

## 主用户干扰约束下的机会频谱接入感知-传输时隙优化调度

张晶<sup>1,2</sup>, 陆音<sup>2</sup>, 高西奇<sup>1</sup>, 郑福春<sup>1</sup>

(1. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 南京邮电大学 电子科学与工程学院 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 提出一种基于主用户干扰约束的机会频谱接入感知-传输时隙调度优化方案。首先, 推导切换机制下认知系统的吞吐量和主用户干扰率, 建立感知时间和感知周期联合优化模型; 然后, 在主用户干扰率和次用户感知质量双重约束下, 推导了可最大化认知系统吞吐量的最优感知时间和感知周期的闭合表达式; 最后, 阐述了时隙优化调度方案并计算了认知系统可获得的最大吞吐量。仿真结果表明, 所提出的时隙调度方案可以为认知系统提供更高的吞吐量, 并更好地适应主用户干扰率和感知质量约束的变化。

**关键词:** 机会频谱接入; 时隙调度优化; 干扰约束; 系统吞吐量

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)12-0042-07

## Sensing-then-transmission slot scheduling optimization for opportunistic spectrum access under the interference constraint of primary users

ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, LU Yin<sup>2</sup>, GAO Xi-qi<sup>1</sup>, ZHENG Fu-chun<sup>1</sup>

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Wireless Communication in Jiangsu Province, College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** A sensing-then-transmission slot scheduling scheme for opportunistic spectrum access under the interference constraint of primary users (PU) was proposed. First, the throughput of the cognitive radio system (CRS) with channel handoff mechanism and the interference ratio to PU were deduced. An optimization model combined the sensing time and sensing period was also set up. Then, the optimal sensing time and sensing period were derived by maximizing the throughput of the CRS subject to both interference ratio and sensing quality constraints. Based on the analysis, a time slot scheduling scheme was finally proposed. The achievable maximum throughput of the CRS was derived too. Simulation results indicate that the proposed slot scheduling scheme can enhance the throughput of the CRS, and fit the changes of interference ratio and sensing quality constraints better.

**Key words:** opportunistic spectrum access; slot scheduling optimization; interference constraint; system throughput

### 1 引言

认知无线电和动态频谱接入技术以其在提升无线频谱效率方面的巨大优势而成为近年无线通

信领域的研究热点和重要课题<sup>[1-3]</sup>。作为与静态频谱分配制度最为兼容的一种动态频谱接入方案, 机会频谱接入受到了研究人员的广泛关注, 其主要思想是在不过分影响授权用户(主用户)正常通信的

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2012-11-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB316004); 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03005-004); 国家博士后科学基金资助项目(2012M520972); 江苏省博士后科学基金资助项目(1201007B); 国家自然科学基金资助项目(61271236, 61001077); 南京邮电大学自然科学基金资助项目(NY211041, NY212057)

**Foundation Items:** The National Key Basic Research & Development Program (973 Program) (2012CB316004); The National Science & Technology Major Project (2011ZX03005-004); State Postdoctoral Science Foundation Project (2012M520972); Postdoctoral Science Foundation Project of Jiangsu Province (1201007B); The National Natural Science Foundation of China(61271236, 61001077); The Natural Science Foundation of NUPT (NY211041, NY212057)

前提下，认知用户（次用户）通过感知授权频段占用情况来寻找未被主用户占用的空闲频段，并按某一准则选择一个或多个空闲频段接入通信<sup>[4]</sup>。由于主用户对无线频段的占用是动态变化的，频谱感知需要周期性地以避免次用户接入对主用户产生过分干扰<sup>[5,6]</sup>。IEEE 802.22 协议规定的 WRAN 是一个典型的机会频谱接入系统应用实例。

基于周期性感知机会频谱接入系统，感知时间和感知周期在很大程度上决定了主用户可能受到的干扰和认知系统可获得的吞吐量，因此优化设计感知时间和感知周期成为决定认知系统性能的一个关键问题。文献[7]首先研究了单信道无切换情况下认知系统的感知-吞吐量折中问题，指出在检测概率约束下存在一个最优感知时间使认知系统的吞吐量达到最大。给定感知时间，文献[8]分别以最小化频谱机会损耗和最小化主用户接收的干扰功率为准则优化设计了次用户对忙碌信道的等待时间和在空闲信道上的传输时间。考虑最大化认知系统的时间利用率，文献[9]联合优化了次用户的感知时间和感知周期，上述工作均忽略了信道切换问题。为研究信道切换对 MAC 帧结构的影响，文献[10]讨论了切换机制下认知系统 MAC 帧结构优化问题，通过平衡误检测和虚警概率并最大化认知系统吞吐量推导了最优 MAC 帧结构的闭合表达式，进而讨论了感知质量和信道切换对认知系统性能的影响。

