

## 机会频谱接入系统的切换请求排队机制及性能分析

郭彩丽 曾志民 冯春燕 刘琦  
(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

**摘要:** 针对非实时业务的特点, 该文提出了机会频谱接入系统的两种切换请求排队方案, 并采用二维 Markov 模型对其性能进行了建模分析, 得到了呼叫阻塞率、强制中断率、信道利用率等系统性能关键参数的解析结果。数值结果分析表明, 提出的两种切换请求排队方案是降低系统强制中断率的有效方法, 且可克服切换信道预留机制阻塞率高、信道利用率低的缺点, 信道利用率最多可提高 26%。仿真实验验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 认知无线电; 机会频谱接入; 切换请求排队; Markov 模型; 强制中断率

中图分类号: TN915.01

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1505-04

## Performance Analysis of Handoff Queuing for Opportunistic Spectrum Access System

Guo Cai-li Zeng Zhi-min Feng Chun-yan Liu Qi  
(School of Information and Communication Engineering,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Two handoff queuing schemes of Opportunistic Spectrum Access (OSA) system are proposed for non-real-time services. For each scheme, a two-dimensional Markov chain analysis is presented and the blocking probability, force termination probability and bandwidth utilization are obtained. Numerical results show that the handoff queuing schemes can greatly reduce forced termination probability and the bandwidth utilization can be improved by 26% compared to the handoff channel reservation scheme with high blocking probability and low bandwidth utilization. The simulation results are observed to match closely with the numerical analysis.

**Key words:** Cognitive Radio (CR); Opportunistic Spectrum Access (OSA); Handoff queuing; Markov model; Force termination probability

### 1 引言

基于认知无线电(Cognitive Radio, CR)的机会频谱接入(Opportunistic Spectrum Access, OSA)系统与其他系统最大的不同是传输的媒介——无线频谱不是自有的, 而是机会式地利用授权频谱进行通信。因此如何保证 CR 用户的服务质量(Quality of Service, QoS)要求是 OSA 系统走向实用面临的关键问题<sup>[1-3]</sup>。

在 OSA 系统中, 授权用户接入频谱具有优先权, 且可强占 CR 用户正在使用的频谱。文献[4,5]将这种 CR 用户与授权用户接入频谱的过程描述为具有被强占优先特性的排队问题, 仿真分析表明仅在授权用户业务量强度很小时, OSA 系统才实际可用, 否则很高的通话强制中断率难以保证 CR 用户的 QoS 要求。为降低强制中断率同时满足不对授权用户做任何改动, 可行的方法是 CR 用户被强占信道后, 进行频谱切换以维持通信链路不被立即中断。目前频谱切换机制的研究仅有 IEEE 802.22 标准草案中提出的备份信道方

案<sup>[6]</sup>, 该方案为授权用户出现时 CR 用户能快速切换, 预留一定的备份信道, 本质上是一种切换信道预留机制。我们的分析表明这种机制可使强制中断率最大降低 48%, 但由于一些信道预留给切换呼叫, 引起了信道利用率的下降。

实际应用中, 不同类型的业务可以采取不同的切换机制。文献[6]中的切换信道预留机制主要适用于时延要求比较高的实时业务。相比而言, 大部分数据业务对实时性的要求并不高。因此完全有可能将切换呼叫先排队缓存, 等系统有空闲信道后再接入。本文针对非实时业务设计了两种切换请求排队方案, 并采用二维 Markov 模型进行了建模分析。

### 2 切换请求排队机制描述

设 CR 用户与授权用户共享频谱池的总带宽为  $B$ , 均匀划分为相互正交的若干个信道。设每个信道具有相同的带宽  $b$ , 每个呼叫占用一个信道, 则每个频谱池最多能承载的呼叫数为  $m = B/b$  个。切换请求排队机制允许被授权用户强占的 CR 呼叫发起切换请求。此时若频谱池还有空闲信道, 该 CR 呼叫立即接入空闲信道, 否则允许 CR 切换呼叫请求到缓存区排队等待, 队列遵循先到先服务排队规则。队列中的呼叫在不超过所容忍的时延期间, 即最大排队时间  $\tau$  内, 若

