

# 认知无线电中认知用户的重新建模与性能分析

林威, 付宇, 张钦宇, 王野, 王胜

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院 通信工程研究中心, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 针对认知网络频谱接入问题, 讨论了以往建模和理论分析中存在的不足。为了真实地模拟授权用户和认知用户的行为, 对频谱接入策略重新进行建模, 并利用矩阵几何法和离散事件系统仿真的事件调度法重新评估和比较了不同接入策略下的认知系统性能, 针对不同业务类型选取最佳接入策略。理论分析和仿真实验结果一致, 验证了所提模型的可靠性。频谱切换和信道预留接入策略增大了阻塞率并有效地降低了掉话率, 后者通过调整预留信道数目使认知系统吞吐量最大。

**关键词:** 认知无线电; 动态频谱接入; 马尔科夫; 频谱切换; 信道预留

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)11-0108-11

## Performance analysis and re-modeling of secondary users in cognitive radio system

LIN Wei, FU Yu, ZHANG Qin-yu, WANG Ye, WANG Sheng

(Communication Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** A number of errors in the past Markov model and theoretical analysis were discussed in spectrum access based on cognitive radio network (CRN). To imitate the behavior of primary user (PU) and secondary user (SU) factually, new models for access strategy were presented. The performance of CRN based on different access strategies were reappraised and compared by using matrix geometric theory and event scheduling of discrete events system simulation. Theoretical analysis results and simulation experiments were tally close, which confirms the reliability of proposed models. The access strategies with handoff and channel reservation efficiently decrease the call dropping probability, as while as, increase the blocking probability. And the thought for CRN can reach the maximum in the latter with the optimum number of reserved channels.

**Key words:** cognitive radio; dynamic spectrum access; Markov; spectrum hand-off; channel reservation

### 1 引言

无线通信业务需求的快速增长, 使频谱资源日益紧缺。目前采用的静态频谱分配政策常常导致某些时段和地区频谱使用频繁, 而其他时段和地区频谱空闲。由于“独占”的授权工作方式不允许非授

权用户使用空闲频段, 频谱资源无法得到充分利用, 造成了大量的资源浪费。根据美国联邦通信委员会(FCC)统计, 现有已分配频谱的利用率在 15% ~ 85% 之间<sup>[1]</sup>。为了公平、有效地使用频谱资源, FCC 提出一种新型的频谱共享技术——认知无线电 (CR, cognitive radio)<sup>[2,3]</sup>。

收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-08-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”计划基金资助项目(2009CB320402); 国家自然科学基金资助项目(60702034); 国家科技重大专项基金资助项目(2012ZX03001027-001)

**Foundation Items:** The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320402); The National Natural Science Foundation of China (60702034); The National Science and Technology Major Project (2012ZX03001027-001)

CR 技术能有效地解决频谱利用率低、频谱资源紧张的状况，并以灵活、低价等特点受到广泛关注。在感知共享的应用环境下，授权系统开放未被授权用户(PU, primary user)使用的频谱资源，支持认知用户(SU, secondary user)通信。PU 是网络的合法用户，具有高优先级，随机接入未被其他 PU 占用的频谱；SU 不具备频谱授予权，以不影响 PU 的正常通信为前提，利用频谱空穴检测技术<sup>[4]</sup>获取 PU 信息后接入空闲频谱。为了避免对 PU 产生干扰<sup>[5]</sup>，SU 在 PU 再次出现时退避。

将 PU 和 SU 的行为映射为 Markov 模型<sup>[6]</sup>是分析认知网络(CRN, cognitive radio network)性能的有效方法。文献[7]提出的 PU 优先的 Markov 模型，能够使 CR 系统有效、公平地利用未被 PU 使用的频谱，但是该方案只针对单信道场景进行了分析，对多信道系统的参数设置和建模则比较复杂，没有给出解决方案。文献[8]使用基于 CR-OFDM 的 Markov 模型来讨论 SU 如何接入授权频段的问题，并在此基础上，提出一种基于退让机制的动态频谱接入方案，通过伺机利用频谱空穴来提高频谱利用率，但在 PU 出现时，SU 没有机制切换到其他空闲频段继续通信，因此频谱利用率仍有进一步提升的空间。文献[9]和文献[10]均使用三维连续时间 Markov 链 3D-CTMC 模型来模拟 CRN 接入策略，清晰地刻画了 PU 和 SU 的行为，分析了基本频谱接入策略下认知系统的性能。文献[9]证明掉话率是限制 CR 系统吞吐量的主要因素，并提出信道预留频谱接入策略，该策略通过牺牲阻塞率换取掉话率，最大化系统吞吐量。而文献[10]通过引入频谱切换技术，使 SU 在信道被抢占后可再次接入空闲信道，降低了掉话率，保证了服务的完整性，并证明在掉话率和信道利用率方面频谱切换技术优于基本频谱接入策略和信道预留频谱接入策略。

但是，在文献[9]的基本频谱接入策略和文献[10]的频谱切换接入策略所使用的 3D-CTMC 模型中，掉话状态和阻塞状态均为瞬态，不存在稳态概率，导致衡量认知系统 QoS 的主要指标(阻塞率和掉话率)的定义不准确，无法求得系统性能参数。此外，文献[9]的信道预留频谱接入模型将系统中的 PU 总数目错误计为预留区域中 PU 数目，造成 PU 错误地使用非预留信道，产生不必要的掉话。

针对上述问题，为真实地刻画 CRN 接入过程，准确地模拟 PU 和 SU 的行为，本文对 CRN 接入部分

PU 和 SU 的行为重新进行了建模，并给出了阻塞率、掉话率的计算式。利用矩阵几何理论和离散事件仿真的事件调度法，求得该模型下各状态的稳态概率和衡量系统 QoS 的主要指标，验证了本文所提模型的可靠性。在此基础上，以最大认知系统吞吐量为目标，求解最优的预留信道数来设计信道预留频谱接入策略。对 3 种频谱接入策略进行了性能评估，针对不同的业务类型选取最佳的接入策略。

