

认知无线网络中基于抢占式排队论的频谱切换模型

杨小龙 谭学治 关凯

Spectrum handoff model based on preemptive queuing theory in cognitive radio networks

Yang Xiao-Long Tan Xue-Zhi Guan Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 108403 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.108403

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108403>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无线携能通信系统中基于能量获取比例公平的波束成形设计

Beamforming design based on energy harvesting proportional fairness in a simultaneous wireless information and power transfer system

物理学报.2015, 64(2): 028402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.028402>

一种面向中继协作频谱感知系统的自适应全局最优化算法

An adaptive global optimization algorithm of cooperative spectrum sensing with relay

物理学报.2015, 64(1): 018404 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018404>

多值数据的自适应脉冲宽度调制预加重方法

A method of adaptive pulse width modulation for multiple-valued data transmission

物理学报.2015, 64(1): 018402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018402>

地月平动点导航星座的概要设计与性能分析

Outline design and performance analysis of navigation constellation near earth-moon libration point

物理学报.2014, 63(24): 248402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248402>

Kalman 滤波辅助的室内伪卫星相对定位算法

Indoor pseudolite relative localization algorithm with kalman filter

物理学报.2014, 63(22): 228402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228402>

认知无线网络中基于抢占式排队论的 频谱切换模型*

杨小龙[†] 谭学治 关凯

(哈尔滨工业大学通信技术研究所, 哈尔滨 150080)

(2014年9月24日收到; 2014年12月8日收到修改稿)

针对认知无线网络中认知用户广义传输时间的优化问题, 提出了一种基于抢占式续传优先权 M/G/m 排队理论的频谱切换模型. 在该排队模型中, 为了最小化认知用户广义传输时间, 采用混合排队-并列式服务的排队方式. 在此基础上, 深入分析多个认知用户、多个授权信道、多次频谱切换条件下认知用户信道使用情况, 从而推导出广义传输时间表达式. 最后探讨了该模型下自适应频谱切换策略. 仿真结果表明, 相比于已有的频谱切换模型, 该模型不仅能够更加完整地描述认知用户频谱切换行为, 而且使得认知用户传输时延更小, 广义传输时间更短. 此外, 认知无线网络允许的认知用户服务强度增加, 能够容纳的认知用户数量增多. 因此, 该模型提升了认知用户频谱切换的性能, 更好地实现了认知用户与授权用户的频谱共享.

关键词: 认知无线电, 频谱切换, 广义传输时间, 排队理论

PACS: 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.64.108403

1 引言

当今无线通信技术迅猛发展, 频谱资源紧缺问题日益突出, 提高频谱资源利用率迫在眉睫. 认知无线电允许认知用户临时地接入授权用户的空闲频段, 极大地提高了频谱利用率^[1,2]. 因此, 在 5 G 标准研发过程中, 引入了认知无线电技术^[3,4]. 在认知无线网络中, 频谱管理的基本框架主要由四个部分组成: 频谱感知^[5-7], 频谱决策^[8,9], 频谱共享^[10,11]和频谱切换^[12]. 其中, 频谱切换是指认知用户当前工作信道出现授权用户或者通信质量急剧恶化时, 切换到其他空闲信道上继续通信的行为. 认知用户在完成一次通信业务时可能经历多次频谱切换, 这将严重影响其通信质量. 因此, 合理的频谱切换模型是提升频谱切换性能、保证认知用户通信质量、实现认知无线电动态频谱共享的关键.

在现有的认知无线电频谱切换模型研究中, 存在诸多不完善之处. 离散二元状态马尔可夫链模

型^[13,14]是一种包含空闲与繁忙两种状态的离散马尔可夫链, 其空闲状态可视为认知用户潜在的频谱使用机会. 然而, 马尔可夫链模型仅适用于认知用户服务时间服从指数分布的场景. 文献中并没有提到如何将它扩展到一般情况. 另外, 该模型采用马尔可夫决策过程对每个时隙的目标信道选择问题进行建模. 根据当前时隙的信道状态, 认知用户可以预选下一个时隙收益最大的目标信道, 从而优化其每个时隙预期的吞吐量或者预期的等待时间. 但是, 即使授权用户在认知用户当前工作信道中不出现, 认知用户仍然会改变其工作信道, 这将导致频繁的频谱切换. 任意 ON/OFF 随机过程模型^[15-17]利用任意连续时间 ON/OFF 随机过程来表征授权用户信道使用情况. 在该模型中, 认知用户能够根据较长时间的观测结果, 估计出 ON 时间和 OFF 时间的分布, 从而计算出每个时隙的预期效益, 例如授权用户的平均空闲持续时间或者认知用户的平均吞吐量等相关的性能参数. 根据预测的

* 国家自然科学基金(批准号: 61071104)和国家科技重大专项(批准号: 2011ZX03004-006)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xiaolongyang_hit@163.com

参数值, 认知用户将立即转移到拥有最大效益的信道. 但是, 该模型并没有考虑频谱切换次数以及切换时延对认知用户通信质量造成的影响. 伯努利随机过程模型^[18]将每个信道中授权用户的频谱使用情况表示为一个伯努利随机过程, 并在此基础上研究授权用户多次的出现对认知用户链路保持概率的影响. 在该模型中, 链路保持概率是指认知用户在预先规定的频谱切换次数内完成其通信业务的概率. 由于授权用户繁忙和空闲时间都服从几何分布, 因此很难将该建模方案扩展到其他更加普遍的服务时间分布模型中. 多维马尔可夫链模型^[19,20]中每个授权用户和认知用户的信道使用行为都与马尔可夫链中“空闲”, “等待队列中”或者“通信中”三种状态对应, 并假定授权用户出现后, 认知用户必须停留在其当前工作信道上. 但是, 该模型仅适用于单信道认知无线网络, 并没有探讨认知用户在不同信道上多次切换的问题. 基于抢占式续传优先权 (preemptive resume priority, PRP) M/G/1 频谱切换模型^[21,22]采用分别排队-并列式服务方式, 研究了多用户、多信道共享以及授权用户多次出现情况下认知用户的频谱切换性能. 为了表征该模型对认知用户频谱切换性能的影响, 引入了广义传输时间的概念. 为了优化认知用户广义传输时间, 提出了基于授权用户服务强度参数的自适应频谱切换策略. 当该参数超过某一门限时, 采用停留等待 (always staying, AS) 策略; 反之, 则采用移动切换 (always changing, AC) 策略. 但 PRP M/G/1 模型中每个信道都拥有一个认知队列, 而各个队列之间是相互独立的, 因此空闲信道存在使用不充分的情况.

