

基于次用户分级的 PRP M/G/m 排队论频谱切换模型

马彬 成双果* 谢显中

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要: 为满足次用户不同时延需求并提高信道利用率, 该文提出一种基于次用户分级的 PRP M/G/m 排队论频谱切换模型。首先, 根据次用户主要业务的时延需求不同, 对次用户进行分级评价, 将次用户分为时延敏感型和非时延敏感型用户, 时延敏感型次用户具有更高的优先级来接入信道。其次, 采用 PRP M/G/m 排队论来建立基于用户分级的频谱切换模型。同时推导和分析了该模型下不同优先级次用户扩展数据传输时间, 进而提出了面向各级次用户自适应频谱切换策略。仿真结果表明, 相较于已有频谱切换策略, 该模型能有效降低次用户切换时延以及扩展数据传输时间, 保证高优先级次用户的服务质量, 提升次用户频谱切换的综合性能。

关键词: 认知无线电; 频谱切换; 排队论

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1963-08

DOI: 10.11999/JEIT171117

PRP M/G/m Queuing Theory Spectrum Handoff Model Based on Classified Secondary Users

MA Bin CHENG Shuangguo XIE Xianzhong

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to meet different delay requirements of secondary users and improve the channel utilization, a PRP M/G/m queuing theory spectrum handoff model based on classified secondary user is proposed. Firstly, according to different delay requirements of the main service, secondary users are classified into delay-sensitive and non-delay-sensitive users. The delay-sensitive users have higher priority to access the channel. Secondly, PRP M/G/m queuing theory is adopted to establish the spectrum handoff model. Meanwhile, the extended data delivery time of secondary users with different priorities is deduced and analyzed. Then the adaptive spectrum handoff strategy for secondary users is proposed. Simulation results suggest that the proposed model can reduce the handoff delay and extended data delivery time, which can effectively ensure the QoS of high-priority secondary users and improve the overall performance.

Key words: Cognitive Radio (CR); Spectrum handoff; Queuing theory

1 引言

随着无线网络的飞速发展以及各种新应用的出现, 无线频谱的需求呈指数级迅猛增长。而当前固定的频谱分配策略不能满足无线网络增长的要求^[1]。认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术作为一种新

型频谱共享技术, 通过允许次级用户(Secondary Users, SU)接入主用户(Primary Users, PU)未使用的授权频谱, 从而有效提高频谱利用率^[2-4], 近年来受到极大的关注。

由于主用户对频谱的使用具有绝对优先权, 因此当主用户到达时次用户必须进行频谱切换, 频谱切换技术可以有效地保证次用户的服务质量。频谱切换策略根据切换时机可分为 4 种: (1)无切换策略^[5]: 主用户到达后, 次用户暂停数据传输, 并在当前信道等待, 直到信道空闲才继续传输; (2)被动切换策略^[6,7]: 当次用户被中断后才开始检测空闲信道并执行切换; (3)主动切换策略^[8,9]: 次用户在被中断前完成目标空闲信道检测, 被中断后立即进行频谱切换; (4)混合切换策略^[5,10]: 为被动切换策略与主

收稿日期: 2017-11-28; 改回日期: 2018-03-07; 网络出版:

*通信作者: 成双果 csg_cqupt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471076, 61601070), 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2015jcyjA40047, cstc2016jcyjA0455), 重庆邮电大学博士启动基金(A2015-16)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471076, 61601070), The Foundation and Advanced Research Program of Chongqing (cstc2015jcyjA40047, cstc2016jcyjA0455), The Doctoral Start-up Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2015-16)

动切换策略的结合。

认知用户在完成数据传输前可能被主用户打断多次,从而需要进行多次频谱切换,合理的频谱切换模型能够有效提升频谱切换性能。文献[11]使用抢占优先恢复(Preemptive Resume Priority, PRP) M/G/1 排队模型,研究了次用户频谱切换性能。为了优化认知用户广义传输时间,提出了该模型的自适应频谱切换策略。文献[12]采用 PRP M/G/1 建立频谱切换模型,根据次用户的中断次数来为次用户建立不同的优先级,从而降低了次用户的平均切换时延和整体服务时间。文献[13,14]同样使用 PRP M/G/1 模型,通过时延需求将次用户分为多个优先级,降低了时延敏感类次用户切换时延。文献[15]采用 PRP M/G/m 混合排队频谱切换模型,分析了次用户扩展数据传输时间,提高了频谱切换性能。与文献[11]相同,文献[15]也未考虑区分次用户的优先级,不能很好地满足时延敏感类次用户的需求。