能获得空闲信道则接入继续通信, 否则呼叫中断。本文设计两种切换请求排队方案, 如图1所示。

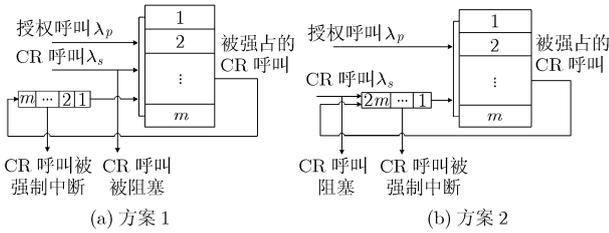


图1 两种切换请求排队方案示意图

**方案1** 仅允许CR切换呼叫请求排队等待。由于CR用户最多可能被强占  $m$  个信道, 缓存区容量设为  $m$ 。当一个CR新呼到达时, 若没有空闲信道则发生呼叫阻塞; 当一个CR切换呼叫请求到达时, 若没有空闲信道, 该呼叫请求将在缓存区中排队等待。如果等待时间超过  $\tau$  时, 仍未能获得信道, 那么该CR呼叫将离开缓存区, 呼叫发生强制中断。

**方案2** CR切换呼叫请求和CR新呼均允许排队等待, 此时, 缓存区不仅需要容纳最多被强占的  $m$  个CR呼叫, 同时还应允许CR新呼缓存, 这里取缓存区容量为  $2m$  为例进行分析。当CR新呼和CR切换呼叫到达时, 若没有空闲信道可接入, 则均到缓存区中排队等待。如果等待时间超过  $\tau$ , 仍未能获得信道, 那么CR新呼和CR切换呼叫请求将离开缓存区, 呼叫发生强制中断。

### 3 方案1性能分析

#### 3.1 分析模型

设授权呼叫和CR新呼到达过程相互独立且均为泊松过程, 到达率分别为  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$ 。授权和CR呼叫持续时间均服从负指数分布, 平均呼叫持续时长分别为  $1/\mu_p$  和  $1/\mu_s$ 。则授权和CR业务量强度分别为  $\rho_p = \lambda_p/m\mu_p$  和  $\rho_s = \lambda_s/m\mu_s$ 。设  $\tau$  服从负指数分布, 平均最大排队时长为  $1/r_d$ 。

设任意时刻  $t$ , 系统中正在服务的授权呼叫数为  $P(t)$ , 系统内的CR呼叫数为  $S(t)$  (包括在服务的呼叫数和缓存里排队的呼叫数)。令  $N(t) = \{P(t), S(t)\}$ ,  $N(t)$  为二维的拟生灭(Quasi-Birth-and-Death, QBD)过程<sup>[7]</sup>。定义  $R_{(i,j) \rightarrow (i+1,j)}$  为状态  $(i, j)$  到状态  $(i+1, j)$  的转移率, 则相邻状态转移率如下:

$$R_{(i,j) \rightarrow (i+1,j)} = \lambda_p, \quad 0 \leq i \leq m-1, \quad 0 \leq j \leq m \quad (1)$$

$$R_{(i,j) \rightarrow (i-1,j)} = i\mu_p, \quad 1 \leq i \leq m, \quad 0 \leq j \leq m \quad (2)$$

$$R_{(i,j) \rightarrow (i,j+1)} = \begin{cases} \lambda_s, & 0 \leq i \leq m-1, \quad 0 \leq j \leq m-1-i \\ 0, & 0 \leq i \leq m, \quad m-i \leq j \leq m \end{cases} \quad (3)$$

$$R_{(i,j) \rightarrow (i,j-1)} = \begin{cases} j\mu_s, & 0 \leq i \leq m-1, \quad 1 \leq j \leq m-i \\ (m-i)\mu_s + (j-m+i)r_d, & 1 \leq i \leq m-1, \quad m+1-i \leq j \leq m \\ jr_d, & i = m, \quad 1 \leq j \leq m \end{cases} \quad (4)$$

