Transmission Collision of Primary User and Secondary User in Cognitive Radio System

Chen Song

*School of Navigation and Aerospace Object Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;*

Nae Zheng

*School of Navigation and Aerospace Object Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;*

Wang Sheng

*School of Navigation and Aerospace Object Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Optimization Sensing Slot under Transmission Collision of Primary User and Secondary User in Cognitive Radio System

## Abstract

**Abstract:** In the cognitive radio system, that the primary user (PU) has collision with the secondary user (SU) when the secondary user (SU) was detected properly was considered. The queuing theory was introduced and the PU's appearance pattern was described by M/M/1 model. Considering the length of the transmitting slot, detection probability and transmitting collision, the function of spectrum usage and transmitting time were established based on the PU's appearance pattern. The existence of the maximum value of spectrum usage in the definition domain of the transmitting time *was proved by theoretical derivation* in some condition. The simulation results provide support to *the existence of the maximum value*. Furthermore, the loss of spectrum usage caused by transmitting collision is more than 20%, which should be considered during the system design procedure.

## Keywords

cognitive radio, spectrum sensing, sensing period, transmission collision

## Recommended Citation

Chen Song, Zheng Nae, Wang Sheng. Optimization Sensing Slot under Transmission Collision of Primary User and Secondary User in Cognitive Radio System[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(6): 1289-1295.

# 主次用户传输冲突下认知系统感知时间优化

陈松, 郑娜娥, 王盛

(解放军信息工程大学导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 考虑在认知无线电系统中, 次用户正确检测的情况下, 主用户与次用户发生传输冲突的情况。引入排队论思想, 以 M/M/1 模型描述主用户的出现模式, 在此基础上, 综合考虑传输时长、检测概率以及传输冲突等情况, 构建频谱利用率与传输时间长度的函数关系式, 并通过理论推导证明了, 满足一定条件下, 传输时间的定义域内频谱利用率的*最大值点存在*。通过仿真对最大值的存在情况进行了验证, 并通过分析发现, 仿真所设条件下, 传输冲突所带来的频谱利用率损失大于 20%, 应在系统设计过程中予以充分考虑。

**关键词:** 认知无线电; 频谱感知; 感知时间; 传输冲突

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 06-1289-07

## Optimization Sensing Slot under Transmission Collision of Primary User and Secondary User in Cognitive Radio System

Chen Song, Zheng Nae, Wang Sheng

(School of Navigation and Aerospace Object Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In the cognitive radio system, that the primary user (PU) has collision with the secondary user (SU) when the secondary user (SU) was detected properly was considered. The queuing theory was introduced and the PU's appearance pattern was described by M/M/1 model. Considering the length of the transmitting slot, detection probability and transmitting collision, the function of spectrum usage and transmitting time were established based on the PU's appearance pattern. The existence of the maximum value of spectrum usage in the definition domain of the transmitting time *was proved by theoretical derivation* in some condition. The simulation results provide support to *the existence of the maximum value*. Furthermore, the loss of spectrum usage caused by transmitting collision is more than 20%, which should be considered during the system design procedure.

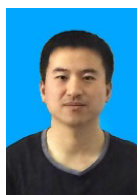
**Keywords:** cognitive radio; spectrum sensing; sensing period; transmission collision

## 引言

随着无线通信的飞速发展, 通信业务的信息传输需求与频谱资源紧缺的矛盾愈发凸显。认知无线电技术在不改变现有授权频谱分配的情况下, 能够

提高空闲频谱的利用率, 被工业界和学术界所广泛关注<sup>[1]</sup>。其基本思想是让次用户(Secondary User, SU)通过感知技术获取空闲时频资源, 在主用户(Primary User, PU)无感的情况下进行频谱资源再利用。

SU 感知与传输结合的机制主要可分为 2 种: 一种是感知与传输同时全双工的机制; 另一种就是基于先听后传(Listen Before Talk, LBT)的机制。相较而言, 第二种机制虽然频谱使用效率较低, 但由于其采用经典的时分半双工工作方式, 技术成熟度高,



收稿日期: 2015-01-13 修回日期: 2015-03-19;  
基金项目: 国家 863 计划 (2012AA01A505);  
作者简介: 陈松(1986-), 男, 福建永安, 博士, 研究方向为移动通信技术; 郑娜娥(1984-), 女, 福建漳浦, 博士, 讲师, 研究方向为 MIMO 信号处理和无线资源分配。