尽管在基于切换机制的认知系统感知-传输时隙调度研究中迈进了一步，文献[10]仍然存在 2 个缺陷：一是计算主用户干扰率时进行了一定的近似；二是对数据传输时间的约束过于严格，这使得实际得到的感知周期偏小。针对上述问题，本文建立了改进的主用户干扰率和时隙调度优化模型；不同于文献[10]首先感知时间，本文首先优化数据传输时间，而后以最大化认知系统吞吐量为准则推导最优感知时间和感知周期的闭合表达式，并提出了一种新的 MAC 层时隙优化调度方案。与文献[10]相比，本文提出的方案可以在更大的感知灵敏度范围内提高认知系统的吞吐量，同时更好地适应主用户干扰约束的变化。

## 2 系统模型

考虑一种周期性感知机会频谱接入系统，其中主用户具有接入优先权，次用户周期性地感知频谱

占用情况并机会地利用感知到的频谱空白，主用户无法获知次用户对频谱的占用情况。假设主网络拥有  $N$  个带宽为  $W$  的授权信道，信道依次标号为  $i=1, \dots, N$ 。主用户以速率  $\lambda_{p,i} s^{-1}$  的泊松过程到达信道  $i$ ，以速率  $\mu_{p,i} s^{-1}$  的泊松过程离开。主网络采用集中式接入控制，新到达的主用户由接入控制点（或者基站）为其分配传输信道。为避免碰撞，每个信道在任一时刻仅分配给一个主用户使用。一旦所有信道分配完毕，新到达的主用户将被阻塞。

次用户采用图 1 所示的感知-传输时隙结构（即 MAC 帧结构）进行机会式通信，其中， $\tau$  为频谱感知时间， $T_d$  为数据传输时间， $T = \tau + T_d$  为感知周期即 MAC 帧长。本文假设次用户具有宽带频谱感知能力，可同时感知  $N$  个频段。次用户在频谱感知中可能出现误检测和虚警情况<sup>[7]</sup>，使用误检测概率和虚警概率来评估频谱感知质量。采用能量检测法进行频谱感知，检测概率  $P_{d,i}$  可计算为<sup>[7~10]</sup>

$$P_{d,i}(\varepsilon_i, \tau) = \Pr(\hat{H}_{1,i} | H_{1,i}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\varepsilon_i - 2m(\gamma_i + 1)}{\sqrt{4m(2\gamma_i + 1)}} \right) \quad (1)$$

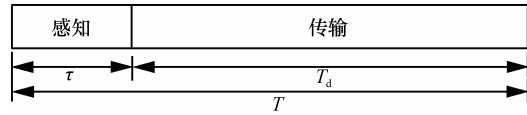


图 1 机会频谱接入感知-传输时隙结构

相应地，误检测概率  $P_{m,i}$  和虚警概率  $P_{f,i}$  计算为

$$P_{m,i}(\varepsilon_i, \tau) = \Pr(\hat{H}_{0,i} | H_{1,i}) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\varepsilon_i - 2m(\gamma_i + 1)}{\sqrt{4m(2\gamma_i + 1)}} \right) \quad (2)$$

$$P_{f,i}(\varepsilon_i, \tau) = \Pr(\hat{H}_{1,i} | H_{0,i}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\varepsilon_i - 2m}{\sqrt{4m}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \alpha_i + \sqrt{\frac{m}{2}} \gamma_i \right) \quad (3)$$

其中， $\varepsilon_i$  表示能量检测器的判决门限， $\tau$  为频谱感知时间。 $H_{0,i}$  和  $H_{1,i}$  分别表示信道  $i$  未被主用户占用和被主用户占用， $\hat{H}_{0,i}$  和  $\hat{H}_{1,i}$  分别表示次用户感知到信道  $i$  未被主用户占用和被主用户占用。 $m = \tau W$  为时间带宽积，通常  $m \gg 1$ ； $\gamma_i$  为次用户在信道  $i$  上接收到的主用户信噪比； $\alpha_i = \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{d,i})\sqrt{2\gamma_i + 1}$ ， $P_{d,i}$  为检测概率。为保证感知质量，要求  $P_{d,i} |_{\gamma_i = \gamma_{\min}} \geq \bar{P}_d$ ， $\gamma_{\min}$

为能量检测器的最低接收信噪比，即检测灵敏度； $\bar{P}_d$  为检测概率门限。

根据对  $N$  个信道的感知结果，新到达的次用户随机选择一个空闲信道接入，即次用户采用分布式接入控制，此处假设认知系统具有理想的接入碰撞避免机制。对于已经处于通信状态的次用户，若其感知到当前信道有主用户进入，它将切换到其他空闲信道上继续传输，切换时间开销  $T_h$  包含在传输时隙  $T_d$  中；若次用户无法找到空闲信道进行切换，则进入缓存区等待下一个感知时隙的到达，此时次用户处于阻塞状态。假设信道  $i$  上次用户的到达率为  $\lambda_{s,i} s^{-1}$ ，离开率为  $\mu_{s,i} s^{-1}$ ，到达和离开过程均服从泊松分布。