在认知无线网络中,次用户的时延需求不尽相同,一些次用户以时延敏感型业务为主,一些次用户以非时延敏感型业务为主,因此,为不同业务类型次用户设置不同优先级来接入信道,对提高时延敏感型业务的服务质量显得非常重要^[16]。另一方面,由于 PRP M/G/1 模型中每个信道都有一个次用户队列,而 PRP M/G/m 模型整个系统只有一个次用户队列,因此,相较于 PRP M/G/1 模型,PRP M/G/m 模型中次用户的调度更合理。

综上,本文建立基于次用户分级的 PRP M/G/m 模型来描述次用户频谱切换情况,根据次用户主要业务时延需求将次用户分为两个等级:时延敏感类 Class1-SU 及非时延敏感类 Class2-SU,进而分别推导出各优先级次用户的扩展数据传输时间。最后,仿真分析了 PRP M/G/m 模型下次用户的频谱切换性能以及优先级机制对次用户扩展数据传输时间的影响。

本文创新点:通过时延需求将次用户分级,采用基于次用户分级的 PRP M/G/m 排队论来建立频谱切换模型,并理论推导出各优先级次用户的扩展数据传输时间,进而给出各级次用户的自适应频谱切换策略,最后对该模型进行了对比仿真实验。

2 基于次用户分级的 PRP M/G/m 频谱切换建模

本文采用 PRP M/G/m 模型来描述次用户分级下的信道使用情况。假设认知网络可抽象成 M 个独立信道,同时采用时隙结构。主次用户的到达过程均设定为泊松过程。主用户与两类次用户在信道 η

上的到达率分别为 $\lambda_p^\eta, \lambda_1^\eta, \lambda_2^\eta$ 。 $\omega_{k,i}^\eta$ 与 $\phi_{k,i}^\eta$ 分别是优先级为 k , 中断次数为 i 的次用户在信道 η 上的到达率和有效服务时间。此外,主次用户在信道 η 上的服务时长分布分别为 $X_p^\eta, X_1^\eta, X_2^\eta$, 单位为时隙/到达数。

在 PRP M/G/m 模型中,每个信道都有其对应的主用户队列。该模型仅有两个低优先级队列,高优先级队列先接受服务,相同优先级的用户遵从先到先服务(First Come First Serve, FCFS)的调度策略。基于次用户分级的 PRP M/G/m 模型频谱切换图如图 1 所示,只有当主用户队列完成数据传输后,次用户才能接入信道。当主用户重新出现,次用户必须暂停数据传输或切换到另一信道进行数据传输。如果被中断的次用户目标信道为当前信道,该次用户会停留在当前信道,等主用户完成数据传输后,该次用户继续进行数据传输。若目标信道不是当前信道,则该次用户按照 FCFS 的规则进入到相应优先级的次用户队列。

3 次用户扩展数据传输时间推导

本文采用常见的指标——扩展数据传输时间来评判次用户频谱切换性能。扩展数据传输时间表示次用户从开始传输数据一直到完成数据传输所持续的时间,在此期间,主用户的到达可能会对次用户造成多次中断^[11-14]。

设 k 为次用户的优先级, k 取值为 1 或 2, n_{\max} 为次用户最大允许中断次数。则信道 m 繁忙的程度为

$$\rho^m = \rho_p^m + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{n_{\max}} \rho_{k,i}^m < 1 \quad (1)$$

其中, ρ_p^m 为主用户占用导致信道 m 繁忙的概率, $\rho_{k,i}^m$ 为优先级为 k , 中断次数为 i 的次用户占用导致信道 m 繁忙的概率, 其中 $\rho_p^m = \lambda_p^m E[X_p^m]$, $\rho_1^m = \lambda_1^m E[X_1^m]$, $\rho_2^m = \lambda_2^m E[X_2^m]$ 。

次用户在数据传输过程中可能会被中断多次, N 为次用户被打断的次数。不失一般性,此处考虑默认信道为 η 的 Class k -SU, 该次用户平均扩展数据传输时间可表示为

$$E T_k = \sum_{n=1}^{n_{\max}} E T_k | N = n \Pr(N = n) \quad (2)$$

其中,

$$E T_k | N = n = E X_k^\eta + \sum_{i=1}^n E[D_{k,i}^\eta] \quad (3)$$

$$\Pr(N = n) = 1 - p_{k,n}^\eta \prod_{i=0}^{n-1} p_{k,i}^\eta \quad (4)$$

其中, $D_{k,i}^\eta$ 为次用户在信道 η 上经历第 i 次中断时的切换时延, $p_{k,i}^\eta$ 为经历了 i 次中断次数的 Class k -SU

