



碰撞约束和非理想感知下认知多址接入信道的有效吞吐量

肖正瑛, 谢显中, 张森林

(重庆邮电大学个人通信研究所 重庆 400065)

摘要:在碰撞约束和非理想信道信息下,研究认知多址接入信道中多个次用户接入主用户频谱的有效吞吐量问题。在机会频谱接入方式(OSA)下,定义有效吞吐量并作为次用户的性能指标。考虑信道质量信息,在信道质量分布参数未知的情况下采用有限的信道样本对参数进行估计,并对非理想感知下次用户的性能进行分析。通过仿真实验,分别讨论了信道质量门限与碰撞概率及次用户性能之间的关系,对比了理想感知和非理想感知下次用户的性能,并与其他算法进行对比,验证了本文接入策略的有效性。

关键词:认知无线电;多址接入;有效吞吐量;非理想信道;信道质量

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015256

Effective Throughput of Cognitive Multiple Access Channel Under Collision Constraints and Imperfect Sensing

Xiao Zhengying, Xie Xianzhong, Zhang Senlin

(Institute of Personal Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The problem of effective throughput of multiple secondary users access to the spectrum of primary user in the cognitive multiple access channel under collision constraints and imperfect channel state information was discussed. Effective throughput was defined and used as the performance metric for secondary users under opportunity spectrum access (OSA). The channel quality information was considered and limited number of channel samples were used to estimate the parameter of unknown channel quality distribution and the performance of secondary users under imperfect sensing was analyzed. The performance of secondary users under perfect sensing and imperfect sensing was compared by simulations. Moreover, the validity of proposed access strategy was verified by comparing it with other algorithm.

Key words: cognitive radio, multiple access, effective throughput, imperfect channel, channel quality

收稿日期:2015-06-23;修回日期:2015-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61271259, No.61301123),重庆市教委科学技术研究项目(No.KJ120501, No.KJ130536),重庆邮电大学科研基金项目(No.A2014-10),长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(No.IRT1299),重庆市委重点实验室专项经费(CSTC)资助课题

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271259, No.61301123), The Science Technology Research Project of Chongqing Science and Technology Commission (No.KJ120501, No.KJ130536), Research Project of Chongqing University of Posts and Telecommunications (No.A2014-10), Development Plan of Changjiang Scholars and Innovative Research Team (No.IRT1299), Special Fund of Key Laboratory of Chongqing Science and Technology Commission (CSTC)

论文引用格式:肖正瑛,谢显中,张森林.碰撞约束和非理想感知下认知多址接入信道的有效吞吐量.电信科学,2015256

Xiao Z Y, Xie X Z, Zhang S L. Effective throughput of cognitive multiple access channel under collision constraints and imperfect sensing. Telecommunications Science, 2015256

1 引言

近年来,认知无线电(CR)技术研究引起了极大的关注。在认知无线网络(CRN)中,次用户(非授权用户)通过一些策略在确保主用户(授权用户)的服务质量(QoS)的条件下共享和利用主用户网络中的频谱。次用户共享主用户的频谱主要有两种方式^[1]:频谱重叠(spectrum underlay)和频谱交替(spectrum overlay),后一种方式也被称为机会频谱接入(OSA)。本文主要关注 OSA 方式下,多个次用户接入它们检测到的空闲信道(形成一个认知多址接入信道)时的有效吞吐量。

在机会频谱接入的方式下,参考文献[3]提出了一种与传统认知无线电相比能够获得更多吞吐量的新的认知无线电系统。参考文献[4]为了最大化次用户的平均吞吐量,采用联合优化速率门限和数据分组传输时间。但是,在这些文献中都假设为理想信道条件,然而实际环境中很难完全获取信道信息。

通常,在认知无线网络中,通过设计接入策略来增加碰撞约束条件下的吞吐量比较困难。因此,一些文献设计了某些特定的系统模型来克服这些困难。参考文献[5,6]中,把主用户信道建模成独立同分布的马尔可夫过程,然后提出了一种感知算法并推导出了算法最优时的条件。参考文献[7~9]中,在服从主用户的碰撞约束下,对用于最大化次用户吞吐量的传输策略设计进行了研究,把传输策略问题建模为部分可观测马尔可夫决策过程(POMDP)。参考文献[7,8]假设主用户和次用户都采用时隙的方式进行传输,目的是简化推导过程,而参考文献[9]假设只有次用户采用时隙的方式进行传输。