<http://www.china-simulation.com>

• 1289 •

得到了更广泛的研究。一个完整的 LBT“感知-传输”过程所占用的时间通常称为感知周期。合理地规划感知周期中感知时隙和传输时隙的比例,对于提高认知无线电系统的整体性能具有重要意义。

文献[2]以广播电视和微小区无线电话网络作为 PU 系统,采用能量检测方法作为频谱感知方法,分别分析了单个 SU 和多个 SU 的情况下,认知系统的感知时间对频谱利用率和系统的容量性能的影响。文献[3]通过离散马尔可夫过程对 PU 行为进行建模,针对能量敏感形 SU 的情况,根据能量情况决定优先级的排队模型对 SU 的行为进行建模。将此系统模型下的容量最大化问题由随机最优化问题转变为马尔可夫决策过程,提出了通过联合优化感知时间和判决门限获取最大容量的算法。文献[4]针对宽带多信道的频谱情况,分别考虑频谱共享和随机接入两种体制,讨论了传输功率和干扰功率的与感知时间的相关关系,最后提出优化感知时间和功率分配得到最大化系统容量的算法。文献[5]使用排队论对 PU 和 SU 的接入和传输过程进行建模,提出了使用“源-目的对”编码方式实现 PU 与 SU 同时传输的方法。文章在限定 PU 的信干噪比条件下,对使用该编码方法所能获得的系统容量和感知时间的关系进行了分析。文献[6]针对认知无线电的频谱感知问题,提出了一种连续偏移卡方检测方法,通过自适应调整感知时间长度,在降低检测过程平均复杂度的同时提高了频谱感知效率,同时也提高了系统整体容量。

上述文献针对不同系统模型下认知无线电系统的,通过优化系统感知时间,获得了频谱利用率和系统容量的提升,由此可以看出,感知时间是提高系统性能的重要参数。但是,上述文献有一个共同假设,即在 SU 的整个感知周期内,PU 状态不变。实际上,许多 PU 系统的接入时间是具有随机性的,因此 PU 可能在 SU 的传输时间内到来。针对这一情况,本文重点研究了 PU 与 SU 在传输时隙内发生传输冲突情况下的感知周期优化问题。在不限定 PU 数量的条件下,根据排队论相关理论对

PU 的到来模式进行建模。基于能量检测方法推导出反映 SU 接收信噪比以及采样数对感知结果影响的函数。根据 PU 的排队模型求得 SU 进行数据传输时,发生 PU 传输冲突的概率。综合上述过程,导出一个反映 SU 系统综合频谱利用率的函数,并通过理论推导证明,在一定条件下该函数存在最优解,使得 SU 频谱利用率最高。

## 1 系统模型

### 1.1 PU 系统模型

假设 PU 的输入服从参数为  $\lambda$  的 Poisson 过程<sup>[7]</sup>,即 PU 的到达时间服从参数为  $\lambda$  的指数分布,且每个 PU 占用频谱的服务时间假设服从参数为  $\mu$  的指数分布<sup>[7]</sup>。假设 PU 的到来时间间隔与 PU 的频谱占用时间相互独立。新的 PU 到来时,如系统当前服务空闲,则直接占用频谱;若系统正忙,则进入排队队列等待,直到频谱空闲。假设 PU 数量无限,且等待队列长度无限。

SU 对频谱进行感知,若频谱空闲则接入频谱进行数据传输,若频谱占用则继续等待。SU 的检测和等待对于 PU 而言是透明无感的,PU 与 SU 的关系见图 1。

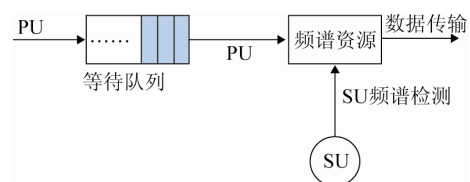


图 1 系统模型

上述假设结合文献[9]相关结论可知,PU 的接入过程符合 M/M/1 排队模型。时刻  $t$  系统中的 PU 个数(包括排队等待的和正在占用频谱的)  $\{X(t), t \geq 0\}$  符合生灭过程,且出生率为  $\lambda$ , 死亡率为  $\mu$ , 则稳态下系统队长分布为:

$$P\{X = k\} = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \quad \frac{\lambda}{\mu} < 1; k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