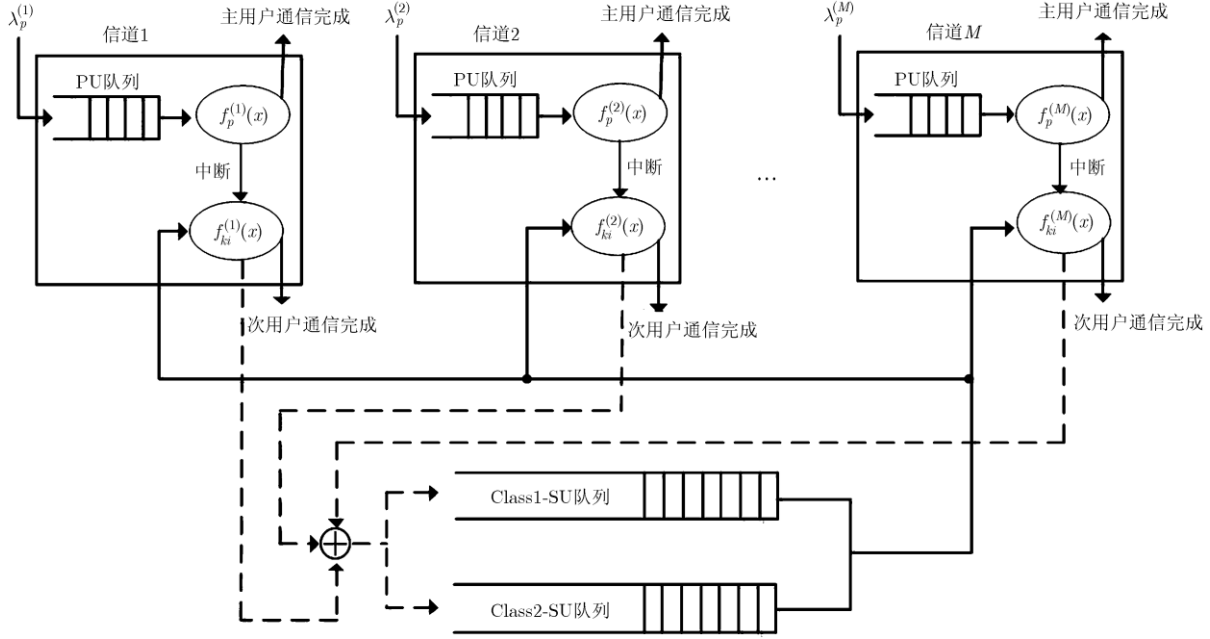


图 1 多优先级 PRP M/G/m 频谱切换模型示意图

在当前信道上再次被打断的概率, $p_{k,i}^n = \lambda_p^n E[\phi_{k,i}^n]$ 。

将式(3)和式(4)代入式(2)得

$$E T_k = E X_k^n + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\sum_{i=1}^n E[D_{k,i}^n] \right) 1 - p_{k,n}^n \prod_{i=0}^{n-1} p_{k,i}^n \right] \quad (5)$$

当次用户进行频谱切换时, 切换策略可以简化为两种类型: 停留等待和切换信道^[11]。下面分别给出停留等待和切换信道两种情况下 SU 的切换时延 $E[D_{k,i}^n]$, 切换时延为次用户在队列中的等待时间 $E[W_{k,i}^n]$ 与信道切换执行时间 t_s 之和, 即 $E[D_{k,i}^n] = E[W_{k,i}^n] + t_s$ 。对于停留等待情况, 由于不需要执行切换, $t_s = 0$ 。

3.1 停留等待情况等待时间

在停留等待情况下, PRP M/G/m 模型次用户等待时间与 PRP M/G/1 模型相同。

(1)Class1-SU 的等待时间:

$$E[W_{1,i}^n] = E[X_p^n] + \lambda_p^n E[W_{1,i}^n] E[X_p^n] \quad (6)$$

其中, 第 1 项代表造成中断的主用户的平均服务时间, 第 2 项代表在等待时间内新到达的主用户的平均服务时间。

解式(6)得

$$E[W_{1,i}^n] = \frac{E[X_p^n]}{1 - \lambda_p^n E[X_p^n]} \quad (7)$$

(2)Class2-SU 的等待时间:

$$E[W_{2,i}^n] = E[X_p^n] + \lambda_p^n E[W_{2,i}^n] E[X_p^n] + \sum_{j=0}^{n_{\max}} \omega_{1,j}^n E[W_{2,i}^n] E[\phi_{1,j}^n] \quad (8)$$

其中, 第 1 项代表造成中断的主用户的平均服务时间, 第 2 项代表等待时间内新到达的主用户的平均服务时间, 第 3 项代表等待时间内新到达的 Class1-SU 次用户的平均服务时间。

