



一种非理想感知条件下的双门限机会频谱接入策略^{*}

彭晓东¹, 肖立民², 钟晓峰¹, 周世东¹

(1.清华大学电子工程系 北京 100084; 2.清华信息科学与技术国家实验室 北京 100084)

摘要: 为了有效提高认知网络中次用户的吞吐率性能, 提出了一种应用于非理想感知条件下的双门限机会频谱接入策略。该策略能在次用户对信道占用情况感知非理想的条件下, 综合考虑次用户的信道质量和非准确的信道占用信息, 使次用户在信道感知为空闲和占用时分别以不同的信道质量门限选择接入信道, 从而最大程度地利用信道质量较好的传输机会, 提高次用户的吞吐率性能。结合本策略, 建立了以次用户的有效吞吐率最大化为目标、以对主用户的干扰程度为约束条件的优化问题, 并在次用户对信道感知存在误差的条件下给出了最优门限的设计方法。仿真结果表明, 所提出的双门限机会频谱接入策略能够在非理想感知条件下显著提高次用户的有效吞吐率。

关键词: 非理想频谱感知; 双门限; 机会频谱接入; 信道质量

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.009

A Dual Threshold Based Opportunistic Spectrum Access Policy with Non-Ideal Spectrum Sensing

Peng Xiaodong¹, Xiao Limin², Zhong Xiaofeng¹, Zhou Shidong¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China)

Abstract: To effectively improve the throughput performance of secondary user in cognitive networks, a dual threshold based opportunistic spectrum access policy was proposed, which could be implemented under the condition that secondary user had non-ideal spectrum sensing capability. The proposed policy can take both channel quality information of secondary user and the inaccurate channel occupation information into account, to make secondary user access the channel in sensed idle and busy states with different channel quality thresholds. Based on this, the throughput performance of secondary user can be improved significantly by utilizing the transmission opportunities with good channel quality. With this policy, an optimization problem maximizing the effective throughput of secondary user with interference constraint for protecting primary user was formulated, and the optimal channel quality thresholds were derived under non-ideal spectrum sensing. Simulation results demonstrate the effective throughput performance of secondary user with non-ideal spectrum sensing capability can be improved significantly by implementing the proposed dual threshold based opportunistic spectrum access policy.

Key words: non-ideal spectrum sensing, dual threshold, opportunistic spectrum access, channel quality

^{*} 国家科技重大专项基金资助项目(No.2013ZX03001024-004), 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2013CB329002), 国家自然科学基金青年基金资助项目(No.61201192), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2012AA011402), 清华大学自主科研基金资助项目(No.2011THZ02-2), 国家国际科技合作项目(No.2012DFG12010), 爱立信合作项目(No.20123000059)

1 引言

随着新兴无线网络的不断部署,无线频谱资源日益短缺。允许不同网络间共享频谱资源可有效提高频谱利用率,缓解频谱资源紧张的矛盾^[1]。OSA (opportunistic spectrum access, 机会频谱接入) 是一种在分等级网络间实现频谱资源共享的途径,基本思想是允许 SU (secondary user, 次用户) 动态地接入频谱资源原有使用者——PU (primary user, 主用户) 的空闲频谱,从而提高频谱的利用率,扩大 SU 的系统容量^[2]。

在分等级网络中, SU 接入 PU 频谱需要保证将对 PU 的干扰控制在一定的约束条件以内,已有的相关研究包括单信道场景下最大化 SU 接入次数的研究^[2,3]以及 SU 的容量域分析^[4,5]。在多信道场景中,博弈论曾被用来实现信道选择算法^[6]。针对 SU 间可能出现的碰撞,参考文献[7]引入 CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance, 带有冲突避免的载波侦听多路访问) 机制和控制信道设计了 SU 选择算法。但这些策略均假设信道非时变,忽略了无线信道的传播特性对 SU 传输吞吐率的影响。

在衰落信道环境中,相关研究^[8-10]曾利用信道质量特性作为选择机会频谱接入时机的准则之一,有效提高了 SU 的吞吐率。但这些策略只允许 SU 在信道状态被感知为空闲时才能发起传输,忽视了信道感知为占用时的传输机会,损失了吞吐率性能。