然而,有一些重要的问题在之前的研究文献中很少被考虑。首先,忽略了信道质量的影响,这在设计认知接入策略中是十分重要的。其次,如果没有考虑信道质量,用于评估从认知接入中所获得的真实收益的性能指标是不实际的。例如,接入信道质量很差的非授权信道几乎没用。参考文献[10]中的研究表明,考虑信道质量能够提高网络的吞吐量。

因此,本文在碰撞约束条件下设计次用户的接入策略时将考虑服务质量和信道信息。在认知多址接入场景中,由于次用户采用机会频谱接入方式接入主用户信道,所以必须考虑主用户与次用户之间的碰撞问题。在接入策略设计过程中,为了保证主用户的性能,将把碰撞概率作为 QoS 约束条件。由于信道质量分布信息未知,为此将采用有限的信道样本对信道质量分布的参数进行估计。在此基础上,给出了次用户的接入策略,并对非理想感知下次用

户的性能进行分析。然后通过仿真实验及与其他算法进行对比,验证了接入策略的有效性。

2 系统模型和性能指标

2.1 系统模型

假设认知无线电系统包含 K 个主用户信道,采用连续时间的马尔可夫转移过程描述每个主用户信道的状态。信道 k ($k \in K$) 空闲状态持续时间和占用状态持续时间分别服从均值为和的指数分布。因此,信道的状态转移速率矩阵 Q 为:

$$Q = \begin{pmatrix} -\lambda_k & \lambda_k \\ \mu_k & -\mu_k \end{pmatrix} \quad (1)$$

空闲状态和占用状态的平稳概率分别为 $v_k(0) = \frac{\mu_k}{\lambda_k + \mu_k}$ 和 $v_k(1) = \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_k}$ 。

主用户采用非时隙的方式传输,次用户采用时隙的方式传输。考虑成本和能量消耗等因素(例如,仅靠电池供能的移动终端设备),次用户通常只配置一个发接收机,因此次用户在一个时隙内只能感知一个信道。在每个时隙的起点,次用户对主用户信道进行频谱感知,然后决定是否接入主用户信道。如果次用户与主用户同时接入主用户信道,它们之间就会产生碰撞。此外,次用户接入主用户信道不仅依赖于信道是否为空闲状态,还取决于碰撞约束和信道质量条件。在理想感知下,当主用户在次用户完成传输之前再次接入信道时,会导致碰撞发生。而在非理想感知下,还存在另一种碰撞,即当主用户占用信道时,次用户由于感知错误接入信道。由于存在多个次用户,当两个及以上的次用户同时接入主用户信道时也会产生次用户之间的碰撞。

当次用户 m 在 t 时刻接入主用户信道时,次用户 m 的接收端接收到的信号为:

$$y_m(t) = h_m(t)x_m(t) + n(t) \quad (2)$$

其中, $x_m(t)$ 表示次用户 m 在 t 时刻发送的信号, $h_m(t)$ 表示次用户 m 在 t 时刻传输时的信道增益, $n(t)$ 表示功率谱密度为 N_0 的加性高斯白噪声。由于本文主要针对信道质量对次用户性能的影响,不考虑信号功率变化的影响,因此可以设定次用户的信号功率与接收端的噪声功率比为一个定值,这里设为 0 dB。因此, $|h_m(t)|^2$ 就为次用户 m 的接收端在 t 时刻接收到的信噪比(SNR)。

为了描述方便,定义 $g_m(t) = |h_m(t)|^2$, 表示信道衰落增益, 本文将其作为信道质量信息。假设 $g_m(t)$ 独立同分布,且概率密度函数为 $f_g(g)$ 。在瑞利衰落信道中,其表示为:



$$f_c(g) = \theta \exp(-\theta g) \quad (3)$$

其中, θ 为信道质量分布的参数且未知。

在实际中,通常只能使用有限数量的信道样本来估计 θ 。这不仅是受到实时性和计算复杂性的限制,而且在一个很长的观测周期里,由于信道质量分布可能已经发生改变,采用大量信道样本得到的估计结果就会无效。在这种情况下,信道质量分布参数的估计不可避免地变得不准确。因此,为了更好地捕捉 θ 的不确定性,定义其为一个随机变量,且概率密度函数为 $p(\theta)$ 。