解式(8)得

$$E[W_{2,i}^n] = \frac{E[X_p^n]}{1 - \lambda_p^n E[X_p^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \omega_{1,j}^n E[\phi_{1,j}^n]} \quad (9)$$

3.2 切换信道情况等待时间

此处引入几个变量, $E R_s^n$ 为信道上当前服务用户的平均剩余服务时间, $E[Q_p^n]$ 为主用户队列中 PU 的平均个数, $E[Q_{k,j}^n]$ 为次用户队列中 Class k -SU 的平均个数, $E[\phi_{k,j}^n]$ 为 PRP M/G/1 模型下优先级为 k , 中断次数为 j 的次用户平均服务时间。

$$E R_s^n = \frac{1}{2} \lambda_p^n E[X_p^n]^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{k,j}^n E[\Theta_{k,j}^n]^2 \quad (10)$$

$$E[Q_p^n] = \frac{\lambda_p^n^2 E[X_p^n]^2}{2(1 - \lambda_p^n E[X_p^n])} \quad (11)$$

$$E[Q_{k,j}^n] = \sum_{\eta=1}^M \omega_{k,j}^n E[W_{k,j}^n] \quad (12)$$

其中, $E[\Theta_{k,j}^n]$ 为 PRP M/G/m 模型下中断次数为 j 的次用户平均服务时间, M/G/1 模型中每个用户对应一个服务窗口, 而 M/G/m 模型中每个用户对应

多个窗口, 因此 M/G/m 模型用户服务时长为多个窗口服务率之和的倒数, 即两者的关系为

$$E[\Theta_{k,j}^n] = \left(\sum_{\eta=1}^M E[\phi_{k,i}^n] \right)^{-1} \quad (13)$$

(1) Class1-SU 的等待时间:

$$E[W_{1,i}^n] = E R_s^n + E[Q_p^n] E[X_p^n] + \sum_{j=0}^{n_{\max}} E[Q_{1,j}^n] E[\Theta_{1,j}^n] + \lambda_p^n E[W_{1,i}^n] E[X_p^n] \quad (14)$$

其中, 第 1 项代表信道 η 上当前服务用户的平均剩余服务时间, 第 2 项代表信道 η 上主用户队列的服务时间, 第 3 项代表信道 η 上原有 Class1-SU 次用户的服务时间, 第 4 项代表等待时间内新到达的主用户的服务时间。

(2) Class2-SU 的等待时间:

$$E[W_{2,i}^n] = E R_s^n + E[Q_p^n] E[X_p^n] + \sum_{j=0}^{n_{\max}} E[Q_{1,j}^n] E[\Theta_{1,j}^n] + \sum_{j=0}^{n_{\max}} E[Q_{2,j}^n] E[\Theta_{2,j}^n] + \lambda_p^n E[W_{2,i}^n] E[X_p^n] + \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[W_{2,i}^n] E[\Theta_{1,j}^n] \quad (15)$$

其中, 第 1 项代表信道 η 上当前服务用户的平均剩余服务时间, 第 2 项代表信道 η 上原有主用户队列的平均服务时间, 第 3 项代表信道 η 上原有 Class1-SU 次用户的平均服务时间, 第 4 项代表信道 η 上原有 Class2-SU 次用户的平均服务时间, 第 5 项代表

等待时间内新到达主用户的平均服务时间, 第 6 项代表等待时间内新到达的 Class1-SU 用户的平均服务时间。

将式(12)分别代入式(14)和式(15), 解得

$$E[W_{1,i}^n] = \frac{E R_s^n + E[Q_p^n] E[X_p^n]}{1 - \lambda_p^n E[X_p^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[\Theta_{1,j}^n]} \quad (16)$$

$$E[W_{2,i}^n] = \left\{ E R_s^n + E[Q_p^n] E[X_p^n] + \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[W_{1,j}^n] E[\Theta_{1,j}^n] \right\} / \left\{ 1 - \lambda_p^n E[X_p^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[\Theta_{1,j}^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{2,j}^n E[\Theta_{2,j}^n] \right\} \quad (17)$$

将式(7), 式(9), 式(16), 式(17)分别代入式(5), 可得到停留等待和切换信道两种策略下 Class1-SU 与 Class2-SU 的平均扩展数据传输时间。

Class1-SU 类次用户在停留等待策略下的扩展数据传输时间为

$$E T_S = E X_1^n + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{E[X_p^n]}{1 - \lambda_p^n E[X_p^n]} \right) 1 - p_{1,n}^n \prod_{i=0}^{n-1} p_{1,i}^n \right] \quad (18)$$