参考文献[11]提出的机会频谱接入策略虽然可以利用信道感知结果为占用时的传输机会,但需要 SU 具备理想的信道感知能力,即能准确感知信道占用与否,但在实际的无线环境中,受具体信道感知方法的局限及噪声的影响, SU 对 PU 传输活动的感知存在一定的虚警和漏警,从而导致 SU 浪费传输机会或过度接入信道以致对 PU 带来过多干扰^[12]。参考文献[12,13]研究了在 SU 对信道感知存在误差的条件下,如何设计接入策略从而最大化 SU 吞吐率的问题,但同样只允许 SU 在信道感知为空闲时传输,而忽视了信道感知为占用时的传输机会。

本文提出一种双门限机会频谱接入策略,它能在 SU 对信道占用情况感知存在误差的条件下,利用 SU 信道质量信息和非准确的 PU 信道占用信息做出传输决策,使得 SU 在满足对 PU 干扰约束的前提下,提高自身的吞吐率。具体来说,通过引入信道质量信息,该双门限机会频谱接入策略使得 SU 在信道感知为空闲和占用时,以不同的信

道功率增益门限选择接入信道,从而充分利用信道质量较好的接入机会,提高 SU 的有效吞吐率。另外,考虑到 SU 对信道占用情况的感知非理想,本文在非理想信道感知条件下给出最优门限的求解方法。仿真结果表明,本文所提出的双门限机会频谱接入策略能够在信道感知非理想的条件下,有效提升 SU 的吞吐率性能。

2 系统模型

本文研究的等级网络包括一个 PU 网络和一个 SU 网络,系统模型如图 1 所示。

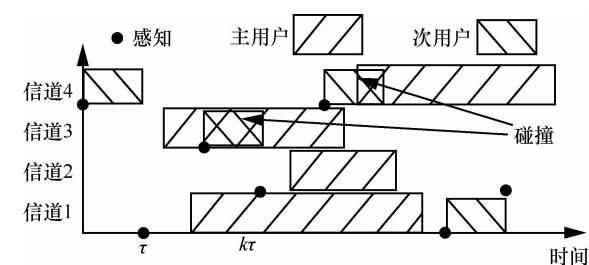


图 1 系统模型

2.1 PU 接入模型

本文考虑具有 M 个并行信道的 PU 网络,第 i 条信道的占用可建模为两状态持续时间马尔可夫链^[14,15],其中空闲状态 ($s_i=0$) 持续时间服从均值为 λ_i^{-1} 的指数分布,占用状态 ($s_i=1$) 持续时间服从均值为 μ_i^{-1} 的指数分布。第 i 条信道空闲和占用的稳态概率分别为:

$$v_i(0) = \mu_i / (\lambda_i + \mu_i) \quad (1)$$

$$v_i(1) = \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i) \quad (2)$$

2.2 SU 接入模型

本文考虑的 SU 网络基于时隙结构,时隙长度为 τ 。在每个时隙开始时刻, SU 选择一个信道进行感知,之后根据感知得到的信道占用情况和当前的信道质量决定是否进行传输。

2.3 SU 传输模型

本文考虑窄带平衰落信道模型,并假设信道衰落的相关时间大于时隙时长,因此信道的衰落特性为块衰落,即在一个时隙内信道功率增益保持不变,不同时间隙的信道功率增益按某一已知的分布随机发生变化。

基于上述假设,在时刻 t , SU 传输的信号经过第 i 条信道后的基带表达式为:

$$y_i(t) = h_i(t)x_i(t) + n_i(t) + I_i(t) \quad (3)$$

其中, $x_i(t)$ 为 SU 的发射信号, $h_i(t)$ 为信道复幅度增益,



$n_i(t)$ 为高斯白噪声, $I_i(t)$ 为 PU 传输时对 SU 形成的干扰。

由于采用块衰落信道模型,使用 $g_i(k)=|h_i(t)|^2, t \in [k\tau, (k+1)\tau)$ 代表第 i 个信道在第 k 个时隙的信道功率增益,假设它服从概率密度函数为 $f_{G,i}(g)$ 的分布^[10]。 $\sigma_i^2(t)$ 代表 SU 接收机处的噪声与干扰功率。观察图 1 不难发现,在一个时隙内,PU 对 SU 的干扰随着 PU 对信道的占用与否而发生变化,假设在一个时隙内, $\sigma_i^2(t)$ 存在两种取值:当 PU 静止即信道为空闲状态时, $\sigma_i^2(t)=\sigma_{\text{idle}}^2$; 当 PU 传输即信道为占用状态时, $\sigma_i^2(t)=\sigma_{\text{busy}}^2$ 。

