

# 应急通信系统的动态频谱接入及性能分析

胡 晗<sup>1</sup> 朱 琦<sup>1,2</sup> 朱洪波<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;  
2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 本文将传统的应急通信系统与认知无线电技术相结合, 在授权用户、应急用户和一般认知用户这三类用户共享频谱池的前提下, 提出了两种不同接入等级的认知无线电接入策略。在这两种接入策略下, 对系统动态频谱接入过程, 构建了基于三维马尔可夫链的分析模型。在该模型基础上推导了应急用户和其它认知用户的阻塞率及强制终止概率, 给出了它们的数学闭合表达式, 并对系统性能进行了分析。仿真结果表明: 三级优先级接入策略, 使得应急用户的阻塞率和强制终止概率得到了降低, 该策略的采用很大程度上提高了应急用户的性能。

**关键词:** 应急通信; 认知无线电; 动态频谱接入; 马尔可夫模型

**中图分类号:** TN929.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2010)06-0811-08

## Dynamic Spectrum Access and Performance Analysis for Emergency Communication System

HU Han<sup>1</sup> ZHU Qi<sup>1,2</sup> ZHU Hong-bo<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and  
Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. National Mobile Communications  
Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, traditional emergency communication system and cognitive radio technology are combined together. Two different-level access strategies are proposed on the premise that the primary user, the emergency user and the ordinary secondary user are sharing one spectrum pooling. A three-dimension Markov chain is developed to construct an analysis model for the dynamic spectrum access of the system under these two access strategies. On the basis of this model, blocking probability and forced termination probability of emergency user and the other cognitive user are deduced. Also, the closed-form expressions of the blocking probability and forced termination probability are given and the system performance is analyzed. Simulation results show that the strategy of three-level priority access can degrade the blocking probability and the forced termination probability of the emergency user. This strategy is able to significantly improve the performance of emergency system.

**Key words:** emergency communication; cognitive radio; dynamic spectrum access; Markov model

## 1 引言

无线应急通信系统[1]是用于紧急情况下局部区域内快速部署的智能通信系统。在自然灾害和突发事件发生时,往往需要稳定、高效的应急通信技术作为紧急情况下的通信保证。然而传统的无线应急通信网络

由于采用固定的频谱资源分配,每一种应急系统分配唯一的频谱带宽,各应急系统及其与它无线系统之间频谱不能共享,在灾难出现时,会有大量突发的无线应急业务,将会造成无线应急系统的频谱资源紧张,呼叫拥塞,甚至系统瘫痪。

认知无线电[2]允许频谱中的授权用户(即主用

收稿日期: 2009年4月14日; 修回日期: 无

基金项目: 国家自然科学基金(60772062), 国家重点基础研究发展计划资助(2007CB310607), 863项目(2009AA012241), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助课题(N200813)

户)将暂时不用的部分频段给其他未授权用户使用,一旦主用户需要时再归还给主用户使用,对有限的无线频谱资源进行高效地利用。基于认知无线电这一特点,已有研究者提出将认知无线电技术应用到应急通信网络中[3][4][5],当灾难发生,出现突发性应急业务时,允许应急用户共享其它无线系统的空闲频谱,这样可以大大缓解应急无线系统频谱资源缺乏的问题。但是,目前这方面的研究不多,还没有采用数学建模的方法对应急通信系统的性能进行分析。

近年来,马尔可夫链作为一种有效的系统分析模型被越来越多的研究者应用到认知无线电的研究中[6-8]。在文献[6]中,用马尔可夫模型分析了为主用户预留信道可以降低次用户的阻塞率和强制终止概率。文献[7]提出了为次用户预留信道作为它的切换信道,可大大降低次级用户的掉话率,并探论了最佳预留信道的个数。文献[8]用该模型分析了为次用户设置缓冲器后可提高次用户的性能。

本文基于认知无线电理论,在原有的主次用户的基础上,引入了另一类特殊的认知用户——应急用户,并提出了两种动态频谱接入策略,一种是将应急用户视作一般次级用户(下文中次用户都是指一般次级用户)的具有两级优先级的系统接入策略;另一种是视应急用户的优先级介于主用户和次用户之间的具有三级优先级的系统接入策略。另外,本文采用了三维马尔可夫链模型,分别构建了在这两种动态频谱接入策略下系统的动态频谱接入过程的分析模型,在该模型基础上推

导了应急用户和其它认知用户的阻塞率和强制终止概率,给出了它们的闭合数学表达式,对系统的性能进行了分析。数值仿真结果表明,采用三级优先级策略的认知无线电应急通信系统较之二级优先级的认知无线电应急通信系统,可有效降低应急用户的阻塞率及强制终止概率,很大程度地提高了应急用户的性能。

本文第二部分介绍了基于认知无线电的应急通信系统的系统模型。第三部分分析了基于两级优先级的动态频谱接入策略及该策略下系统的性能指标;第四部分分析了基于三级优先级的动态频谱接入策略及在该策略下系统的性能指标;第五部分给出了在这两种接入策略下的系统的性能仿真结果及分析;第六部分是本文的结束语。