Class2-SU 类次用户在停留等待策略下的扩展数据传输时间为

$$E T_S = E X_2^n + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{E[X_p^n]}{1 - \lambda_p^n E[X_p^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[\Theta_{1,j}^n]} \right) 1 - p_{2,n}^n \prod_{i=0}^{n-1} p_{2,i}^n \right] \quad (19)$$

Class1-SU 类次用户在切换信道策略下的扩展数据传输时间为

$$E T_C = E X_1^n + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{E R_s^n + E[Q_p^n] E[X_p^n]}{1 - \lambda_p^n E[X_p^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[\Theta_{1,j}^n]} + t_s \right) \right) 1 - p_{1,n}^n \prod_{i=0}^{n-1} p_{1,i}^n \right] \quad (20)$$

Class2-SU 类次用户在切换信道策略下的扩展数据传输时间为

$$E T_C = E X_2^n + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{E R_s^n + E[Q_p^n] E[X_p^n] + \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[W_{1,j}^n] E[\Theta_{1,j}^n]}{1 - \lambda_p^n E[X_p^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{1,j}^n E[\Theta_{1,j}^n] - \sum_{j=0}^{n_{\max}} \sum_{\eta=1}^M \omega_{2,j}^n E[\Theta_{2,j}^n]} + t_s \right) \right) \left(1 - p_{2,n}^n \prod_{i=0}^{n-1} p_{2,i}^n \right) \right] \quad (21)$$

3.3 自适应频谱切换策略

为减少次用户扩展数据传输时间, 次用户可自

适应选择停留等待或切换信道策略, 即自适应信道选择策略下次用户的扩展数据传输时间可表示为

$$E T_A = \min E T_S, E T_C .$$

$$\left. \begin{aligned} E T_S - E T_C > 0, & \text{ 切换信道} \\ E T_S - E T_C < 0, & \text{ 停留等待} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

通过自适应频谱切换策略，各级次用户可获得更低的扩展数据传输时间，有效提高频谱切换性能。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真网络环境配置

考虑具有 3 条信道的 CR 网络。PU, Class1-SU, Class2-SU 的到达过程为泊松到达过程，到达率分别为 $\lambda_p, \lambda_1, \lambda_2$ ，主次用户的服务时间服从指数分布。本文分别从主用户信道占用率，次用户服务时间，次用户信道占用率几个方面对扩展数据传输时间进行了仿真。

4.2 扩展数据传输时间与主用户信道占用率的仿真

本节仿真分析扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系。首先考虑 3 条信道具有相同的业务负载情况，因此，公式中代表信道的上标可以省略。仿真参数设置如下： $E[X_p^{(n)}] = E[X_p] = 20$ (时隙/到达数)， $E[X_1^{(n)}] = E[X_1] = E[X_2^{(n)}] = E[X_2] = 10$ (时隙/到达数)， $t_s = 1, \lambda_1 = \lambda_2 = 0.01$ (到达数/时隙)，由于 $\rho_p + \rho_1 + \rho_2 < 1, \rho_1 = \rho_2 = 0.1$ ，因此， $\rho_p \in (0, 0.8)$ 。

图 2 为两种切换策略下 Class1-SU 与 Class2-SU 扩展数据传输时间的比较。由图 2 可以看出，随着主用户信道占用率 ρ_p 的增大，两种策略下次用户平均扩展数据传输时间都增大。此外，无论何种策略下，Class1-SU 类次用户的扩展数据传输时间都比 Class2-SU 类次用户小，这是由于区分了次用户优先级后，Class1-SU 类次用户比 Class2-SU 类次用户有更高的优先级来接入信道。当 ρ_p 值较小时，切换信道策略下次级用户的扩展数据传输时间小于停留等

待策略；反之，当 ρ_p 值较大时，停留等待策略更优，这是由于 ρ_p 较小时，被中断的次用户通过采用切换策略，具有更大的概率接入到另一信道，因此，扩展数据传输时间更低。

图 3 为自适应策略下两类次用户的平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系。由图可以看到，对于 Class1-SU 类次用户，选择两种策略的交叉点为 $\rho_p = 0.44$ ，对于 Class2-SU，选择两种策略的交叉点则为 $\rho_p = 0.38$ 。Class2-SU 交叉点的 ρ_p 值小于 Class1-SU，这是因为 Class2-SU 优先级低于 Class1-SU，Class2-SU 切换到另一信道时，需要等待主用户以及高优先级的 Class1-SU 用户完成数据传输，才能继续传输数据，而 ρ_p 越大，等待时间越长。