为简化分析，本文假设所有信道具有相同统计特性和业务负荷，即  $\lambda_{p,i} = \lambda_{p,1}$ ， $\mu_{p,i} = \mu_{p,1}$ ， $\lambda_{s,i} = \lambda_{s,1}$ ， $\mu_{s,i} = \mu_{s,1}$ 。次用户在各个信道上感知到的信号具有相同的统计特性，即给定假设  $H_j, j \in \{0,1\}$  有  $\gamma_i = \gamma$ ；所有的能量检测器具有相同的判决门限，即  $\varepsilon_i = \varepsilon$ ，于是可推知次用户在任一信道上具有相同的感知质量，即  $P_{d,i} = P_d$ ， $P_{f,i} = P_f$ ， $P_{m,i} = P_m$ 。

### 3 感知-传输时隙优化调度

根据系统模型，次用户在频谱感知结束时可能出现 3 种动作：不切换、成功切换和阻塞。相应地，机会频谱接入系统的 MAC 帧有 3 种应用图景，如图 2 所示。

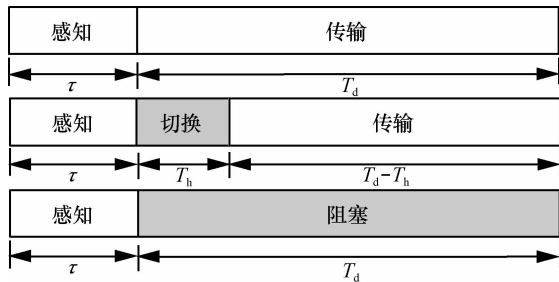


图 2 机会频谱接入感知-传输时隙结构

设  $P_h$  和  $P_n$  为次用户在每个时隙的成功切换概率和不切换概率<sup>[10]</sup>。若次用户未感知到主用户出现在其工作信道上，则无需执行信道切换而继续工作在当前信道上，此时次用户的吞吐量为  $(T_d/T)r$ ；当次用户感知到主用户出现在其工作信道上且找到空闲信道进行切换时，次用户的吞吐量计算

为  $((T_d - T_h)/T)r$ ；若无法找到空闲信道进行切换，次用户暂时被阻塞，此时次用户的吞吐量为零。此处  $r = C_0 P_0 (1 - P_f) + C_1 P_1 P_m$  为次用户可获得的信道容量<sup>[7]</sup>，其中， $C_0 = \text{lb}(1 + \text{SNR}_s)$  和  $C_1 = \text{lb}(1 + \text{SNR}_s / (1 + \text{SNR}_p))$  分别表示正确感知情况下次用户信道容量和误检测情况下次用户信道容量， $\text{SNR}_s$  为次用户信噪比， $\text{SNR}_p$  为次用户接收到的主用户信噪比。 $P_0 = \text{Pr}(H_0)$  表示信道未被主用户占用的概率， $P_1 = \text{Pr}(H_1)$  表示信道被主用户占用的概率， $P_0 = \mu_{p,1} / (\lambda_{p,1} + \mu_{p,1})$ ， $P_1 = \lambda_{p,1} / (\lambda_{p,1} + \mu_{p,1})$ <sup>[5-7]</sup>。根据上述分析，得到如下引理。

**引理 1** 切换机制下认知系统的平均吞吐量为

$$R(\tau, T) = \frac{T_d}{\tau + T_d} P_n r + \frac{T_d - T_h}{\tau + T_d} P_h r \quad (4)$$

**引理 2** 在次用户的每个传输时隙中，主用户受到的平均干扰率为

$$\bar{I} = P_0 (1 - P_f) + P_1 P_m - \frac{1 - P_f - P_m}{P_n + P_h} P_0 [P_n e^{-\nu T_d} + P_h e^{-\nu(T_d - T_h)}] \quad (5)$$

此处  $\nu = \max\{\lambda_{p,1}, \mu_{p,1}\}$ 。考虑到  $P_f \leq P_d$ ，可以推知  $\bar{I} \in [P_m, P_0(1 - P_f) + P_1 P_m]$ 。

**证明** 见附录 A。

考虑感知质量和主用户干扰率双重约束，以最大化认知系统吞吐量为准则，建立感知-传输时隙调度优化模型如下

$$\begin{aligned} \max_{\tau, T} R(\tau, T) &= \frac{T - \tau}{T} P_n r + \frac{T - \tau - T_h}{T} P_h r \\ \text{s.t. } r &= C_0 P_0 (1 - P_f) + C_1 P_1 (1 - P_d) \\ P_f(\varepsilon, \tau) &\geq P_m(\varepsilon, \tau) \\ P_d(\varepsilon, \tau) &\geq \bar{P}_d \\ \bar{I} &\leq I_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $\bar{P}_d$  为检测概率门限， $I_{\max}$  为主用户容忍的最大干扰率，即干扰限值。