2.4 SU 感知模型

在信道 i 上, SU 在每个时隙开始时刻对信道进行感知,感知结果可建模为一个二值的假设检验问题,即:

$$\begin{aligned} H_0: y_i(t) &= n_i(t) \\ H_1: y_i(t) &= n_i(t) + I_i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

定义 $\hat{s}$ 为时隙开始时刻 SU 信道感知的结果, $\hat{s}=0$ 代表 SU 感知信道为空闲状态; $\hat{s}=1$ 代表 SU 感知信道为占用状态,则 SU 感知信道的虚警 P_{fa} 和漏警 P_{md} 可相应定义如下:

$$\begin{aligned} P_{\text{fa}} &= \Pr(\hat{s}=1 | H_0) \\ P_{\text{md}} &= \Pr(\hat{s}=0 | H_1) \end{aligned} \quad (5)$$

2.5 SU 对 PU 碰撞概率模型

SU 在时隙开始时刻,根据感知到的信道状态以及当前的信道质量做出传输决策,当 SU 决定传输后,由于 PU 可能在时隙开始时刻或中间时刻发起传输,会出现 SU 和 PU 碰撞的情形。本文使用如下条件碰撞概率来衡量 SU 接入信道的频谱对 PU 造成干扰的严重程度:

$$c_i = \Pr(\text{SU 在同一时隙传输} | \text{PU 在某一时刻传输}) \quad (6)$$

为保证 PU 的传输质量,该条件碰撞概率不应超过预设的约束条件 γ_i ,即 $c_i \leq \gamma_i, \gamma_i \in [0, 1]$ 。

2.6 SU 接入频谱的性能度量指标

本文使用“有效吞吐率”作为度量 SU 机会频谱接入性能的指标,是 SU 的可达遍历容量,可以更准确地描述 SU 通过机会频谱接入获得的实际好处,定义如下^[10]:

$$T = \liminf_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} E \left(\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K T_i(k) \right) \quad (7)$$

其中, $T_i(k)$ 为 SU 在时隙 k 接入信道 i 获得的容量,即:

$$T_i(k) = \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \text{lb} \left(1 + \frac{p_i(k)g_i(k)}{\sigma_i^2(t)} \right) u_i(k) dt \quad (8)$$

其中, $p_i(k)$ 和 $\sigma_i^2(t)$ 分别是 SU 在时隙 k 的发射功率和 SU 接收机处的噪声与干扰功率, $g_i(k)$ 为信道功率增益。当 SU 在时隙 k 发起传输时, $u_i(k)=1$; 否则 $u_i(k)=0$ 。在一个时

隙内,当 PU 没有进行传输时, $\sigma_i^2(t)=\sigma_{\text{idle}}^2$; 当 PU 发起传输时, $\sigma_i^2(t)=\sigma_{\text{busy}}^2$ 。

3 双门限机会频谱接入策略和最优门限设计

为了简化分析,本文将以单信道为例进行讨论,在下面的推导中将略去下标。本文所提出的算法可以较容易地推广到多信道情况,如采用轮询机制^[9-11]。

3.1 双门限机会频谱接入策略

本文提出一种利用 SU 信道质量信息和信道感知结果的 DT-OSA (dual threshold based opportunistic spectrum access, 双门限机会频谱接入) 策略,它可在 SU 对信道感知非理想的条件下,充分利用信道质量好的传输机会,有效提高 SU 的吞吐率。具体来说,在每个时隙开始时刻,当 SU 感知信道为空闲状态时,若当前信道功率增益超过预设的门限值 g_{idle} ,则 SU 发起传输,否则不传输;当 SU 感知信道为占用状态时,若当前信道功率增益超过预设的信道质量门限值 g_{busy} ,则 SU 发起传输,否则 SU 不传输。下个时隙重复上述步骤。

3.2 优化问题建立

建立以最大化 SU 有效吞吐率为目标、以对 PU 的干扰为约束条件的优化问题,从而求得最优接入门限 g_{idle} 和 g_{busy} ,使得 SU 能在非理想信道感知条件下,选择接入信道质量较好的时隙,从而获得吞吐率性能的提升。