图 4 对比了以下 3 种模型的切换信道策略：本文提出的区分次用户优先级 PRP M/G/m 模型、文献[13]提出的区分次用户优先级 PRP M/G/1 模型以及文献[15]提出的不区分次用户优先级 PRP M/G/m 模型。由图 4 可以看到，相比于文献[15]，本模型中 Class1-SU 类次用户扩展数据传输时间有所降低，这是由于本模型区分了 SU 优先级，Class1-SU 类次用户具有相对高的优先级来接入信道。相比于文献[13]，本模型中 Class1-SU 和 Class2-SU 次用户平均扩展数据传输时间皆有所降低。随着 ρ_p 的增大，PRP M/G/m 模型中次用户的平均扩展数据传输时间明显减少，因此，本文 PRP M/G/m 模型更优。

进一步，对信道业务负载不同的情况进行仿真，分别给每条信道设置不同的主次用户平均服务时长、主次用户到达率，以模拟不同信道业务负载条件。图 5 为不同信道业务负载条件下，平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系。由图 5 可以看到，相较于图 4 中相同信道业务负载情况，由于信道业务负载变化，各模型下扩展数据传输时间

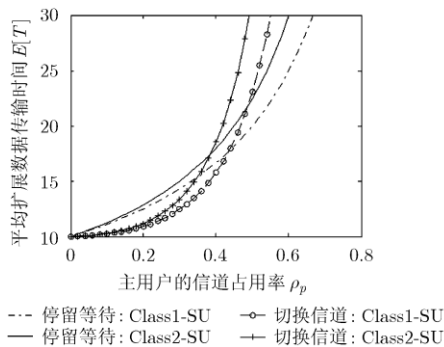


图 2 停留等待与切换信道平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系

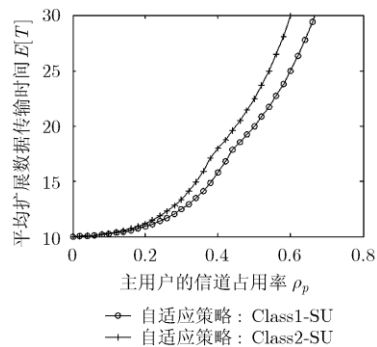


图 3 自适应策略下平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系

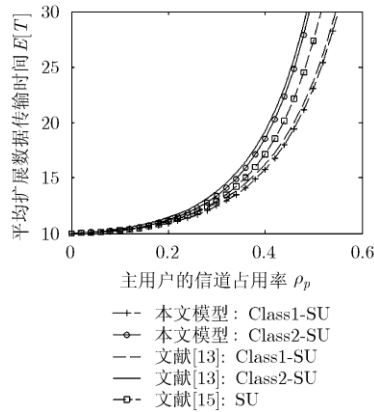


图 4 平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系

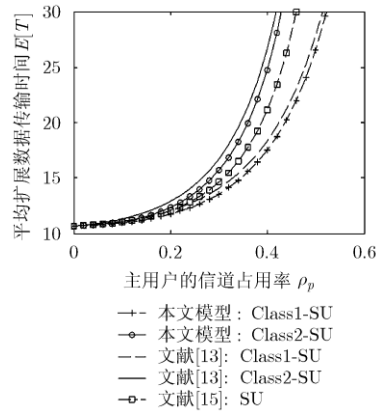


图 5 不同信道业务负载下平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系

的大小皆有了相应改变，但扩展数据传输时间相对大小关系及变化趋势无改变。因此，后续仿真在相同信道业务负载情况下进行。

4.3 扩展数据传输时间与次用户服务时间的仿真

本节验证不同次用户服务时间对扩展数据传输时间的影响，设置如下仿真参数： $E[X_p] = 20$ (时隙/到达数)， $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.01$ (到达数/时隙)， $E X_1 = E X_2 = E X_s$ ， $E X_s$ 分别取 8,10,12,15。图 6 为不同次用户服务时间下，本文模型中自适应策略的平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系图，L1, L2 分别为 Class1-SU 和 Class2-SU 次用户自适应策略拐点所连成的直线。由图 6 可以看出，在 ρ_p 相同的情况下， $E X_s$ 越大，次用户平均扩展传输时间越大，这是由于随着 $E X_s$ 的增大，次用户等待时间相应变长，进而主用户再次到达的概率增大，导致切换时延增大。对于 $E X_s$ 较大的情况，由于切换信道策略花费的时间比停留等待花费的时间更长，被中断的次用户更倾向于停留在原信道等待，因此，随着 $E X_s$ 的增大，两种策略的交叉点在往左移，且 Class2-SU 交叉点的 ρ_p 值小于 Class1-SU 的 ρ_p 值。