针对上述文献中的缺陷, 本文采用混合排队-并列式服务方式, 将认知用户进行混合排列, 建立了 PRP M/G/m 频谱切换模型, 更加全面地描述了多个认知用户在多信道、多次频谱切换情况下的信道使用情况, 进一步提高信道的利用率, 缩短广义传输时间, 提升认知用户频谱切换性能. 首先, 根据认知无线电特点和混合排队-并列式服务方式, 建立 PRP M/G/m 频谱切换模型; 其次, 分析该模型中认知用户信道使用情况, 利用排队理论推导出广义传输时间表达式; 最后, 通过仿真分析认知用户频谱切换性能, 并与现有的频谱切换模型进行比较. 仿真结果表明 PRP M/G/m 模型中广义传输时间进一步缩短, 认知用户服务强度可执行区域增大, 系统容纳能力增强, 从而使得频谱切换性能得到提高.

2 PRP M/G/m 频谱切换模型研究

2.1 频谱切换模型及其假设

在认知无线网络中, PRP M/G/m 模型可以用来表征在多个信道中授权用户和认知用户的信道使用情况. 如图 1 所示, 假设 PRP M/G/m 模型具有 m 个独立的信道, 其中每个信道都有其相应的高优先级队列, 即授权队列. 该模型仅有一个低优先级队列, 即认知队列. 在进行数据传输之前, 授权用户进入相应的高优先级队列, 认知用户则进入低优先级队列. 然后, 根据队列中各用户的到达时刻, 建立相应的授权链接和认知链接, 并且拥有相同优先级的链接遵从先到先服务 (first come first serve, FCFS) 的调度策略. 只有授权队列中所有用

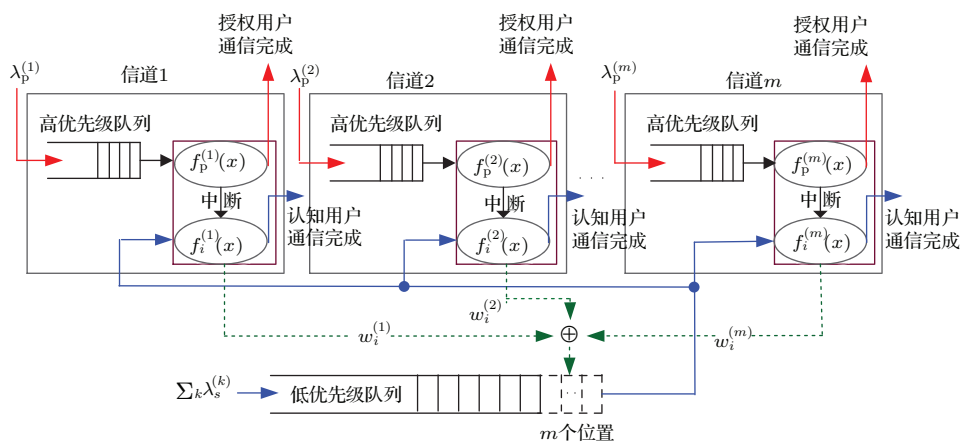


图 1 PRP M/G/m 模型下的频谱切换过程示意图

Fig. 1. Schematic diagram of spectrum handoff process in PRP M/G/m model.

户全部完成数据传输后, 认知队列中的用户才能够接入信道. 一旦授权用户再次出现, 认知用户则暂停数据传输或者切换到别的信道. 此外, 在认知队列的队首预留 m 个位置, 用来安置每个信道上被中断的认知用户. 如果被中断的认知用户的目标信道为当前信道, 则认知用户会停留在当前信道, 当该信道上的授权队列中所有授权用户完成数据传输后, 认知用户优先接入该信道; 如果认知用户的目标信道不是当前信道, 那么该用户会按照 FCFS 的规则进入到认知队列的前 m 个位置. 当有空闲信道且允许其接入时, 在相应的空闲信道上完成其剩下的通信业务.

如图 1 所示, 认知队列中认知用户和每个信道授权队列中的授权用户的到达过程服从泊松流, 令 $\lambda_p^{(k)}$ (到达数/时隙) 为授权用户在信道 $k(1 \leq k \leq m)$ 上的到达率; $\lambda_s^{(k)}$ (到达数/时隙) 为认知用户在信道 k 上的初始到达率, 因此 $\sum_k \lambda_s^{(k)}$ 为认知队列总的初始到达率; $\omega_i^{(k)}$ 表示经历过 i

次频谱切换的认知用户在信道 k 上的到达率, 因此 $\sum_k \omega_i^{(k)}$ 为认知队列中历过 i 次频谱切换的认知用户总的到达率; 此外, 令 $X_p^{(k)}$ (时隙/到达数) 和 $X_s^{(k)}$ (时隙/到达数) 分别表示相应的授权用户和认知用户在信道 k 上服务时长的分布, $f_p^{(k)}(x)$ 和 $f_s^{(k)}(x)$ 分别表示 $X_p^{(k)}$ 和 $X_s^{(k)}$ 的概率密度函数. 业务参数 $\lambda_p^{(k)}$, $\lambda_s^{(k)}$, $f_p^{(k)}(x)$ 和 $f_s^{(k)}(x)$ 能通过确定的业务模式预测方法 [23] 得到, 因此 PRP M/G/m 模型中多信道多次频谱切换的很多性能指标就能推导出.

2.2 认知用户频谱切换分析

在认知无线网络中, 由于授权用户的出现, 认知用户在完成一次数据传输期间可能会被多次中断. 因此, 认知用户被迫进行频谱切换, 将会依次接入事先通过频谱感知或者信道参数估计 [24] 确定好的目标信道. 图 2 给出了认知用户在完成一次完整数据传输期间发生的三次频谱切换的例子.

