

认知无线网络中的频谱切换性能分析

吴呈瑜* 何晨 蒋铃鸽
(上海交通大学电子工程系 上海 200240)

摘要: 在认知无线网络中, 次用户的频谱切换性能不仅和主用户的通信行为关系密切, 而且也和次用户本身的频谱感知精度以及频谱切换策略密切相关。该文采用连续时间马尔科夫模型对次用户在理想感知和非理想感知情况下的频谱切换进行建模, 进一步分析与比较不同频谱感知精度对频谱切换性能的影响。为了有效降低次用户在频谱切换过程中的强制中断概率, 提出基于信道预留机制的频谱切换策略。数值结果表明, 次用户对主用户信号的感知精度明显会影响次用户的频谱切换性能, 而有效的频谱切换策略则可以以较小的代价获得更好的频谱切换性能。

关键词: 认知无线网络; 频谱切换; 马尔科夫模型; 信道预留

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2590-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01353

Performance Analysis of Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks

Wu Cheng-yu He Chen Jiang Ling-ge

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In cognitive radio networks, the spectrum handoff performance of secondary users not only relates closely to the communication behavior of primary users, but also related closely to the spectrum sensing accuracy and the spectrum handoff strategies of the secondary users. In this paper, the spectrum handoff schemes that considered with perfect sensing and imperfect sensing are modeled by using the continuous time Markov model, and the affection on the performance of spectrum handoff for different spectrum sensing accuracy is analyzed and compared further. Furthermore, the spectrum handoff strategy based on the channel reservation mechanism is proposed to reduce the forced termination probability of the secondary users effectively in the spectrum handoff process. The numerical results show that the sensing accuracy on the primary signals affects significantly the spectrum handoff performance of secondary users, while the effective spectrum handoff strategy can achieve better performance for spectrum handoff at a lower cost.

Key words: Cognitive radio networks; Spectrum handoff; Markov model; Channel reservation

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)能够解决当前无线通信发展中频谱资源紧张和低效利用的问题, 即在不影响主用户服务质量(Quality of Service, QoS)的情况下 CR 用户通过频谱感知选择并接入到可用频段进行通信, 从而有效地提高系统的频谱利用率^[1]。当主用户要求使用次用户的当前通信频段或信道条件变得很差时, 次用户要进行频谱切换^[2]。

频谱切换主要考虑次用户的切换时延和中断概率, 以最小化切换时延或最大化次用户的吞吐量为目标设计频谱切换策略。认知无线网络中的主用户对次用户具有抢占优先权, 因此可将认知无线网络

建模为抢占优先队列模型。其抢占优先队列模型可以从两个角度来考虑, 对到达的用户的队列模型分析^[3-6]和对到达的用户的数据包的队列模型进行分析^[7-10]。文献[3]进一步考虑了主用户的抢占优先特性, 但是只考虑了一个主用户时的情景, 次用户也仅仅是考虑两个次用户, 在文献[4]中简单地将其推广到多个次用户的情况。文献[5]比文献[3, 4]更系统地拓展到了多个主用户的场景, 并考虑了频谱切换, 同时联合信道预留机制以最大化系统吞吐量为目标寻求最佳预留信道数, 以提高系统整体性能。文献[11]进一步分析了次用户采用 OFDM 情况下非连续子载波的分配问题。文献[7]提出机会调度策略以在与主用户最大碰撞约束条件下最大化次用户网络的吞吐量。文献[8]则提出在非理想感知的情况下以次用户和主用户的碰撞为约束最大化次用户网络的吞吐量。文献[9]考虑在主用户 QoS 的约束条件下次用

2012-10-19 收到, 2013-05-21 改回

国家自然科学基金(60832009, 60872017, 60772100)资助课题

*通信作者: 吴呈瑜 jerry916@sjtu.edu.cn

户在两个不同授权频段间接入和垂直切换，并以最大化次用户的吞吐量为目标寻求最佳切换策略。文献[10]分析次用户网络的最优队列控制机制，将主用户的到达作为次用户队列中断服务的约束条件，其优化问题以获得最佳队列长度阈值来最优化设计队列控制方案。文献[12]基于结合确定性和随机性占空比模型的两状态离散时间马尔科夫链，提出频谱使用的实证时间维度模型，来验证和评估实际无线环境中的频谱占用统计。以上文献分别针对理想感知和非理想感知分析了次用户频谱切换的性能，也提出了相应的频谱切换策略，但是并没有相应的文献分析和比较理想感知和非理想感知情况下的频谱切换性能。