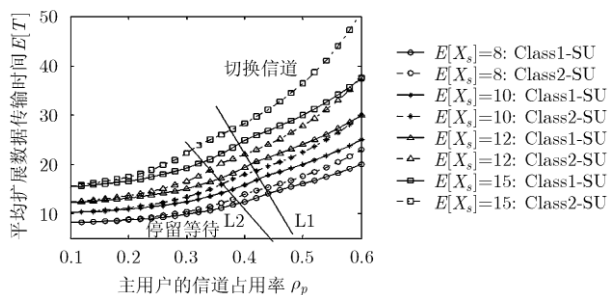


图 6 不同次用户服务时间下平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率关系

4.4 扩展数据传输时间与次用户信道占用率的仿真

本节对不同次用户到达率情况下的次用户扩展数据传输时间进行仿真。两类次用户到达率之和取为定值 0.02，分别给出了 λ_1 与 λ_2 的 3 种组合，图 7 为不同次用户到达率下平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系，图 7(a)和图 7(b)分别为 Class1-SU 与 Class2-SU 的曲线图。由图 7 可以看出，相较于未区分次用户优先级，Class1-SU 的扩展数据传输时间得到降低。此外，当高优先级 Class1-SU 的到达率 λ_1 减小时，两类次用户的扩展数据传输时间都得到了降低，这是由于 λ_1 越小，等待时间内主用户以及 Class1-SU 到达数都会相应减少，从而减少了次用户被中断的概率，降低了次用户扩展数据传输时间。

同时，为验证次用户信道占用率与扩展数据传输时间的关系，设置如下仿真参数： $\lambda_p = 0.02$ (到达数/时隙)， $\lambda_1 = \lambda_2$ ，其取值范围为 (0,0.03)。图 8 为次用户平均扩展数据传输时间与次用户信道占用率的关系。由图 8 可以看到，随着次用户信道占用率的增大，Class1-SU 的扩展数据传输时间缓慢增加，而 Class2-SU 的扩展数据传输时间增加得更快。这是由于 Class1-SU 优先级高于 Class2-SU， λ_1 增大使得 Class2-SU 被打断概率增加， λ_2 增大使得同一时间需要接入信道的 Class2-SU 增多，从而使得 Class2-SU 类次用户的扩展数据传输时间增加；另一方面，当 $\rho_1 < 0.15$ 时，相较于未区分次用户业务类型，Class2-SU 的扩展数据传输时间在可接受范围内，但随着 ρ_1 继续增大，Class2-SU 的扩展数据传输时间严重增加，因此，本文提出的区分次用户优先级模型更适用于高优先级次用户业务量适中的情形。