## 2 模型分析与重建

本节对第 1 节提到的 3 种接入策略进行深入地讨论，论证现存数学模型中存在的问题。针对此问题重新建模，给出阻塞率和掉话率的计算式。

### 2.1 基本频谱接入策略

采用 PU 占优的认知系统和授权系统共享频谱资源方式，对相同频带采用时分复用方式接入，每一频带同一时刻只容纳一个用户。系统中共有  $N$  个等带宽独立频带，假设 PU 和 SU 的到达速率分别为  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$ ，服从泊松过程，服务时间分别服从均值为  $1/m_p$  和  $1/m_s$  的负指数分布。图 1 描述了基本频谱接入过程。在  $t_0$  时刻，SU 利用空穴检测技术占用空闲频带  $F_2$  和  $F_5$ ；在  $t_1$  时刻，系统无空闲频带，处于阻塞状态，拒绝 SU 接入；在  $t_2$  时刻，PU 随机选择频带接入，强制中断  $F_2$  上通信的 SU，SU 退出系统，此时系统处于掉话状态；经过可忽略的延迟时间  $t$ ，系统处于图 1(d)所示稳定状态。

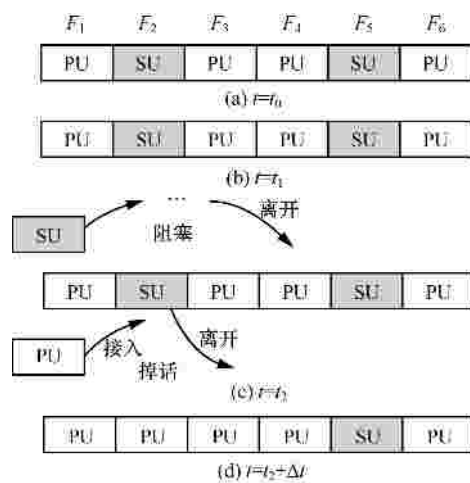


图 1 基本 CRN 频谱接入

在文献[9]中采用的 3D-CTMC 模型中，状态表示为  $(i, j, k)$ ，其中  $i, j$  分别代表系统中 PU 和 SU 的数目； $k=0$  表示 PU 和

SU 间无碰撞,  $k=1$  为发生掉话,  $k=2$  为系统阻塞;  $P(i, j, k)$  表示系统处于状态  $(i, j, k)$  的稳态概率。阻塞率和掉话率分别定义为所有阻塞状态和掉话状态的概率和, 即文献[9]中式(9)、式(10):

$$P_{\text{block}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N-1} P(i, j, 2) \quad (1)$$

$$P_{\text{drop}} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P(i, j, 1) \quad (2)$$

当系统中有 1 个 SU 时, 如果新的 PU 抢占了 SU 信道, 系统状态由  $(0, 1, 0)$  转移到状态  $(1, 0, 1)$  后以概率 1 (速率 8) 稳定在状态  $(1, 0, 0)$ , 由此可知状态  $(1, 0, 1)$  为瞬态, 存在时间极短, 可忽略不计。在 SU 试图接入满载系统的过程中同样存在瞬态, 例如: 当系统处于状态  $(2, N-2, 0)$  时, 拒绝新的 SU 接入, 转移到状态  $(2, N-2, 2)$  后以 8 速率回到状态  $(2, N-2, 0)$ , 其中, 状态  $(2, N-2, 2)$  是瞬态。从上述状态转移过程来看, 所有的掉话和阻塞状态 ( $k=1, 2$ ) 均是瞬态。由于瞬态不存在稳态概率, 式(1)、式(2)作为  $P(i, j, 2)$  和  $P(i, j, 1)$  的函数没有理论解, 因此阻塞率和掉话率的定义是不准确的。

针对上述 3D-CTMC 模型存在的问题, 采用 2D-CTMC 模型对 PU 和 SU 的行为重新建模, 如图 2 所示, 状态空间表示为

$$W = \{(i, j) : 0 \leq i \leq N, 0 \leq j \leq N, 0 \leq i+j \leq N\}$$

其中,  $i, j$  分别代表系统中 PU 和 SU 的数目,  $P_{i,j}$  表示系统处于状态  $(i, j)$  的稳态概率。

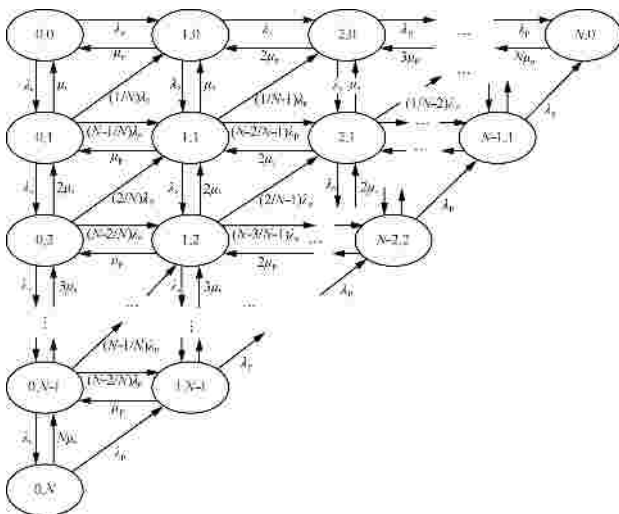


图 2 修正后的 2D-CTMC 基本频谱接入模型

当  $i+j < N, j > 1$  时, 若新的 PU 接入空闲信

道, 系统状态  $(i, j)$  将以转移率  $\frac{N-i-j}{N-i} \lambda_p$  转移到状态  $(i+1, j)$ ; 若新的 PU 抢占了 SU 信道, SU 掉话, 系统状态  $(i, j)$  将以转移率  $\frac{j}{N-i} \lambda_p$  转移到状态  $(i+1, j-1)$ 。当  $i+j = N$  时, 新的 PU 抢占了 SU 的信道, 系统处于阻塞状态, 拒绝新的 SU 接入, 系统状态不变。

这里重新给出阻塞率和掉话率的定义, 并对文献[9]中的式(9)、式(10)进行修正。

阻塞率: 单位时间内无法接入系统的 SU 数量与试图接入系统的 SU 数量之比。

掉话率: 单位时间内通信被迫中断的 SU 数量与成功接入系统的 SU 总数量之比。

$$P_{\text{block}}^{(\text{RAN})} = \sum_{i=0, j=N-i}^N P_{i,j} \quad (3)$$

$$P_{\text{drop}}^{(\text{RAN})} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-i} l_p \frac{j}{N-i} P_{i,j}}{l_s (1 - P_{\text{block}})} \quad (4)$$

其中,  $\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-i} l_p \frac{j}{N-i} P_{i,j}$  是单位时间内通信被迫中断的 SU 数量,  $l_s (1 - P_{\text{block}})$  是单位时间内成功接入系统的 SU 数量。