对于QBD过程  $N(t)$ , 状态空间有限, 稳态概率必然存在。定义  $\pi(i, j)$  为稳态概率, 稳态概率向量为  $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_m)$ , 其中  $\pi_n = (\pi(n, 0), \pi(n, 1), \dots, \pi(n, m)), 0 \leq n \leq m$ 。根据相邻状态转移率, 无穷小生成矩阵  $Q$  可表示为

$$Q = \begin{bmatrix} E_0 & B_0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ D_1 & E_1 & B_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & D_{m-1} & E_{m-1} & B_{m-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & D_m & E_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $Q$  为  $(m+1)(m+1)$  阶方阵,  $B_i, D_i$  和  $E_i$  均为  $(m+1)$  阶方阵, 其值分别为

$$B_i = \lambda_p I_{m+1} = B, \quad 0 \leq i \leq m-1 \quad (6)$$

$$D_i = i\mu_p I_{m+1} = iD, \quad 1 \leq i \leq m \quad (7)$$

$$E_i = \begin{cases} A_i - B, & i = 0 \\ A_i - iD - B, & 1 \leq i \leq m-1 \\ A_i - iD, & i = m \end{cases} \quad (8)$$

其中  $I_m$  为  $m$  阶单位矩阵, 定义  $A_i(j, k)$  为矩阵  $A_i$  的第  $j$  行, 第  $k$  列元素, 则式(8)中的  $A_i(j, k)$  可表示为

$$A_i(j, k) \rightarrow \begin{cases} \lambda_s, & 0 \leq i \leq m-1, 0 \leq j < m-1-i, k = j+1 \\ j\mu_s, & 0 \leq i \leq m-1, 1 \leq j \leq m-i, k = j-1 \\ (m-i)\mu_s + (j-m+i)r_d, & 0 \leq i \leq m, m+1-i \leq j \leq m, k = j-1 \\ -[A_i(j, j+1) + A_i(j, j-1)], & 0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq m, k = j \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

由  $\pi Q = 0$ , 得

$$\left. \begin{aligned} \pi_0 E_0 + \pi_1 D_1 &= 0 \\ \pi_0 B_0 + \pi_1 E_1 + \pi_2 D_2 &= 0 \\ &\vdots \\ \pi_{m-2} B_{m-2} + \pi_{m-1} E_{m-1} + \pi_m D_m &= 0 \\ \pi_{m-1} B_{m-1} + \pi_m E_m &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(6), 式(7)和式(8)代入式(9), 可得

$$\left. \begin{aligned} \pi_n &= \pi_{n-1} B_{n-1} (-C_n)^{-1} = \pi_0 \prod_{i=1}^n [B_{i-1} (-C_i)^{-1}], \quad 1 \leq n \leq m \\ \pi_0 C_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中  $C_i$  表示为

$$\left. \begin{aligned} C_i &= E_i + B_i (-C_{i+1})^{-1} D_{i+1}, \quad 0 \leq i \leq m-1 \\ C_m &= E_m, \quad i = m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

#### 3.2 系统性能参数

基于以上得到的所有稳态概率  $\pi(i, j)$ , 可获得系统QoS性能参数如下:

(1)阻塞概率  $P_b$ :

$$P_b = \sum_{i=0}^m \sum_{j=m-i}^m \pi(i, j) \quad (12)$$

(2)强制中断概率  $P_f$ : 指因授权呼叫抢占而被挤到缓存区排队的 CR 切换呼叫在其最大排队时间  $\tau$  内未被服务而离开缓存区的概率。设  $\psi_k$  表示一时间段, 起点为 CR 切换请求到达并发现缓存区里已有  $k-1$  个呼叫在排队的时刻, 终点为任一呼叫离开系统时刻(包括呼叫完成离开系统和队列中呼叫未被服务而离开缓存区两种情况)。在  $\psi_k$  的起始时刻, CR 切换请求到达使得系统状态变为  $(i, m-i+k)$ , 此时系统中有  $i$  个授权呼叫,  $m-i$  个 CR 呼叫,  $k$  个排队呼叫。在  $\psi_k$  的结束时刻, 若是一个授权呼叫完成或一个 CR 呼叫完成, 将会空闲出一个信道使得缓存区队列的队头获得信道; 若是队列中一个呼叫因未被服务而离开缓存区, 将使得该呼叫之后的队列前移一位, 因此  $\psi_k$  也服从指数分布, 服务率为  $i\mu_p + (m-i)\mu_s + kr_d$ 。设排在第  $k$  位的呼叫等待服务时间  $Y = \varphi_1 + \dots + \varphi_k$ , 则其未被服务离开缓存区的概率为