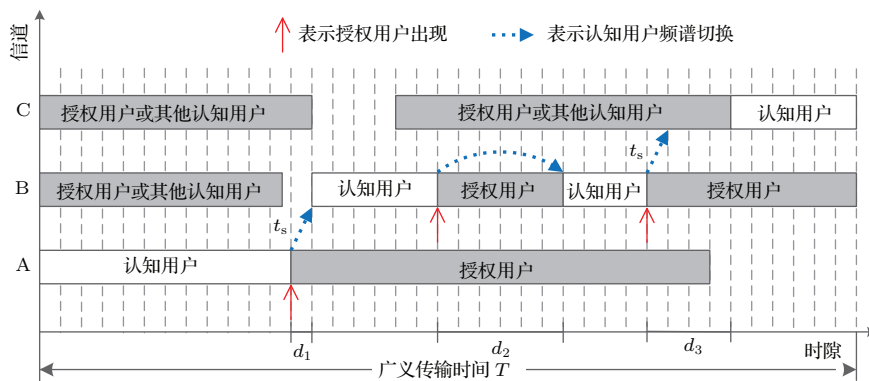


图 2 认知用户频谱切换过程示例

Fig. 2. Example of spectrum handoff process for a secondary user.

图 2 中, 认知用户的初始信道为 A, 进行频谱切换的目标信道序列为 (B, B, C, ...); T 为广义传输时间; d_i 为第 i 次频谱切换后认知用户的传输时延, 是指从认知用户数据传输被中断的时刻到其恢复数据传输的时间间隔. 假设认知用户完成数据传输需要 28 个时隙, 其整个数据传输过程总结如下.

第 1 步: 在开始阶段, 认知用户在初始信道 A 建立通信, 当授权用户出现时, 根据预先决定的目标信道进行频谱切换.

第 2 步: 在第一次频谱切换发生后, 由于第一次预先决定的目标信道是 B, 认知用户将其工作信道从 A 切换到空闲信道 B. 这种情况下, 传输时延 d_1 就是信道切换时间, 用 t_s 来表示.

第 3 步: 第二次频谱切换时, 认知用户停留在其当前工作的信道 B, 因为目标信道序列中第二个目标信道是 B. 直到所有高优先级的授权用户在信道 B 完成数据传输后, 才能继续传输数据. 这种情况下, 传输时延 d_2 是从信道 B 被授权用户使用的时刻开始到授权队列空闲的时刻截止, 是由在信道 B 上多个授权用户进行数据传输导致的.

第 4 步: 在第三次频谱切换时, 认知用户从正在工作的信道切换到信道 C, 因为第三个目标信道是 C. 在这种情况下, 因为信道 C 处于繁忙状态, 认知用户必须在认知队列中等待, 直到信道 C 中授权和认知队列中用户完成数据传输. 此时, 传输时延 d_3 是等待时间与信道切换时间 t_s 的总和.

第5步: 最后, 认知用户在信道C上完成整个数据传输.

从上述示例可以看出, 三次频谱切换造成的传输时延为 $d_1 + d_2 + d_3$. 因此, 认知用户完成数据传输的时间在原来28个时隙的基础上增加了11个时隙的传输时延. 从开始接入初始信道到最终完成数据传输所用的时间被定义为广义传输时间. 该参数是衡量认识用户切换性能优劣的重要标准.

2.3 认知用户广义传输时间推导

为了探讨 PRP M/G/m 模型中认知用户频谱切换性能, 下面对广义传输时间进行推导. 为了便于推导, 设 $k(i) (1 \leq k(i) \leq m, 0 \leq i \leq I_{\max})$ 表示认知用户经历 i 次频谱切换的目标信道, 其中 I_{\max} 为认知用户能够允许的最大切换次数. 不失一般性, 考虑一个初始信道为 $k(0)$ 的认知链接, 此时 $i = 0$. 设 I 是该认知链接发生频谱切换次数的总和, 那么该认知链接的广义传输时间期望可以表示为

$$E[T] = \sum_{i=1}^{I_{\max}} E[T|I=i] \Pr(I=i), \quad (1)$$

其中, T 为广义传输时间; $E[T|I=i]$ 表示认知链接经历 i 次频谱切换后完成数据传输所需要时间的期望值; $\Pr(I=i)$ 则表示认知链接经历 i 次频谱切换的概率. 因此, 为了获得广义传输时间期望, 首先推导出 $E[T|I=i]$ 的表达式. 由于多次频谱切换将认知链接分为多段传输, 因此该认知链接的广义传输时间由初始信道服务时间期望 $E[X_s^{(k(0))}]$ 和多次切换造成的累计传输时延期望组成. 设 d_i 表示第 i 次频谱切换造成的传输时延, 认知链接的广义传输时间条件期望可以表示为

$$E[T|I=i] = E[X_s^{(k(0))}] + \sum_{i=1}^{I_{\max}} E[d_i]. \quad (2)$$

接下来, 探讨如何推导 $\Pr(I=i)$ 的表达式. 根据 $k(i)$ 的定义, 该认知链接的目标信道序列可以描述为 $(k(1), k(2), k(3), \dots)$. 令 $p_i^{(k(i))}$ 为考虑的认知链接在经历了 i 次频谱切换之后, 在信道 $k(i)$ 上再次切换的概率. 根据上述分析, 认知链接恰好发生 i 次频谱切换的概率可以表示为

$$\Pr(I=i) = \left(1 - p_i^{(k(i))}\right) \prod_{j=0}^{i-1} p_j^{(k(j))}, \quad (3)$$

(3) 式中, $j (0 \leq j \leq i-1)$ 也表示认知用户频谱切换次数. 将 (1), (2) 式代入 (3) 式可以得到广义传输时间的期望值如下:

$$E[T] = E[X_s^{(k(0))}] + \sum_{i=1}^{I_{\max}} \left[\left(\sum_{j=1}^i E[d_j] \right) \times \left(1 - p_i^{(k(i))} \right) \prod_{j=0}^{i-1} p_j^{(k(j))} \right]. \quad (4)$$

由 (4) 式可以看出, 认知用户广义传输时间由三个参数决定: $E[X_s^{(k(0))}]$, $E[d_i]$ 和 $p_i^{(k(i))}$. 其中 $E[X_s^{(k(0))}]$ 可以根据服务时间分布的概率密度函数求解, 即

$$E[X_s^{(k(0))}] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_s^{(k(0))}(x) dx,$$

$f_s^{(k(0))}(x)$ 为认知用户在初始信道 $k(0)$ 上的服务时间分布的概率密度函数. 下面推导后两个参数. 当认知用户进行频谱切换时, 会有两种情况出现.