其中当  $X \geq 0$  时,PU 占用频谱,当  $X = 0$  时,信道空闲,此时 SU 可以接入。

## 1.2 SU 感知模型

本文采用 LBT 机制, 每个感知周期由长度为  $\tau$  的感知时隙和长度为  $T - \tau$  传输时隙组成。SU 在感知时隙内进行频谱感知, 若发现频谱被占用, 则认为  $T$  时间内频谱都被占用。若发现信道空闲, 则在  $T - \tau$  时间内进行数据传输。此处如感知有误, 判定频谱空闲而实际占用, 则可能发生冲突, 影响 PU 的数据传输。如判定信道占用而实际空闲, 则浪费了频谱使用的机会, 将会降低频谱利用率。

从通用性考虑, 感知时隙内的频谱感知方法采用离散能量检测<sup>[10]</sup>, 依据聂曼-皮尔逊准则<sup>[11]</sup>, 考虑到对于 PU 的影响主要来自于 SU 漏检所造成的传输碰撞, 与文献[12]中恒虚警概率的研究不同, 本文采用固定漏检门限的方法, 即设定  $P_m = \gamma$ , 在此基础上通过最小化虚警概率, 即  $\min P_f$ , 获得频谱接入概率的最大化。离散能量检测的二元假设检验模型写为:

$$y(k) = \begin{cases} n(k) & H_0 \\ s(k) + n(k) & H_1 \end{cases} \quad k \in [1, 2, \dots, N] \quad (2)$$

式中:  $y(k)$  是 SU 接收到的信号样点;  $N$  为采样点数;  $s(k)$  为 SU 所接收到的 PU 信号样点;  $n(k)$  为 SU 所接收到的噪声样点。根据文献[13]中的结论, 可假设  $s(k)$  满足均值为 0, 方差  $\sigma_s^2$  的复高斯分布。同理,  $n(k)$  满足均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2$  的复高斯分布。

$$y \sim \begin{cases} CN(0, \sigma_n^2) & H_0 \\ CN(0, \sigma_s^2 + \sigma_n^2) & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

定义似然比函数为:

$$L(\mathbf{y}) = \frac{f(\mathbf{y}, H_1)}{f(\mathbf{y}, H_0)} > \theta \quad (4)$$

式中:  $f(\mathbf{y}, H_1)$ ,  $f(\mathbf{y}, H_0)$  分别表示信道占用和信道空闲时 SU 采样序列的概率密度函数。将高斯随机变量的概率密度函数带入公式(4)中, 可得到:

$$\frac{1}{[\pi(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)]^N} \exp\left[-\frac{1}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} \sum_{i=1}^N y^2(i)\right] > \frac{1}{(\pi\sigma_n^2)^N} \exp\left[-\frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{i=1}^N y^2(i)\right] > \theta \quad (5)$$

两端取对数化简:

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y^2(i) > \frac{1}{N} \left[ \ln \theta + N \ln \left( 1 + \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right) \right] \left( 1 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \right) \sigma_n^2 = \alpha \quad (6)$$

式中:  $\sigma_s^2 / \sigma_n^2$  是 SU 接收信号的信噪比;  $\alpha$  是能量检测的判决门限值, 判决准则为:

$$\begin{aligned} Y > \alpha &\rightarrow H_1 \\ Y < \alpha &\rightarrow H_0 \end{aligned} \quad (7)$$

## 2 传输冲突下的最佳感知时间分析

在总长度为  $T$  的感知周期内, 感知时间与传输时间是相互矛盾的, 感知时间  $\tau$  越长, 则感知准确度越高, 但传输时间  $T - \tau$  越短, 则频谱利用率降低; 而感知时间  $\tau$  减小, 虽然传输时间  $T - \tau$  增长, 但是降低的感知准确度和增加的传输时间都将增大 SU 与 PU 发生冲突的概率, 一旦发生冲突, 双发的此次传输将相互干扰。因此, 影响最终频谱利用率的参数应包含<sup>[13]</sup>: 传输时间与感知周期的比例  $(T - \tau)/T$ , SU 检测空闲频谱的概率  $P_a$ , PU 业务的频谱空闲的概率  $P_{H_0}$ 、在传输时间内 PU 与 SU 冲突未发生的概率  $P_s$ 。综合上述参数, 最终的频谱利用率  $\Lambda$  为:

$$\Lambda = \frac{T - \tau}{T} P_a P_{H_0} P_s \quad (8)$$

式中:  $(T - \tau)/T$  为 SU 频谱利用率的上界。下面给出各参数的推导过程, 进而导出  $\Lambda$  的详细表达式, 最后给出最佳感知时间的存在性证明。