$$P\{\tau < Y\} = 1 - \int_0^{+\infty} f_Y(y)e^{-r_d y} dy = 1 - f_Y^*(r_d)$$

其中  $f_Y(y)$  为  $Y$  的密度函数,  $f_Y^*(r_d)$  为  $f_Y(y)$  的拉氏变换。经计算得:

$$P\{\tau < \varphi_1 + \dots + \varphi_k\} = \frac{kr_d}{i\mu_p + (m-i)\mu_s + (k+1)r_d}$$

$$P_f = \sum_{k=1}^m P(\text{CR呼叫排第 } k \text{ 位}) \times P(\text{CR呼叫被丢弃} / \text{CR呼叫排第 } k \text{ 位}) = \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{i=1}^m \pi(i, m-i+k) \right] \times P\{\tau < Y\} \quad (13)$$

(3)信道利用率  $\eta$ : 表示平均占用信道数占总共可用信道数的比率。这里,

$$\eta = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} (i+j)P(i, j) + \sum_{i=0}^m \sum_{j=m-i}^m mP(i, j) \right\} \quad (14)$$

### 4 方案 2 性能分析

方案 2 的排队规则与方案 1 基本相同, 唯一不同的是方案 2 同时允许 CR 新呼和切换呼叫请求排队等待, 这里取缓存区容量为  $2m$ 。业务流参数与 3.1 节所设相同。

同样,  $N(t) = \{P(t), S(t)\}$  为二维 QBD 过程, 相邻状态转移率如下:

$$R_{(i,j) \rightarrow (i+1,j)} = \lambda_p, \quad 0 \leq i \leq m-1, 0 \leq j \leq 2m \quad (15)$$

$$R_{(i,j) \rightarrow (i-1,j)} = i\mu_p, \quad 1 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq 2m \quad (16)$$

$$R_{(i,j) \rightarrow (i,j+1)} = \lambda_s, \quad 0 \leq i \leq m-1, 0 \leq j \leq 2m \quad (17)$$

$$R_{(i,j) \rightarrow (i,j-1)} = \begin{cases} j\mu_s, & 0 \leq i \leq m-1, 1 \leq j \leq m-i \\ (m-i)\mu_s + (j-m+i)r_d, & 1 \leq i \leq m-1, m+1-i \leq j \leq 2m \\ jr_d, & i = m, 1 \leq j \leq 2m \end{cases} \quad (18)$$

定义  $\pi(i, j)$  为稳态概率, 稳态概率向量为  $\boldsymbol{\pi} = (\boldsymbol{\pi}_0, \boldsymbol{\pi}_1, \dots, \boldsymbol{\pi}_m)$ , 其中  $\boldsymbol{\pi}_n = (\pi(n, 0), \pi(n, 1), \dots, \pi(n, 2m)), 0 \leq n \leq 2m$ 。同 3.1 节中所述, 可求解得  $\pi(i, j)$ 。相类似地, 得系

统 QoS 性能参数如下:

(1)CR 呼叫的阻塞概率为

$$P_b = \sum_{i=0}^m \pi(i, 2m) \quad (19)$$

(2)CR 呼叫的强制中断概率为

$$P_f = \sum_{k=1}^{2m} P(\text{CR呼叫排第 } k \text{ 位}) \times P(\text{CR呼叫被丢弃} / \text{CR呼叫排第 } k \text{ 位}) = \sum_{k=1}^{2m} \left[ \sum_{i=0}^m \pi(i, m-i+k) \right] \times P\{\tau < Y\} \quad (20)$$

(3)信道利用率为

$$\eta = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} (i+j)P(i, j) + \sum_{i=0}^m \sum_{j=m-i}^{2m} mP(i, j) \right\} \quad (21)$$

### 5 数值结果与仿真实验分析

本节对切换请求排队机制(Handoff Queuing Scheme, HQS)性能进行数值结果分析, 同时采用可变步长事件调度法构造离散事件仿真器, 进行了仿真实验验证。