定义 $\Psi_0(g)$ 和 $\Psi_1(g)$ 分别为时隙开始时刻信道为空闲和占用时的归一化 SU 容量期望值,是以一个时隙内平均空闲时间和占用时间比例为权重的容量加权,即:

$$\begin{aligned} \Psi_0(g) &= \Theta_0(0) \text{lb} \left(1 + \frac{Pg}{\sigma_{\text{idle}}^2} \right) + \Theta_0(1) \text{lb} \left(1 + \frac{Pg}{\sigma_{\text{busy}}^2} \right) \\ \Psi_1(g) &= \Theta_1(0) \text{lb} \left(1 + \frac{Pg}{\sigma_{\text{idle}}^2} \right) + \Theta_1(1) \text{lb} \left(1 + \frac{Pg}{\sigma_{\text{busy}}^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\Theta_s(j)(s, j \in \{0, 1\})$ 表示在某个时隙开始时刻信道为空闲 ($s=0$) 或占用 ($s=1$) 时,该时隙内信道处于空闲状态 ($j=0$) 和占用状态 ($j=1$) 的期望时间比例。容易推知:

$$\begin{aligned} \Theta_0(0) &= \eta + (1-\eta) \frac{\mu}{\lambda + \mu}, & \Theta_0(1) &= (1-\eta) \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \\ \Theta_1(0) &= (1-\eta) \frac{\mu}{\lambda + \mu}, & \Theta_1(1) &= 1 - (1-\eta) \frac{\mu}{\lambda + \mu} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\eta = \frac{1 - \exp(-(\lambda + \mu)\delta)}{(\lambda + \mu)\delta}$ 。

由于 SU 对信道占用情况存在感知误差, SU 在信道感知结果为空闲或占用时获得的期望容量 $\Omega_0(g)$ 和 $\Omega_1(g)$ 可分别表示为:

$$\begin{aligned}\Omega_0(g) &= Pr(H_0 | \hat{s}=0) \Psi_0(g) + Pr(H_1 | \hat{s}=0) \Psi_1(g) \\ \Omega_1(g) &= Pr(H_0 | \hat{s}=1) \Psi_0(g) + Pr(H_1 | \hat{s}=1) \Psi_1(g)\end{aligned}\quad (11)$$

根据式(1)、式(2)、式(5)不难推知:

$$\begin{aligned}Pr(H_0 | \hat{s}=0) &= \frac{(1-P_{fa})v(0)}{P(\hat{s}=0)}, Pr(H_1 | \hat{s}=0) = \frac{P_{md}v(1)}{P(\hat{s}=0)} \\ Pr(H_0 | \hat{s}=1) &= \frac{P_{fa}v(0)}{P(\hat{s}=1)}, Pr(H_1 | \hat{s}=1) = \frac{(1-P_{md})v(1)}{P(\hat{s}=1)}\end{aligned}\quad (12)$$

其中, $P(\hat{s}=0)$ 和 $P(\hat{s}=1)$ 分别表示 SU 感知信道为空闲状态和占用状态的概率, 可表示如下:

$$\begin{aligned}P(\hat{s}=0) &= (1-P_{fa})v(0) + P_{md}v(1) \\ P(\hat{s}=1) &= P_{fa}v(0) + (1-P_{md})v(1)\end{aligned}\quad (13)$$

根据 DT-OSA 策略和式(11)、式(13), SU 的有效吞吐率 T 可表示为:

$$\begin{aligned}T &= \int_{g_{idle}}^{+\infty} P(\hat{s}=0) f_G(g) \Omega_0(g) dg + \\ &\quad \int_{g_{busy}}^{+\infty} P(\hat{s}=1) f_G(g) \Omega_1(g) dg\end{aligned}\quad (14)$$

其中, $f_G(g)$ 是描述信道功率增益 g 分布的概率密度函数。

根据式(6)对碰撞概率的定义及 DT-OSA 传输策略, 同时参考文献[11], 易知 SU 对 PU 造成的碰撞概率为:

$$\begin{aligned}c &= \frac{P(\hat{s}=0) \int_{g_{idle}}^{+\infty} f_G(g) dg [(1-e^{-\lambda\tau}) Pr(H_0 | \hat{s}=0) + Pr(H_1 | \hat{s}=0)]}{1-v(0)e^{-\lambda\tau}} \\ &\quad + \frac{P(\hat{s}=1) \int_{g_{busy}}^{+\infty} f_G(g) dg [(1-e^{-\lambda\tau}) Pr(H_0 | \hat{s}=1) + Pr(H_1 | \hat{s}=1)]}{1-v(0)e^{-\lambda\tau}}\end{aligned}\quad (15)$$