1) 目标信道为当前信道, 即 $k(i) = k(i-1)$. 此时, 认知用户的传输延时与 PRP M/G/1 模型结论相同, 即

$$E[d_i] = \frac{E[X_p^{(k(i))}]}{1 - \lambda_p^{(k(i))} E[X_p^{(k(i))}]}. \quad (5)$$

2) 目标信道为其他信道, 即 $k(i) \neq k(i-1)$. 此时, 认知用户将会由信道 $k(i-1)$ 切换到信道 $k(i)$. 在切换到目标信道 $k(i)$ 之后, 认知用户必须在信道 $k(i)$ 的认知队列中等待, 直到授权队列中的授权用户以及认知队列中排在队前的认知用户数据传输完成. 在 PRP M/G/m 模型中, 认知用户目标信道 $k(i)$ 可能被授权用户占用, 也可能被认知用户占用. 如果被授权用户占用, 那么所等待的时间为三部分时间之和: 第一部分为授权队列中的授权用户占用时间, 第二部分为认知队列中的认知用户占用时间, 第三部分为在等待时间内到达的新的授权用户占用时间. 如果被认知用户占用, 则等待时间包括两部分: 第一部分为认知队列中认知用户占用时间, 第二部分为在等待时间内到达的新的授权用户占用时间. 同时, 队列前端最多有 m 个位置, 即等于信道的数量. 因为每个信道最多只有一个认知用户在使用, 当其被中断后, 会根据 FCFS 策略进入到认知队列中前 m 个位置中的某一个. 如果认知队列中的认知用户没有完成数据传输时, 不会有新认知用户进入到这前 m 个位置中. 因此, 认知用户

在目标信道上需要等待的时间期望值 $E[\Psi_s^{(k(i))}]$ 可以表示为

$$\begin{aligned} E[\Psi_s^{(k(i))}] &= E[\Gamma_s^{(k(i))}] + \rho_p^{(k(i))} E[\Psi_p^{(k(i))}] \\ &+ \sum_{i=1}^{I_{\max}} E[N_i^{(k(i))}] E[\Theta_i^{(k(i))}] \\ &+ \lambda_p^{(k(i))} E[\Psi_s^{(k(i))}] E[X_p^{(k(i))}], \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $E[\Gamma_s^{(k(i))}]$ 为认知用户在信道 $k(i)$ 上的平均有效剩余时间, 即为认知用户在信道 $k(i)$ 上完成其剩余的通信所用时间; $\rho_p^{(k(i))}$ 为授权用户在信道 $k(i)$ 上进行数据传输的概率; $E[\Psi_p^{(k(i))}]$ 为认知用户在信道 $k(i)$ 上等待授权用户完成数据传输时间; $E[N_i^{(k(i))}]$ 为信道 $k(i)$ 上经历 i 次频谱切换的认知用户数量; $E[\Theta_i^{(k(i))}]$ 为信道 $k(i)$ 上经历 i 次频谱切换的认知用户的占用时间; $\lambda_p^{(k(i))} E[\Psi_s^{(k(i))}] E[X_p^{(k(i))}]$ 为在认知用户等待时间内到达的授权用户完成数据传输所用时间.

对于 $E[\Gamma_s^{(k(i))}]$, 根据文献 [25] 可以表示为

$$\begin{aligned} E[\Gamma_s^{(k(i))}] &= \frac{1}{2} \lambda_p^{(k(i))} E\left[\left(X_p^{(k(i))}\right)^2\right] \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{I_{\max}} \sum_{k(i)=1}^m \omega_i^{(k(i))} E\left[\left(\Theta_i^{(k(i))}\right)^2\right], \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\sum_{k(i)=1}^m \omega_i^{(k(i))}$ 为认知队列中经历 i 次频谱切换的认知用户总的到达率, 为了便于比较, 引

入 PRP M/G/1 模型中信道 $k(i)$ 上经历 i 次频谱切换的认知用户的服务时间 $E[\Phi_i^{(k(i))}]$. 由于 PRP M/G/1 模型采用分别排队-并列式服务方式, 而本文采用混合排队-并列式服务方式, 则可以获得如下关系:

$$E[\Theta_i^{(k(i))}] = \left(\sum_{k(i)=1}^m \left(E[\Phi_i^{(k(i))}] \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (8)$$

$\rho_p^{(k(i))} E[\Psi_p^{(k(i))}]$ 为认知用户等待高优先级队列中的授权用户完成通信的时间, 也就是授权用户在高优先级队列中的逗留时间, 由排队论的公式得:

$$E[\Psi_p^{(k(i))}] = \frac{E[X_p^{(k(i))}]}{1 - \lambda_p^{(k(i))} E[X_p^{(k(i))}]}. \quad (9)$$

对于 $\sum_{i=1}^{I_{\max}} E[N_i^{(k(i))}] E[\Theta_i^{(k(i))}]$, 下脚标是从 $i = 1$ 开始的, 因为如果低优先级队列中没有认知用户完成其通信时, 预留位置中不会有新的认知用户接入, 只会存在被中断的认知用户, 因此 i 是从 1 开始进行计数. 由 Little 定理可知:

$$E[N_i^{(k(i))}] = \sum_{k(i)} \omega_i^{(k(i))} E[\Psi_s^{(k(i))}]. \quad (10)$$

$\lambda_p^{(k(i))} E[\Psi_s^{(k(i))}] E[X_p^{(k(i))}]$ 即为在等待时间 $E[\Psi_s^{(k(i))}]$ 内到达的授权用户完成其数据传输所用时间. 将 (7), (9), (10) 式代入 (6) 式, 便可推导出 $k(i) \neq k(i-1)$ 情况下的认知用户在新的目标信道上需要等待的时间期望值表达式:

$$E[\Psi_s^{(k(i))}] = \frac{\frac{\rho_p^{(k(i))} E[X_p^{(k(i))}]}{1 - \lambda_p^{(k(i))} E[X_p^{(k(i))}]} + \frac{1}{2} \lambda_p^{(k(i))} E\left[\left(X_p^{(k(i))}\right)^2\right] + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{I_{\max}} \sum_{k(i)=1}^m \omega_i^{(k(i))} E\left[\left(\Theta_i^{(k(i))}\right)^2\right]}{1 - \lambda_p^{(k(i))} E[X_p^{(k(i))}] - \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{k(i)=1}^m \omega_i^{(k(i))} E[\Phi_i^{(k(i))}]}, \quad (11)$$