设频谱池共有  $m=45$  个信道,  $1/\mu_p = 120\text{s}$ ; 设 CR 呼叫为 GPRS 业务, 采用编码方案 CS-2<sup>[8]</sup>, 数据传输速率为  $R_s = 13.4\text{ kbit/s}$ , 每个 GPRS 分组数据包大小符合均值为  $M_s = 13.4 \times 8\text{ kbit}$  的指数分布, 则  $1/\mu_s = 8\text{ s}$ 。

首先比较 HQS 与文献 [4,5] 中所述无切换机制(Non-Handoff Scheme, NHS)及文献 [6] 中切换信道预留机制 HCRS 的系统性能。设  $\lambda_s = 2$  (呼叫/s),  $1/r_d = 40\text{s}$ , HCRS 中选取使系统吞吐量性能最优的预留信道数为 22。HQS, HCRS 和 NHS 性能随授权业务量强度  $\rho_p$  变化的比较结果如图 2-图 4 所示。

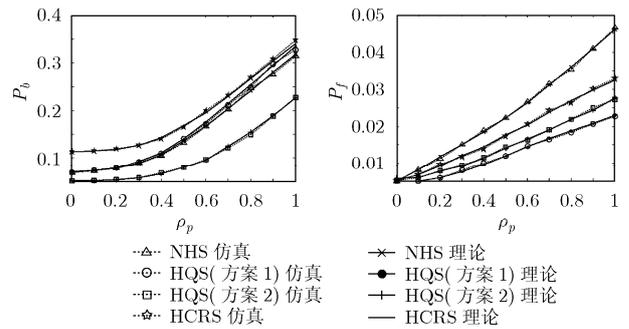


图 2 HQS 与 NHS, HCRS 的阻塞率性能比较

图 3 HQS 与 NHS, HCRS 的强制中断率性能比较

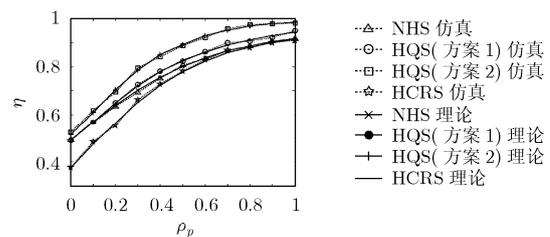


图 4 HQS 与 NHS, HCRS 的信道利用率性能比较

由图2-图4中可见,本文采用的理论分析方法能准确地描述HQS机制性能,数值分析与仿真实验结果吻合程度较好。其中,图2给出了HQS,NHS和HCRS的阻塞率 $P_b$ 性能比较。由于HCRS采用预留信道机制,本质是以 $P_b$ 换取 $P_f$ ,因此 $P_b$ 性能最差。 $P_b$ 性能最好的是HQS的方案2,由于允许缓存新呼,相比方案1 $P_b$ 下降了68%左右。居中的是HQS的方案1和NHS,当 $\rho_p$ 较小时,两者的 $P_b$ 性能接近,但随着 $\rho_p$ 的增加,两者性能差距渐增,这是由于排队切换请求呼叫增加,一旦系统有空闲信道出现,这些排队切换请求呼叫马上占用信道,使得CR新呼接入信道概率减小, $P_b$ 增加。

图3给出了HQS,NHS和HCRS的中断率 $P_f$ 性能比较。由于采用了频谱切换机制,HQS和HCRS的 $P_f$ 性能均明显优于NHS。图3中同时可见,两种HQS的 $P_f$ 相比HCRS较低,这实质与选取的 $1/r_d$ 有关。当CR用户容许的最大时延减小时,HQS的 $P_f$ 将增大。比较HQS的方案1和方案2,由于方案2的缓存区容量较大,由于可能有更多的用户不能在所容忍的时延内得到服务而被中断,因此 $P_f$ 高于方案1。

图4中可见,HQS方案1和方案2的信道利用率 $\eta$ 均比NHS,HCRS高,这是由于允许切换呼叫排队等待,一旦有空闲信道,排队的呼叫马上接入信道,使得信道能够更充分利用。又由于HQS方案2即使在系统没有空闲信道可接入的情况下,仍然允许CR新呼排队,增加了信道被利用的机会,相比HCRS, $\eta$ 最多可提高26%。同时,不仅是HQS的 $\eta$ 明显较HCRS高,NHS的 $\eta$ 也高于HCRS,这是因为HCRS预留了一定数量的备份信道,这些信道通常未被充分利用。