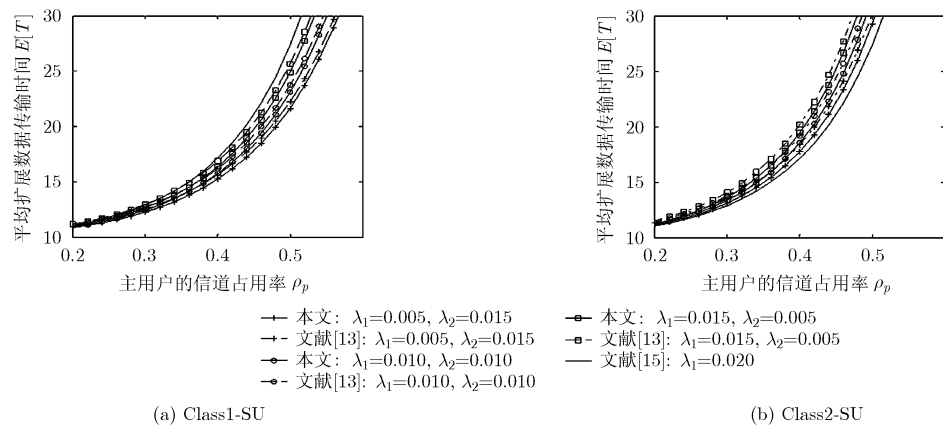


图7 不同次用户到达率下平均扩展数据传输时间与主用户信道占用率的关系

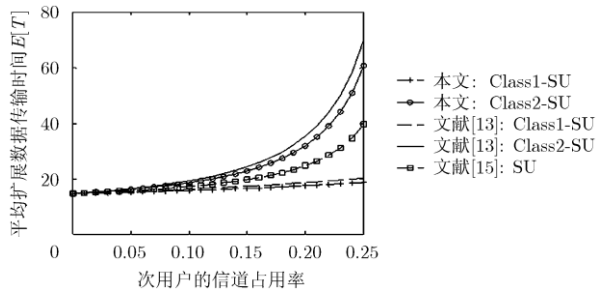


图8 平均扩展数据传输时间与次用户信道占用率的关系

5 结论

本文通过建立多优先级PRP M/G/m 排队模型来描述多次频谱切换情况下信道使用情况, 并推导出切换与停留等待两种策略下不同优先级次用户扩展数据传输时间表达式, 进一步, 给出各优先级次用户自适应频谱切换策略, 最后仿真分析了各优先级次用户自适应频谱切换性能, 并与现有模型进行比较。仿真结果表明所提区分次用户优先级 PRP M/G/m 模型中, 次用户切换时延以及扩展数据传输时间进一步缩短, 频谱切换性能得到有效提高。

参考文献

- [1] KUMAR K, PRAKASH A, and TRIPATHI R. Spectrum handoff in cognitive radio networks: A classification and comprehensive survey[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 61(8): 161-188. doi: 10.1016/j.jnca.2015.10.008.
- [2] MITOLA J and MAGUIRE G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18. doi: 10.1109/98.788210.
- [3] HAYKIN S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220. doi: 10.1109/JSAC.2004.839380.
- [4] WANG Beibei and LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: A survey[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(1): 5-23. doi: 10.1109/JSTSP.2010.2093210.
- [5] CHRISTIAN I, MOH S, CHUNG I, et al. Spectrum mobility in cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(6): 114-121. doi: 10.1109/MCOM.2012.6211495.
- [6] SALAMEH O, TURCK K D, BRUNEEL H, et al. Analysis of secondary user performance in cognitive radio networks with reactive spectrum handoff[J]. *Telecommunication System*, 2017, 65(3): 1-12. doi: 10.1007/s11235-016-0250-7.
- [7] WANG Lichun and WANG Chunwang. Analysis of reactive spectrum handoff in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(10): 2016-2028. doi: 10.1109/JSAC.2012.121116.
- [8] WU Yan, YANG Qinghai, LIU Xuefang, et al. Delay-constrained optimal transmission with proactive spectrum handoff in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(7): 2767-2779. doi: 10.1109/TCOMM.2016.2561936.
- [9] TAYEL A F, RABIA S I, and ABOUELSEOUY Y. An optimized hybrid approach for spectrum handoff in cognitive radio networks with non-identical channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(11): 4487-4496. doi: 10.1109/TCOMM.2016.2607741.
- [10] 马彬, 包小敏, 谢显中. 认知无线网络中基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 31-37. doi: 10.11999/JEIT160268.

MA Bin, BAO Xiaomin, and XIE Xianzhong. Optimal target channel selection algorithm based on hybrid spectrum handoffs in cognitive radio networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 31-37. doi: 10.11999/JEIT160268.

- [11] WANG Lichun, WANG Chungwei, and CHANG Chungju. Modeling and analysis for spectrum handoffs in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(9): 1499–1513. doi: 10.1109/TMC.2011.155.
- [12] ZAHED S, AWAN I, and CULLEN A. Analytical modeling for spectrum handoff decision in cognitive radio networks[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2013, 38(1): 98–114. doi: 10.1016/j.simpat.2013.07.003.
- [13] ZHANG Lei, SONG Tiecheng, WU Ming, *et al.* Traffic-adaptive proactive spectrum handoff strategy for graded secondary users in cognitive radio networks[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2015, 24(4): 844–851. doi: 10.1049/cje.2015.10.030.
- [14] ZAKARIYA A Y and RABIA S I. Analysis of an interruption-based priority for multi-class secondary users in cognitive radio networks[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1–6. doi: 10.1109/ICC.2016.7511542.
- [15] 杨小龙, 谭学治, 关凯. 认知无线网络中基于抢占式排队论的频谱切换模型[J]. *物理学报*, 2015, 64(10): 379–388. doi: 10.7498/aps.64.108403.
- YANG Xiaolong, TAN Xuezhhi, and GUAN Kai. Spectrum handoff model based on preemptive queuing theory in cognitive radio networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(10): 379–388. doi: 10.7498/aps.64.108403.
- [16] ZHANG Yun, JIANG Tao, ZHANG Lei, *et al.* Analysis on the transmission delay of priority-based secondary users in cognitive radio networks[C]. *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*, Hangzhou, China, 2013: 1–6. doi: 10.1109/WCSP.2013.6677133.
- 马 彬: 男, 1978 年生, 教授, 主要研究方向为异构无线网络、认知无线网络等.
- 成双果: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为认知无线网络.
- 谢显中: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线和移动通信技术.