### 2.2 频谱切换接入策略

对于实时性要求较高的业务, 通信被迫中断通常比阻塞更加难以接受。为保证服务的完整性, 提高已接入系统的 SU 的服务质量, 在基本频谱接入策略的基础上引入了频谱切换的概念<sup>[11,12]</sup>, 使得 SU 在为 PU 让出频谱后可以寻找其他空闲频谱继续通信。

文献[10]采用的 3D-CTMC 模型中, 状态表示为  $(i, j, k)$ , 其中,  $i, j$  分别代表系统中 PU 和 SU 的数目;  $k$  表示系统发生的事件, 其中,  $k=0$  为 PU 和 SU 间无碰撞,  $k=1$  为频谱切换,  $k=2$  为掉话,  $k=3$  为系统阻塞;  $P(i, j, k)$  表示系统处于状态  $(i, j, k)$  的稳态概率。同理于 2.1 节对系统状态的分析, 该模型中掉话状态、阻塞状态、延迟状态均为瞬态, 不存在稳态概率。此外, 由于频谱切换带来的延迟对系统性能的影响很小, (见附录), 通过使用最优的频谱切换算法和有效的频谱切换技术可进一步优化延迟时间, 因此, 本文不考虑频谱切换带来的延迟, 将延迟状态视为不存在。

下面采用 2D-CTMC 对频谱切换接入策略重新建模, 如图 3 所示, 状态空间表示为

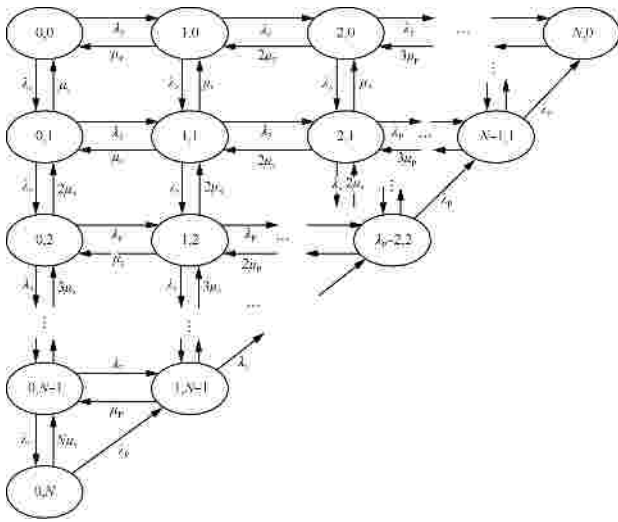


图 3 修正后的 2D-CTMC 带切换频谱接入模型

$$W = \{(i, j) : 0 \leq i \leq N, 0 \leq j \leq N, i + j \leq N\}$$

其中,  $i, j$  分别代表系统中 PU 和 SU 的数目。下文用  $p_{i,j}$  表示系统处于状态  $(i, j)$  的稳态概率。

当  $i + j < N - 1, j < N - 1$  时, 新的 PU 抢占了 SU 的信道或者接入空闲信道, 系统状态将  $(i, j)$  以转移率  $l_p$  转移到状态  $(i + 1, j)$ 。当  $i + j = N$  时, 系统处于阻塞状态, 拒绝新的 SU 接入, 系统状态保持不变。当  $i + j = N, j < N - 1$  时, 系统无法为被抢占信道的 SU 提供信道, SU 掉话, 系统状态  $(i, j)$  以转移率  $l_p$  转移到状态  $(i + 1, j - 1)$ 。

阻塞率的计算式与基本频谱接入策略的相同, 由于掉话只发生在系统中无空闲信道时, 因此掉话率不同。

$$P_{\text{block}}^{(\text{SH})} = \sum_{i=0, j=N-i}^N P_{i,j} \quad (5)$$

$$P_{\text{drop}}^{(\text{SH})} = \frac{l_p \sum_{i=0, j=N-i}^{N-1} P_{i,j}}{l_s (1 - P_{\text{block}}^{(\text{SH})})} \quad (6)$$

此外, 考查衡量频谱切换策略中另一个重要因素——频谱切换概率, 指 SU 频谱切换次数与通信次数的比值。

$$P_{\text{handoff}} = \frac{l_p \sum_{i=0, j=N-i}^{N-1} \frac{j}{N-i} P_{i,j}}{l_s (1 - P_{\text{block}}^{(\text{SH})})} \quad (7)$$

### 2.3 信道预留接入策略

在信道预留接入策略中, 信道按位置被划分为

预留区域和非预留区域 2 部分。授权基站安排 PU 优先接入预留区域的空闲信道, 在 PU 和 SU 接满非预留区域的信道后, 周期性地发送通告阻止 SU 接入预留区域。

文献[9]采用的 3D-CTMC 模型对预留信道<sup>[13,14]</sup>数为  $R$  的  $N$  信道系统进行建模。系统状态表示为  $(i, j, k)$ , 其中,  $i, j$  分别代表系统中 PU 和 SU 的数目;  $k$  表示系统发生的事件, 其中,  $k=0$  为 PU 与 SU 间无碰撞,  $k=1$  为掉话,  $k=2$  为系统阻塞;  $P(i, j, k)$  表示系统处于状态  $(i, j, k)$  的稳态概率。

当  $i < R$  时, 若新的 PU 抢占 SU 的信道, SU 掉话, 系统状态  $(i, j, 0)$  以转移率  $\frac{j}{N-R} l_p$  转移到状态  $(i + 1, j - 1, 1)$ ; 若新的 PU 接入空闲信道, 系统状态  $(i, j, 0)$  以转移率  $\frac{N-i-j}{N-R} l_p$  转移到状态  $(i + 1, j, 0)$ 。但实际情况并非如此, 在系统 PU 数目较多时, 由于预留区域的 PU 完成服务后离开系统, 非预留区域有 PU 存在, 那么系统 PU 数目不少于  $R$ , 预留区域仍可能有空闲信道, 新的 PU 将接入预留区域, SU 不掉话, 此时系统状态将直接以转移率  $l_p$  进入状态  $(i + 1, j, 0)$ 。由此可知系统中部分状态转移不正确, 产生此错误的根本原因在于此模型将预留区域和非预留区域的 PU 一起计数, 把 PU 总数错误地理解为预留区域中 PU 数, 造成 PU 没有接入预留信道, 产生不必要的掉话。此外, 系统中部分状态仍为瞬态。

为了清晰地刻画预留区域和非预留区域中用户的行为, 避免发生不必要的掉话, 本文将 2 个区域中的 PU 分开计数。如图 4 所示, 系统共有  $N$  个信道, 为 PU 预留  $R$  个信道, 系统状态空间表示为

$$W = \{(i, j, k) : 0 \leq i \leq R, j = 0, 0 \leq i + j + k \leq N\} \cup \{(i, j, k) : i = R, N - R \leq j \leq N, 0 \leq i + j + k \leq N\}$$

