

一种基于代价的冒泡式多优先级认知 无线电排队接入机制

许瑞琛, 蒋 挺

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘 要: 本文首先根据认知无线电实际环境, 在一类虚警事件和三类漏检事件的影响下, 对 M/G/1 排队模型进行修正, 给出主用户及次级用户数据传输时间的一阶矩和二阶矩的解析解, 得到 M/G/1-R (M/G/1-Revised) 排队模型. 其次在多优先级次级用户情境下, 提出一种基于系统代价的冒泡式排队接入方案 (B-M/G/1-R, Bubble-M/G/1-Revised), 给出该方案能够最小化系统代价的证明过程. 仿真与数值计算验证了 M/G/1-R 的有效性, 在实际认知无线电环境下, B-M/G/1-R 能够获得最小的系统代价和次级用户数据传输中断次数.

关键词: 认知无线电; 实际环境; M/G/1; 系统代价; 打断次数

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014) 06-1147-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.06.017

A Cost Based Bubble-Queuing Access Scheme in Multi-Priority Cognitive Radio Network

XU Rui-chen, JIANG Ting

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper analyzes the impact on the average data transmission time of primary user (PU) and secondary users (SU), which is caused by the one kind of false alarm event and three kinds of undetected events in realistic cognitive radio (CR) environment. Based on the analysis, the M/G/1 queue model is rectified and the M/G/1-R queue model is obtained, in which the first moment and the second moment of data transmission time of PU and SU are derived. And a multi-priority bubble-queuing access scheme (B-M/G/1-R) based on systemic cost is proposed whose sorting method can minimize the systemic cost. Analytical results and simulation confirm the validity of M/G/1-R model. Also in realistic CR environment, B-M/G/1-R presents the smallest systemic cost and SU data transmission interrupted times.

Key words: cognitive radio; realistic environment; M/G/1; systemic cost; interrupted times

1 引言

如何在实际的认知无线电 (CR, Cognitive Radio)^[1] 环境中建立能够为次级用户 (SU, Secondary User) 提供低系统代价和数据中断次数的排队接入机制已经成为认知无线电系统目前亟待解决的问题之一.

目前 CR 排队接入模型可分为 4 类: 二维马尔科夫模型^[2,3]、伯努利模型^[4,5]、M/M/1 模型^[6] 和 M/G/1 模型^[7-9]. 四类模型中仅 M/G/1 模型可以适用于不同服务时间分布场景, 且四类模型均基于占先重传接入方 (PR, Preemptive Resume)^[7], 即 SU 接受服务时如遇 PU 出现, 立刻挂起等待 PU 服务完成后继续进行数据传输.

PR 机制假设 SU 能够完全避免和 PU 的同频干扰, 并且虚警概率和漏检概率为 0. 根据 802.22 标准^[10], CR 在频谱感知时间内无法实现理想感知, 并且在数据传输时间内无法进行频谱检测, 这都可能导致 SU 和 PU 的同频干扰以及 SU 的数据传输虚延迟. 所以根据实际 CR 环境修正 PR 机制解决 CR 系统和 M/G/1 排队模型的衔接问题具有积极的现实意义. 此外, 已有的 CR 多优先级单信道排队模型并未统筹解决系统代价和 SU 数据传输中断次数最小化问题.

根据以上分析, 本文首先在已有的一类虚警事件和两类漏检事件^[1] 的基础上定义第三类漏检事件, 针对 PRP M/G/1 排队模型^[7-9] (此后简称为 M/G/1-C, M/G/

1-Classical), 分析四类事件对 PU 和 SU 数据传输时间的影响, 推导出 PU 和 SU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩的解析解, 得到修正 M/G/1 排队模型 (M/G/1-R, M/G/1-Revised), 解决实际 CR 环境和 M/G/1 模型之间的衔接问题. 其次, 根据多优先级 M/G/1 模型^[7,8], 基于单位时间损耗代价^[9], 采用冒泡排序的方式设计出多优先级排队模型 (B-M/G/1-R, Bubble-M/G/1-Revised), 能够根据各优先级用户的单位时间损耗代价和系统繁忙率确定新的排队顺序, 统筹解决 SU 数据传输中断次数和系统代价最小化问题. 本文最后给出数值及仿真结果分析.