本文在文献[5]和文献[6]的基础上，进一步采用 3 维连续时间马尔科夫模型详细分析了在理想感知情况下的频谱切换性能，同时采用 2 维连续时间马尔科夫模型详细分析了在非理想感知情况下的频谱切换性能，在相同参数下对这两种情况下的频谱切换性能进行比较分析，并通过仿真分析进一步验证在非理想感知情况下部分频谱切换性能的提升是以牺牲主用户的 QoS 为代价的。为了有效保障主用户和次用户的 QoS，本文提出一种基于信道预留机制的频谱切换策略，不仅可以有效提升频谱切换的性能，也可以有效降低主用户和次用户间的干扰问题。通过提出的频谱切换策略和文献[5]中的切换策略比较，进一步证明本文提出的频谱切换策略可以获得更好的性能。

2 系统模型

在认知无线网络中，设定主用户网络是宽带通信系统，单个主用户通信时需占用带宽为 B_{PU} ；设定次用户网络是窄带通信系统，单个次用户通信时需占用带宽为 B_{SU} ，且 $B_{PU} = N \times B_{SU}$ 。给定系统中频谱资源共有 M 个主用户授权频段，记为 $L_i (i = 1, 2, \dots, M)$ ，每个主用户频段又可分成 N 个信道，每个次用户接入则占用其中一个可用信道，记为 $C_j (j = 1, 2, \dots, MN)$ 。

在理想感知情况下，次用户的频谱切换性能主要受主用户的通信行为影响，即和主用户对频谱资源的平均占用概率直接相关。设次用户和主用户服从参数为 λ_s 和 λ_p 的泊松到达过程，其通信持续时间服从参数为 μ_s 和 μ_p 的负指数分布。用变量 i, j, k 构造系统状态空间， i 代表次用户占用信道数， j 代表主用户占用频段数， $k = 0$ 表示次用户在系统中不被阻塞或中断， $k = 1$ 表示次用户被阻塞， $k = 2$ 表示次用户被中断，用 $P(i, j, k)$ 表示 (i, j, k) 的稳态概率，则

状态空间 $S: S = \{(i, j, k) \mid 0 \leq i \leq MN, 0 \leq j \leq M, 0 \leq i + jN \leq MN, 0 \leq k \leq 2\}$ 。

在实际考虑中，次用户的频谱感知存在一定的漏检概率和虚警概率。漏检概率主要考虑刚到达的次用户没有感知到当前信道中正在通信的主用户。虚警概率是指次用户将本来空闲可用的信道感知为当前有主用户正在使用该信道，从而使得次用户无法接入该信道进行通信。设 P_d 为次用户的检测概率， $P_m = 1 - P_d$ 为次用户的漏检概率， P_{fa} 为次用户的虚警概率。考虑到次用户间频谱感知的空间相关性，将次用户在非理想感知情况下的系统状态空间表示为

$$\Gamma = \{(i, j) \mid 0 \leq i \leq MN, 0 \leq j \leq M, 0 \leq i + jN \leq MN\}$$

3 连续时间马尔科夫模型分析

3.1 理想感知情况下的频谱切换

在理想感知情况下，即 $P_d = 1, P_m = 0$ ，设定 $T = i + jN$ 表示系统所占用的信道数，被中断的次用户数为 r ，且所有被中断的次用户可动态切换到当前可用信道，其连续时间马尔可夫模型可分 3 种情况来分析：

(1) $i + jN \leq N(M - 1)$ ：系统中的可用信道数大于等于被中断的次用户数，平衡方程为

$$\begin{aligned} P(i, j, 0)(\lambda_s + \lambda_p + j\mu_p + i\mu_s) \\ = P(i + 1, j, 0)(1 + i)\mu_s \\ + P(i, j + 1, 0)(j + 1)\mu_p \\ + P(i - 1, j, 0)\lambda_s + P(i, j - 1, 0)\lambda_p \end{aligned} \quad (1)$$