其中,  $i, j$  分别代表预留区域和非预留区域中 PU 的数目,  $k$  代表非预留区域中 SU 的数目。下文用  $p_{i,j,k}$  表示系统处于状态  $(i, j, k)$  的稳态概率。

当  $i < R - 1$  时, 新的 PU 接入预留信道, 不影响非预留区域的 SU, 系统状态  $(i, j, k)$  以转移率  $l_p$  转移到状态  $(i + 1, j, k)$ 。当  $i = R - 1, j < N - R$  时, 若新的 PU 使用非预留区域的空闲信道, 则系统状



换为  $e$ ，记作  $Q_1$ 。由于  $pe = 1$ ，可得到下列方程。

$$\begin{cases} \sum_{n=0}^N p_n e = 1, k=0 \\ p_{k-1}C_{k-1} + p_k A_k + p_{k+1}B_{k+1} = 0, 1 \leq k \leq N-1 \\ p_{k-1}C_{k-1} + p_k A_k = 0, k = N \end{cases}$$

因此，有  $pQ_1 = [1, 0, L, 0, 0]$ ，对等式两边分别进行求逆运算，可得到系统的稳态概率为  $p = [1, 0, 0, L, 0]Q_1^{-1}$ 。将  $p$  代入式(2)和式(3)，求得阻塞率和掉话率。

这种方法简单易懂，但是只适用于 Markov 状态数较小的情况。当 Markov 状态数较多时，计算量极大，矩阵求逆极其耗费系统资源，稳态方程求解困难，甚至无法求解，因此采用计算机仿真法求解是有效的解决途径。

### 3.2 事件调度法

事件调度法<sup>[18]</sup>将事件例程作为基本仿真单元，按事件发生的先后顺序执行相应的事件例程。CRN 接入过程分为接入系统、接受服务、退出系统 3 个事件，它们只在离散时间点发生变化，其变化域和空间状态具有离散性，因此采用离散系统仿真的事件调度法对该接入过程进行仿真，能够更真实地模拟系统中 PU 和 SU 的行为，具体步骤如下。

1) 设置仿真参数。包括仿真时间  $T$ 、系统信道数目  $N$ 、到达速率  $l_p$  和  $l_s$ 、服务时间均值  $1/m_p$  和  $1/m_s$ 。

2) 初始化。生成用户的到达时间、服务时间、服务完成时间(到达时间间隔服从均值  $l_p$  和  $l_s$  的负指数分布，服务时间服从均值  $1/m_p$  和  $1/m_s$  的负指数分布)放在事件发生时刻表中，将计数器归 0。

3) 在规定的仿真时间内，进行时间扫描确定下一事件发生的时间，按时间顺序执行每个事件，更新相应的数据。

4) 在仿真时间到达时，统计数据(SU 的总数量、阻塞数量、掉话数量)，计算阻塞率和掉话率。

### 3.3 2 种方法的结果评估

本节以基本频谱接入策略为例，采用以上 2 种方法求得阻塞率和掉话率，并分析与比较实验结果。为便于分析，将采用几何矩阵法和事件调度法得到的结果分别简写为理论解和仿真解。

由于部分用户(如话音业务)的服务时间由自身业务性质决定，不会发生变化，因此到达速率成为影响系统性能的重要因素。假设仿真时间  $T=90\ 000s$ ，

$l_p = 0 \sim 0.5$  个数/s， $l_s = 0.4$  个数/s， $1/m_p = 1/0.5s$ ， $1/m_s = 1/0.6s$ (SU 的服务时间略低于 PU 的服务时间)，在不同  $N$  值下分析阻塞率、掉话率随  $l_p$  的变化规律。

在图 5 和图 6 中，随着  $l_p$  的增大，更多的 PU 接入空闲信道和抢占 SU 信道，导致 SU 阻塞和掉话的数量增多，因此阻塞率和掉话率随  $l_p$  呈上升趋势。在系统中的信道数较多时，用户可享用更多的资源，SU 阻塞和掉话的数量会相应减少，阻塞率和掉话率较低。不同  $N$  值下，阻塞率和掉话率随  $l_p$  的变化规律与理论分析结果相吻合，证实了利用的 2D-CTMC 模型的理论分析和实验仿真方法都是可靠的。

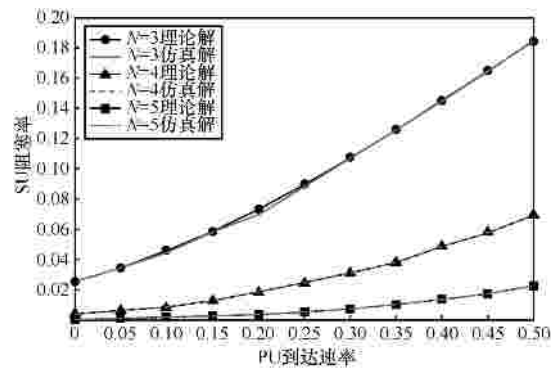


图 5 以  $l_p$  为变量的阻塞率

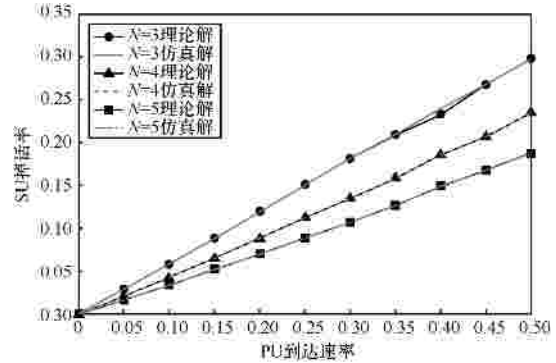


图 6 以  $l_p$  为变量的掉话率

## 4 3 种接入策略实验分析

本节通过对第 2 节提出的 3 种 CRN 接入策略进行实验，得到阻塞率、掉话率、信道利用率的变化情况以及不同策略间的比较。在此基础上，以最大认知系统吞吐量为目标，运用拉格朗日松弛法找到最优预留信道数来设计最优的信道预留接入策略。最后，针对不同的业务类型，选择最佳的接入策略。