### 2.1 $P_a$ 的获取

$P_a$  反映了 SU 的检测性能对于频谱利用率的影响。根据式(8)的判决标准, 对应的漏检和虚警概率分别为:

$$P_m(\alpha, N) = P(Y < \alpha, H_1) \quad (9)$$

$$P_f(\alpha, N) = P(Y > \alpha, H_0) \quad (10)$$

式中:  $Y$  是自由度为  $2N$  的  $\chi^2$  分布。检测采样点数量  $N$  在实际信号接收中取值一般较大, 因此根据中心极限定理<sup>[14]</sup>, 当处于  $H_0$  状态时,  $Y$  趋近于

均值  $\mu_{Y,H_0}$  方差  $\sigma_{Y,H_0}$  的复高斯分布<sup>[2]</sup>

$$\mu_{Y,H_0} = \sigma_n^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{Y,H_0}^2 = \frac{1}{N} [E|n(k)|^4 - \sigma_n^4] \quad (12)$$

其中, 因为  $n(k)$  服从复高斯分布,  $E|n(k)|^4 = 2\sigma_n^4$ , 带入式(12)中可得

$$\sigma_{Y,H_0}^2 = \frac{1}{N} \sigma_n^4 \quad (13)$$

同理, 处于当处于  $H_1$  状态时,  $Y$  趋近于均值  $\mu_{Y,H_1}$  方差  $\sigma_{Y,H_1}$  的高斯分布<sup>[2]</sup>.

$$\mu_{Y,H_1} = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \quad (14)$$

$$\sigma_{Y,H_1}^2 = \frac{1}{N} [E|s(k)|^4 + E|n(k)|^4 - (\sigma_s^2 - \sigma_n^2)^2] \quad (15)$$

其中, 因为  $s(k)$  与  $n(k)$  都服从复高斯分布,  $E|s(k)|^4 = 2\sigma_s^4$ ,  $E|n(k)|^4 = 2\sigma_n^4$  代入式(15)中可得:

$$\sigma_{Y,H_1}^2 = \frac{1}{N} [(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2] \quad (16)$$

综合上述结论可得:

$$P_f(\alpha, N) = P(Y > \alpha, H_0) = Q\left(\frac{\alpha - \mu_{Y,H_0}}{\sigma_{Y,H_0}}\right) = Q\left(\left(\frac{\alpha}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{N}\right) \quad (17)$$

$$P_m(\alpha, N) = 1 - P_d(\alpha, N) = 1 - P(Y > \alpha, H_1) = 1 - Q\left(\frac{\alpha - \mu_{Y,H_1}}{\sigma_{Y,H_1}}\right) = 1 - Q\left(\left(\frac{\alpha}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{N}\right) \quad (18)$$

则可得到:

$$\frac{\alpha}{\sigma_n^2} = \left(\frac{1}{\sqrt{N}} Q^{-1}(1 - P_m) + 1\right)(\gamma_s + 1) \quad (19)$$

$$\frac{\alpha}{\sigma_n^2} = \frac{1}{\sqrt{N}} Q^{-1}(P_f) + 1 \quad (20)$$

式中:  $\gamma_s = \sigma_s^2 / \sigma_n^2$ 。将式(19)带入式(17)中可得

$$P_f(N) = Q((\gamma_s + 1)Q^{-1}(1 - P_m) + \gamma_s \sqrt{N}) \quad (21)$$

则有

$$P_a(N) = 1 - P_f(N) = 1 - Q((\gamma_s + 1)Q^{-1}(1 - P_m) + \gamma_s \sqrt{N}) \quad (22)$$