(2) $N(M - 1) < i + jN < MN$ ：这种情况下，系统中没有足够的可用信道用于被中断次用户的频谱切换，则必有 $r = (i + jN) - N(M - 1)$ 个次用户会被强制中断，即当主用户到达后，系统中的次用户数将变为 $i - r$ 个。因此，从状态 $(i, j, 0)$ 到状态 $(i - r, j + 1, 2)$ (其中 $r = 1, 2, \dots, N$) 的转移速率，即主用户到达后被中断的次用户的转移速率为^[5]

$$\gamma_{(i-r, j+1, 2)}^{(i, j, 0)} = \frac{\begin{bmatrix} N \\ r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (M - j - 1)N \\ i - r \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} (M - j)N \\ i \end{bmatrix}} \lambda_p \quad (2)$$

当 r 个次用户被中断时，需要至少有 r 个可用信道才能使得这 r 个切换用户不被强制中断掉。当 $N(M - 1) < i + jN < MN$ 时，其平衡方程为

$$\begin{aligned} P(i, j, 0)\left(\gamma_{(i-r, j+1, 2)}^{(i, j, 0)} + \lambda_s + j\mu_p + i\mu_s\right) \\ = P(i + 1, j, 0)(1 + i)\mu_s \\ + P(i - 1, j, 0)\lambda_s + P(i, j - 1, 0)\lambda_p \end{aligned} \quad (3)$$

(3) $i + jN = MN$ 且 $i > 0$: 即 $i + (j-1)N = (M-1)N$, 当主用户到来时, 状态 $(i+1, j-1, 0)$, $(i+2, j-1, 0), \dots, (i+N, j-1, 0)$ 转移到状态 $(i, j, 0)$ 时, 都会发生次用户的强制中断, 如图 1 所示, 其平衡方程为

$$\begin{aligned} P(i, j, 0) & \left(\gamma_{(i-r, j+1, 2)}^{(i, j, 0)} + \lambda_s + i\mu_s + j\mu_p \right) \\ & = P(i, j, 1) + P(i-1, j, 0)\lambda_s \\ & \quad + P(i, j, 2) + P(i, j-1, 0)\lambda_p \end{aligned} \quad (4)$$

对于连续时间马尔科夫模型 (S, Q) , 状态空间 S , 其转移速率矩阵为 Q , 其平衡方程为 $\pi Q = 0$, 从而可求得其稳态概率, 进一步可求得次用户的阻塞概率和强制中断概率分别为

$$P_B = \sum_{i=0}^{MN} \sum_{j=0}^M P(i, j, 1) \quad (5)$$

$$P_F = \frac{\sum_{i=0}^{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^N r \gamma_{(i-r, j+1, 2)}^{(i, j, 0)} P(i, j, 2)}{(1 - P_B)\lambda_s} \quad (6)$$

对于次用户系统的吞吐量, 参照文献[5]中的定义, 设所有次用户的数据传输速率归一化为 1 bps, 则次用户的链接完成率为 $(1 - P_B)(1 - P_F)\lambda_s$, 完成服务的平均持续时间为 $\left(\frac{\mu_s}{1 - P_F} \right)^{-1} = (1 - P_F) \cdot \frac{1}{\mu_s}$, 其吞吐量可表示为

$$\rho_{\text{bps}} = (1 - P_B)(1 - P_F)\lambda_s \left(\frac{\mu_s}{1 - P_F} \right)^{-1} \quad (7)$$

3.2 非理想感知情况下的频谱切换

在非理想频谱感知情况下, 就要考虑分析漏检概率和虚警概率对频谱接入和频谱切换的影响, 其连续时间马尔科夫模型可分为以下 5 种情况来分别讨论。

(1) $i + jN < N(M-1), i \neq 0, j \neq 0$: 如图 2 所示, 当主用户到达时, 会导致以下 4 种状态变化: (a)