## 2 系统模型

图1(a)给出了基于认知无线电的应急通信系统(简称认知应急通信系统)结构模型。应急用户与次级用户通过对频谱机会的检测来进行动态频谱接入,实现对无线资源的高效利用。在认知无线电中,通常将主用户与次用户共享的频带称作一个频谱池[9]。如图1(b)所示,假定一个频谱池包含 $N$ 条等宽的信道,在认知应急通信系统中我们假定有三类用户,即主用户(PU),次用户(SU),应急用户(EU)共享这个频谱池,为了简化分析,本文假设各类用户的每次呼叫业务均只占用其中的一条信道进行发送,并且三类用户处于单冲突域中。

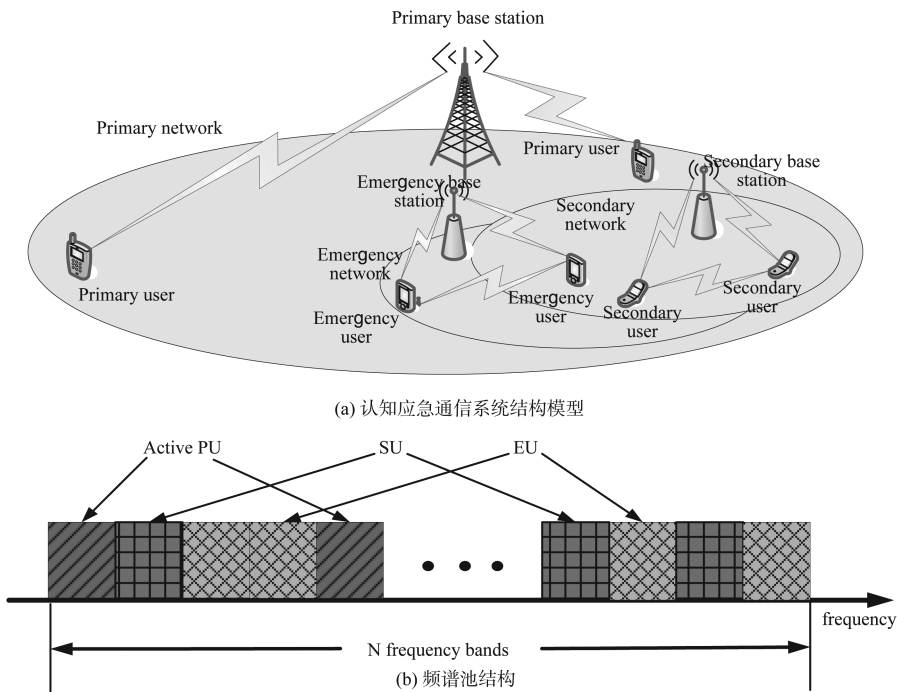


图1 系统模型

假定主用户、次用户和应急用户的呼叫到达过程相互独立且分别服从参数为  $\lambda_p$ 、 $\lambda_s$  和  $\lambda_e$  的泊松分布。主用户、次用户和应急用户每次呼叫所需的服务时间序列相互独立,且分别服从参数为  $\mu_p$ 、 $\mu_s$  和  $\mu_e$  的负指数分布。为了动态表示频谱池的占用过程,我们采用一个三维连续时间马尔可夫链模型进行分析。

连续时间的马尔可夫链是由系统状态和转移率进行表征的。本文定义的系统状态  $(i, j, k)$  中,  $i$  表示频谱池中当前被次用户占用的信道数,  $j$  表示频谱池中当前被主用户占用的信道数,  $k$  表示频谱池中当前被应急用户占用的信道数。则系统的状态空间  $\Gamma$  可表示为:

$$\Gamma = \{ (i, j, k) | 0 \leq i \leq N; 0 \leq j \leq N; 0 \leq k \leq N; 0 \leq i+j+k \leq N \} \quad (1)$$

我们定义指示函数  $l_{(i,j,k)}$ , 如果系统状态  $(i, j, k) \in \Gamma$ , 则  $l_{(i,j,k)} = 1$ ; 否则  $l_{(i,j,k)} = 0$ 。由  $\Gamma$  可知系统的状态总数  $K$  可表示为:  $K = (N+1)^3$

马尔可夫链中的转移过程是由转移率来确定的。为了求得系统各状态的稳态概率  $\pi_{(i,j,k)}$ , 需构造状态转移率矩阵  $Q$  [10]。  $Q$  矩阵中的元素  $q_{ij}$  表示表示从状态  $i$  转到状态  $j$  的转移速率。并且  $Q$  矩阵需满足每行元素之和等于为 0, 对角线元素为负或者是 0, 其它非对角线元素需大于或等于 0。且:

$$\sum_{j \neq i} q_{ij} < \infty, \text{ and } q_{ij} > 0 \quad (2)$$

$$q_{ii} = -\sum_{j \neq i} q_{ij} \quad (3)$$

由于系统稳态概率之和为 1, 则系统的稳态向量  $\pi = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K]$  ( $K$  表示状态集中所有状态的总数) 可由求解下列方程组得出:

$$\pi Q = 0 \text{ and } \pi e = 1 \quad (4)$$

### 3 基于两级优先级的动态频谱接入策略

#### 3.1 接入策略

在基于两级优先级的接入策略下, 我们假定主用户具有最高的接入优先级, 次用户和应急用户具有同等的第二等级的接入优先级。在这种情况下, 次用户与应急用户只有在频谱池中有空闲信道且在不影响主用户业务的情况下才能接入。当频谱池中不存在空闲信道, 主用户呼叫到达来临时, 次用户或者应急用户则需要终止某个信道上正在进行的呼叫业务, 退让信道给主用户使用。