DT-OSA 策略的优化目标为最大化 SU 获得的有效吞吐率 T , 同时满足 SU 对 PU 的干扰在约束条件 γ 之内, 故该优化问题可表示为:

$$\max_{g_{idle}, g_{busy}} T \text{ s.t. } c \leq \gamma, g_{idle}, g_{busy} \geq 0 \quad (16)$$

3.3 最优门限设计

在优化问题式(16)中, 当 $c < \gamma$ 时, SU 的有效吞吐率 T 总可以在满足约束条件 γ 的前提下, 通过更多地接入信道得到提升, 因此可知:

$$c = \gamma \quad (17)$$

式(17)是式(16)取得最优解的必要条件。将式(15)代入式(17), 则可将 g_{idle} 表示为 g_{busy} 的函数, 即:

$$g_{idle} = \pi(g_{busy}) \quad (18)$$

其中, $\pi(\cdot)$ 函数是单调递减函数。对式(18)求导, 不难得到:

$$\frac{dg_{idle}}{dg_{busy}} = -\frac{\varepsilon f_G(g_{busy})}{\varphi f_G(\pi(g_{busy}))} \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= P(\hat{s}=1) [(1-e^{-\lambda\tau}) Pr(H_0 | \hat{s}=1) + Pr(H_1 | \hat{s}=1)] \\ \varphi &= P(\hat{s}=0) [(1-e^{-\lambda\tau}) Pr(H_0 | \hat{s}=0) + Pr(H_1 | \hat{s}=0)]\end{aligned}\quad (20)$$

将式(14)对 g_{busy} 求导, 然后将式(19)代入, 可得:

$$\frac{dT}{dg_{busy}} = f_G(g_{busy}) \left(\frac{\varepsilon P(\hat{s}=0) \Omega_0(\pi(g_{busy}))}{\varphi} - P(\hat{s}=1) \Omega_1(g_{busy}) \right) \quad (21)$$

观察式(21)可知, 当 g_{busy} 为 0 时, 式(21)取值为正; 当 g_{busy} 趋于无穷时, 式(21)取值为负, 而 $\Omega_0(\pi(g_{busy}))$ 为 g_{busy} 的单调递减函数, $\Omega_1(g_{busy})$ 为 g_{busy} 的单调递增函数, 则可知式(21)有唯一零解, 此解即最优 g_{busy} 。在实际中, 最优 g_{busy} 可通过数值解法求出, 如使用梯度法或二分法等, 再根据式(18), 最优 g_{idle} 也可解出。

当 SU 信道为瑞利衰落信道时, 信道的功率增益 g 服从概率密度函数 $f_G(g) = \theta \exp(-\theta g)$ 的分布, 此时式(18)可写为:

$$g_{idle} = -\frac{1}{\theta} \ln \left(\frac{\gamma \varphi}{\varphi} - \frac{\varepsilon}{\varphi} e^{-\theta g_{busy}} \right) \quad (22)$$

其中, $\varphi = 1 - v(0) \exp(-\lambda\tau)$ 。

4 仿真结果与分析

本文使用瑞利衰落信道为仿真环境, 并将 DT-OSA 策略与参考文献[3]中的策略进行性能比较, 以验证 DT-OSA 策略对 SU 吞吐率的性能提升。

参考文献[3]的策略没有考虑到信道质量对 SU 有效吞吐率的影响, 仅把最大化 SU 接入信道的次数作为优化目标, 其具体步骤为在每个时隙开始时刻感知信道, 若信道感知为空闲则以一定概率传输; 否则不传输。该策略被证明在信道碰撞概率约束较紧时具有最优性。本文将参考文献[3]中的算法称为 BP (benchmark policy, 基准策略), BP 认为 SU 具有理想感知能力, 从而使用非准确的信道感知结果设计接入策略。

在仿真中, 时隙长度设为 0.1 ms, 信道空闲时的平均信干噪比 (pg/σ_{idle}^2) 设为 5 dB, 信道占用时的平均信干噪比 (pg/σ_{busy}^2) 设为 2 dB。SU 信道感知的虚警率设为 $P_{fa}=0.1$, 漏警率设为 $P_{md}=0.01$ [12]。本节在以下两组 PU 信道业务量参数下进行仿真。

- 组 1 (业务量较小): $\lambda^{-1}=0.8$ ms, $\mu^{-1}=0.4$ ms;
- 组 2 (业务量较大): $\lambda^{-1}=0.1$ ms, $\mu^{-1}=1$ ms。