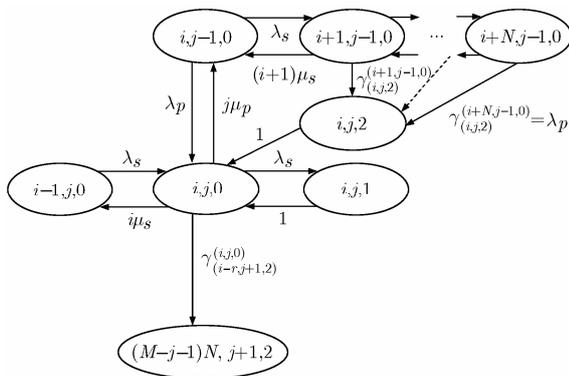


图 1 $i + jN = MN$ 且 $i > 0$ 条件下的状态转移图

(a) (i, j) 到 $(i, j+1)$; (b) (i, j) 到 $(i-r, j)$, 其原因是被中断的 r 个次用户因漏检与主用户发生碰撞后共同退出了系统; (c) (i, j) 到 $(i-r+m, j-n+1)$, 表示被中断的 r 个次用户有 $m (m \geq 1)$ 个感知正确切换到其它可用信道, 剩下 $r-m$ 个次用户因漏检切换到存在主用户的 $n (1 < n \leq \min\{j, r-m\})$ 个信道中; (d) (i, j) 到 $(i-r, j+1)$ 。当次用户到达时, 可能会导致两种状态的变化: (a) (i, j) 到 $(i+1, j)$; (b) (i, j) 到 $(i, j-1)$, 次用户因漏检接入到存在主用户的信道, 两者发生碰撞而退出, 从而导致主用户数减少。其平衡方程为

$$\begin{aligned} P(i, j) & \left\{ \lambda_p + \sum_{r=1}^{\min\{i, N\}} P_d \gamma_{(i-r, j+1)}^{(i, j)} \right. \\ & \quad + \sum_{m=1}^r \sum_{r=1}^{\min\{i, N\}} P_d \gamma_{(i-r+m, j+1)}^{(i, j)} (1 - P_d)^n \\ & \quad + (j\mu_p + (1 - P_d)\lambda_s) + i\mu_s + [(1 - P_{fa}) \\ & \quad \quad + P_d(1 - P_{fa}) + \dots + P_d^{jN}(1 - P_{fa})] \lambda_s \left. \right\} \\ & = P(i, j+1)[(j+1)\mu_p + (1 - P_d)\lambda_s] \\ & \quad + P(i, j-1)\lambda_p + \sum_{r=1}^N P(i+r, j-1) \\ & \quad \cdot P_d \gamma_{(i, j)}^{(i+r, j-1)} + \sum_{m=1}^r \sum_{r=1}^N \sum_{n=1}^{\min\{j, r-m\}} P(i+r \\ & \quad \quad - m, j+n-1) \cdot [P_d \gamma_{(i, j)}^{(i+r-m, j+n-1)} \\ & \quad \quad \cdot (1 - P_d)^n] + P(i+1, j)(i+1)\mu_s \\ & \quad + P(i-1, j) \cdot [(1 - P_{fa}) + P_d(1 - P_{fa}) \\ & \quad \quad + \dots + P_d^{jN-1}(1 - P_{fa})] \lambda_s \end{aligned} \quad (8)$$

(2) $i + jN = MN, i \neq 0, j \neq 0$: 此时信道全被占用, 其平衡方程表示为

$$\begin{aligned} P(i, j) & \left\{ \sum_{r=1}^{\min\{i, N\}} P_d \gamma_{(i-r, j+1)}^{(i, j)} + \sum_{m=1}^r \sum_{r=1}^{\min\{i, N\}} P_d \gamma_{(i-r+m, j+1)}^{(i, j)} \right. \\ & \quad \cdot (1 - P_d)^n + (j\mu_p + (1 - P_d)\lambda_s) + i\mu_s \left. \right\} \\ & = P(i, j-1)\lambda_p + \sum_{r=1}^N P(i+r, j-1) \cdot P_d \gamma_{(i, j)}^{(i+r, j-1)} \\ & \quad + P(i+1, j)(i+1)\mu_s + P(i-1, j) \cdot [(1 - P_{fa}) \\ & \quad \quad \cdot P_d(1 - P_{fa}) + \dots + P_d^{jN-1}(1 - P_{fa})] \lambda_s \end{aligned} \quad (9)$$

(3) $0 < i \leq MN, j = 0$: 和情况(1)相比, 状态中少了 $(i, j-1)$ 和 $(i+r, j-1)$ 这两个状态, 因此对应的状态转移也就不存在了, 状态 $(i-r+m, j-n+1)$ 只能取 $n=1$ 。其平衡方程为