频谱池中信道动态分配机制如下:

1) SU 呼叫请求: 对于一个 SU 呼叫请求, 如果在频谱池中还存在空闲的信道, 那么系统将该 SU 呼叫请求接入其中一个空闲信道。但是, 如果此时所有的信道都处于忙的状态, 那么 SU 的呼叫请求将会被阻塞。

2) SU 呼叫完成: 当一个 SU 呼叫完成之后, 系统将自动释放该信道。

3) EU 呼叫请求: 同 SU 类似, 对于一个 EU 呼叫请求, 如果在频谱池中还存在空闲的信道, 那么系统将该 EU 呼叫请求接入其中一个空闲信道。但是, 如果此时所用的信道都处于忙的状态, 那么 EU 的呼叫请求将会被阻塞。

4) EU 呼叫完成: 当一个 EU 呼叫完成之后, 系统将自动释放该信道。

5) PU 呼叫请求: 由于 PU 较之 SU 和 EU, 具有更高的接入优先级, 则 SU 与 EU 的接入状态, 对 PU 而言可视作是完全透明的。对于每一个 PU 呼叫请求, 如果频谱池中还存在空闲信道, 那么系统将该 PU 呼叫请求接入, 而无需终止 SU 或 EU 正在进行的呼叫业务; 但是如果此时频谱池中不存在空闲的信道, 那么系统将会终止一个正在进行服务的 SU 或 PU 的呼叫业务, 空出信道供 PU 使用; 另外, 当频谱池已被 PU 占满, 若此时再来一个 PU 呼叫请求, 则该 PU 的呼叫请求将会被阻塞。

6) PU 呼叫完成: 当一个 PU 呼叫完成之后, 系统将自动释放该信道。

该策略的状态转移图如图 2 所示。

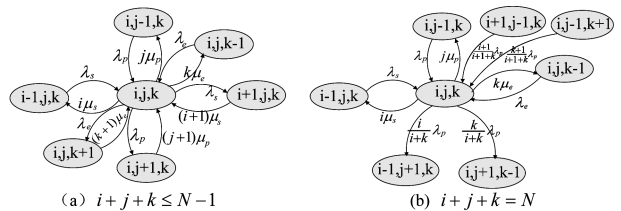


图 2 二级优先级策略下的系统状态转移图

状态集  $\Gamma$  中, 满足  $i+j+k \leq N-1$  的状态转移图如图 2(a) 所示, 并可列此种情况下的状态平衡方程式为:

$$\begin{aligned} & (\lambda_s + i\mu_s + \lambda_p + j\mu_p + \lambda_e + k\mu_e) \pi(i, j, k) \\ & = \lambda_s \pi(i-1, j, k) + (i+1)\mu_s \pi(i+1, j, k) + \lambda_p \pi(i, j-1, k) \\ & \quad + (j+1)\mu_p \pi(i, j+1, k) + (k+1)\mu_e \pi(i, j, k+1) + \\ & \quad \lambda_e \pi(i, j, k-1) \end{aligned} \quad (5)$$

状态满足  $i+j+k = N$  的状态转移图如图 2(b) 所示, 并可列此种情况下的状态平衡方程式为:

$$\begin{aligned} & (i\mu_s + k\mu_e + j\mu_p + \frac{i}{i+k} \lambda_p l_{i-1, j+1, k} + \frac{k}{i+k} \lambda_p l_{i, j+1, k-1}) \pi(i, j, k) \\ & = \lambda_s \pi(i-1, j, k) + \lambda_e \pi(i, j, k-1) + \lambda_p \pi(i, j-1, k) \\ & \quad + \frac{i+1}{i+1+k} \lambda_p l_{i+1, j-1, k} \pi(i+1, j-1, k) + \\ & \quad \frac{k+1}{i+1+k} \lambda_p l_{i, j-1, k+1} \pi(i, j-1, k+1) \end{aligned} \quad (6)$$

图1(b)中出现的特殊状态转移是由于主用户的到达使得次用户或者应急用户不得不空出信道供主用户使用。

另外,状态集中所有状态的稳态概率和应为1,即:

$$\sum_{(i,j,k) \in \Gamma} \pi(i,j,k) = 1 \quad (7)$$

联立式(5)~(7),则由线性方程组可解出状态集中所有状态的稳态概率。我们可以根据上述线性方程组构造状态率矩阵  $\mathbf{Q}$ , 如第二部分的方法求解系统状态的稳态概率。

### 3.2 系统性能

衡量认知无线电系统的主要性能指标有次用户的阻塞率  $P_{b,s}$  和强制终止概率  $P_{f_t,s}$ 。本文,引入了应急用户后,我们还需要讨论应急用户(EU)的阻塞率  $P_{b,e}$  及强制终止概率  $P_{f_t,e}$ 。 $P_b$  定义为被拒绝的SU用户呼叫次数占其总呼叫次数的百分比; $P_{b,e}$  定义为被拒绝的EU用户呼叫次数占其总呼叫次数的百分比; $P_{f_t,s}$  定义为被系统接纳的SU用户呼叫在其通话途中被强制中断的概率; $P_{f_t,e}$  定义为被系统接纳的EU用户呼叫在其通话途中被强制中断的概率。