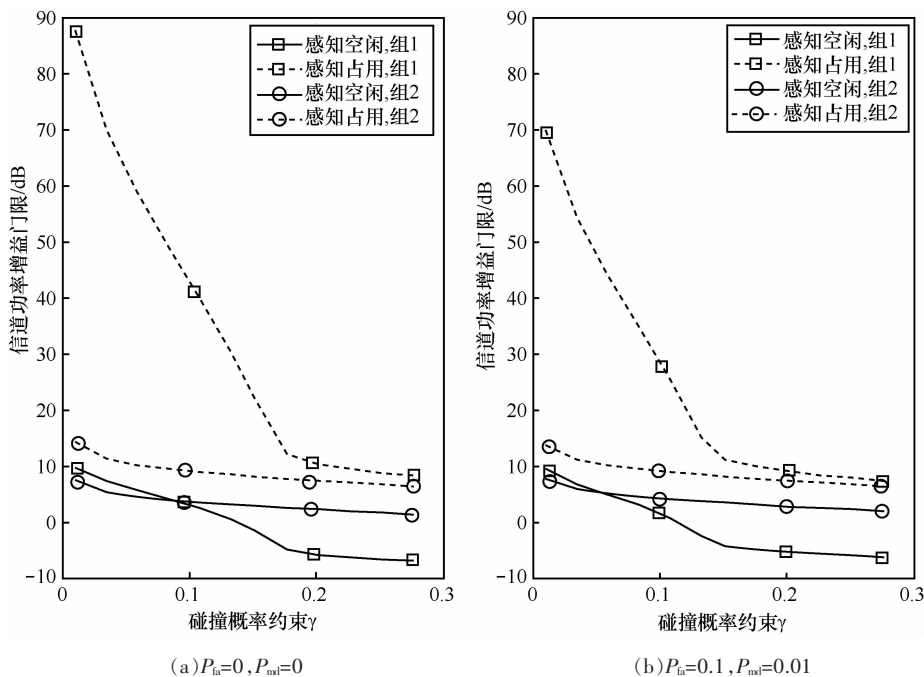


图2 DT-OSA策略中信道功率增益门限

DT-OSA 策略在理想感知和非理想感知两种情况下,信道功率增益门限 g_{idle} 和 g_{busy} 随碰撞概率约束变化的曲线如图2所示。可以看到,随着碰撞概率约束的不断放松,PU对碰撞的容忍度变大,SU可以在更多感知结果为空闲或占用的时隙进行传输,从而用于选择传输机会的最优门限 g_{idle} 和 g_{busy} 均会不断下降。与理想感知情况(如图2(a)所示)相比,当SU对信道占用感知存在一定的虚警和漏警时(如图2(b)所示),信道功率增益门限 g_{idle} 和 g_{busy} 均有所上升,这是因为DT-OSA策略考虑到SU对信道的感知存在一定的误差,因此用于选择传输机会的门限将变大,传输决策趋于保守。图2同时给出两组不同PU业务量强度下的门限对比,可以看到,当PU业务量为组2时,由于PU信道业务量较大,信道很少被感知为空闲,DT-OSA中的信道门限 g_{busy} 较低而 g_{idle} 较高,从而SU在信道感知为占用状态时获得了较多接入频谱的机会。这也说明,对于那些由于业务量较大而很少被感知为空闲的信道来说,由于DT-OSA策略可以利用信道感知结果为占用时的传输机会,从而DT-OSA策略相较其他策略,可使SU获得更高的有效吞吐率。

SU采用DT-OSA和BP策略,在理想感知和非理想感知两种情况下,其获得的有效吞吐率对比如图3所示。可以看到,由于SU对信道占用情况的感知存在一定的虚警和漏警(如图3(b)所示),因此其获得的有效吞吐率要低

于理想感知(如图3(a)所示)时的结果。观察图3,还可以看出SU采用DT-OSA策略获得的吞吐率性能优于其采用BP策略,这是因为BP策略只能在信道感知结果为空闲时才进行传输,且忽视了信道质量对SU传输吞吐率的影响;而采用双门限的DT-OSA策略可以通过优化 g_{idle} 和 g_{busy} 选择传输机会,从而使得SU放弃了一部分信道质量较差的信道感知为空闲时的传输机会,转为在信道质量较好的感知为占用的时隙进行传输,因此可在满足碰撞概率约束的条件下,提高SU的有效吞吐率。