2 系统模型

系统由一个授权信道、一个 PU 队列及一个多优先级 SU 队列组成. 所有用户共分为 N 个优先级, 记为 U_1, U_2, \dots, U_N , 优先级 $U_1 > U_2 > \dots > U_N$. 其中 U_1 拥有最高优先级, 即 PU, 拥有打断 U_2, \dots, U_N 数据传输的权利, PU 之间实行先到先服务 (FCFS, First Come First Serve)^[8] 的排队方式. U_2, \dots, U_N 为 $N-1$ 个优先级的 SU. 各优先级用户在数据传输之前根据 PU 和 SU 的分类进入不同的队列, 各 SU 根据自身的优先级进行排队, 优先级更高的 SU 拥有先于低优先级 SU 接入信道的权力. 和 M/G/1-C 不同, 本文所提出的 B-M/G/1-R 不允许高优先级的 SU 打断低优先级 SU 的数据传输, 同等优先级的 SU 实行 FCFS 的排队方式. PU 和各优先级 SU 的到达符合均值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 的泊松分布, 单位为 arrival/frame^[9]. PU 和 SU 的数据传输时间均值分别为 $E[X_1], E[X_2], \dots, E[X_N]$, 单位为 frame/arrival. 系统结构如图 1 所示.

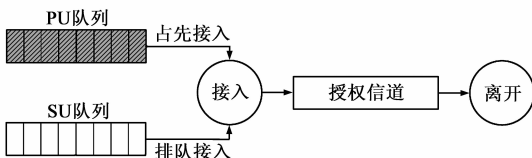


图1 系统排队模型

根据 802.22 标准^[10], SU 在数据传输过程中使用 PR 传输方式和周期频谱感知方式. 其中 T_s 为频谱感知时间, T_d 为数据传输时间, $T = T_s + T_d$ 为帧长. SU 在数据传输过程中由于可能受 PU 占先接入的影响, 数据传输会分成若干段. 以图 2 为例说明一个 SU 在接入信道后的数据传输情况, SU 在接入信道之后, PU 的两次占先式接入导致 SU 的数据传输分为 IT_1, IT_2, IT_3 三段, 每当 PU 接入, SU 挂起并等待 PU 服务完成后继续数据传输, 当 SU 数据传输完毕, SU 离开信道. 其中 PU 数据传输时间包括占先接入的 PU 的数据传输时间以及在此期间到达的 PU 的数据传输时间.

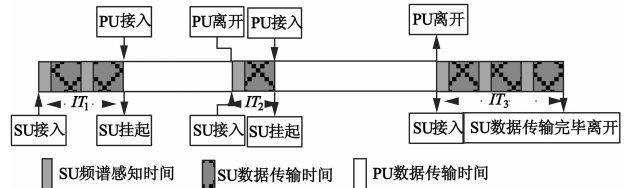


图2 SU数据传输模型

3 M/G/1 排队模型的修正方案 M/G/1-R

3.1 一类虚警事件和三类漏检事件对 PU 和 SU 数据传输时间的影响

CR 环境对传统排队模型的高低优先级用户之间无缝衔接假设的影响分为两类, 一类是虚警事件造成的 SU 虚延迟, 另一类是漏检事件造成的 PU 和 SU 的同频干扰, 并导致数据重传. 如图 3 所示, 在频谱感知方面^[1]存在一类虚警事件和两类漏检事件. 但是在 SU 数据传输过程中到达的 PU 用户会造成和 SU 的同频干扰, 并且无法通过改进频谱检测技术避免该类事件的发生, 这里将该类事件定义为第三类漏检事件. 为简便起见, 首先令所有 SU 的优先级相同, 讨论四类事件对 PU 和 SU 的数据传输影响, 最后讨论多优先级分类和 2 优先级分类的区别. 下面将分别介绍这四类事件的定义和发生的概率.

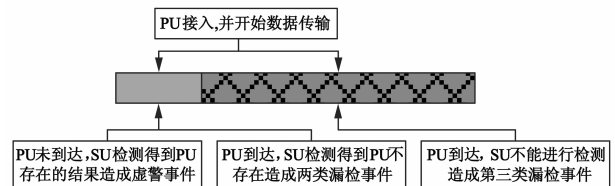


图3 一类虚警事件和三类漏检事件

第一类虚警事件: PU 队列长度为零, SU 数据传输过程中在频谱检测时出现虚警事件^[1]. 虚警事件出现的概率为

$$P_{fa} = P_f \cdot \Pr(Q_P = 0) \quad (1)$$

其中 Q_P 表示 PU 队列长度. 根据文献^[7], $\Pr(Q_P = 0) = 1 - \lambda_p E[X_p] = 1 - \rho_p$, 其中 ρ_p 为 PU 的系统繁忙率. 所以

$$P_{fa} = P_f (1 - \rho_p) \quad (2)$$

根据文献^[1], CR 频谱感知的漏检事件可以分为两类.