此时, 认知用户传输时延为

$$E[d_i] = E[\Psi_s^{(k(i))}] + t_s. \quad (12)$$

根据上述关于认知用户传输时延的讨论, 可以将频谱切换策略分为两种. 第一种是 AS 策略, 即认知用户通信被中断后, 并没有切换到其他的信道上, 而是等待授权用户完成通信之后继续通信. 此时, 广义传输时间为

$$E[T_{\text{case-one}}] = E[X_s^{(k(0))}] + \sum_{i=1}^{I_{\max}} \left[\frac{i E[X_p^{(k(0))}]}{1 - \lambda_p^{(k(0))} E[X_p^{(k(0))}]} \left(1 - p_i^{(k(0))} \right) \prod_{j=0}^{i-1} p_j^{(k(0))} \right]. \quad (13)$$

第二种是AC策略,即认知用户通信被中断后,立即切换到下一个目标信道进行通信.此时,广义传输时间为

$$E[T_{\text{case-two}}] = E[X_s^{(k(0))}] + \sum_{i=1}^{I_{\max}} \left[\left(\sum_{j=1}^i (E[\Psi_s^{(k(j))}] + t_s) \right) (1 - p_i^{(k(i))}) \prod_{j=0}^{i-1} p_j^{(k(j))} \right]. \quad (14)$$

为了获得更好的频谱切换性能,认知用户应该采用自适应频谱切换策略.当 $E[T_{\text{case-one}}] > E[T_{\text{case-two}}]$ 时,采用AC策略;当 $E[T_{\text{case-one}}] < E[T_{\text{case-two}}]$ 时,采用AS策略;当 $E[T_{\text{case-one}}] = E[T_{\text{case-two}}]$ 时,采用两种策略均可.

3 仿真结果与分析

本节给出了PRP M/G/m模型下认知用户频谱切换性能的一系列仿真图,包括:认知用户最佳广义传输时间与授权用户服务强度的关系,认知用户服务强度与授权用户服务强度的关系.并在以上两个方面分析比较了PRP M/G/m模型与PRP M/G/1模型,得出相应结论.

3.1 认知用户最佳广义传输时间

本文将PRP M/G/m模型运用于语音业务中,授权用户与认知用户在信道上到达率服从泊松分布,服务时间服从指数分布.假设系统有3条信道且具有相同的特性,则每条信道上授权用户到达率为 λ_p ,平均服务时长为 $E[X_p]$.而认知队列中认知用户到达率为 $3\lambda_s$,每条信道上认知用户的服务时间服从相同参数的指数分布,即

$$f_s(x) = \mu_s e^{-\mu_s x}, \quad E[X_s] = 1/\mu_s.$$

根据文献[21]中推导的结论可知,相关参数可简化为

$$\begin{aligned} \omega_i^{(k(i))} &= \omega_i = \lambda_s [\lambda_p / (\lambda_p + \mu_s)]^i, \\ E[\Phi_i^{(k(i))}] &= E[\Phi_i] = 1/(\lambda_p + \mu_s), \\ p_i^{(k(i))} &= \lambda_p / (\lambda_p + \mu_s), \\ E\left[\left(\Phi_i^{(k(i))}\right)^2\right] &= E\left[\left(\Phi_i\right)^2\right] = 2/(\lambda_p + \mu_s)^2. \end{aligned}$$

将仿真的系统定义为时间连续的认知无线电系统,系统中的到达时间间隔和服务时间间隔可以是非整数时隙的时间.根据IEEE802.22关于认知无线电中时隙长度的定义,将仿真中每个时隙的时间定义为10 ms.

图3描绘了PRP M/G/m排队模型中,在认知用户到达率 $\lambda_s = 0.01$ (到达数/时隙)、授权用户的平均服务时间 $E[X_p] = 20$ (时隙/到达数),认知用户的平均服务时间 $E[X_s] = 10$ (时隙/到达数)情况下,停留等待AS策略与移动切换AC策略两种切换策略在广义传输时间上的比较.其中横轴代表授权用户的服务强度 $\rho_p = \lambda_p E[X_p]$.可以看出当 $\rho_p < 0.48$ 时,AC切换策略更优,此时认知用户广义传输时间更短;而当 $\rho_p > 0.48$ 时,AS的切换策略更优.因为授权用户服务强度增大时,同一信道中相邻两个授权用户的到达时间间隔变短,从而导致AC策略下认知用户频谱切换次数增多,传输时延增大.

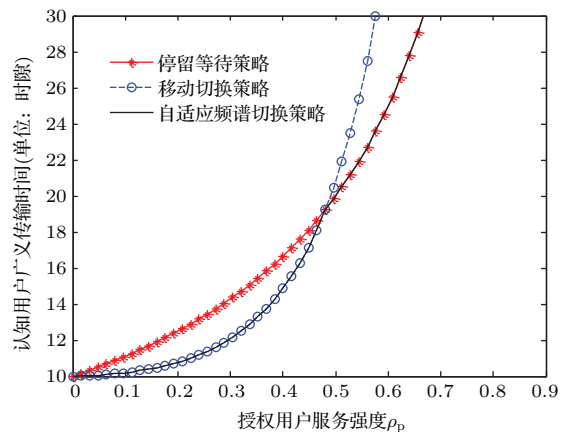


图3 (网刊彩色) PRP M/G/m模型中两种切换策略的广义传输时间的比较

Fig. 3. (color online) Extended data delivery time comparison between two handoff strategies in PRP M/G/m model.

PRP M/G/1排队模型和PRP M/G/m排队模型在AS切换策略下广义传输时间相同,不予讨论.图4描述了两种模型在AC策略下广义传输时间的比较.设每条信道上认知用户到达率 $\lambda_s = 0.01$ (到达数/时隙),授权用户平均服务时间 $E[X_p] = 20$ (时隙/到达数),认知用户平均服务时间 $E[X_s] = 10$ (时隙/到达数).可以看出,当授权用户的服务强度 $0 < \rho_p < 0.2$ 时,两种模型的AC切换策略造成的广义传输时间曲线几乎重合;当授权用户的服务强度 $0.2 < \rho_p < 0.42$ 时,相较于PRP

M/G/1 模型, PRP M/G/m 模型中 AC 切换策略下的广义传输时间略微减小, 减小的程度在 0 到 1 个时隙之间; 当授权用户服务强度 $0.42 < \rho_p < 1$, PRP M/G/m 排队模型的 AC 切换策略造成的广义传输时间明显减小, 并且随着授权用户服务强度 ρ_p 的增大, 减小的趋势也在增大. 总而言之, PRP M/G/m 排队模型的 AC 切换策略造成的广义传输时间比 PRP M/G/1 排队模型要小, 系统模型更优.