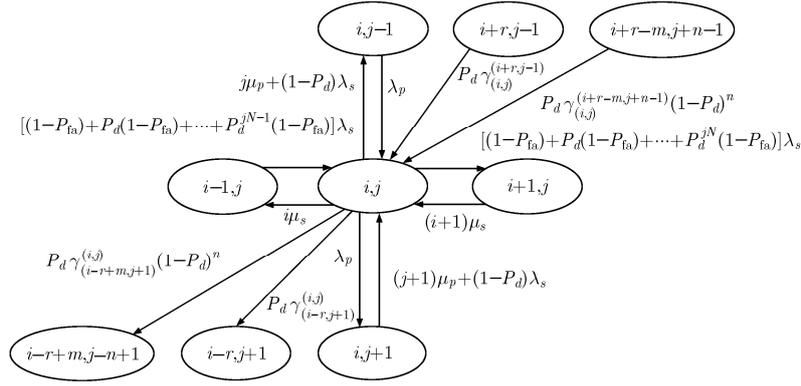


图 2 $i + jN < N(M - 1)$, $i \neq 0, j \neq 0$ 条件下的状态转移图

$$\begin{aligned}
 P(i, j) & \left\{ (1 - \delta(i - MN))\lambda_p + \sum_{r=1}^{\min\{i, N\}} P_d \gamma^{(i, j)}_{(i-r, j+1)} \right. \\
 & + \sum_{m=1}^r \sum_{r=1}^{\min\{i, N\}} P_d \gamma^{(i, j)}_{(i-r+m, j+1)} (1 - P_d)^n \\
 & + i\mu_s + (1 - \delta(i - MN))[(1 - P_{fa}) \\
 & + P_d(1 - P_{fa}) + \dots + P_d^{jN}(1 - P_{fa})]\lambda_s \left. \right\} \\
 & = (1 - \delta(i - MN))P(i, j+1)[(j+1)\mu_p \\
 & + (1 - P_d)\lambda_s] + P(i+1, j)(i+1)\mu_s \\
 & + P(i-1, j)[(1 - P_{fa}) + P_d(1 - P_{fa}) + \dots \\
 & + P_d^{jN-1}(1 - P_{fa})]\lambda_s + \sum_{m=1}^r \sum_{r=1}^N P(i+r-m, j) \\
 & \cdot [P_d \gamma^{(i, j)}_{(i+r-m, j)} (1 - P_d)^n] \quad (10)
 \end{aligned}$$

(4) $i = 0, 0 < j \leq M$ ：这种情况的状态转移图比情况(1)的状态转移图少了 $(i-1, j)$, $(i-r, j+1)$, $(i-r+m, j-n+1)$ 3 个状态。同样当 $j = M$ 时, 不存在状态 $(i+1, j)$ 以及与这个状态有关的状态转移。当 $i = 0, 0 < j \leq M$ 时, 其平衡方程为

$$\begin{aligned}
 P(i, j) & \left\{ \lambda_p + (j\mu_p + (1 - P_d)\lambda_s) + (1 - \delta(j - M)) \right. \\
 & \cdot [(1 - P_{fa}) + P_d(1 - P_{fa}) + \dots + P_d^{jN}(1 - P_{fa})]\lambda_s \left. \right\} \\
 & = P(i, j+1)[(j+1)\mu_p + (1 - P_d)\lambda_s] \\
 & + P(i, j-1)\lambda_p + \sum_{r=1}^N P(i+r, j-1) \cdot P_d \gamma^{(i, j)}_{(i+r, j-1)} \\
 & + \sum_{m=1}^r \sum_{r=1}^N \sum_{n=1}^{\min\{j, r-m\}} P(i+r-m, j+n-1) \\
 & \cdot [P_d \gamma^{(i, j)}_{(i+r-m, j+n-1)} (1 - P_d)^n] \\
 & + (1 - \delta(j - M))P(i+1, j)(i+1)\mu_s \quad (11)
 \end{aligned}$$

(5) 初始状态 $(0, 0)$ ：这种特殊情况, 主用户到

达或者次用户到达都会导致系统中的对应用户增加一个, 所以只有转移到 $(1, 0)$ 和 $(0, 1)$ 这两种状态。

在非理想感知情况下, 次用户的阻塞概率和强制中断概率分别为

$$P_B = \sum_{i=0}^{MN} \sum_{j=0}^M \delta(i + Nj \geq NM)P(i, j) \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 P_F & = \sum_{i=0}^{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^N \sum_{m=0}^r \sum_{n=0}^{\min\{j, r-m\}} (r-m) P_d \gamma^{(i, j)}_{(i-r+m, j-n+1)} \\
 & \cdot (1 - P_d)^n P(i, j) / ((1 - P_B)\lambda_s) \quad (13)
 \end{aligned}$$