第一类漏检事件分为两子类: (1) PU 正在使用信道, SU 队列为空, SU 在 PU 数据传输过程中到达, 进行频谱检测并出现漏检事件. (2) SU 正在使用信道, PU 队列为空, PU 在频谱检测时间 T_s 内到达, 出现漏检事件. 由于 SU 和 PU 到达符合泊松分布, 那么在 PU 数据传输单帧长 T 内有大于等于一个的 SU 到达的概率为 $1 - \exp(-\lambda_s T)$. 同理, 在 SU 频谱检测时间 T_s 内有大于

等于一个的 PU 到达的概率为 $1 - \exp(-\lambda_p T_S)$. 所以第一类漏检事件发生的概率为

$$\begin{aligned} P_{m1} &= \Pr(Q_S = 0) \cdot (1 - \exp(-\lambda_S T)) P_m \\ &\quad + \Pr(Q_P = 0) \cdot (1 - \exp(-\lambda_p T_S)) P_m \\ &= [(1 - \rho_S) \cdot (1 - \exp(-\lambda_S T)) \\ &\quad + (1 - \rho_P) \cdot (1 - \exp(-\lambda_p T_S))] \cdot P_m \quad (3) \end{aligned}$$

其中 Q_S 表示 SU 队列长度, $\rho_S = \lambda_p E[X_S]$ 为 SU 的系统繁忙率, λ_S 和 $E[X_S]$ 分别为 SU 的到达强度和数据传输时间均值.

第二类漏检事件: PU 和 SU 队列均不为空, PU 正在使用信道, 队列头部的 SU 出现漏检事件. 第二类漏检事件发生的概率为

$$P_{m2} = \Pr(Q_S \neq 0) \cdot \Pr(Q_P \neq 0) \cdot P_m = \rho_P \cdot \rho_S \cdot P_m \quad (4)$$

第三类漏检事件: PU 队列为空, SU 正在进行数据传输, PU 没有在 T_S 内到达, 而在 T_D 内到达, 造成 SU 和 PU 的同频干扰. 第三类漏检事件发生的概率为

$$\begin{aligned} P_{m3} &= \exp(-\lambda_p T_S) \cdot (1 - \exp(-\lambda_p T_D)) \cdot \Pr(Q_P = 0) \\ &= \exp(-\lambda_p T_S) \cdot (1 - \exp(-\lambda_p T_D)) \cdot (1 - \rho_P) \quad (5) \end{aligned}$$

对于 SU 而言, 4 类事件均会造成 SU 数据传输时间延长. 对于 PU 而言, 由于虚警事件不会造成 PU 的数据重传, 所以 3 类漏检事件会使 PU 数据传输时间延长. 此外, 由于 M/G/1-C 排队模型中主要的延迟计算式^[4]均需要不同优先级用户数据传输时间的一阶矩和二阶矩, 所以下面将推导 SU 和 PU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩.

3.2 SU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩

SU 的数据传输时间均值为 $E[X_S]$, 受四类事件影响后延长为 $E[\tilde{X}_S]$. \tilde{X}_S 的一阶原点矩(期望)可以表示为

$$E[\tilde{X}_S] = \sum_{x=1}^{\infty} E[\tilde{X}_S | X_S = x] \Pr\{X_S = x\} \quad (6)$$

当四类事件发生时(四类事件独立互斥), SU 当前帧的数据传输需要延迟到下一帧. $X_S = x$ 时, 实际数据传输时间 $\tilde{X}_S = x + i$ 的事件发生等价于: 四类事件在前 $x + i - 1$ 帧发生 i 次, 且在第 $x + i$ 帧没有发生. $\tilde{X}_S = x + i$ 符合参数为 $(i, P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3})$ 的负二项分布. $E[\tilde{X}_S | X_S = x]$ 可以表示为

$$\begin{aligned} E[\tilde{X}_S | X_S = x] &= \sum_{i=0}^{\infty} (x + i) \binom{x + i - 1}{i} \\ &\quad \cdot (1 - [P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}])^x \\ &\quad \cdot ([P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}])^i \quad (7) \end{aligned}$$

SU 此次数据传输时间长度为 x 帧的事件服从均值为 $1/E[X_S]$ 的几何分布, 所以 $\Pr\{X_S = x\}$ 可以表示为

$$\Pr\{X_S = x\} = \left(1 - \frac{1}{E[X_S]}\right)^{x-1} \left(\frac{1}{E[X_S]}\right) \quad (8)$$

将式(7)和(8)带入式(6)得到

$$\begin{aligned} E(\tilde{X}_S) &= \sum_{x=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} (x + i) \binom{x + i - 1}{i} \\ &\quad \cdot (1 - [P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}])^x \\ &\quad \cdot ([P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}])^i \\ &\quad \cdot \left(1 - \frac{1}{E[X_S]}\right)^{x-1} \left(\frac{1}{E[X_S]}\right) \quad (9) \end{aligned}$$