2.2 性能指标

由于不了解信道变化情况,以往研究通常把信道占用率作为性能指标。然而,本文采用更准确和更实际的指标,即通过在信道质量统计上对瞬时吞吐量计算期望值,使得其在物理上是可实现的各态历经速率。这里的“吞吐量”不同于参考文献[9]中的吞吐量,其仅仅是成功传输的指标。因此,为了区别于之前的参考文献,本文采用“有效吞吐量”这一术语来表示次用户的吞吐量。定义 $R_m(t)$ 为次用户 m 在时隙 t 所获得的容量,其表达式为:

$$R_m(i) = \ln(1 + |h_m(i)|^2) \quad (4)$$

因此,次用户 m 的有效吞吐量为:

$$R(m) = \liminf_{I \rightarrow \infty} \frac{1}{I} \mathbb{E} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I R_m(i) \right\} \quad (5)$$

3 次用户接入策略设计

当主用户信道空闲及信道质量超过预定的门限值时,次用户才接入其信道。由于 g 为信道衰落增益,因此,在主用户信道空闲状态下,定义次用户接入信道的概率为 P_i ,表示为:

$$P_i = \int_{g_i}^{+\infty} \theta \exp(-\theta g) dg \quad (6)$$

其中, g_i 为信道质量门限,计算式(6)得:

$$P_i = \exp(-\theta g_i) \quad (7)$$

定义 $g[n](n=1,2,\dots,N)$ 为信道功率增益样本,其关于 θ 的条件概率密度函数为:

$$p(g[n]|\theta) = \theta \exp(-\theta g[n]) \quad (8)$$

矢量 g 由 N 个独立的信道功率增益样本组成,因此,其概率密度函数为:

$$p(g|\theta) = \theta^N \exp(-N\theta \bar{g}) \quad (9)$$

其中, $\bar{g}$ 为 g 的均值。

根据贝叶斯定理,得到:

$$p(\theta|g) = \frac{p(g|\theta)p(\theta)}{\int p(g|\theta)p(\theta)d\theta} \quad (10)$$

式(10)中,把关于 θ 的先验知识整合到了后验概率密度函数估计 $p(\theta|g)$ 中。 $p(\theta|g)$ 包含了对参数 θ 的了解情况,并取决于先验知识和样本数据。

在信道质量分布参数未知以及碰撞约束下,为了获取更多的吞吐量,下面将构建优化问题。当主用户信道空闲时,多个次用户会以概率 P_i 接入主用户信道。但是,当接入主用户信道的次用户数大于 1 时,次用户之间会产生碰撞。因此,当恰好只有一个次用户接入信道时,其发送才能成功,且能够获得的有效吞吐量为:

$$J = \int_0^{\infty} \int_{g_i}^{\infty} \nu(0) \exp(-\lambda T) M P_i (1 - P_i)^{M-1} \theta \exp(-\theta g) \ln(1 + g) p(\theta|g) dg d\theta \quad (11)$$

其中, $M(M>1)$ 表示次用户的数量, T 表示一个时隙周期。从式(11)可以得出,当 $g_i=0$ 时,多个次用户会以概率 1 接入信道,导致相互碰撞,此时的有效吞吐量为 0。

次用户对主用户的碰撞概率为:

$$C(g_i, \theta) = \nu(0)(1 - \exp(-\lambda T))[1 - (1 - P_i)^M] \quad (12)$$

因此,优化问题可以表示为:

$$\max_{g_i} J, \text{ s.t. } \int_0^{\infty} C(g_i, \theta) p(\theta|g) d\theta \leq \gamma, g_i \geq 0, \theta > 0 \quad (13)$$

其中, γ 为预设的碰撞概率门限值。

本文中的接入策略可以扩展到多主用信道场景。 M 个次用户采用有序的(例如,从低频率到高频率)信道感知顺序对 K 个主用户信道进行周期性地感知。在时隙 i ,次用户感知信道 k ,如果信道繁忙,次用户将推迟发送信息,并在下一个时隙感知下一个信道。只有感知到信道空闲且信道质量超过门限值时,次用户才会接入信道。次用户在每 N 个时隙感知信道 k 一次,在信道 k 上的碰撞概率表示为:

$$C_k(g_i, \theta) = \frac{1}{K} C(g_i, \theta) \quad (14)$$

同理,次用户在多个主用户信道上的有效吞吐量表示为:

$$J_K = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K J_k \quad (15)$$

其中, J_k 为次用户在信道 k 上的式(11)。

4 优化问题求解

第 3 节将次用户接入策略设计问题转化一个优化问题,这里给出优化问题的求解。可以看出,式(13)是关于 g_i 的减函数。由式(13)得:

$$\int_0^{\infty} C(g_i, \theta) p(\theta|g) d\theta = \gamma \quad (16)$$

为了描述方便,定义:

$$\Phi \triangleq \nu(0)(1 - \exp(-\lambda T)) \quad (17)$$

根据式(12)计算 $C(g_i, \theta)$, 得到:

$$C(g_i, \theta) = \Phi[1 - (1 - \exp(-\theta g_i))^M] \quad (18)$$

为了进一步求解式(16), 下面将计算 $p(\theta|g)$ 。由式(9)和式(10)得:

$$p(\theta|g) = \frac{\theta^N \exp(-N\theta\bar{g})}{\int_0^\infty \theta^N \exp(-N\theta\bar{g})d\theta} \quad (19)$$

式(19)右边中分母为:

$$\int_0^\infty \theta^N \exp(-N\theta\bar{g})d\theta = \frac{\Gamma(N+1)}{(N\bar{g})^{N+1}} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19), 得到:

$$p(\theta|g) = \frac{(N\bar{g})^{N+1} \theta^N \exp(-N\theta\bar{g})}{\Gamma(N+1)} \quad (21)$$

其中, $\Gamma(a)$ 表示伽马函数。将式(18)和式(21)代入式(16)左边, 得到:

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty C(g_i, \theta)p(\theta|g)d\theta \\ &= \Phi \left[1 - \frac{(N\bar{g})^{N+1}}{\Gamma(N+1)} \int_0^\infty (1 - \exp(-\theta g_i))^M \theta^N \exp(-N\theta\bar{g})d\theta \right] \end{aligned} \quad (22)$$

对式(22)中的积分部分 $(1 - \exp(-\theta g_i))^M$ 进行二项式展开, 然后根据和的积分等于积分的和进一步化解式(22)的右边部分, 得到:

$$\gamma = \Phi \left[1 - \sum_{i=0}^M \frac{\binom{M}{i} (N\bar{g})^{N+1} (-1)^{M-i}}{[g_i(M-i) + N\bar{g}]^{N+1}} \right] \quad (23)$$

从式(23)可知, 当给定碰撞概率的预定门限值时, 可以得到其对应的 g_i 。然后, 通过式(11)就可以获得对应的次用户的有效吞吐量。

5 非理想感知下次用户有效吞吐量分析

在实际情况中, 次用户很难获取完全准确的感知信息, 即会出现感知错误或非理想感知结果, 接下来将对这种情况下次用户吞吐量进行分析。

次用户由于感知错误, 当主用户信道空闲时, 会认为信道被占用, 这种情况被称为虚警; 而当主用户信道被占用时, 会认为信道空闲, 这种情况被称为误警。本文分别用 P_f 和 P_d 表示次用户的虚警概率和检测概率。 M 个次用户对主用户信道进行感知, $M_1 (0 \leq M_1 \leq M)$ 个次用户出现感知错误, $(M-M_1)$ 个次用户正确感知。因此, 当主用户信道空闲时, 次用户能够获得的有效吞吐量为:

$$\begin{aligned} J_f &= \int_0^\infty \int_{g_i}^\infty \nu(0) \exp(-\lambda T) \binom{M}{M_1} P_f^{M_1} (1 - P_f)^{M-M_1} (M - M_1) \\ &P_f (1 - P_f)^{M-M_1-1} \theta \exp(-\theta g) \ln(1 + g) p(\theta|g) dg d\theta \end{aligned} \quad (24)$$

非理想感知下次用户对主用户的碰撞概率为:

$$\begin{aligned} C_f(g_i, \theta) &= \nu(0)(1 - \exp(-\lambda T)) [1 - (1 - P_f)^{M-M_1}] \binom{M}{M_1} \\ &P_f^{M_1} (1 - P_f)^{M-M_1} + [1 - \nu(0) \exp(-\lambda T)] \cdot \\ &[1 - (1 - P_f)^{M_1}] \binom{M}{M_1} (1 - P_d)^{M_1} P_d^{M-M_1} \end{aligned} \quad (25)$$