在基于两级优先级接入策略下,当所有的信道都被占据时,若此时再来一个SU呼叫请求或EU呼叫请求时,则该SU或EU的呼叫请求将被阻塞,根据Markov链可得出SU阻塞率和EU的阻塞率的解析表达式分别为:

$$P_{b,s} = \sum_{\{(i,j,k) \in \Gamma | i+j+k=N\}} \pi(i,j,k) \quad (8)$$

$$P_{b,e} = \sum_{\{(i,j,k) \in \Gamma | i+j+k=N\}} \pi(i,j,k) \quad (9)$$

对于已存频谱池中的SU或EU,当PU的呼叫请求到达时,且当系统中没有其它空闲信道可被PU使用时,SU或EU将会终止某一信道上正在进行的呼叫业务,让出该信道供PU使用。在这种情况下,SU或者EU受到干扰的概率  $P_{int,s}$ ,  $P_{int,e}$ , 可分别表示为:

$$P_{int,s} = \sum_{\substack{\{(i,j,k) \in \Gamma | i+j+k=N \\ \text{且 } k>0\}}} \frac{1}{i} \cdot \frac{i}{i+k} \pi(i,j,k) \quad (10)$$

$$P_{int,e} = \sum_{\substack{\{(i,j,k) \in \Gamma | i+j+k=N \\ \text{且 } k>0\}}} \frac{1}{k} \cdot \frac{k}{i+k} \pi(i,j,k) \quad (11)$$

考虑到所有可能状态,SU或EU的干扰概率  $P_{int,s}$ ,  $P_{int,e}$ , 可表示为:

$$P_{int,s} = \frac{P_{int,s}}{\sum_{\{(i,j,k) \in \Gamma | i>0\}} \pi(i,j,k)} \quad (12)$$

$$P_{int,e} = \frac{P_{int,e}}{\sum_{\{(i,j,k) \in \Gamma | k>0\}} \pi(i,j,k)} \quad (13)$$

在一个SU或EU的服务时间里,一些PU的呼叫请求可能会相继到达。对于每一个PU的呼叫到达,

SU或EU将会分别以概率  $P_{int,s}$  或  $P_{int,e}$  被干扰。以SU为例,首先推导SU的强制终止概率  $P_{f_t,s}$ 。

设  $t_s$  表示一个SU呼叫从服务开始到服务结束的时间间隔。 $t_{p,1}$  表示该SU呼叫从服务开始到服务过程中出现第一个PU呼叫到达的时间间隔。 $t_{p,r}$  ( $r=2,3,\dots$ ) 表示从第一个PU呼叫到达开始到第  $r$  个PU呼叫到达时的时间间隔。那么,  $t_{p,r}$  服从均值为  $1/\lambda_p$  的指数分布。则SU的强制终止概率可表示为:

$$P_{f_t,s} = \sum_{r=1}^{\infty} \Pr(t_s > \sum_{u=1}^r t_{p,u}) (1 - P_{int,s})^{r-1} P_{int,s} \quad (14)$$

设  $\xi = \sum_{u=1}^r t_{p,u}$ , 则随机变量  $\xi$  服从于参数为  $\lambda_p$  和  $r$  的爱尔兰分布[10]。它的概率密度函数(pdf)  $f_{\xi}(t)$  和其对应的拉普拉斯变换  $f_{\xi}^*(s)$  分别表示为:

$$f_{\xi}(t) = \frac{\lambda_p (\lambda_p t)^{r-1}}{(r-1)!} e^{-\lambda_p t} \quad (15)$$

$$f_{\xi}^*(s) = \left( \frac{\lambda_p}{s + \lambda_p} \right)^r \quad (16)$$

$$\Pr(t_s > \sum_{u=1}^r t_{p,u}) = \int_0^{\infty} f_{\xi}(t) [1 - F_{\xi}(t)] dt = \left( \frac{\lambda_p}{\mu_s + \lambda_p} \right)^r \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)中,则有:

$$P_{f_t,s} = \sum_{r=1}^{\infty} \left( \frac{\lambda_p}{\mu_s + \lambda_p} \right)^r (1 - P_{int,s})^{r-1} P_{int,s} = \frac{\lambda_p P_{int,s}}{\mu_s + \lambda_p P_{int,s}} \quad (18)$$

同理,可以得出在两级优先级接入策略中,应急用户(EU)的强制终止概率为:

$$P_{f_t,e} = \frac{\lambda_p P_{int,e}}{\mu_e + \lambda_p P_{int,e}} \quad (19)$$

## 4 基于三级优先级的动态频谱接入策略

### 4.1 接入策略

在认知应急通信系统中,由于应急用户呼叫的特殊性和紧急性,我们将其视作一种特殊的认知用户。在基于三级优先级接入策略中,我们给主用户(PU),应急用户(EU),次用户(SU)分配的优先级如下:  $PU > EU > SU$ 。则系统的频谱接入机制可描述如下:

1) SU呼叫请求:对于一个SU呼叫请求,如果在频谱池中还存在空闲的信道,那么系统将该SU呼叫请求接入其中一个空闲信道。但是,如果此时所有的信道都处于忙的状态,那么SU的呼叫请求将会被阻塞。

2) SU呼叫完成:当一个SU呼叫完成之后,系统将会自动释放该信道。

3) EU呼叫请求:由于EU的接入优先级高于SU,则SU的接入状态对EU而言可视作透明的。对于一个EU呼叫请求,当频谱池中还存在空闲的信道,那么系统将该EU呼叫请求接入其中一个空闲信道;如果此