若  $N = \tau / T_s$ ,  $T_s$  为采样周期。则式(22)可化为

$$P_a(\tau) = 1 - Q\left((\gamma_s + 1)Q^{-1}(1 - P_m) + \gamma_s \sqrt{\frac{\tau}{T_s}}\right) \quad (23)$$

## 2.2 $P_{H_0}$ 的获取

$P_{H_0}$  表示了频谱空闲的概率。由 2.1 节的模型可知, PU 的行为服从  $M/M/1$  排队模型, 频谱空闲的概率即对应于 PU 排队系统中用户数量为 0, 由式(1)可得:

$$P_{H_0} = P(X=0) = 1 - \frac{\lambda}{\mu} \quad (24)$$

## 2.3 $P_s$ 的获取

从图 2 中可以看出, SU 与 PU 两种发生传输冲突的情况可以归结为类: 一种情况出现在图 2 中(1)(2)场景下, SU 的感知时隙内 PU 占用频谱, SU 如果发生了漏检, 将引发冲突; 另一种情况则是出现在图 2 中(3)场景下, SU 的感知时隙内 PU 并未占用频谱, 而在 SU 的传输时隙内 PU 占用频谱, 由此造成 SU 与 PU 的传输冲突。



图 2 SU 与 PU 传输过程中可能发生传输冲突的场景

针对第 1 种情况, 其空闲频谱利用率与检测概率  $P_a$  相关。而在第 2 种情况下, PU 的到达时间间隔服从参数为  $\lambda$  的指数分布。其概率密度函数为:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (25)$$

因此, SU 在感知时隙内判定频谱空闲后, 在  $T - \tau$  时间内没有新的 PU 到达, 即为用户到达的间隔时间  $t > T - \tau$ , 则不发生传输冲突的概率  $P_s$  为:

$$P_s = P(t > T - \tau) = e^{-\lambda(T-\tau)} \quad (26)$$

## 2.4 最佳感知时间存在性证明

根据前面的推导, 将式(23)(24)(26)代入式(8)可得频谱利用率的表达式为

$$\Lambda = \frac{T - \tau}{T} \left( 1 - Q\left(\left(1 + \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}\right)Q^{-1}(1 - P_m) + \sqrt{\frac{\tau}{T_s} \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}}\right)\right) \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) e^{-\lambda(T-\tau)} \quad (27)$$

则感知时间优化可归结为如下优化问题

$$\begin{cases} \max_{\tau} \Lambda \\ \text{s.t. } 0 \leq \tau \leq T \end{cases} \quad (28)$$

下面对最佳感知时间的存在性进行证明:

首先为方便表示, 令

$$\Lambda = K(1-V) \left( 1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (29)$$

其中  $K = \frac{T-\tau}{T} e^{-\lambda(T-\tau)}$  (30)

$$V = Q \left[ \left( 1 + \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right) Q^{-1}(1-P_m) + \sqrt{\frac{\tau}{T_s}} \frac{\sigma_s}{\sigma_n} \right] \quad (31)$$

对  $\Lambda$  进行求导, 则有

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \tau} = \left( 1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \left( \frac{\partial K}{\partial \tau} (1-V) + K \left( -\frac{\partial V}{\partial \tau} \right) \right) \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \tau^2} = \left( 1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \left( \frac{\partial^2 K}{\partial \tau^2} (1-V) - 2 \frac{\partial K}{\partial \tau} \frac{\partial V}{\partial \tau} - K \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} \right) \quad (33)$$

对式(30)求导可得:

$$\frac{\partial K}{\partial \tau} = \frac{1}{T} [\lambda(T-\tau) - 1] \exp(-\lambda(T-\tau)) \quad (34)$$

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \tau^2} = \frac{1}{T} [\lambda(T-\tau) - 2] \exp(-\lambda(T-\tau)) \quad (35)$$

当  $\lambda(T-\tau) - 1 < 0$  时,  $\frac{\partial K}{\partial \tau} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 K}{\partial \tau^2} < 0$ 。即在  $T-\tau$  的传输时隙内, PU 平均出现强度小于 1。