由文献[4]可知，虚警概率  $P_f$  越高，次用户可获得的频谱机会越少，认知系统可获得的吞吐量越小。因此，通过适当调整能量检测器的判决门限  $\varepsilon$  使  $P_f(\varepsilon, \tau) = P_m(\varepsilon, \tau)$  时，认知系统吞吐量将达到最大。令  $P_f = P_m$ ，由  $\bar{I} \leq I_{\max}$  可推知，当  $P_m \leq I_{\max} < P_0 P_d + P_1 P_m$  时，

$$T_d \leq \tilde{T}_d = \frac{1}{\nu} \left[ \ln \frac{P_n + P_h e^{\nu T_h}}{P_n + P_h} + \ln P_0 + \ln(2P_d - 1) - \ln(P_0 P_d + P_1(1 - P_d) - I_{\max}) \right] \quad (7)$$

当  $I_{\max} < P_m$  时,  $T_d = 0$ ; 当  $I_{\max} \geq P_0 P_d + P_1 P_m$  时,  $T_d$  可以为任意正数。

式(7)表明,  $\tilde{T}_d$  是  $P_d$  的增函数。给定  $I_{\max} \in [P_m, P_0 \bar{P}_d + P_1(1 - \bar{P}_d)]$ , 为确保  $P_d(\varepsilon, \tau) \geq \bar{P}_d$  时  $\bar{T} \leq I_{\max}$  恒成立, 次用户的最大传输时间应为

$$\bar{T}_d = \tilde{T}_d \Big|_{\bar{P}_d} = \frac{1}{\nu} \left[ \ln \frac{P_n + P_h e^{\nu T_h}}{P_n + P_h} + \ln \frac{P_0(2\bar{P}_d - 1)}{P_0 \bar{P}_d + P_1(1 - \bar{P}_d) - I_{\max}} \right] \quad (8)$$

相应地, 感知周期应满足  $T \leq \tau + \bar{T}_d$ 。

另一方面, 给定感知时间  $\tau$ , 认知系统吞吐量  $R(\tau, T)$  是感知周期  $T$  的增函数。因此, 当  $T = \tau + \bar{T}_d$  时认知系统吞吐量达到最大。于是式(6)转化为

$$\begin{aligned} \max_{\tau} \tilde{R}(\tau) &= \frac{\bar{T}_d}{\tau + \bar{T}_d} P_n r + \frac{\bar{T}_d - T_h}{\tau + \bar{T}_d} P_h r \\ \text{s.t. } r &= C_0 P_0(1 - P_f) + C_1 P_1(1 - P_d) \\ P_f(\varepsilon, \tau) &= P_m(\varepsilon, \tau) \\ P_d(\varepsilon, \tau) &\geq \bar{P}_d \end{aligned} \quad (9)$$

求解上式, 得到最优感知时间和感知周期如下述定理 1。

**定理 1** 给定检测概率门限  $\bar{P}_d$  和主用户干扰限值  $I_{\max} \in [P_m, P_0 \bar{P}_d + P_1(1 - \bar{P}_d)]$ , 可最大化认知系统吞吐量的最优感知时间  $\tau^*$  和感知周期  $T^*$  分别为

$$\tau^* = \frac{2}{\gamma^2 W} \left( \text{erfc}^{-1}(2 - 2\bar{P}_d) - \alpha \right)^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T^* &= \frac{2}{\gamma^2 W} \left( \text{erfc}^{-1}(2 - 2\bar{P}_d) - \alpha \right)^2 + \\ &\frac{1}{\nu} \ln \left( \frac{P_n + P_h e^{\nu T_h}}{P_n + P_h} \cdot \frac{P_0(2\bar{P}_d - 1)}{P_0 \bar{P}_d + P_1(1 - \bar{P}_d) - I_{\max}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $\alpha = \text{erfc}^{-1}(2\bar{P}_d) \sqrt{2\gamma + 1}$ 。

**证明** 见附录 B。

上述定理表明, 最优感知时间和感知周期与次用户感知到的主用户信噪比  $\gamma$  有关, 这意味着实现最优的时隙调度需要对  $\gamma$  进行连续估计。显然, 这需要额外的时间开销和硬件开销, 且  $\gamma$  的时变性会引起感知时间和感知周期的动态调整。为方便实际应用, 可以采用一种次优的方案, 以频谱检测器的接收灵敏度  $\gamma_{\min}$  代替主用户信噪比  $\gamma$  来计算感知时

间和感知周期。

根据上述定理, 认知系统的 MAC 层时隙调度方案陈述如下。

首先, 根据预先统计出的网络业务流参数 (主、次用户的到达率和离开率), 按文献[10]中的定理 1 计算出次用户的不切换概率  $P_n$ 、成功切换概率  $P_h$ ;