时频谱池中不存在空闲的信道,并且有 SU 的呼叫业务占用信道时,那么系统讲终止某个信道上的正在接受服务的 SU 的呼叫业务,空出信道使得 EU 呼叫接入;但是,如果频谱池中不存在空闲信道且都被 PU 或 EU 业务占据时,如果此时再来一个 EU 呼叫请求,则该 EU 的呼叫请求将会被阻塞。

4) EU 呼叫完成:当一个 EU 呼叫完成之后,系统将会自动释放该信道。

5) PU 呼叫请求:由于 PU 较之 SU 和 EU,具有更高的接入优先级,则 SU 与 EU 的接入状态,对 PU 而言可视为是完全透明的。对于每一个 PU 呼叫请求,如果频谱池中还有空闲的信道,那么系统将该 PU 呼叫请求接入该空闲信道,而无需终止 SU 或 EU 正在进行的呼叫服务。如果此时频谱池中不存在空闲信道,那么首先由 SU 终止一个信道的呼叫业务,以供 PU 的呼叫请求进行使用。当所有的 SU 服务都被终止完时,如果还不能满足 PU 的需求,则终止 EU 的呼叫服务,以满足 PU 的需求。另外,当频谱池已被 PU 占满,若此时再来一个 PU 呼叫请求,则该 PU 的呼叫请求将会被阻塞。

6) PU 呼叫完成:当一个 PU 呼叫完成之后,系统将自动释放该信道。

上述机制的状态转移图如图 3 所示。

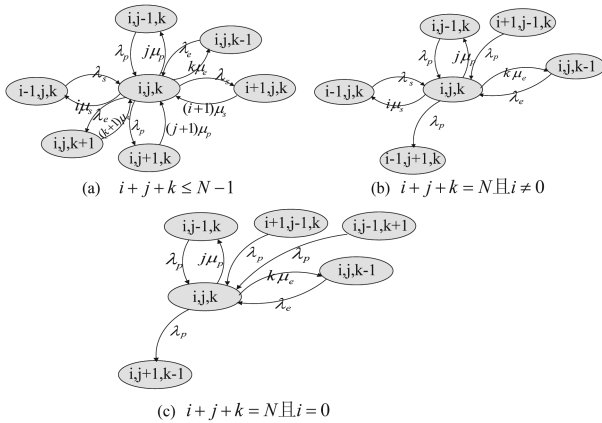


图 3 三级优先级策略下的系统状态转移图

状态集  $\Gamma$  中,满足  $i+j+k \leq N-1$  的状态转移图如图 3(a) 所示,并可列此种情况下的状态平衡方程式为:

$$\begin{aligned}
 & (\lambda_s + i\mu_s + \lambda_p + j\mu_p + \lambda_e + k\mu_e) \pi(i, j, k) \\
 = & \lambda_s \pi(i-1, j, k) + (i+1)\mu_s \pi(i+1, j, k) + \lambda_p \pi(i, j-1, k) + \\
 & (j+1)\mu_p \pi(i, j+1, k) + (k+1)\mu_e \pi(i, j, k+1) + \lambda_e \pi(i, j, k-1)
 \end{aligned} \tag{20}$$

状态集  $\Gamma$  中,满足  $i+j+k=N$  且  $i \neq 0$  的状态转移图如图 3(b) 所示,并可列此种情况下的状态平衡方程式为:

$$(i\mu_s + k\mu_e + j\mu_p + \lambda_p l_{i,j+1,k-1}) \pi(i, j, k)$$

$$\begin{aligned}
 = & \lambda_s \pi(i-1, j, k) + \lambda_e \pi(i, j, k-1) + \lambda_p l_{i+1,j-1,k} \\
 & \pi(i+1, j-1, k) + \lambda_p \pi(i, j-1, k)
 \end{aligned} \tag{21}$$

状态集  $\Gamma$  中,状态满足  $i+j+k=N$  且  $i=0$  的状态转移图如图 3(c) 所示,并可列此种情况下的状态平衡方程式为:

$$\begin{aligned}
 & (k\mu_e + j\mu_p + \lambda_p l_{i,j+1,k-1}) \pi(i, j, k) \\
 = & \lambda_e \pi(i, j, k-1) + \lambda_p \pi(i, j-1, k) + \lambda_p l_{i+1,j-1,k} \\
 & \pi(i+1, j-1, k) + \lambda_p l_{i,j-1,k-1} \pi(i, j-1, k-1)
 \end{aligned} \tag{22}$$