对式(31)求导可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \tau} &= -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\gamma_s}{\sqrt{T_s}} \tau^{-\frac{1}{2}} \times \\ &\exp \left[ -\left( A + \frac{\gamma_s}{\sqrt{T_s}} \sqrt{\tau} \right)^2 / 2 \right] \leq 0 \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} &= \frac{1}{4} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\gamma_s}{\sqrt{T_s}} \left( \tau^{-\frac{3}{2}} + \tau^{-\frac{1}{2}} \gamma_s \left( \frac{A}{\sqrt{T_s}} + \frac{\gamma_s}{T_s} \right) \right) \times \\ &\exp \left[ -\left( A + \frac{\gamma_s}{\sqrt{T_s}} \sqrt{\tau} \right)^2 / 2 \right] \geq 0 \end{aligned} \quad (37)$$

式中:  $A = (1 + \gamma_s) Q^{-1}(1 - P_m)$ ,  $\gamma_s = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}$ 。

又  $1-V > 0$ ;  $K > 0$ , 当  $\lambda(T-\tau) - 1 < 0$  时

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 K}{\partial \tau^2} (1-V) &< 0 ; \quad -2 \frac{\partial K}{\partial \tau} \frac{\partial V}{\partial \tau} < 0 ; \\ -K \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} &< 0 ; \quad 1 - \frac{\lambda}{\mu} \geq 0 \end{aligned} \quad (38)$$

将式(38)带入式(33)中可得

$$\frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \tau^2} \leq 0 \quad (39)$$

当  $\lambda = \mu$  时取等号。因此, 存在  $\tau \in [T_s, T]$  使  $\Lambda$  能够得到最大值。下面通过仿真给出部分理论分析和数值验证结果。

### 3 性能仿真与分析

本节基于 Matlab 对推导结果进行数值验证和比较。仿真条件设置如下: 以 VoIP 服务作为 PU 业务参考<sup>[15]</sup>, 信道空闲概率  $P_{H_0} = 0.65$ <sup>[16]</sup>, 由式(1)中可得:

$$P\{X=0\} = \left( 1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) = 0.65 \quad (40)$$

假设用户到达的强度为 35 个/s, 服务能力为 100 个/s, 漏检概率  $P_m = 0.1$ 。采样率为 1MSPS。

图 3 与图 4 分别显示了  $SNR = -10$  dB 的条件, 有无传输冲突下, 感知时间与频谱利用率之间的关系。从图中可以看出, 感知时间与频谱利用率存的关系存在最大的峰值, 能够验证理论推导的正确性。图 3 中显示出, 在无传输冲突的情况下, 随着感知周期的增加, 最高频谱利用率逐渐提高, 并且都在 5 ms 内能够达到最大频谱利用率。这是因为在仿真条件下, 少量样点已经足够正确检测信道状态。图 4 中显示, 考虑了传输冲突后, 频谱利用率曲线不升反降, 这是因为更长的感知周期增加了传输冲突的概率, 而一次的传输冲突就将造成整个传输数据帧的错误。另一方面, 对比两图, 可以发现, 图 3 的频谱利用率在达到最高点后基本呈现线性下降的状态, 而图 4 则是一个由缓变陡的下降过程, 这是因为随着  $\tau$  的增大, PU 的出现概率呈现指数衰减, 在最高点后减缓了频谱利用率降低的速率, 而随着  $\tau$  的进一步增大, 传输时隙减少逐渐成为造成的频谱利用率下降主要的原因。