然后, 根据给定的干扰限值  $I_{\max}$ 、检测概率门限  $\bar{P}_d$ 、检测器灵敏度  $\gamma_{\min}$  以及切换概率, 按式(10)、式(11)计算出感知时间和感知周期;

最后, 根据计算出的感知时间和感知周期进行周期性地 MAC 层时隙调度。

基于上述时隙调度方案, 认知系统可获得的最大吞吐量为

$$R_{\max} = R(\tau^*, T^*) = C_0 P_0 r_0 \left( \frac{\bar{T}_d}{T^*} P_n + \frac{\bar{T}_d - T_h}{T^*} P_h \right) \quad (12)$$

其中,  $r_0 = \bar{P}_d + \delta(1 - \bar{P}_d)$ ,  $\delta = C_1 P_1 / C_0 P_0$ 。

## 4 仿真分析

令可共享信道数  $N = 5$ , 信道带宽即感知带宽为  $W = 200$  kHz, 所有信道具有相同的统计特性和业务负荷。对单个信道而言, 主用户到达率为  $\lambda_{p,1} = 0.6 \text{ s}^{-1}$ , 离开率为  $\mu_{p,1} = 1 \text{ s}^{-1}$ ; 次用户到达率为  $\lambda_{s,1} = 1 \text{ s}^{-1}$ , 离开率为  $\mu_{s,1} = 1 \text{ s}^{-1}$ ; 次用户的信道切换时间  $T_h = 10$  ms, 平均接收信噪比为  $SNR_s = 10$  dB,  $SNR_p = \gamma$ 。根据上述假设, 对提出的感知-传输时隙调度方案和认知系统吞吐量进行数值仿真并与文献[10]进行比较, 得到图 3~图 6 所示的仿真结果。鉴于本文得到的最优感知时间  $\tau^*$  与文献[10]一致, 本节不再通过仿真对感知时间  $\tau^*$  进行比较。