### 4.1 3 种接入策略的性能分析

在本节，主要考虑 2 种参数情况下的阻塞率、

掉话率、信道利用率： $l_p = 0 \sim 0.5$  个数/s,  $l_s = 0.4$  个数/s,  $1/m_p = 1/0.4$  s,  $1/m_s = 1/0.6$  s,  $N = 5$ ,  $R = 2$  ;  
 $l_p = 0.3$  个数/s,  $l_s = 0.4$  个数/s,  $1/m_p = 1/0.05 \sim 1/0.5$  s,  $1/m_s = 1/0.6$  s,  $N = 5$ ,  $R = 2$ 。

1) 阻塞率

结合式(3)、式(5)和式(8), 得出上述参数情况下的阻塞率。如图 7 所示, 3 种接入策略的阻塞率均随  $\lambda_p$  增大而增大。随着  $\lambda_p$  增大, 单位时间内 PU 的到达频率加快、数量增多, PU 占用了更多信道, 相对 SU 的可用信道减少。如图 8 所示, 3 种接入策略的阻塞率均随  $\mu_p$  增大而减小, 这是由于  $\mu_p$  的增大使得 PU 的服务时间缩短, PU 能在较短的时间内完成服务, 信道处于空闲状态。

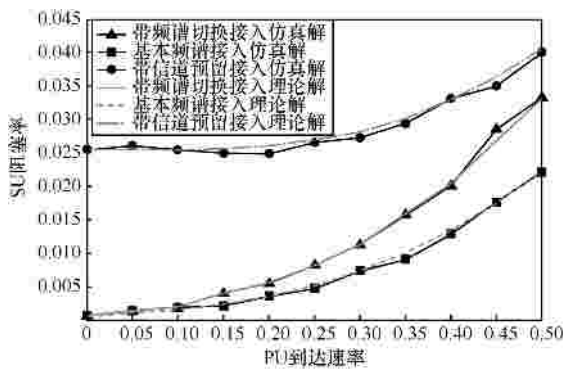


图 7 以  $\lambda_p$  为变量的阻塞率

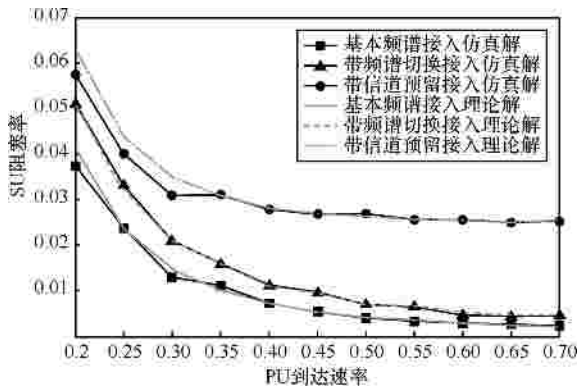


图 8 以  $\mu_p$  为变量的阻塞率

从图 7 和图 8 可以看出, 在相同参数下, 频谱切换接入策略阻塞率最大, 信道预留接入策略次之。原因在于频谱切换技术允许被抢占了信道的 SU 可再次接入空闲信道, 使得系统中空闲信道数量减少; 信道预留策略将一部分信道分配给 PU 独享, 只允许 SU 和 PU 共享非预留区域的空闲信道, SU 的可用信道数量减少。

2) 掉话率

结合式(4)、式(6)和式(9), 得出上述参数情况下的掉话率。如图 9 所示, 3 种 CRN 接入策略的掉话率均随  $\lambda_p$  增大而增大。随着  $\lambda_p$  增大, 更多的 PU 抢占了 SU 信道, 导致被迫中断服务的 SU 数量增多。如图 10 所示, 3 种 CRN 接入策略的掉话率均随  $\mu_p$  增大而减小。随着  $\mu_p$  增大, PU 的服务时间缩短使得系统中的空闲信道增多, SU 在被 PU 抢占信道后可继续接受服务。

从图 9 和图 10 可以看出, 在相同参数下, 频谱切换和信道预留的接入策略均降低了掉话率, 其中, 频谱切换接入策略的掉话率最小。由于频谱切换接入策略下的 SU 在被迫让出信道后, 可接入其他空闲信道, 这使得掉话数减少。信道预留接入策略中 PU 优先接入预留信道, 减少了占用非预留区域中 SU 信道, 掉话数随之减少。

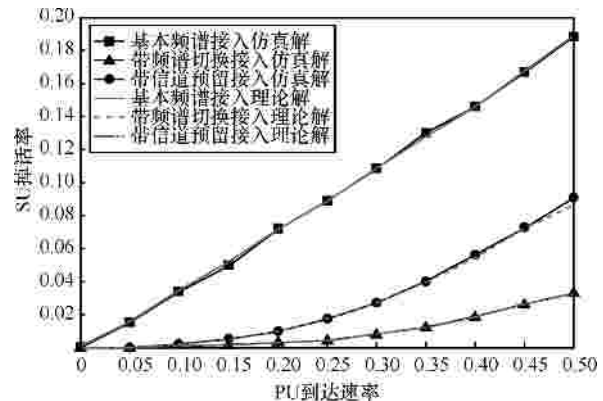


图 9 以  $\lambda_p$  为变量的掉话率

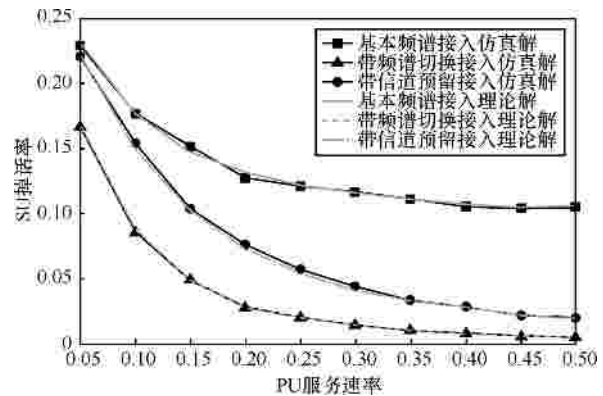


图 10 以  $\mu_p$  为变量的掉话率

3) 信道利用率

CR 的提出旨在解决部分地区和时段频谱资源利用率低的问题, 因此信道利用率成为衡量 CRN 性能的重要指标。

信道利用率指信道平均被占用的程度，即系统中正在通信的用户数量与信道数目之比。根据定义给出 3 种策略下信道利用率的数学表达式。

$$h^{(RAN)} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} (i+j)p_{i,j} \quad (11)$$

$$h^{(SH)} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} (i+j)p_{i,j} \quad (12)$$

$$h^{(RC)} = \frac{1}{N} (i+j+k) \sum_{i=0}^R \sum_{j=0}^{N-R} \sum_{k=0}^{N-i-j} P(i,j,k) \quad (13)$$