5 结束语

本文提出了一种应用于SU非理想感知条件下的双门限机会频谱接入策略,该策略能够在SU对信道感知存在一定虚警和漏警的情况下,结合信道感知结果和SU的信道质量做出最优传输决策,从而在保障PU传输质量的前提下,最大化SU的有效吞吐率。另外,本文通过建立优化问题并求解,给出了存在信道感知误差下求解最优信道功率增益双门限的方法。数值仿真结果同样验证了采用本文所提出的DT-OSA策略,SU的有效吞吐率性能可获得较大提升。

参考文献

- 1 Zhao Q, Sadler B. A survey of dynamic spectrum access. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79~89

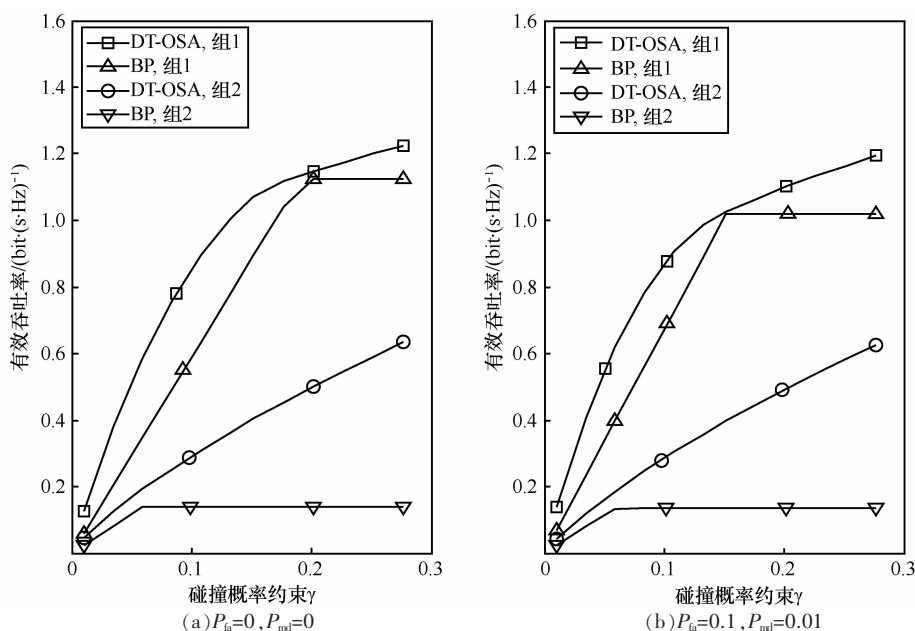


图 3 DT-OSA 与 BP 策略的有效吞吐量性能对比

- 2 Zhao Q, Geirhofer S, Tong L, *et al.* Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(2): 785~796
- 3 Li X, Zhao Q, Guan X, *et al.* Optimal cognitive access of Markovian channels under tight collision constraints. *IEEE Journal on Selected Areas Communication*, 2011, 29 (4): 746~756
- 4 Chen S, Tong L. Maximum throughput region of multiuser cognitive access of continuous time Markovian channels. *IEEE Journal on Selected Areas Communication*, 2011, 29(10): 1959~1969
- 5 Chen S, Tong L. Multiuser cognitive access of continuous time Markov channels: maximum throughput and effective bandwidth regions. *Proceedings of Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, San Diego, CA, 2010: 1~10
- 6 Xu Y, Wang J, Wu Q, *et al.* Opportunistic spectrum access in unknown dynamic environment: a game-theoretic stochastic learning solution. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2012, 11(4): 1380~1391
- 7 Kim K, Kwak K, Choi B. Performance analysis of opportunistic spectrum access protocol for multi-channel cognitive radio networks. *Journal on Communication Network*, 2013, 15(1): 77~86
- 8 Tan S, Zeidler J, Rao B. Opportunistic channel-aware spectrum access for cognitive radio networks with interleaved transmission and sensing. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2013, 12(5): 2376~2388
- 9 Peng X D, Xiao L M, Zhong X F, *et al.* Modeling and analysis of an opportunistic transmission scheme based on channel quality information in multi-channel cognitive networks. *Proceedings of IEEE WCNC 2013*, IEEE Press, Shanghai, China, 2013: 297~302
- 10 Peng X D, Zhong X F, Xiao L M, *et al.* Robust opportunistic spectrum access based on channel quality information in varying multi-channel networks. *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2013*, IEEE Press, Atlanta, GA, 2013
- 11 Peng X D, Zhong X F, Xiao L M, *et al.* Opportunistic spectrum access based on channel quality under general collision constraints. *Proceedings of IEEE PIMRC 2013*, IEEE Press, London, UK, 2013
- 12 Shu T, Krunz M. Throughput-efficient sequential channel sensing and probing in cognitive radio networks under sensing errors. *Proceedings of ACM 2009 MobiCom*, Beijing, China, 2009: 37~48
- 13 Liang Y, Zeng Y, Peh E, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2008, 7(4): 1326~1337
- 14 Geirhofer S, Tong L, Sadler B. Cognitive medium access: constraining interference based on experimental models. *IEEE Journal on Selected Areas Communication*, 2008, 26(1): 95~105
- 15 Geirhofer S, Tong L, Sadler B. A measurement-based model for dynamic spectrum access in WLAN channels. *Proceedings of IEEE MILCOM 2006*, IEEE Press, Washington DC, USA, 2006: 1~7