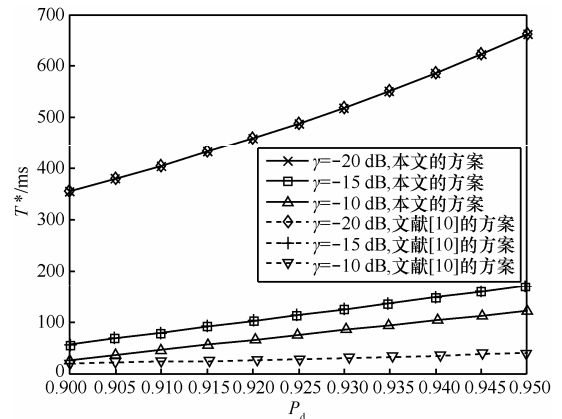


图 3 感知周期  $T^*$  与检测概率门限  $\bar{P}_d$

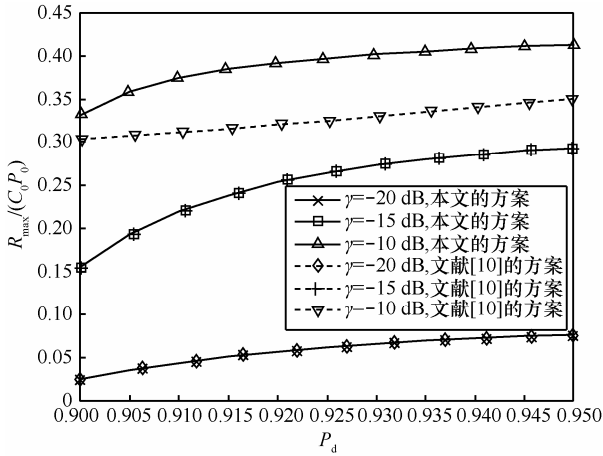


图 4 归一化吞吐量  $R_{\max} / (C_0 P_0)$  与检测概率门限  $\bar{P}_d$

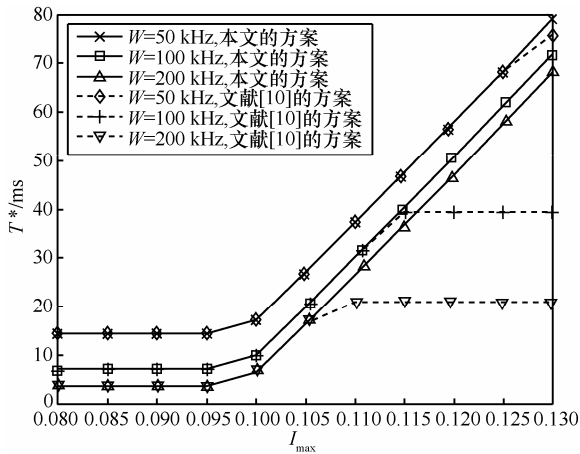


图 5 感知周期  $T^*$  与主用户干扰限值  $I_{\max}$

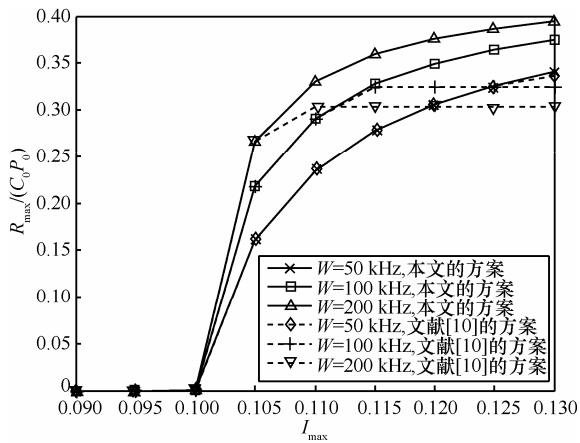


图 6 归一化吞吐量  $R_{\max} / (C_0 P_0)$  与主用户干扰限值  $I_{\max}$

#### 4.1 时隙调度方案与检测概率门限的关系

给定主用户干扰限值  $I_{\max} = 0.11$ ，感知周期  $T^*$  和认知系统吞吐量  $R_{\max}$  随检测概率门限  $\bar{P}_d$  的变化曲线如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看到，无论采

用本文提出的方案还是文献[10]的方案，感知周期  $T^*$  均随检测概率门限  $\bar{P}_d$  的提高而上升，且  $\gamma$  越小  $T^*$  上升速度越快。这是因为感知质量的提高将引起感知时间的增加，感知周期随之上升。比较本文方案和文献[10]的方案，当  $\gamma = -15$  dB 和  $\gamma = -20$  dB 时，二者给出的感知周期相同；当  $\gamma = -10$  dB 时，本文给出的感知周期则明显大于文献[10]，且随着  $\bar{P}_d$  的提高 2 种方案的感知周期差值变大，这意味着新方案在高主用户信噪比条件下可以获得更长的感知周期，且感知周期对  $\bar{P}_d$  的变化更为敏锐。

图 4 表明，认知系统可获得的最大吞吐量  $R_{\max}$  随检测概率门限  $\bar{P}_d$  的提高呈现上升趋势，但上升速度逐渐变缓。这意味着新的时隙调度方案实现了感知质量和认知系统吞吐量的同步提高。给定  $\bar{P}_d$ ，次用户接收到的主用户信噪比  $\gamma$  越小，认知系统可获得的吞吐量越小。这是因为  $\gamma$  越小，维持一定检测概率  $\bar{P}_d$  所需要的感知时间越长；而传输时间  $\bar{P}_d$  保持不变，因此次用户的时间效率下降，认知系统的吞吐量随之下降。比较本文方案和文献[10]的方案，当  $\gamma = -15$  dB 和  $\gamma = -20$  dB 时，2 种方案所提供的认知系统吞吐量相同；当  $\gamma = -10$  dB 时，本文方案提供的系统吞吐量明显高于文献[10]。这一结果表明，新方案在高主用户信噪比条件下可以获得更大的认知系统吞吐量，且系统吞吐量对  $\bar{P}_d$  的变化更为敏锐。

#### 4.2 时隙调度方案与主用户干扰限值的关系

令  $\bar{P}_d = 0.9$ ， $\gamma = -10$  dB，感知周期  $T$  和认知系统吞吐量  $R_{\max}$  随主用户干扰限值  $I_{\max}$  的变化曲线如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看到，给定感知带宽  $W$ ，当  $I_{\max} < 0.1$  时，感知周期  $T^*$  为定值；而当  $I_{\max} \geq 0.1$  时，感知周期  $T^*$  随  $I_{\max}$  的提高而上升。这是因为，当  $I_{\max} < 1 - \bar{P}_d$  时，传输时间  $T_d = 0$ （见式 (7)），此时次用户只能处于感知状态而不能传输。给定  $I_{\max}$  和  $\bar{P}_d$ ，感知带宽  $W$  越小，所需要的感知时间越长，因此感知周期越长。此外，存在一个转折点  $I_{\max}^*$ ，当  $I_{\max} \leq I_{\max}^*$  时，本文给出的感知周期  $T^*$  与文献[10]相同，而当  $I_{\max} > I_{\max}^*$  时本文给出的感知周期  $T^*$  继续上升而文献[10]给出的  $T^*$  保持恒定；转折点  $I_{\max}^*$  随感知带宽  $W$  的增加而下降，例如  $W = 15$  kHz 时， $I_{\max}^* = 0.125$ ，而  $W = 200$  kHz 时， $I_{\max}^* = 0.105$ 。上述结果表明，本文方案可以更好地适应主用户干扰限值的变化，文献[10]的方案对于干扰约束的适应性