另外,状态集中所有状态的稳态概率和应为 1,即:

$$\sum_{(i,j,k) \in \Gamma} \pi(i, j, k) = 1 \tag{23}$$

联立式(20)~(23),解得状态集  $\Gamma$  各状态的稳态概率。具体解法同第三部分。

### 4.2 系统性能

在三级优先级的认知应急通信系统中,次级用户的阻塞率  $P_{b,s}$  的定义与两级优先级的认知应急通信系统中的定义是一致的。但是由于三级优先级系统中,EU 的优先级要高于 SU,所以仅当系统中所有信道处于忙状态且没有被 SU 占用时,新到达的 EU 的呼叫请求才会被阻塞。则  $P_{b,s}, P_{be}$  分别表示为:

$$P_{b,s} = \sum_{\{(i,j,k) \in \Gamma | i+j+k=N\}} \pi(i, j, k) \tag{24}$$

$$P_{be} = \sum_{\{(i,j,k) \in \Gamma | j+k=N\}} \pi(i, j, k) \tag{25}$$

下面先分析三级优先级策略下 SU 的强制终止概率  $P_{fs}$

由于 SU 的接入优先级最低,那么当系统没有空闲信道时,EU 呼叫到达或是 PU 呼叫到达都会使得某一信道上正在接受服务的 SU 的呼叫将会被终止。

由于 PU 或 EU 的呼叫到达,使 SU 被受到干扰的概率  $P_{int,s}$  表示为:

$$P_{int,s} = \sum_{\substack{\{(i,j,k) \in \Gamma | i+j+k=N \\ l_i > 0\}}} \frac{1}{l_i} \cdot \pi(i, j, k) \tag{26}$$

考虑到所有可能状态, SU 受到 PU 或 EU 的干扰概率  $P_{int,s}$ ,可表示为:

$$P_{int,s} = \frac{P_{int,s}}{\sum_{\{(i,j,k) \in \Gamma | l_i > 0\}} \pi(i, j, k)} \tag{27}$$

类似于上一节的推导分析,则由于 PU 呼叫到达使得 SU 业务的强制终止概率为:

$$P_{f1s} = \frac{\lambda_p P_{int,s}}{\mu_s + \lambda_p P_{int,s}} \tag{28}$$

同理由于 EU 呼叫到达使得 SU 业务的强制终止概率可表示为:

$$P_{f2s} = \frac{\lambda_e P_{int,s}}{\mu_s + \lambda_e P_{int,s}} \tag{29}$$

综合这两种情况考虑, SU 的强制终止概率  $P_{fs}$  表示

为:

$$P_{f1s} = \frac{\lambda_p}{\lambda_e + \lambda_p} P_{f1s} + \frac{\lambda}{\lambda_e + \lambda_p} P_{f1s} \quad (30)$$

下面分析三级优先级策略下 EU 的强制终止概率  $P_{fte}$  :

在三级优先级动态接入系统中,当系统中没有空闲信道,PU 呼叫请求到达时,那么 SU 先退让信道,当所有 SU 退让完了之后 EU 再退让。则处于这种情况下 EU 受到干扰的概率为:

$$P_{intel} = \sum_{\substack{(i,j,k) \in \Gamma | j+k=N \\ \text{且 } k>0}} \frac{1}{k} \cdot \pi(i,j,k) \quad (31)$$

考虑到所有可能状态,EU 受到 PU 的干扰概率  $P_{inte}$ ,可表示为:

$$P_{inte} = \frac{P_{intel}}{\sum_{\substack{(i,j,k) \in \Gamma | k>0}} \pi(i,j,k)} \quad (32)$$

同上一节的推导,则 EU 的强制终止概率为:

$$P_{fte} = \frac{\lambda_p P_{inte}}{\mu_e + \lambda_p P_{inte}} \quad (33)$$

## 5 仿真及性能分析

下面我们首先对应急用户和一般次用户的阻塞率和强制终止概率分别进行仿真分析,仿真中假设频谱池信道数量  $N=5$ ,主用户业务离开率  $\mu_p=0.06$ ,次级用户业务离开率  $\mu_s=0.82$ ,应急用户业务离开率  $\mu_e=0.2$ , $\lambda_e$  和  $\lambda_s$  分别为应急用户业务到达率和次级用户业务到达率,主用户业务到达率  $\lambda_p=0.2\lambda_e$ 。

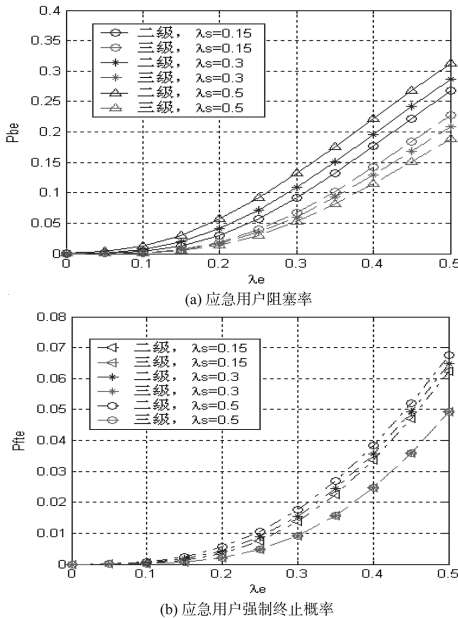


图4  $N=5, \mu_p=0.06, \mu_s=0.82, \mu_e=0.2, \lambda_p=0.2\lambda_e$  时两种动态频谱接入策略的应急用户性能比较