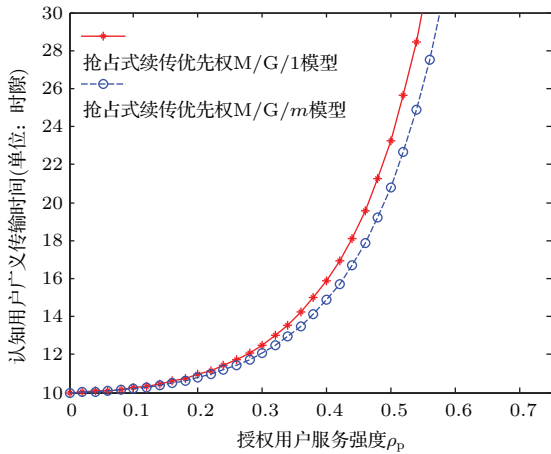


图 4 (网刊彩色) 两种模型在 AC 切换策略下广义传输时间的比较

Fig. 4. (color online) Extended data delivery time comparison between two models with respect to AC strategy.

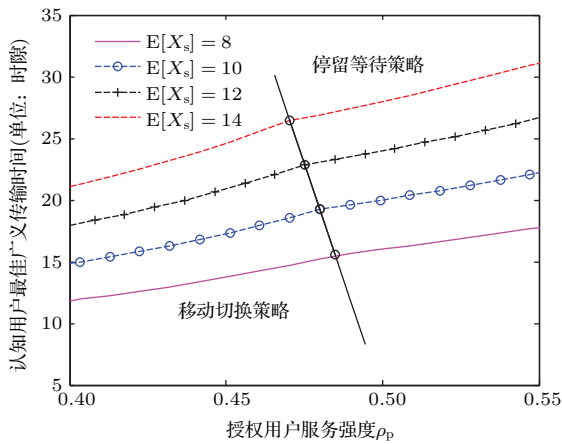


图 5 (网刊彩色) PRP M/G/m 模型中不同的认知用户服务时间期望对广义传输时间的影响

Fig. 5. (color online) Effect to extended data delivery time with different service time expectations of the secondary user in PRP M/G/m model.

图 5 描绘了 PRP M/G/m 排队模型中认知用户的到达率 $\lambda_s = 0.01$ (到达数/时隙)、授权用户服务时间 $E[X_p] = 20$ (时隙/到达数) 时, 随着授权用户不同的服务强度 ρ_p 及认知用户不同的服务时间 $E[X_s]$ 的变化, 认知用户最佳广义传输时间的变化.

从图中可以看出, 随着认知用户平均服务时间的增加, 最佳广义传输时间逐渐增大. 这种情况是由两方面因素导致的: 一方面, 当认知用户的服务时间 $E[X_s]$ 增大时, 被中断的认知用户的等待时间会变长; 另一方面, 更长的等待时间意味着该信道上授权用户再次出现的可能性更大, 使得认知用户的通信被中断的次数也越多, 因此切换的时延会增大. 此外, 随着认知用户平均服务时间的增加, 两种切换策略的交汇点所对应的授权用户服务强度在逐渐变小, 且呈线性趋势. 这说明较大的认知用户平均服务时间使得停留等待 AS 切换策略更具优势.

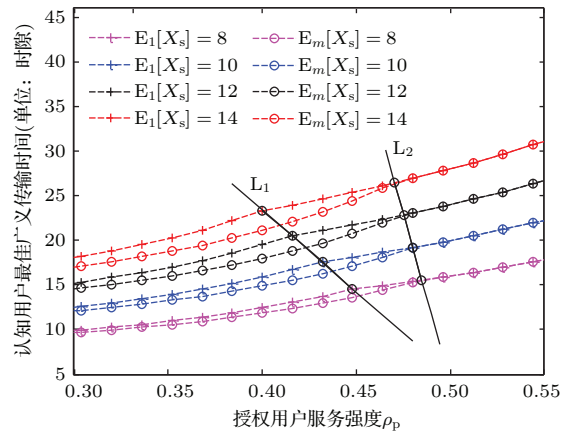


图 6 (网刊彩色) 两种模型不同认知用户服务时间期望对广义传输时间的影响

Fig. 6. (color online) Effect to extended data delivery time with different service time expectations of the secondary user in two models.

图 6 展示了在不同的认知用户平均服务时间 $E[X_s]$ 和不同的授权用户服务强度 ρ_p 的情况下, PRP M/G/1 模型和 PRP M/G/m 模型在认知用户广义传输时间上的比较. 其中, $E_1[X_s]$, $E_m[X_s]$ 分别表示 PRP M/G/1 模型和 PRP M/G/m 模型中认知用户的平均服务时间. 从图中可以看出, 在不同认知用户的平均服务时间条件下, PRP M/G/m 模型中认知用户的广义传输时间比 PRP M/G/1 模型更优. 另外, 图中的两条直线 L_1 和 L_2 分别表示 PRP M/G/1 和 PRP M/G/m 模型中, 当认知用户的平均服务时间 $E[X_s]$ 分别为 8, 10, 12 和 14 (时隙/到达数) 时, 最佳广义传输时间切换点的变化趋势. 可以看出直线 L_2 的斜率小于直线 L_1 , 说明较之 PRP M/G/1 模型, PRP M/G/m 中不同的平均服务时间 $E[X_s]$ 对认知用户自适应频谱切换策略影响较小, 频谱切换策略更加稳定. 因为 PRP M/G/m 模型中采用混合排队-并列式服务的排队

方式,使得信道的利用更加充分,从而降低了平均服务时间 $E[X_s]$ 对频谱切换策略的影响.