展用户范围的同时加强对下游企业的吸引力。在收入结构方面,可以通过借鉴互联网企业的后向收入模式,加强与外部企业的合作,通过接入用户规模的提高或者直接的广告收入获得收益。

(3)将智能管道与开放平台进行紧密耦合,支持开放平台上的应用服务

相对于终端厂商的开放平台而言,电信运营商在技术水平、贴近终端和促销策略上存在着明显的差距,但其控制着终端厂商所没有的独特的管道资源,其应利用这一独特的竞争优势,发展智能管道,并将其与自身的开放平台进行紧密的耦合,从而支持开放平台上的应用服务,实现与终端厂商和互联网企业的差异化开放平台构建。

(4)加强在电商平台的投入,形成差异化优势

在各类开放平台中,电子商务平台起步较早且发展迅速,已在我国形成了庞大的用户规模并拥有巨大的市场价值。同时,移动支付的逐步发展,为电信运营商开展电子商务开放平台提供了良好的机遇。为了更好地抓住这一发展契机,电信运营商应加强在该平台的投入,提高宣传力度,且有重点地发展移动市场。电信运营商可以通过店铺费用的减免、移动支付能力的开放等手段来吸引第三方服务商向自身的电子商务平台进行集聚,为用户提供更多的商品种类和服务内容。为了更好地满足用户在移动的场景下更快速便捷地使用电子商务服务,运营商应针对移动场景简化操作功能,从而逐步地实现差异化优势。

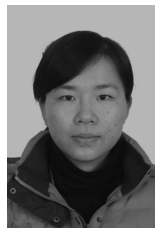
6 结束语

开放平台已成为当下移动互联网行业不可逆的发展方向,电信运营商的价值链中心位置正逐渐被削弱,应适时实施“去管道化”战略,加强与产业链中其他主体的合作,建立和运营开放平台,赢得在移动互联网时代的竞争优势。

参考文献

- 1 杨晓芳.基于移动互联网的新业务发展模式研究.北京邮电大学硕士学位论文,2013
- 2 腾讯科技(深圳)有限公司.2013 中国互联网开放平台白皮书,2013
- 3 丁晟.移动互联网时代通信运营商对策.中国新通信,2013(14)
- 4 华一强.电信运营商基于智能管道的开放平台发展策略研究.邮电设计技术,2012(3):11~15
- 5 董斌,于玉海,席平亚.移动互联网业务能力开放研究.电信科学,2010,26(10):1~5
- 6 祁晓清,付忠.运营商的移动互联网应对之策.通信企业管理,2014(1):82~84

[作者简介]



陈小玲,女,浙江大学管理学院博士生,主要研究方向为移动商务与商业模式。

(收稿日期:2014-07-14)

(上接第 65 页)

[作者简介]



彭晓东,男,清华大学博士生,主要研究方向为信号处理、认知无线电、无线信道建模等。



钟晓峰,男,清华大学副研究员,主要研究方向为无线网络技术,包括 B3G/4G 移动通信系统、分布式无线通信系统、无线自组织与协作传输网络等。



肖立民,男,清华信息科学与技术国家实验室副教授,主要研究方向为信道测量与建模、无线移动通信和宽带无线传输技术。



周世东,男,清华大学教授,主要研究方向为无线与移动通信系统体制与实现、第三代移动通信系统与技术、B3G/4G 移动通信体制与技术、信道编译码技术、多天线系统与技术、MIMO 技术、分布式天线系统。

(收稿日期:2014-03-18)