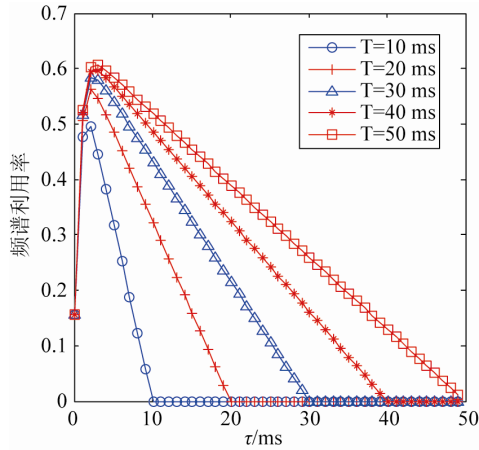


图 3 无传输冲突, 不同感知时间的频谱利用率

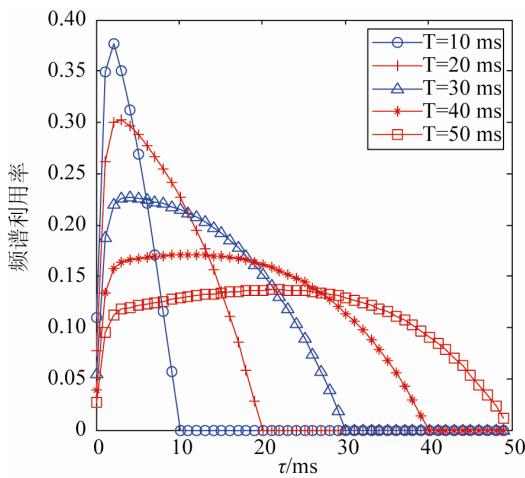


图 4 考虑传输冲突, 不同感知时间的频谱利用率

图 5 显示了考虑了传输冲突的场景下, 感知时间域频谱利用率关系的数值仿真结果。从图中可以看出, 其曲线的变化规律和特性与图 4 基本吻合, 验证了文章中理论分析的合理性。

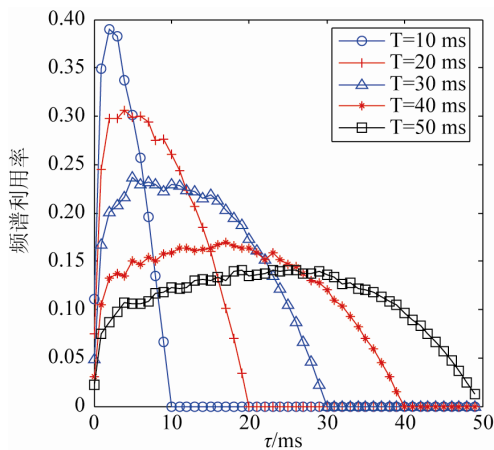


图 5 考虑传输冲突, 感知时间与频谱利用率关系的仿真值

图 6 与图 7 分别显示了有无传输冲突的情况下, 信噪比与最佳感知时间的变化关系。其中最佳感知时间即为获得最大频谱利用率的感知时间长度。从图 6 中可以看出, 无冲突的情况下, 不同感知周期的最佳感知时间随信噪比变化的收敛点基本相同, 都是在 0 dB 左右达到最佳感知时间的收敛值。因为在不考虑传输时隙冲突的情况下, 最佳感知时间受检测概率影响最大, 随着信噪比的增大, 获得最高  $P_a$  所需的采样点数迅速降低, 无论感知周期是多少, 在 0 dB 附近都能够达到收敛点。