其吞吐量的计算同理想感知情况下的吞吐量计算公式(7)。

3.3 基于信道预留机制的频谱切换

在认知无线网络中, 为了在保障主用户 QoS 的同时有效保障次用户的 QoS, 最佳的频谱切换策略是结合接纳控制来实现。最简单的接纳控制方法是预留部分可用信道用于被中断次用户的频谱切换, 即信道预留机制。信道预留机制是次用户的阻塞概率和强制中断概率的一个折中, 而且需要考虑预留的信道数和被预留的信道的动态更新。

设定认知无线网络给次用户预留的信道数为 α , 则在理想感知情况下, 次用户的阻塞概率和强制中断概率更新为

$$P_B = \sum_{i=0}^{MN-\alpha} \sum_{j=0}^M P(i, j, 1) \quad (14)$$

$$P_F = \frac{\sum_{i=0}^{MN-\alpha} \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^N r \gamma^{(i, j)}_{(i-r, j+1, 2)} P(i, j, 2)}{(1 - P_B)\lambda_s} \quad (15)$$

在非理想感知情况下, 次用户的阻塞概率和强制中断概率更新为

$$P_B = \sum_{i=0}^{MN-\alpha} \sum_{j=0}^M \delta(i + Nj \geq NM)P(i, j) \quad (16)$$

$$P_F = \sum_{i=0}^{MN-\alpha} \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^N \sum_{m=0}^r \sum_{n=0}^{\min(j,r-m)} (r-m) P_d \gamma_{(i-r+m, j-n+1)}^{(i,j)} \cdot (1-P_d)^n P(i,j) / ((1-P_B)\lambda_s) \quad (17)$$

文献[5]提出以最大化次用户网络的吞吐量为目标设计最佳的信道预留数, 即

$$\arg \max_{\alpha \in [1, N]} \rho_{\text{bps}} = (1-P_B)(1-P_F)\lambda_s \left(\frac{\mu_s}{1-P_F} \right)^{-1} \quad (18)$$

但是预留过多的信道会使得次用户的阻塞概率变大, 在有效提升次用户网络吞吐量和有效降低次用户的强制中断概率的情况下, 为了有效保障新到次用户的接入概率, 本文在文献[5]的吞吐量最大化求取最佳信道预留数的基础上, 对于理想感知情况增加了次用户阻塞概率的约束条件, 对于非理想感知情况, 为了有效降低次用户感知的漏检概率和虚警概率, 其约束条件还包括次用户的感知精度, 即

$$\left. \begin{array}{l} \max_{\alpha \in [1, N]} \rho_{\text{bps}} = (1-P_B)(1-P_F)\lambda_s \left(\frac{\mu_s}{1-P_F} \right)^{-1} \\ \text{s.t. } P_B \leq \tilde{P}_B \\ P_d \geq \tilde{P}_d, \quad P_{\text{fa}} \leq \tilde{P}_{\text{fa}} \end{array} \right\} \quad (19)$$

其中 \tilde{P}_B 是给定的次用户的阻塞概率门限, $P_d \geq \tilde{P}_d, P_{\text{fa}} \leq \tilde{P}_{\text{fa}}$ 为非理想感知情况的感知精度约束条件, 约束条件 $P_B \leq \tilde{P}_B$ 实际上确定了次用户预留信道数的上确界。

4 数值仿真与结果分析

用 Matlab 对理想感知和非理想感知的频谱切换进行相应的仿真和分析。在仿真中, 设定 $M=3, N=3, \tilde{P}_d=0.9, \tilde{P}_{\text{fa}}=0.1, \tilde{P}_B=0.2, \mu_p=0.6, \lambda_s=0.6, \mu_s=0.8$ 。首先分析在理想感知情况下和非理想感知情况下系统的频谱切换性能, 然后进一步分析基于信道预留机制的频谱切换策略对系统性能的影响, 并和文献[5]中的没有约束限制的信道预留机制做比较分析。