与前面类似, 优化问题表示为:

$$\max_{g_i} J_f, \text{ s.t. } \int_0^\infty C_f(g_i, \theta)p(\theta|g)d\theta \leq \gamma, g_i \geq 0, \theta > 0 \quad (26)$$

下面将对优化问题进行求解。为了描述方便, 定义:

$$\Phi_1 \triangleq \nu(0)(1 - \exp(-\lambda T)) \binom{M}{M_1} P_f^{M_1} (1 - P_f)^{M-M_1} \quad (27)$$

$$\Phi_2 \triangleq [1 - \nu(0) \exp(-\lambda T)] \binom{M}{M_1} (1 - P_d)^{M_1} P_d^{M-M_1} \quad (28)$$

由约束条件式(26)得:

$$\int_0^\infty C_f(g_i, \theta)p(\theta|g)d\theta = \gamma \quad (29)$$

根据式(27)和式(28), 得到:

$$\begin{aligned} C_f(g_i, \theta) &= \Phi_1 [1 - (1 - \exp(-\theta g_i))^{M-M_1}] + \\ &\Phi_2 [1 - (1 - \exp(-\theta g_i))^{M_1}] \end{aligned} \quad (30)$$

将式(21)、式(27)、式(28)式代入式(29)左边, 得到:

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty C_f(g_i, \theta)p(\theta|g)d\theta \\ &= \Phi_1 \left[1 - \frac{(N\bar{g})^{N+1}}{\Gamma(N+1)} \int_0^\infty (1 - \exp(-\theta g_i))^{M-M_1} \theta^N \exp(-N\theta\bar{g})d\theta \right] + \\ &\Phi_2 \left[1 - \frac{(N\bar{g})^{N+1}}{\Gamma(N+1)} \int_0^\infty (1 - \exp(-\theta g_i))^{M_1} \theta^N \exp(-N\theta\bar{g})d\theta \right] \end{aligned} \quad (31)$$

进一步化解式(31), 得到:

$$\begin{aligned} \gamma &= \Phi_1 \left[1 - \sum_{i=0}^{M-M_1} \frac{\binom{M-M_1}{i} (N\bar{g})^{N+1} (-1)^{M-M_1-i}}{[g_i(M-M_1-i) + N\bar{g}]^{N+1}} \right] + \\ &\Phi_2 \left[1 - \sum_{i=0}^{M_1} \frac{\binom{M_1}{i} (N\bar{g})^{N+1} (-1)^{M_1-i}}{[g_i(M_1-i) + N\bar{g}]^{N+1}} \right] \end{aligned} \quad (32)$$



6 仿真结果与分析

在这一部分中,将采用 MATLAB 进行蒙特卡洛仿真,并由此分析信道质量门限与碰撞概率之间的关系。然后,进一步分析次用户的有效吞吐量随信道质量门限的变化规律,并比较理想感知和非理想感知下次用户的性能。最后,用本文所提出的接入策略与参考文献[11]中算法进行对比。仿真过程中,时隙长度 $T=0.1$ ms,出现感知错误次用户数 $M_1=2$,虚警概率 $P_f=0.1$,检测概率 $P_d=0.9$,信道通信量参数 $\lambda^{-1}=1$ ms, $\mu^{-1}=0.5$ ms。

图 1 为理想感知和非理想感知下信道门限对碰撞概率的影响。其中,信道样本数 N 取 800。从图 1 中可以看出,当信道门限值增加时,次用户对主用户的碰撞减少。因为次用户的发送概率 P_i 随着信道门限值的增加而降低,导致了接入主用户信道的机会减少,从而减少了与主用户产生碰撞的概率。同时,从图 1 中还得出,次用户数越多,碰撞概率越大。由于当主用户信道暂时空闲时,次用户数越多,有次用户接入主用户信道的概率就越大,相应的与主用户碰撞的机会也会变大。在非理想感知下,虽然次用户的误警增加了碰撞概率,但是次用户的虚警会进一步降低碰撞概率,导致整个碰撞概率下降。这是因为,碰撞主要发生在主用户信道从空闲变忙时,即次用户正在主用户信道上进行传输时,主用户再次接入信道。