下面以  $\rho_p$  为变量进行实验，考查 3 种接入策略下信道利用率的变化情况（参数设置与图 7 一致）。

结合式(11)、式(12)和式(13)得出上述参数下的信道利用率。如图 11 所示，随着  $\rho_p$  增大，系统中更多信道被使用，那么 3 种接入策略的信道利用率均增大。从图 11 中可以看出，引入频谱切换后，SU 在被迫让出信道后能再次接入空闲信道，信道利用率为基本频谱接入策略的 2 倍。信道预留接入策略由于只允许 SU 接入非预留区域，预留区域的信道没有得到充分利用，信道利用率与基本频谱接入策略近似。

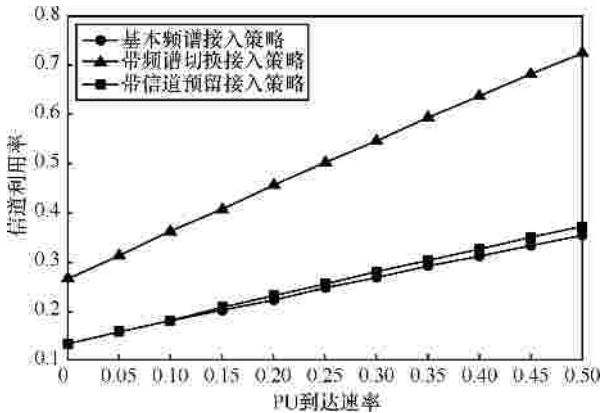


图 11 以  $\rho_p$  为变量的信道利用率

#### 4.2 信道预留接入策略的优化

基于 4.1 节的分析，了解到信道预留接入策略以牺牲阻塞率来换取掉话率，不同的预留信道数将会带来不同的阻塞率和掉话率。那么，选取适当的预留信道数目成为设计该策略的关键问题。

首先，以预留信道数目为变量进行实验，考查阻塞率和掉话率的变化情况。参数设置如下：

$l_p = 0.3$  个数/s,  $l_s = 0.4$  个数/s,  $1/m_p = 1/0.4$  s,  $1/m_s = 1/0.6$  s,  $N = 5$ ,  $R = 0 \sim 4$ 。实验结果如图 12 所示，随着预留信道数的增多，SU 可使用的信道数减少，导致 SU 无法接入系统，阻塞率逐渐增大；同时，PU 独享的信道数目增多使得更多的 PU 可以接入预留信道，无需抢占非预留区域的 SU 信道，掉话率逐渐减小。

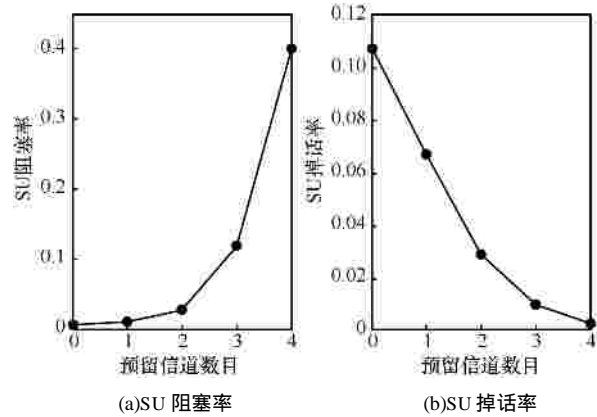


图 12 以 R 为变量的阻塞率和掉话率

考虑到认知系统吞吐量作为阻塞率和掉话率的函数（由式(10)可知），对于不同的 C 值有唯一的 R 值与之对应，因此以最大认知系统吞吐量为目标，在满足业务对阻塞率和掉话率限制条件下，选取最优的 R 值是一个较为可行的方法，对此采用拉格朗日松弛法<sup>[19]</sup>进行求解。

目标函数： $C = l_s (1 - P_{\text{block}}) (1 - P_{\text{drop}})$

约束条件： $P_{\text{block}}(R) \leq a, P_{\text{drop}}(R) \leq b$

首先，给定拉格朗日乘子 m 和 n，将约束条件松弛，得到拉格朗日函数

$$L = \sum_{i=1}^T C_i(R_i) + \sum_{i=1}^T m(P_{\text{block}}(R_i) - a) + \sum_{i=1}^T n(P_{\text{drop}}(R_i) - b) \\ = \sum_{i=1}^T (C_i(R_i) + mP_{\text{block}}(R_i) + nP_{\text{drop}}(R_i)) - \sum_{i=1}^T (ma + nb) \quad (14)$$

将式(14)分解为 2 层优化问题，分别进行求解。底层由 T 个子问题  $L_i$  构成， $i = 1, 2, \dots, T$

$$\max L_i = \max \{C_i(R_i) + mP_{\text{block}}(R_i) + nP_{\text{drop}}(R_i)\}$$

上层为  $\sum_{i=1}^T L_i - \sum_{i=1}^T (ma + nb)$

接下来，采用标准梯度法<sup>[19]</sup>修正拉格朗日乘

子,在满足收敛条件时,获取原问题的最优解  $R_{opt}$  及  $C$  的最大值。

1) 通过给定  $m$ 、 $n$  的初值  $m^0$ 、 $n^0$ ,求得每个  $L_i$  的最优解  $R_i$ 。

2) 计算  $m$ 、 $n$  的梯度,得  $g_m^{l+1} = P_b^l - a$  和  $g_n^{l+1} = P_d^l - b$ ,其中, $l$  为迭代次数;并根据梯度得到收敛条件  $conv^{l+1}$ 。

3) 当  $|conv^{l+1} - conv^l| < e$  时 结束迭代,将  $m^{l+1}$ 、 $n^{l+1}$  代入原问题,求得  $R_{opt}$ 。

采用事件调度法进行求解的结果如图 13 所示,在为 PU 预留 2 个信道时,认知吞吐量达到最大值。此外,为 PU 预留 0 个信道时,该策略相当于基本频谱接入策略。结合图 12 和图 13 中可以看出为 PU 预留合适的信道有助于更多的 SU 完成服务,提高认知系统吞吐量。