在理想感知情况下, 其连续时间马尔科夫模型共有 29 个系统状态, 依次按 i, j, k 排列, 即 $(0,0,0), (0,1,0), (0,2,0), \dots, (0,3,0), (0,3,1), \dots$, 可列出其转移速率矩阵, 进一步求解其稳态概率, 根据求得的稳态概率进一步可获得相应的阻塞概率、中断概率和吞吐量。对于非理想情况下的连续时间马尔科夫模型, 共有 22 个系统状态, 依次按 i, j 排列, 即 $(0,0), (0,1), (0,2), (0,3), (1,0), \dots$, 列出其转移速率矩阵, 可进一步求解出系统的相应性能指标。

图 3 给出了在理想感知情况和非理想感知情况下次用户的阻塞概率随 λ_p 的变化。当主用户的到达

率逐渐变大时, 次用户的阻塞概率都随之增大。由于在非理想感知情况下次用户存在漏检和虚警, 其阻塞概率相对理想感知情况下的频谱切换的阻塞概率较小。在非理想感知情况下, 基于信道预留机制的频谱切换使得次用户网络的阻塞概率随着预留信道数的增加而增加。当预留信道数 $\alpha=3$ 时, 次用户的阻塞概率都已经大于我们给定的阻塞概率门限 $\tilde{P}_B=0.2$, 即在当前仿真参数下, 次用户可预留的最大信道数为 $\alpha=2$ 。

图 4 给出了在理想感知情况和非理想感知情况下次用户的强制中断概率随 λ_p 的变化。非理想情况下的次用户的强制中断概率比理想情况下的中断概率要大, 这主要是由于在非理想感知情况下还需要考虑因感知错误而引起的强制中断, 包括对主用户的漏检而造成与主用户碰撞而强制中断的情况和因虚警而使得次用户认为当前没有可用信道切换而造成的强制中断。此外, 不管是在理想感知情况下还是在非理想感知情况下, 次用户的强制中断概率都随着主用户到达率增大而随之增大。在非理想感知情况下, 采用预留信道机制, 次用户的强制中断概率随着预留信道数 α 的增加而降低。当 α 越大, 次用户的强制中断概率也就越小, 但是考虑到次用户阻塞概率的约束, α 最大取值为 2。

图 5 给出了在理想感知情况和非理想感知情况下次用户的吞吐量随主用户到达率 λ_p 的变化。由图 5 可知, 在理想感知和非理想感知情况下, 次用户的吞吐量都是随着主用户到达率的变大而减少, 而且在相同情况下非理想感知所获得的次用户的吞吐量要比理想感知所获得的吞吐量要小。非理想感知所获得的次用户的吞吐量要比理想感知情况下的要小的主要原因是因为次用户对主用户的漏检而接入信道使得次用户和主用户发生碰撞, 致使次用户和主用户都被迫中断通信, 在这种情况下使得次用户的吞吐量相对理想感知情况下的吞吐量要小一点。在非理想情况下, 采用预留信道机制, 次用户的吞吐量随着预留信道数 α 的增大而降低。因此, 在本文的仿真参数下, 要使得基于预留信道机制的频谱切换获得最大的吞吐量, 即当预留信道数 $\alpha=1$ 时次用户的吞吐量可以获得最大。

由图 3~图 5 可知, 非理想感知情况下次用户的阻塞概率要比理想感知情况下次用户的阻塞概率要小, 而非理想感知情况下次用户的强制中断概率要比理想感知情况下次用户的强制中断概率要大很多。当非理想感知情况采用预留信道机制之后, 次用户的阻塞概率随着预留信道数的增加而增大, 次用户的强制中断概率随着预留信道数的增加而降