依赖于检测带宽。

从图 6 可以看到，当  $I_{\max} < 0.1$  时，认知系统可获得的吞吐量  $R_{\max} = 0$ ，这是因为次用户在此情况下无法传输；当  $I_{\max} \geq 0.1$  时，认知系统的吞吐量随主用户干扰率  $I_{\max}$  的提高而上升，但上升速度逐渐变慢。这表明主用户干扰约束越宽松，认知用户可获得的频谱机会越多，认知系统的吞吐量越高。给定  $I_{\max}$  和  $\bar{P}_d$ ，感知带宽  $W$  越小认知系统可获得的吞吐量越小。比较本文方案和文献[10]的方案，当  $I_{\max} \leq I_{\max}^*$  时，二者所提供的系统吞吐量相同；而当  $I_{\max} > I_{\max}^*$  时，文献[10]提供的系统吞吐量保持恒定而本文得到的系统吞吐量仍然单调上升，这表明新方案可以在弱干扰约束条件下为认知系统提供更高的吞吐量。

## 5 结束语

本文研究了机会频谱接入系统的感知-传输时隙优化调度问题：基于主用户干扰率和感知质量双重约束建立了感知-传输时隙调度优化模型，推导了最优感知时间和感知周期的闭合表达式，阐述了认知系统的 MAC 层时隙调度方案，计算出了认知系统可获得的最大吞吐量。仿真结果表明，所提出的时隙调度方案可以更好地适应主用户干扰率和感知质量约束的变化，同时为认知系统提供更高的吞吐量。

## 附录 A 引理 2 的证明

根据系统模型，无切换发生时次用户在每个感知-传输周期中可获得的传输时间为  $T_d$ ，执行成功切换时次用户在每个周期中可获得的传输时间为  $T_d - T_h$ 。根据文献[9]，2 种情况下次用户传输使主用户受到的干扰比率分别为

$$\begin{aligned} \bar{I}_n &= P_m (P_0 e^{-\mu_{p,1} T_d} + P_1) + P_0 (1 - P_f) (1 - e^{-\lambda_{p,1} T_d}) \\ &\doteq P_0 (1 - P_f) + P_f P_m - P_0 (1 - P_f - P_m) e^{-\nu T_d} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_h &= P_m (P_0 e^{-\mu_{p,1} (T_d - T_h)} + P_1) + P_0 (1 - P_f) (1 - e^{-\lambda_{p,1} (T_d - T_h)}) \\ &\doteq P_0 (1 - P_f) + P_f P_m - P_0 (1 - P_f - P_m) e^{-\nu (T_d - T_h)} \end{aligned} \quad (14)$$

其中， $\nu = \max\{\lambda_{p,1}, \mu_{p,1}\}$ 。于是，在每个次用户传输时隙中，主用户受到的平均干扰比率为

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{P_n \bar{I}_n + P_h \bar{I}_h}{P_n + P_h} = P_0 (1 - P_f) + P_f P_m - \\ &\frac{1 - P_f - P_m}{P_n + P_h} P_0 [P_n e^{-\nu T_d} + P_h e^{-\nu (T_d - T_h)}] \end{aligned} \quad (15)$$

考虑到  $P_f \leq P_d$ ，可推知  $P_m \leq \bar{I} < P_0 (1 - P_f) + P_f P_m$ 。

## 附录 B 定理 1 的证明

根据文献[10]，当  $P_f = P_m = 1 - P_d$  时，频谱感知时间可推导为

$$\tau = \frac{\varepsilon(1 + \sqrt{2\gamma + 1})}{2W(\gamma + 1 + \sqrt{2\gamma + 1})} = \frac{2}{\gamma^2 W} (\operatorname{erfc}^{-1}(2 - 2P_d) - \alpha_0)^2 \quad (16)$$

相应地，能量检测器的判决门限为

$$\varepsilon = 2\tau W \frac{\gamma + 1 + \sqrt{2\gamma + 1}}{1 + \sqrt{2\gamma + 1}} = 2\kappa\tau W \quad (17)$$

其中， $\alpha_0 = \operatorname{erfc}^{-1}(2P_d)\sqrt{2\gamma + 1}$ ， $\kappa = (\gamma + 1 + \sqrt{2\gamma + 1}) / (1 + \sqrt{2\gamma + 1})$ 。将式 (17) 代入式 (3) 并考虑到  $m = \tau W$ ，得到次用户的虚警概率（此处略去信道标号  $i$ ）为

$$P_f(\varepsilon, \tau) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\varepsilon - 2\tau W}{\sqrt{4\tau W}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( (\kappa - 1) \sqrt{\frac{\tau W}{2}} \right) \quad (18)$$