图 2 为理想感知和非理想感知下信道门限对次用户性能的影响。其中,次用户数 M 为 6,信道样本数 N 分别取 800 和 400。从图 2 中可以看出,有效吞吐量是关于信道质量门限的一个凸函数。随着信道门限值增大,次用户的有效吞吐量也随之增大。但是,当信道门限值超过一定值时,其有效吞吐量随之减少。这是因为,当信道门限值为

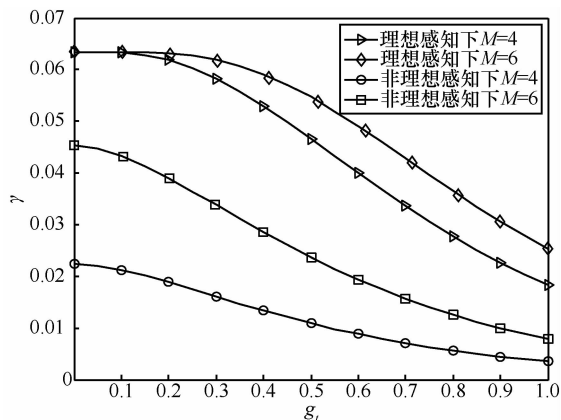


图 1 不同次用户数下信道门限对碰撞概率的影响

0 时,次用户的发送概率 P_i 为 1,它们之间必然会产生碰撞,所以导致有效吞吐量为 0。当信道门限值刚从 0 开始增加时,次用户的发送概率 P_i 从 1 开始逐渐降低,次用户之间的碰撞也随之降低,因此有效吞吐量开始从 0 增加。当超过一定值时,由于发送概率 P_i 过低,导致次用户不能有效的抓住传输机会,从而造成了有效吞吐量的降低。此外,从图 2 中还得出, N 取 800 时的有效吞吐量大于其取 400 时的当信道样本数增加时,对 θ 估计也会越准确,所获得的有效吞吐量也会越大。由于非理想感知下次用户的虚警,导致次用户的有效吞吐量减少。

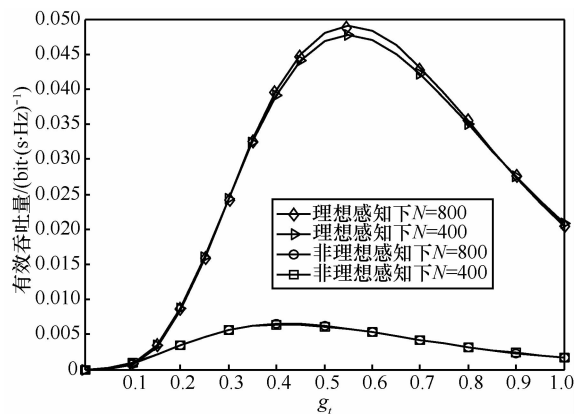


图 2 不同信道样本数下信道门限对次用户的有效吞吐量的影响

图 3 在相同的碰撞约束下比较了理想感知和非理想感知下次用户的有效吞吐量。其中,信道样本数 N 取 800。与图 2 类似,由于非理想感知下次用户的虚警,导致次用户的性能大幅度下降。从图 3 中可以得出,当次用户数 M 减少时,次用户之间对主用户信道的竞争程度降低,使得有效吞吐量增加。从图 3 中还得出,随着碰撞约束条件越来越宽松,次用户获得的有效吞吐量也越来越多。但是,随着碰撞约束条件进一步宽松,次用户的性能趋于饱和,不再

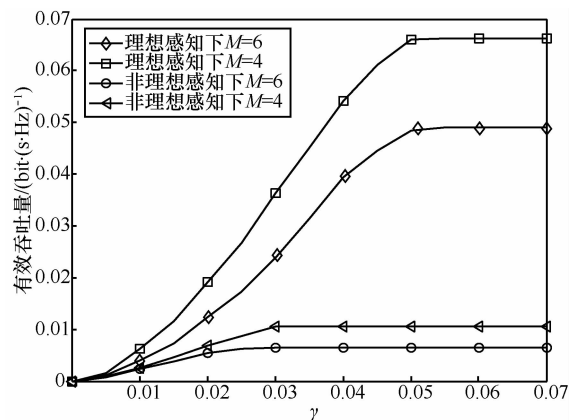


图 3 碰撞约束对次用户的有效吞吐量的影响

增加。这是因为,信道质量门限受到碰撞约束条件的限制(如图 1 所示)。当碰撞约束门限值增加时,信道质量门限值逐渐接近最佳值(如图 2 所示),使得次用户的有效吞吐量增加。当碰撞约束门限值进一步增加,直到信道质量门限值可以取最佳值时,此时次用户的有效吞吐量达到最大,即使碰撞约束门限值再增加,次用户的性能也不会再增加。