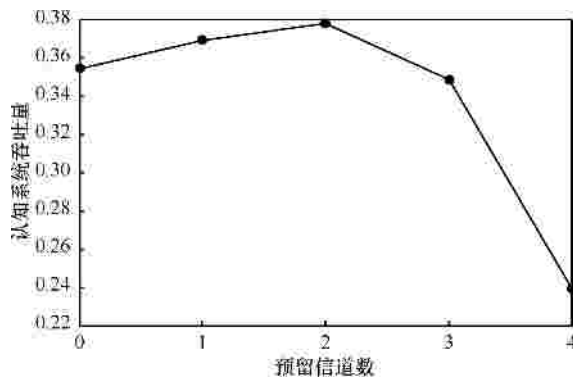


图 13 以  $R$  为变量的认知系统吞吐量

### 4.3 不同业务对接入策略的选取

频谱切换接入策略使 SU 具有频谱切换能力,在可用频谱资源时变的情况下依然能维持正常通信。信道预留接入策略,通过改变信道分配政策,减少 PU 抢占 SU 信道的可能性,使得 SU 能顺利地完成任务。两者均以牺牲一定阻塞率获取较低的掉话率;相比之下,基本频谱接入策略则保持较低的阻塞率和较高的掉话率。3 种接入策略各有优势,工作方式和应用场景有所不同,下面针对不同的业务类型选择最佳的频谱接入策略。

按业务接入性能的要求,将 3GPP 和 IMT-Advanced 定义的业务类型<sup>[20]</sup>划分为尽力而为型业务和实时型业务。

#### 1) 尽力而为型业务

尽力而为型业务包括交互式业务和背景类业务,它们对阻塞率、掉话率要求严格,对频谱切换

概率无限制。因此,阻塞率、掉话率成为该业务选择接入策略需要考虑的因素。

认知系统吞吐量是阻塞率和掉话率的函数,可以此为优化目标,在满足阻塞率和掉话率的限制条件下,选取最佳的接入策略。仿真参数设置如下: $l_p = 0.3$  个数/s,  $l_s = 0.4$  个数/s,  $1/m_p = 1/0.4$  s,  $1/m_s = 1/0.6$  s,  $N = 5$ ,由 4.2 节的求解结果可知, $R = 2$  时信道预留接入策略的认知系统吞吐量最大,因此本节令  $R = 2$ 。如图 14 所示,频谱切换接入策略的认知系统吞吐量最大, SU 能完成更多的业务,因此,对尽力而为型业务而言是最佳的接入策略。

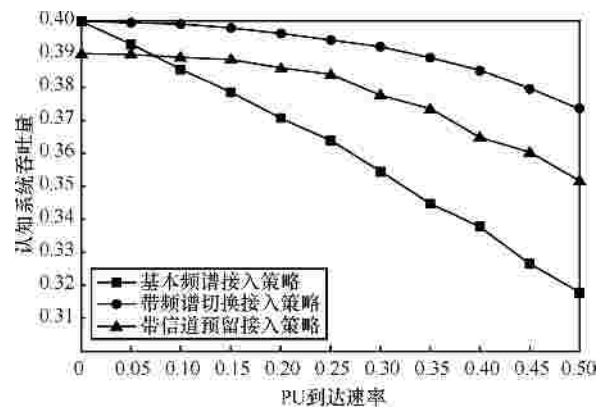


图 14 以  $\lambda_p$  为变量的认知系统吞吐量

#### 2) 实时型业务

实时型业务包括语音业务和媒体流业务,这些业务对掉话率、切换概率要求严格,对阻塞率要求较低。在选择最佳接入策略时需综合考虑这 3 个因素,将阻塞率、掉话率、切换概率分别加权求和,记作 QoS 效用函数  $U$ ,  $U$  值越小,系统性能越优。

$$U = w_1 P_{block} + w_2 P_{drop} + w_3 P_{handoff} \quad (15)$$

其中,  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。考虑到阻塞率和掉话率对系统性能影响比较大,切换概率则对系统性能影响较小,并且实时型业务对各个指标的要求不同,设  $w_1 = 0.3$ ,  $w_2 = 0.5$ ,  $w_3 = 0.2$ ,其他参数设置与图 14 一致。在上述参数下的 QoS 效用函数如图 15 所示,PU 到达速率在 0~0.1 之间时,采用频谱切换接入策略的  $U$  值最小;在 0.1~0.5 之间,采用信道预留接入策略的  $U$  值最小。因此,对实时型业务而言,当 PU 业务量较小时,选择频谱切换接入策略系统的性能最佳,

当 PU 业务量较大时,选择信道预留接入策略系统的性能最佳。

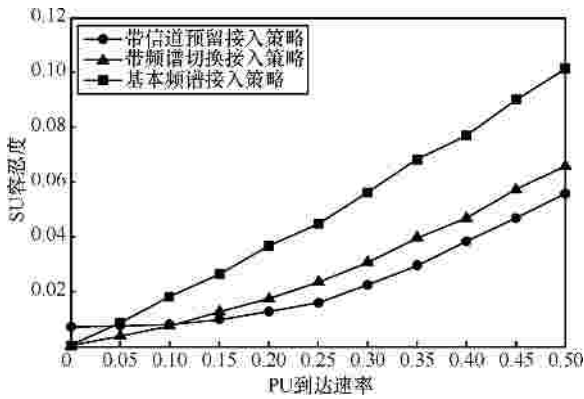


图 15 以  $\lambda_p$  为变量的用户容忍度

### 5 结束语

本文讨论了文献[9]和文献[10]CRN 接入模型中存在的问题,通过模拟 PU 和 SU 的行为重新进行建模,根据此模型修正了认知系统性能评估的重要指标的定义和表达式。采用矩阵几何法和离散系统仿真的事件调度法求得各状态的稳态概率,进一步重新评估了 CRN 性能。理论分析和仿真结果一致,验证了所提的数学模型的可靠性。实验结果表明,频谱切换和信道预留接入策略,均以牺牲阻塞率换取掉话率,最大限度地维持 SU 服务;此外,频谱切换接入策略具有较高的信道利用率。针对不同业务类型的各性能指标的要求,选择最佳的接入策略,尽力而为型业务采用频谱切换接入策略;实时型业务在 PU 业务量较小时采用频谱切换接入策略,反之则采用信道预留接入策略。

### 附录

2.1 节提到频谱切换技术给 CRN 接入带来一定的延迟,下面通过一组仿真实验说明延迟对系统性能的影响很小,可忽略不计。

假定仿真时间  $T=90\ 000s$ ,  $N=5$ ,  $\lambda_p=0\sim 0.5$  个数/s,  $\lambda_s=0.4$  个数/s,  $1/m_p=1/0.4s$ ,  $1/m_s=1/0.6s$ ,  $D=0.5s$  (延迟时间为服务时间 0.3 倍)和  $D=0$  (无延迟)下,以  $\lambda_p$  为变量查看阻塞率和掉话率的变化情况。