由图4可知,EU的阻塞率  $P_{be}$  和强制概率  $P_{fte}$  随着 ER 的到达率  $\lambda_e$  增加而增大,进一步得出认知应急通信系统中采取三级优先级策略,明显提高 ER 的性能,有效降低了 EU 的阻塞率  $P_{be}$  和强制终止概率  $P_{fte}$ 。该结果与本文前面几部分的分析是一致的。同时还比较了  $\lambda_s$  在分别取 0.15、0.3、0.5 时两种策略下的性能,由图4(a)可知, $\lambda_s$  取值越大,二级策略下的  $P_{be}$  越大;三级策略下的  $P_{be}$  反而越小。这是因为,二级策略下,EU 与 SU 具有相同的优先级,单位时间内 SU 呼叫到达数越多,SU 占用信道的机率越高,阻止 EU 接入信道的机率也会越高,从而 EU 的阻塞率会增加;三级策略下,EU 的优先级高于 SU,如果单位时间内的 SU 呼叫到达越多,则 SU 占用信道的机率越高,从而当 EU 的呼叫到达时,SU 退让信道给 EU 使用的机率也会增加,因此,EU 的阻塞率反而降低。由图4(b)可知, $\lambda_s$  取值越大,二级策略下的  $P_{fte}$  越大;三级策略下的  $P_{fte}$  几乎不变。这是因为二级策略下,如果单位时间到达的 SU 越多,那么频谱池空闲的信道将会越少,如果 PU 达到时,则 EU 或 SU 的强制终止概率都会略有增加;三级策略下,EU 的优先级高于 SU,如果 PU 到达,首先被强制中断的是 SU,因此 EU 的强制终止概率并不会随着单位时间的 SU 呼叫到达数的增加而增加。

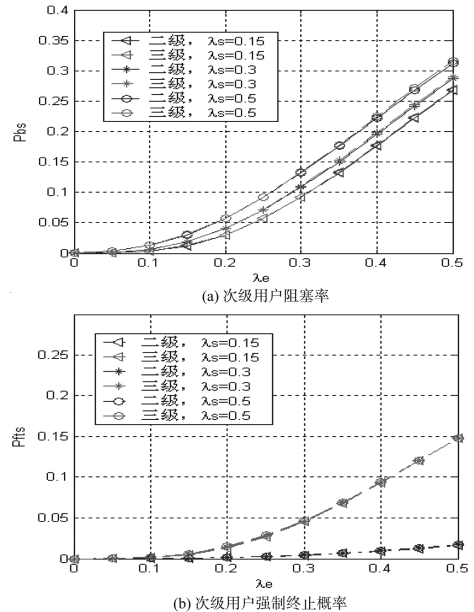


图5  $N=5, \mu_p=0.06, \mu_s=0.82, \mu_e=0.2, \lambda_p=0.2\lambda_e$  时两种动态频谱接入策略的次级用户性能比较

由图5可见,次级用户SU的阻塞率 $P_{bs}$ 和强制概率 $P_{f_{ts}}$ 随着EU用户的到达率 $\lambda$ 的增加而增大,并且采取三级优先级接入策略较之二级优先级接入策略,次级用户SU的阻塞率 $P_{bs}$ 几乎不变。但是次级用户SU的强制终止概率 $P_{f_{ts}}$ 会明显增大。该现象是由于三级优先级接入策略下,SU用户的优先级最低,当PU或EU用户到达时,都有可能使得SU的呼叫服务强制终止。同时还比较了 $\lambda_s$ 在分别取0.15、0.3、0.5时两种策略下的性能。由图5可知,二、三级策略下, $P_{bs}$ 会随着 $\lambda_s$ 的取值增加而明显增大, $P_{f_{ts}}$ 随着 $\lambda_s$ 取值增加几乎不变。这是因为,无论二级策略或是三级策略,SU的强制终止概率与自身的达到率关系不大。

下面我们分析频谱池中共享信道数对应急用户性能的影响,设 $\lambda_s=0.15$ ,信道数 $N$ 分别取3、5、7、9四种。由图6可以看出,共享信道数的减少后,应急用户的阻塞率 $P_{be}$ 和强制终止概率 $P_{fte}$ 会随着到达率 $\lambda$ 的增加而急剧上升;反之,共享信道数的增加后, $P_{be}$ 和 $P_{fte}$ 随着 $\lambda$ 的增加而缓慢上升,当 $N$ 增加到一定数目(例如 $N=9$ )时, $P_{be}$ 和 $P_{fte}$ 几乎不随 $\lambda$ 变化而变化,上升曲线的斜率近似为零。

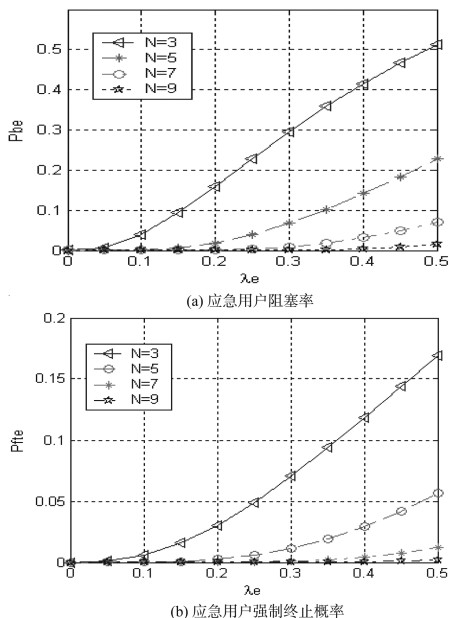


图6  $\mu_p=0.06, \mu_s=0.82, \mu_e=0.2, \lambda_s=0.15, \lambda_p=0.2$  时三级优先级策略下共享信道数 $N$ 取3、5、7、9时应急用户性能比较