下面求解最优感知时间。由式 (9) 可知  $r = C_0 P_0 (1 - P_f) + C_1 P_f P_f$ ，将其代入  $\tilde{R}(\tau)$  并关于  $\tau$  求导，得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_0 P_0} \frac{\partial \tilde{R}(\tau)}{\partial \tau} &= \left( \frac{-\bar{T}_d}{(\tau + \bar{T}_d)} P_n - \frac{\bar{T}_d - T_h}{(\tau + \bar{T}_d)^2} P_h \right) \left[ (1 - P_f) + \frac{C_1 P_f}{C_0 P_0} P_f \right] + \\ &\frac{\kappa - 1}{2\tau} \sqrt{\frac{\tau W}{2\pi}} \exp \left( -\frac{(\kappa - 1)^2 \tau W}{2} \right) \left( \frac{\bar{T}_d}{\tau + \bar{T}_d} P_n + \frac{\bar{T}_d - T_h}{\tau + \bar{T}_d} P_h \right) \left( 1 - \frac{C_1 P_f}{C_0 P_0} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

整理得到

$$\frac{\tilde{R}'(\tau)}{C_0 P_0} = \frac{P_n \bar{T}_d + P_h (\bar{T}_d - T_h)}{(\tau + \bar{T}_d)^2} \left[ (1 - \delta) (\tau + \bar{T}_d) b - \tilde{r} \right] \quad (20)$$

其中， $\tilde{r} = (1 - P_f) + \delta P_f$ ， $b = \frac{\kappa - 1}{2\tau} \sqrt{\frac{\tau W}{2\pi}} \exp \left( -\frac{(\kappa - 1)^2 \tau W}{2} \right)$ ，

$\delta = \frac{C_1 P_f}{C_0 P_0}$ 。由约束条件  $P_d(\varepsilon, \tau) \geq \bar{P}_d$  及  $P_f = P_m$ ，可知

$$\tau \geq \hat{\tau} = \frac{2}{\gamma^2 W} (\operatorname{erfc}^{-1}(2 - 2\bar{P}_d) - \alpha)^2 \quad (21)$$

其中， $\alpha = \operatorname{erfc}^{-1}(2\bar{P}_d)\sqrt{2\gamma + 1}$ 。由  $m = \tau W \gg 1$  和  $\kappa > 1$  可推知  $b \rightarrow 0$ ，进一步考虑到  $0 < \delta \ll 1$ ，得到  $\tilde{R}'(\tau) < 0$ 。这意味着当  $\tau \in [\hat{\tau}, +\infty)$  时，认知系统吞吐量  $\tilde{R}(\tau)$  是感知时间  $\tau$  的减函数。因此，最优感知时间为

$$\tau^* = \hat{\tau} = \frac{2}{\gamma^2 W} (\operatorname{erfc}^{-1}(2 - 2\bar{P}_d) - \alpha)^2 \quad (22)$$

相应地，最优感知周期为

$$\begin{aligned} T^* &= \tau^* + \bar{T}_d = \frac{2}{\gamma^2 W} (\operatorname{erfc}^{-1}(2 - 2\bar{P}_d) - \alpha)^2 + \\ &\frac{1}{\nu} \ln \left( \frac{P_n + P_h e^{\nu T_h}}{P_n + P_h} \cdot \frac{P_0 (2\bar{P}_d - 1)}{P_0 \bar{P}_d + P_1 (1 - \bar{P}_d) - I_{\max}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

## 参考文献:

- [1] Federal communications commission spectrum policy task force report[J]. ET Docket, 2002, (11):2-135.
- [2] CABRIC D, O'DONNELL I D, CHEN M S W, *et al.* Spectrum sharing radios[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2006, 6(2): 30-45.
- [3] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [4] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3):79-89.
- [5] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, *et al.* Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3):589-600.
- [6] ZHAO Q C, GEIRHOFER S, TONG L, *et al.* Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2):785-796.
- [7] LIANG Y C, ZENG Y H, PEH E, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4):1326-1336.
- [8] ZHOU X W, MA J, LI G Y, *et al.* Probability-based optimization of inter-sensing duration and power control in cognitive radio[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10):4922-4927.
- [9] LEE W Y, AKYILDIZ I F. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10):3845-3857.
- [10] ZHANG J, QI L N, ZHU H B. Optimization of MAC frame structure for opportunistic spectrum access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6):2036-2045.
- [11] HAMMUDA H. Cellular Mobile Radio Systems[M]. New York: Wiley, 1997.
- [12] 刘次华. 随机过程(第二版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- LIU C H. Stochastic Processes(2nd Edition)[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2001.

## 作者简介:



张晶(1980-), 女, 湖北襄阳人, 博士, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为宽带无线通信、无线资源管理、认知无线电和动态频谱接入技术。

陆音(1970-), 男, 江苏南京人, 博士, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为无线通信与电磁兼容、移动通信与宽带无线技术。

高西奇(1967-), 男, 安徽灵璧人, 博士, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为未来移动通信理论与关键技术、宽带多载波传输与多址技术、空时无线通信理论与技术。

郑福春(1963-), 男, 澳大利亚籍, 博士, 主要研究方向为通信信号处理、系统与算法的低复杂度、多天线系统等。