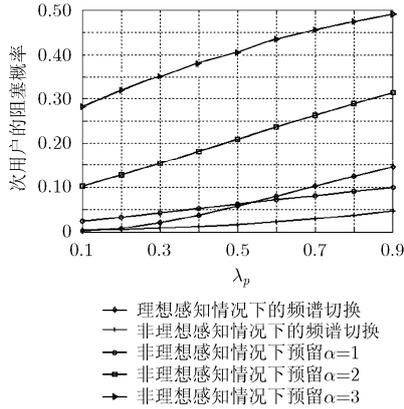


图 3 次用户的阻塞概率随主用户到达率 λ_p 的变化曲线

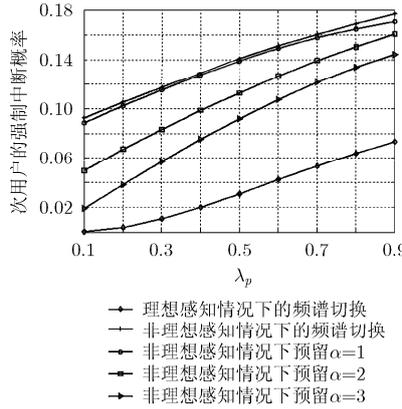


图 4 次用户的强制中断概率随主用户到达率 λ_p 的变化曲线

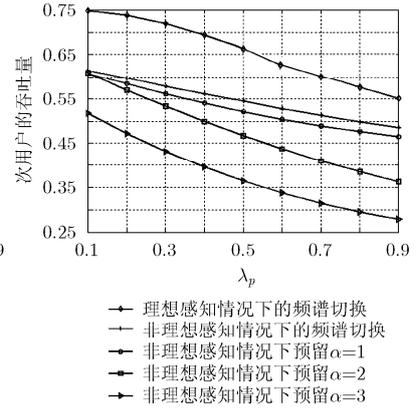


图 5 次用户的吞吐量随主用户到达率 λ_p 的变化曲线

低。总的来说，基于预留信道机制的频谱切换可以有效降低次用户的强制中断概率，在保障次用户较低的阻塞概率和一定的感知精度下以获得最大的次用户吞吐量为目标，其最佳的信道预留数为 $\alpha = 1$ 。

5 结束语

本文主要研究分析了认知无线网络中理想感知和非理想感知情况下的频谱切换马尔科夫模型及其性能，给出了理想和感知两种情况下系统性能的仿真分析，并以基于信道预留机制的频谱切换策略为例分析该策略对系统性能的影响，以在保障主用户 QoS 要求的同时保证次用户的 QoS。对于信道预留机制的频谱切换策略来说，次用户的阻塞概率和中断概率是一个折中的过程，需要采用一个合适的优化折中算法以确定最佳的信道预留数。在本文研究基础上，我们将进一步联合考虑合作频谱感知和信道预留机制设计频谱切换策略，以有效提高次用户对主用户的感知精度的同时可以有效提高次用户频谱切换的性能。

参考文献

- [1] Mitola J and Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Akyildiz I F, Lee W Y, and Vuran M C, et al. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [3] Beibei W, Zhu J, and Liu K J R. Primary-prioritized markov approach for dynamic spectrum access[C]. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Dublin, Ireland, Apr. 17-20, 2007: 507-515.
- [4] Beibei W, Zhu J, Liu K J R, et al. Primary-prioritized markov approach for dynamic spectrum allocation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1854-1865.
- [5] Zhu X, Shen L, and Yum T S P. Analysis of cognitive radio

spectrum access with optimal channel reservation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(4): 304-306.

- [6] Ahmed W, Gao J, Suraweera H A, et al. Comments on "analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation"[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(9): 4488-4491.
- [7] Urgaonkar R and Neely M J. Opportunistic scheduling with reliability guarantees in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(6): 766-777.
- [8] Li X, Zhao Q C, Guan X H, et al. Optimal cognitive access of markovian channels under tight collision constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(4): 746-756.
- [9] Gambini J, Simeone O, Bar-Ness Y, et al. Packet-wise vertical handover for unlicensed multi-standard spectrum access with cognitive radios[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 5172-5176.
- [10] Li H S and Han Z. Socially optimal queuing control in cognitive radio networks subject to service interruptions: to queue or not to queue?[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(5): 1656-1666.
- [11] Coffman E, Robert P, Simatos F, et al. A performance analysis of channel fragmentation in dynamic spectrum access systems[J]. *Queueing Systems*, 2012, 71(3): 293-320.
- [12] Lopez-Benitez M and Casadevall F. Empirical time-dimension model of spectrum use based on a discrete-time markov chain with deterministic and stochastic duty cycle models[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(6): 2519-2533.

吴呈瑜：男，1982 年生，博士生，研究方向为认知无线网络中的无线资源管理。

何晨：男，1952 年生，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为无线资源管理、MIMO、高频无线通信技术、协同通信、认知无线电等。

蒋铃鸽：女，1959 年生，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为协同通信、无线资源管理、MIMO、网络编码、高频无线通信技术等。