图7为三级接入策略下,主用户与应急用户到达率之比 $\lambda_p/\lambda$ 的不同对应急用户性能的影响。由图7

可见,应急用户的阻塞率 $P_{be}$ 和强制终止概率 $P_{fte}$ 会随着 $\lambda_p/\lambda$ 的增大而增大,这是因为在应急用户到达率 $\lambda$ 不变的情况下,随着主用户的到达率 $\lambda_p$ 的升高,即单位时间里的主用户呼叫请求增多,这时总的业务量增大,会使得应急用户的阻塞率 $P_{be}$ 及强制终止概率 $P_{fte}$ 增大。

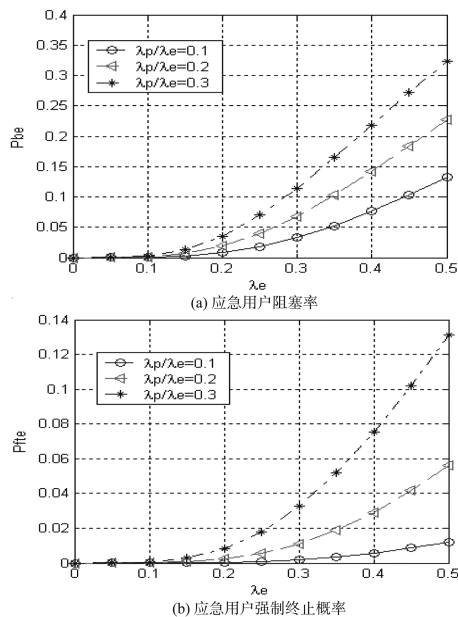


图7  $N=5, \mu_p=0.06, \mu_s=0.82, \mu_e=0.2, \lambda_s=0.15$  时三级优先级策略下 $\lambda_p/\lambda_e$ 取值不同时应急用户性能比较

## 6 结束语

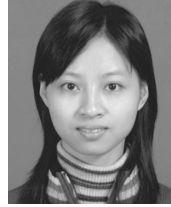
本文的主要工作可分为两部分:(1)在认知应急通信系统中,提出了两种基于不同优先级的动态频谱接入策略,并用马尔可夫链构建了对这两种策略的分析模型;(2)在马尔可夫模型的基础上分别推导了在这两种策略下应急用户与次级用户的阻塞概率、强制终止概率等系统性能指标并对其进行仿真。仿真结果表明,采用三级优先级的接入策略较之二级优先级接入策略,可有效降低应急用户的阻塞率和强制终止概率,这与应急通信系统中提高应急用户性能的目的是一致的。

## 参考文献

- [1] Guvenc I, Kozat U C, and Moo-Ryong Jeong, et al. . Reliable multicast and broadcast services in relay-based emergency communications [ J ] . Wireless communication IEEE, Jun. 2008, 15(3) :40-47.
- [2] Gabriella di Benedetto M, Yingbo Hua and Kaiser, T, et. al. . Cognitive Radio Technology[ J ] . Signal Processing

- Magazine IEEE, Nov. 2008, 25(6): 10-198.
- [3] Gorcin, A, Arslan, H. Public Safety and Emergency Case Communications: Opportunities from the Aspect of Cognitive Radio[C]. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on, Chicago, USA, 14-17 Oct. 2008:1-10.
- [4] Sherman, M, Mody, A N, and Martinez, R, et al. . IEEE Standards Supporting Cognitive Radio and Networks, Dynamic Spectrum Access, and Coexistence [J]. Communications Magazine, IEEE, July 2008, 46(7):72-79.
- [5] Majid S, Ahmed K. Post-Disaster Communications: A Cognitive Agent Approach[C]. Seventh International Conference on Networking, Cancun, Mexico, 13-18 April 2008:645-650.
- [6] Tang P K, Chew Y H, and Ong L C, et al. . Performance of Secondary Radios in Spectrum Sharing with Prioritized Primary Access [C]. Military Communications Conference, 2006, Washington, D C., USA, 23-25 Oct. 2006:1-7.
- [7] Xiaorong Zhu, Lianfeng Shen, and Yum T-S P. Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation [J]. IEEE Communication Letters, Apr. 2007, 11(4):304-306.
- [8] Yan Zhang. Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Wireless Networks[C]. IEEE International Conference on communications ICC'08, Beijing, China, 19-23 May 2008; 4927-4932.
- [9] Haddad M, Hayar A and Debbah M. Spectral efficiency of spectrum-pooling systems[J]. Communications IET, July 2008, 2(6):733-741.
- [10] 刘次华. 随机过程[M]. 第二版. 武汉:华中科技大学出版社, 2001:42-89.
- [11] N L Johnson. Continuous Univariate Distributions-1[M]. New York: Wiley, 1970.

### 作者简介



胡 晗(1985-),女,湖北黄冈人,南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室硕士研究生。目前主要研究方向为移动通信与无线技术。

E-mail:huhan68@163.com



朱 琦(1965-),女,江苏苏州人,南京邮电大学通信与信息工程学院教授,主要研究领域包括:下一代移动通信技术、宽带无线接入技术、OFDM 技术、信道和信源编码技术和无线资源动态分配技术等。

E-mail:zhuqi@njupt.edu.cn



朱洪波(1956-),男,江苏扬州人,南京邮电大学教授,博士生导师;现任南京邮电大学副校长。研究方向为无线通信与电磁兼容、移动通信与宽带无线技术。

E-mail:zhuhb@njupt.edu.cn