3.2 认知用户允许服务强度

本文提出的 PRP M/G/m 模型可以用于实际问题中的不同情况、不同标准. 在认知用户传输时延有要求时,对授权用户和认知用户通信流量进行控制以满足系统要求. 在 IEEE 802.22 WRAN 协议中,要求 IP 语音传输服务的最大传输时延为 20 ms (即相当于本文中的 2 个时隙). 设授权用户的平均服务时间 $E[X_p] = 20$ (时隙/到达数), 认知用户的平均服务时间 $E[X_s] = 10$ (时隙/到达数), 认知用户的切换时间 $t_s = 1$ (时隙), 且授权用户的服务强度 $\rho_p = \lambda_p E[X_p]$, 认知用户的服务强度 $\rho_s = \lambda_s E[X_s]$. 要达到 IP 语音传输服务时延的要求,需满足下面的公式

$$\begin{cases} \rho_p + \rho_s < 1, \\ \sum_{i=1}^{I_{\max}} \left[\left(\sum_{j=1}^i (E[\Psi_s^{(k(j))}] + t_s) \right) \times \left(1 - p_i^{(k(i))} \right) \prod_{j=0}^{i-1} p_j^{(k(j))} \right] < 2. \end{cases} \quad (15)$$

通过 (15) 式,便可求出 PRP M/G/m 模型中满足时延要求的 (ρ_p, ρ_s) 集合.

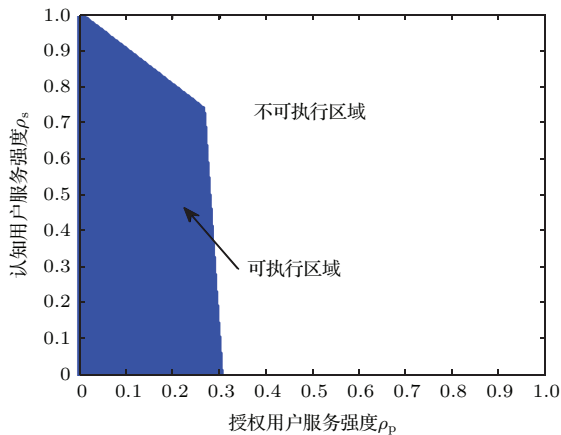


图7 PRP M/G/m 模型满足时延条件的 (ρ_p, ρ_s) 变化范围

Fig. 7. Variation range of (ρ_p, ρ_s) as PRP M/G/m model satisfies time delay condition.

从图7可以看出,当授权用户的服务强度 $\rho_p < 0.276$ 时,在认知网络系统的流量饱和前,即 $\rho_p + \rho_s \simeq 1$,授权用户的每个信道上可被接入任意数量的认知用户.如果 $\rho_p + \rho_s > 1$,则说明当前

信道的流量过饱和,授权用户和认知用户的流量总和超出了当前信道的承受范围,意味着在当前信道上等待服务的用户在队列中的平均等待时间将为无限长.当 $0.273 < \rho_p < 0.3$ 时,由于授权用户流量的增加,在信道上进行通信的认知用户会较频繁地被到达的授权用户中断,导致时延的增加.因此,系统将拒绝一部分的认知用户接入信道以满足认知用户时延的要求,这部分的授权用户服务强度和认知用户的服务强度应满足 $0.3 < \rho_p + \rho_s < 1$. 当授权用户的服务强度 $\rho_p > 0.3$ 时,认知无线电系统不允许认知用户接入系统,因为此时无论如何都无法满足认知用户 IP 语音传输服务对于时延的要求.

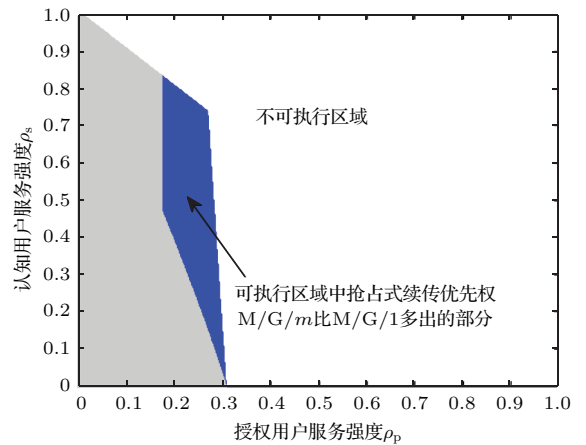


图8 两种模型满足时延条件的 (ρ_p, ρ_s) 变化范围比较

Fig. 8. Variation range comparison of (ρ_p, ρ_s) as two models both satisfy time delay condition.

图8给出了满足IP语音传输服务时延时、两种模型相应的 (ρ_p, ρ_s) 范围.可以看出,在满足 IEEE 802.22 WRAN 协议中的 IP 语音传输服务时延的情况下,代表 PRP M/G/1 排队模型流量控制的 (ρ_p, ρ_s) 集合为图中的灰色区域,蓝色区域代表 PRP M/G/1 排队模型较 PRP M/G/m 达不到的流量控制范围,灰色区域与蓝色区域的总和代表的是 PRP M/G/m 排队模型流量控制的 (ρ_p, ρ_s) 集合.可以看出,在授权用户服务强度 ρ_p 大于某一值后,在相同 ρ_p 的情况下,PRP M/G/m 比 PRP M/G/1 排队模型能容纳更多的认知用户,且增多的趋势为先增大后减小.当授权用户的服务强度 $\rho_p > 0.3$ 时,两种模型均不能容许认知用户的介入,因为此时接入的认知用户不能满足 IP 语音传输服务时延要求.因此,PRP M/G/m 排队模型的流量控制较 PRP M/G/1 排队模型更加灵活,且流量控制范围更加广阔.

4 结 论

本文在认知无线电系统中采用了混合排队-并列式服务的排队方式, 提出了PRP M/G/m频谱切换模型, 缩短了认知用户广义传输时间, 进一步提升了频谱切换性能. 仿真结果表明, 与已有的频谱切换模型相比较, 在没有时延限制的前提下, 当授权用户服务强度 $0.42 < \rho_p < 1$, PRP M/G/m模型中广义传输时间明显减小, 并且随着授权用户服务强度 ρ_p 的增大, 减小的趋势也在增大; 在存在时延限制的前提下, PRP M/G/m模型的流量控制更加灵活, 且流量控制范围更加广阔. 因此, 本文提出的模型更好地实现了认知无线网络中认知用户与授权用户的频谱共享. 此外, 在本文的研究中, 认知用户具有完美的续传能力. 因此, 未来将进一步研究重传机理对于频谱切换的影响.