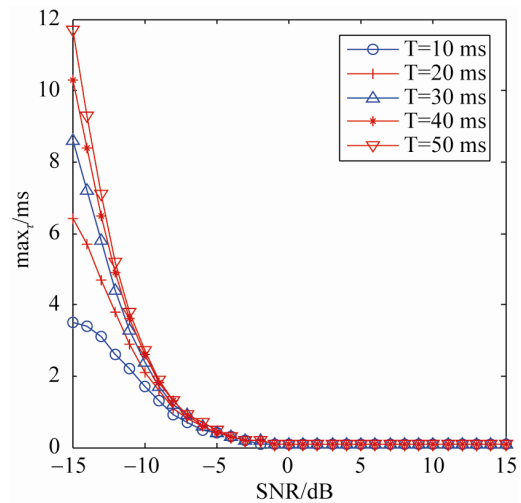


图 6 无传输冲突, 信噪比与最佳感知时间的关系

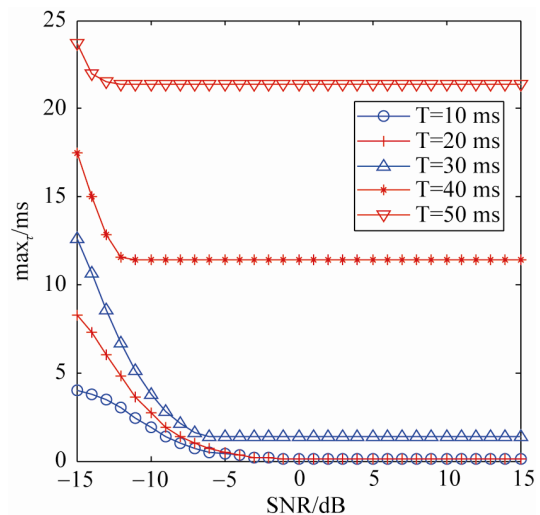


图 7 考虑传输冲突, 信噪比与最佳感知时间的关系

图 7 显示的情况与图 6 则大为不同, 最佳感知时间不再收敛于相近的数值, 而是随着感知周期  $T$



的增大而提高。造成这一现象的原因,正是传输时隙冲突的引入。随着信噪比的增高,获得最高  $P_a$  所需的采样点数虽然降低了,但是过长的传输时隙却又增加了冲突的概率,需要在  $P_a$  和  $P_s$  之间获得折中才能得到最佳感知时间。

数值仿真结果首先验证了本文模型和理论分析的合理性和正确性,而通过理论分析可以发现,基于经典的 LBT 机制建立的认知系统模型,加入传输冲突前后的系统性能有着非常大的差异。传输冲突带来的系统性能损失,即使在感知周期  $T = 10 \text{ ms}$  的情况下也超过了 20%,并且这一损失将随着感知周期的增加而愈发严重,因此传输冲突在 LBT 机制的系统设计下是不应该被忽略的。

## 4 结论

本文基于 LBT 机制建立认知系统模型,引入 M/M/1 排队论模型对 PU 行为进行描述,同时考虑了 PU 与 SU 在传输时隙中发生冲突的情况。文中首先综合上述条件对系统进行建模,构建了频谱利用率的表达式,然后对最佳感知时间的存在性进行了理论推导和证明,最后对考虑传输冲突和未考虑传输冲突的系统进行了分析比较,并通过数值仿真对理论分析的结果进行了验证。文中分析适用于认知系统拥有确定连续感知周期的情况,实际中认知用户也可能存在随机接入和随机服务时长的情况,针对这一问题的分析将是下一步的研究方向。

## 参考文献:

[1] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (S0733-8716), 2005, 23(2): 201-220.

[2] Liang Y C, Zeng Y, Peh E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on (S1536-1276), 2008, 7(4): 1326-1337.

[3] Park S, Hong D. Optimal Spectrum Access for Energy Harvesting Cognitive Radio Networks [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on (S1536-1276), 2013, 12(12): 6166-6179.

[4] Stotas S, Nallanathan A. Optimal sensing time and power

allocation in multiband cognitive radio networks [J]. Communications, IEEE Transactions on (S0090-6778), 2011, 59(1): 226-235.

[5] Jeon J, Codreanu M, Latva-aho M, et al. The Stability Property of Cognitive Radio Systems with Imperfect Sensing [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (S0733-8716), 2014, 32(3): 628-640.

[6] Xin Y, Zhang H, Lai L. A Low-Complexity Sequential Spectrum Sensing Algorithm for Cognitive Radio [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (S0733-8716), 2014, 32(3): 387-399.

[7] Xing Y, Chandramouli R, Mangold S, et al. Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (S0733-8716), 2006, 24(3): 626-637.

[8] 岳新智, 郭滨. 基于纯不联系马尔可夫过程的频谱感知研究 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(1): 29-35.

[9] 唐应辉, 唐小我. 排队论: 基础与分析技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[10] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 1967, 55(4): 523-531.

[11] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing, Vol. II: Detection Theory [M]// Signal Processing. Upper Saddle River, N J, USA: Prentice Hall, 1998.

[12] Lee W Y, Akyildiz I F. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on (S1536-1276), 2008, 7(10): 3845-3857.

[13] Ma J, Zhou X, Li G Y. Probability-based periodic spectrum sensing during secondary communication [J]. Communications, IEEE Transactions on (S0090-6778), 2010, 58(4): 1291-1301.

[14] 梁之舜, 邓集贤, 杨维权. 概率论及数理统计 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[15] Sahai A, Hoven N, Tandra R. Some fundamental limits on cognitive radio [C]// Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello, Illinois: University of Illinois, 2004: 1662-1671.

[16] Pei Y, Hoang A T, Liang Y C. Sensing-throughput tradeoff in cognitive radio networks: how frequently should spectrum sensing be carried out? [C]// Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on. USA: IEEE, 2007: 1-5.