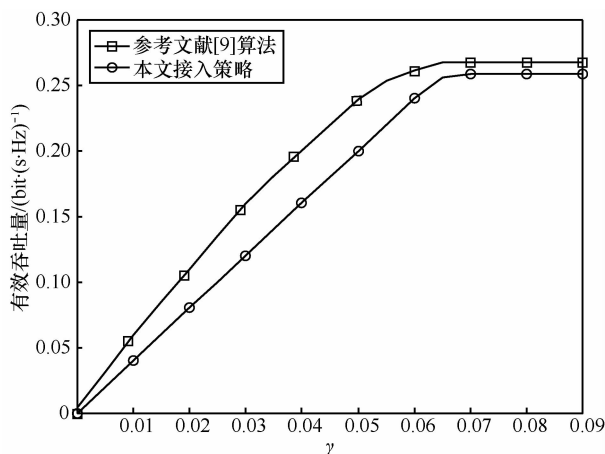


图 4 不同方法下碰撞约束对次用户的有效吞吐量的影响

图 4 中,对本文所提出的接入策略与参考文献[9]中的算法进行了比较。从图 4 中可以看出,采用本文中的接入策略所获得的性能优于参考文献[9]中算法的性能。这是因为,在设计接入策略时,考虑了信道质量对次用户接入信道的影响,使得次用户可以选择最合适的信道质量门限值接入主用户信道,从而获得最佳的性能。这也验证了在设计认知接入策略中,考虑信道质量能够提高网络的吞吐量。

7 结束语

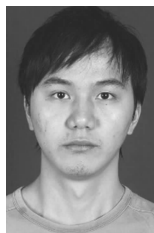
本文在基于机会频谱接入的认知多址接入信道中,考虑了服务质量和信道信息,并采用有限的信道样本对信道质量分布的参数进行估计,得到了次用户的接入策略,并研究了次用户的有效吞吐量。通过仿真实验,分别研究了信道质量门限与碰撞概率以及次用户的有效吞吐量之间的关系,并比较了理想感知和非理想感知下次用户的性能。通过与其他文献算法进行了对比,验证了本文所提出的接入策略的有效性,同时表明了考虑信道质量对于认知接入策略的重要性。

参考文献

- 1 Lu L, Zhou X W, Onunkwo U, *et al.* Ten years of research in spectrum sensing and sharing in cognitive radio. *EURASIP Journal*

- on Wireless Communications and Networking, 2012, 28(1):1~16
- 2 Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(3):79~89
- 3 Stotas S, Nallanathan A. On the throughput and spectrum sensing enhancement of opportunistic spectrum access cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(1):97~107
- 4 Tan S S, Zeidler J, Rao B. Opportunistic channel-aware spectrum access for cognitive radio networks with interleaved transmission and sensing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5):2376~2388
- 5 Zhao Q, Krishnamachari B, Liu K. On myopic sensing for multichannel opportunistic access: structure, optimality, and performance. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12):5431~5440
- 6 Javidi T, Krishnamachari B, Zhao Q, *et al.* Optimality of myopic sensing in multichannel opportunistic access. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 55(9):2107~2112
- 7 Zhao Q, Tong L, Swami A, *et al.* Decentralized cognitive mac for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a pomdp framework. *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 2007, 25(3):589~600
- 8 Sabir E, Haddad M, Tembine H. Joint strategic spectrum sensing and opportunistic access for cognitive radio networks. *Proceedings of 2012 IEEE Global Communications Conference*, California, USA, 2012
- 9 Li X, Zhao Q C, Guan X H, *et al.* Optimal cognitive access of markovian channels under tight collision constraints. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(4):746~756
- 10 Li B W, Yang P L, Wang J L, *et al.* Optimal frequency-temporal opportunity exploitation for multichannel ad hoc networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(12): 2289~2302

[作者简介]



肖正瑛,男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为认知无线网络。

谢显中,男,博士,重庆邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为 MIMO 预编码、认知无线网络、协作通信。

张森林,男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为干扰对齐。