如图 16 和图 17 所示,在相同参数下有延迟和无延迟的阻塞率和掉话率随  $\lambda_p$  呈现相同的变化趋势,并且两者之间相差不到 0.5%。因此,可知频谱切换对系统性能的影响很小,可忽略不计。

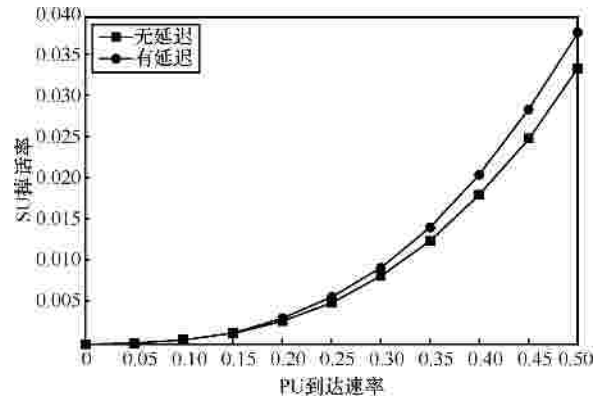


图 16 以  $\lambda_p$  为变量的阻塞率

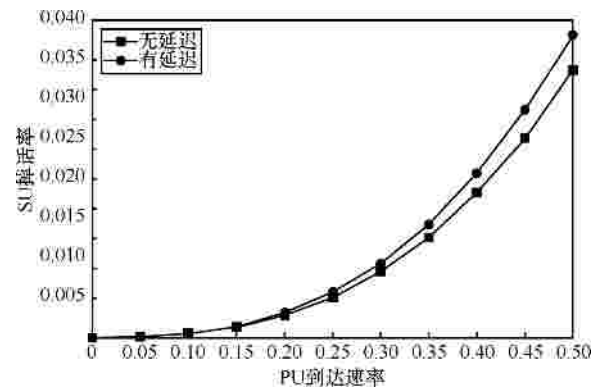


图 17 以  $\lambda_p$  为变量的掉话率

### 参考文献：

- [1] NTIA U S. Frequency allocations[EB/OL]. <http://www.nita.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf>, 2010.
- [2] MITOLA J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [3] FRANK H P F, MARCOS D K. Cooperative and Cognitive Networks: A Motivating Introduction[M]. Springer, Netherlands, 2007.
- [4] ARSHAD K, MOESSNER K. Collaborative spectrum sensing for cognitive radio[A]. Communications Workshops, 2009 ICC Workshops 2009. IEEE International Conference[C]. Dresden, Germany, 2009. 1-5
- [5] ZHANG L, ZHENG G X. Adaptive QoS-aware channel access scheme for cognitive radio networks[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2010, 6(3):172-182
- [6] EDWARD P C K. An Introduction to Stochastic Processes[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [7] WANG B B, ZHU J, LIU K. Primary-prioritized Markov approach for dynamic spectrum allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009,8(4):1854-1865 .
- [8] 周来秀, 贺建军. 感知无线网络中频谱检测与动态接入技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- ZHOU L X , HE J J. Research on Spectrum Sensing and Dynamic

- Spectrum Access in Cognitive Radio Networks[D]. Changs :Central South University, 2008.
- [9] TANG P, CHEW Y, ONG L. Performance of secondary radios in spectrum sharing with prioritized primary access[A]. Military Communication Conference[C]. New York, USA, 2006. 1-7.
- [10] KONDAREDDY Y R, ANDREWS N, AGRAWAL P. On the capacity of secondary users in a cognitive radio network[A]. Sarnoff Symposium[C]. Sarnoff Symposium, 2009. 1-5.
- [11] 刘红杰, 李书芳. 基于认知无线电的动态频谱管理理论及相关关键技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2009.
- LIU H J, LI F S. Research on Theory and Related Key Techniques in Dynamic Spectrum Management Based on Cognitive Radio[D]. Beijing :Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.
- [12] LIANG Y H, CHANG B J, HSIEL S J. Analytical model of QoS-based fast seamless handoff in IEEE 802.16j WiMAX networks[J]. Vehicular Technology, 2010, 59(7):3549-3561.
- [13] AHMED W, GAO J. Comments on "analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation"[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9):4488-4491.
- [14] HONG C P T, KANG H S, KOO I. An efficient radio resource management scheme for cognitive radio networks[J]. Advanced Intelligent Computing Theories and Applications, with Aspects of Artificial Intelligence Lecture Notes in Computer Science, 2010,6(21):376-383.
- [15] NEUTS M F. Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models: An Algorithmic Approach[M]. Baltimore: the John Hopkins University Press, 1981.41-66.
- [16] WALLACE V. The Solution of Quasi Birth and Death Processes Arising from Multiple Access Computer Systems[M]. Michigan: Ph.D. Dissertation, Systems Engineering Laboratory, 1969.
- [17] 田乃硕,岳德权.拟生灭过程与矩阵几何解[M].北京:科学出版社, 2002.
- TIAN N S, YUE D Q. Quasi-Birth-Death Process and the Matrix Geometric Solution[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [18] 赵彤宇, 张乃通. 基于事件触发的通信业务量仿真方法[J]. 通信技术, 2002, 11(25):70-72.
- ZHAO T Y, ZHANG N T. Communication traffic simulation method based on event-triggering[J]. Communications Technology, 2002, 11(25): 70-72.
- [19] AHUJA R K. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications[M]. Prentice Hall/Pearson, 1991.
- [20] 惠蕾放,李建东.无线网络中兼顾业务类型及公平性的无线资源共享问题研究[J]. 通信学报, 2011, 32(4):39-46.

HUI L F, LI J D. Radio resource sharing for wireless networks with traffic type and fairness consideration[J]. Journal on Communications, 2011, 32(4):39-46.

#### 作者简介:



林威(1982-),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学深圳研究生院博士后,主要研究方向为认知无线电、无线网络及应用。



付宇(1985-),女,黑龙江鹤岗人,哈尔滨工业大学深圳研究生院硕士生,主要研究方向为认知网络。



张钦宇(1972-),男,江苏扬州人,哈尔滨工业大学深圳研究生院教授,通信工程研究中心主任,主要研究方向为无线通信、生物医学电子、人工智能神经网络和认知无线电等。



王野(1983-),男,黑龙江佳木斯人,哈尔滨工业大学深圳研究生院博士生,主要研究方向为认知无线电和认知网络。



王胜(1986-),男,山东章丘人,哈尔滨工业大学深圳研究生院硕士生,主要研究方向为认知网络。