参考文献

- [1] Wang B B, Liu K J R 2011 *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* **5** 5
- [2] Wang L C, Wang C W, Chang C J 2012 *IEEE Trans. Commun.* **60** 2444
- [3] Li Q C, Niu H N, Papathanassiou A T, Wu G 2014 *IEEE Veh. Technol. Mag.* **9** 71
- [4] Bhushan N, Li J Y, Malladi D, Gilmore R, Brenner D, Damnjanovic A, Sukhavasi R, Patel C, Geirhofe S 2014 *IEEE Commun. Mag.* **52** 82
- [5] Zu Y X, Zhou J, Zeng C C 2010 *Chin. Phys. B* **19** 119501
- [6] Zhang X J, Lu Y, Tian F, Sun Z X, Cheng X F 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 078401 (in Chinese) [张学军, 鲁友, 田峰, 孙知信, 成谢锋 2014 物理学报 **63** 078401]
- [7] Zu Y X, Zhou J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 019501
- [8] Gavrilovska L, Atanasovski V, Macaluso I, DaSilva L A 2013 *IEEE Commun. Surveys Tut.* **15** 1761
- [9] Qi P H, Li Z, Si J B, Gao R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 128401
- [10] Bansal T, Li D, Sinha P 2014 *IEEE Trans. Mobile Comput.* **13** 852
- [11] Chai Z Y, Wang B, Li Y L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 228802 (in Chinese) [柴争义, 王秉, 李亚伦 2014 物理学报 **63** 228802]
- [12] Christian I, Moh S, Chung I, Lee J Y 2012 *IEEE Commun. Mag.* **50** 114
- [13] Msumba J A, Xu H 2013 *IEEE Africon 2013* Mauritius, Sept. 9–12, 2013 p1
- [14] Romero J, Sallent O, Umbert A 2013 *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications* London, United Kingdom Sept. 8–11, 2013 p2512
- [15] Li C P, Neely M J 2011 *IEEE International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks* Princeton, New Jersey May 9–13, 2011 p401
- [16] Xu Y H, Anpalagan A, Wu Q H, Shen L, Gao Z, Wang J L 2013 *IEEE Commun. Surveys Tut.* **15** 1689
- [17] Li X, Zhao Q H, Guan X H, Tong L 2011 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **29** 746
- [18] Nejatian S, Syed-Yusof S K, Latiff N M A, Asadpour V 2013 *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications* London, United Kingdom Sept. 8–11, 2013 p2887
- [19] Liu J, Chen W, Cao Z, Zhang Y J 2012 *IET Communications* **6** 945
- [20] Wang J, Huang A P, Wang W, Quek T Q S 2013 *IEEE Wireless Commun. Lett.* **2** 175
- [21] Wang L C, Wang C W, Chang C J 2012 *IEEE Trans. Mobile Comput.* **11** 1499
- [22] Wang C W, Wang L C 2012 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **30** 2016
- [23] Liu Y, Tamma B R, Manoj B S, Rao R 2010 *INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops* San Diego, USA March 15–19, 2010 p1
- [24] Wu C, Jiang H, You X J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 088801 (in Chinese) [伍春, 江虹, 尤晓建 2014 物理学报 **63** 088801]
- [25] Bose S K 2002 *An Introduction to Queuing Systems* (New York: Kluwer Academic/Plenum) pp168–169

Spectrum handoff model based on preemptive queuing theory in cognitive radio networks*

Yang Xiao-Long[†] Tan Xue-Zhi Guan Kai*(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)*

(Received 24 September 2014; revised manuscript received 8 December 2014)

Abstract

Cognitive radio can significantly improve spectrum efficiency by temporarily sharing under-utilized licensed frequency with primary users. Its spectrum management framework consists of four parts: spectrum sensing, spectrum decision, spectrum sharing and spectrum handoff. The last part is what we focus on in this paper. Spectrum handoff, which aims at guaranteeing requirement for service of secondary users and shortening time delay produced by interruption from primary users, is an important functionality of cognitive radio networks. For solving the problem of optimizing the extended data delivery time, a spectrum handoff model is proposed based on the preemptive resume priority M/G/m queuing theory. In order to minimize the extended data delivery time, the queuing method with mixed queuing and parallel service is adopted. In this model, each channel has its own high-priority queue and there is only one low-priority queue for all secondary users. The primary and secondary users respectively enter into the high-priority and low-priority queue to establish corresponding primary connections and secondary connections and execute corresponding data transmission. On the above basis, secondary users' channel usage behaviors are thoroughly analyzed in the cases of multiple secondary users, multiple licensed channels and multiple spectrum handoffs. In this process, when multiple interruptions occur, the secondary user will stay on the current channel and suspend data transmission until primary users finish their data transmission, otherwise the secondary user will switch from the current channel to the predetermined target channel to resume his unfinished data transmission. The target channel is sequentially obtained from the target channel sequence, which is determined by channel parameter estimation algorithm. Based on the analysis of channel usage behaviors for secondary users, the total time delay caused by spectrum handoffs within the whole data transmission process is derived first. The total time delay can be deduced from two scenarios. One is that the target channel is the current channel. For this reason, the total time delay equals transmission time of primary users in high-priority queue. Obviously, the other is that the target channel is not the current channel. Thus, the total time delay equals the sum of transmission times of primary users in high-priority and secondary users ahead in low-priority. In addition, appearance of new primary users should also be considered in the data transmission process. Then, expressions of the extended data delivery time in two different cases (i. e. always-staying strategy and always-changing strategy) are respectively derived. Furthermore, the adaptive spectrum handoff strategy is finally discussed, which is to choose the optimal scheme from always-staying and always-changing strategy when a spectrum handoff happens. Simulation results verify that this model can not only describe handoff behaviors of secondary users more perfectly, but also can make the transmission time delay smaller and make the extended data delivery time shorter than the existing spectrum handoff model. Especially, with the increase of service intensity of primary users, the advantages of the proposed spectrum handoff model are more outstanding. In addition, the allowable secondary user service intensity is improved and the receptive number of secondary user is increased in cognitive radio networks. All in all, the proposed spectrum handoff model improves the performance of spectrum handoff, increases the capacity of cognitive radio networks and optimally realizes spectrum sharing between secondary users and primary users.

Keywords: cognitive radio, spectrum handoff, extended data delivery time, queuing theory**PACS:** 84.40.Ua**DOI:** 10.7498/aps.64.108403

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61071104), and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011ZX03004-006).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaolongyang_hit@163.com