实际应用中,不同的业务所能容忍的最大排队时间 $\tau$ 也不同。下面比较 $\tau$ 对HQS系统性能的影响,取 $1/r_d$ 来衡量。设 $\lambda_s=2$ (呼叫/s), $\lambda_p=0.5$ (呼叫/s),图5表示了HQS方案1和方案2的 $P_b$ 和 $P_f$ 随 $1/r_d$ 变化的情况。

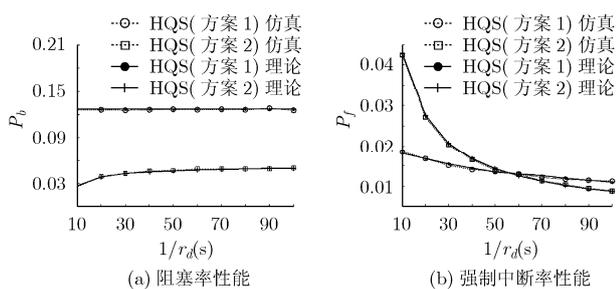


图5 HQS两种方案性能随平均最大排队时间 $1/r_d$ 变化

图5中可以看出,随着 $1/r_d$ 的增加,HQS方案1和方案2的 $P_b$ 均随之加大,而 $P_f$ 均随之减小。只是对于方案2来说,其 $P_b$ 和 $P_f$ 受 $\tau$ 的影响更大一些,这主要是由于缓存区容量较大时, $\tau$ 越长,引起CR呼叫阻塞的可能性越大,而未被服务离开缓存区的可能性越小。这说明对于能容忍排队时延相对较大的业务来说,选用方案2系统性能会更好一些。

## 6 结束语

本文针对非实时业务允许存在一定时延的特点,为降低OSA系统的强制中断率,提出了切换请求排队机制并设计了两种排队方案,采用二维Markov模型对其性能进行了系统建模分析,得到了呼叫阻塞率、强制中断率、信道利用率等系统性能关键参数的解析结果。数值结果分析表明,提出的两种切换请求排队方案可有效降低系统的强制中断率,相比切换信道预留机制,采用切换请求排队机制可在降低系统阻塞率的同时最多可提高26%的信道利用率。论文同时通过仿真实验验证了理论分析的正确性。

## 参考文献

- [1] Ishibashi B, Bouabdallah N, and Boutaba R. QoS performance analysis of cognitive radio-based virtual wireless networks[C]. IEEE INFOCOM 2008, Phoenix, 2008: 2423-2431.
- [2] Attar A, Nakhai M R, and Aghvami A H. Cognitive radio game: A framework for efficiency, fairness and QoS guarantee[C]. IEEE ICC 2008, Beijing, 2008: 4170-4174.
- [3] Su Hang and Zhang Xi. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisioning over cognitive radio wireless networks [J]. *IEEE Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 118-129.
- [4] Capar F, Martoyo I, and Weiss T, et al. Comparison of bandwidth utilization for controlled and uncontrolled channel allocation in a spectrum pooling system[C]. IEEE Spring VTC 2002, Birmingham, 2002: 1069-1073.
- [5] Tang P K, Chew Y H, Ong L C, and Haldar M K. Performance of secondary radios in spectrum sharing with prioritized primary access[C]. Military Communications Conference 2006, Washington, DC, 2006: 1-7.
- [6] IEEE P802.22™/D0.3, Draft standard for wireless regional area networks part 22: Cognitive wireless RAN Medium Access Control and Physical Layer specifications, 2007.
- [7] 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: 16-26.  
Tian Nai-shuo and Yue De-quan. The Quasi-Birth-Death Process and Matrix-Geometric Solutions [M]. Beijing: Science Press, 2002: 16-26.
- [8] ETSI. Digital cellular telecommunications system (phase 2+), General Packet Radio Service (GPRS), Stage 2 + ETSI GSM03. 64[E]. Version 7. 0. 0. 1999.

郭彩丽: 女, 1977年生, 讲师, 研究方向为未来无线移动通信新技术、认知无线电关键技术。  
曾志民: 男, 1956年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信理论与技术、宽带网络与无线传感器网络。