为了使推导可视化, 设 $P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} = A$, $1/E[X_S] = B$, $k = x + i$, $r = i + 1$, 可得

$$\begin{aligned} E(\tilde{X}_S) &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r}^{\infty} k C_{k-1}^{r-1} (1-A)^{k-r+1} A^{r-1} (1-B)^{k-r} B \\ &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r}^{\infty} k C_{k-1}^{r-1} (1-A)^{k-r+1} A^{r-1} (1-B)^{k-r} B \\ &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r}^{\infty} k C_{k-1}^{r-1} (1-A)^{k-r} (1-A) A^{r-1} (1-B)^{k-r} B \\ &= (1-A) A^{-1} B \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r}^{\infty} k \\ &\quad \cdot C_{k-1}^{r-1} [(1-A)(1-B)]^{k-r} A^r \\ &= (1-A) A^{-1} B \sum_{r=1}^{\infty} (A/(A+B-AB))^r \\ &\quad \cdot \sum_{k=r}^{\infty} k C_{k-1}^{r-1} [1 - (A+B-AB)]^{k-r} (A+B-AB)^r \quad (10) \end{aligned}$$

设 $A + B - AB = P$, 式(10)中的 $\sum_{k=r}^{\infty} k C_{k-1}^{r-1} [1 - P]^{k-r} P^r$ 可以表示为

$$\begin{aligned} &\sum_{k=r}^{\infty} k C_{k-1}^{r-1} [1 - P]^{k-r} P^r \\ &= \sum_{k=r}^{\infty} k \frac{(k-1)!}{(r-1)! (k-r)!} [1 - P]^{k-r} P^r \\ &= r \sum_{k=r}^{\infty} \frac{(k)!}{r! (k-r)!} [1 - P]^{k-r} P^r \\ &= r \sum_{k=r}^{\infty} C_k^r [1 - P]^{k-r} P^r \\ &= \frac{r}{P} \sum_{k=r}^{\infty} C_k^r [1 - P]^{(k+1)-(r+1)} P^{r+1} \\ &= \frac{r}{P} \sum_{k=r}^{\infty} C_{k-1}^{r-1} [1 - P]^{(k-r)} P^r = r/P \quad (11) \end{aligned}$$

将式(11)带入式(10)可得

$$\begin{aligned} E(\tilde{X}_S) &= (1-A) A^{-1} B (A+B-AB)^{-1} \\ &\quad \cdot \sum_{r=1}^{\infty} (A/(A+B-AB))^r r \\ &= \frac{(1-A) A^{-1} B (A+B-AB)^{-1} A}{(1-A/(A+B-AB))^2 (A+B-AB)} \\ &= \frac{1}{B(1-A)} = \frac{E[X_S]}{1 - (P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3})} \quad (12) \end{aligned}$$

下面推导 SU 数据传输时间的二阶原点矩 $E[(\tilde{X}_S)^2]$.

$$E[(\tilde{X}_S)^2] = \sum_{x=1}^{\infty} E[(\tilde{X}_S)^2 | X_S = x] \Pr\{X_S = x\} \quad (13)$$

和得到式(9)的原因相同, 式(13)可以表示为

$$\begin{aligned} E[(\tilde{X}_S)^2] &= \sum_{x=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} (x + i)^2 \binom{x + i - 1}{i} \\ &\quad \cdot (1 - [P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}])^x \\ &\quad \cdot ([P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}])^i \end{aligned}$$

$$\cdot \left(1 - \frac{1}{E[X_S]}\right)^{x-1} \left(\frac{1}{E[X_S]}\right) \quad (14)$$

同样设 $P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} = A$, $1/E[X_S] = B$, $k = x + i$, $r = i + 1$, 可得

$$\begin{aligned} E[(\tilde{X}_S)^2] &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r}^{\infty} k(k+1) C_{k-1}^{-1} (1-A)^{k-r+1} A^{r-1} (1-B)^{k-r} B - \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r}^{\infty} k C_{k-1}^{-1} (1-A)^{k-r+1} A^{r-1} (1-B)^{k-r} B \\ &= \left\{ \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r}^{\infty} k(k+1) C_{k-1}^{-1} (1-A)^{k-r+1} A^{r-1} (1-B)^{k-r} B \right\} - \frac{1}{B(1-A)} \\ &= \left\{ (1-A) A^{-1} B \sum_{r=1}^{\infty} (A/(A+B-AB))^r \sum_{k=r}^{\infty} k(k+1) C_{k-1}^{-1} [1-(A+B-AB)]^{k-r} (A+B-AB)^r \right\} - \frac{1}{B(1-A)} \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \sum_{k=r}^{\infty} k(k+1) C_{k-1}^{-1} [1-(A+B-AB)]^{k-r} (A+B-AB)^r &= \sum_{k=r}^{\infty} k(k+1) \frac{(k-1)!}{(r-1)! (k-r)!} [1-(A+B-AB)]^{k-r} (A+B-AB)^r \\ &= \sum_{k=r}^{\infty} r(r+1) \frac{(k+1)!}{(r+1)! (k-r)!} [1-(A+B-AB)]^{k-r} (A+B-AB)^r \\ &= \sum_{k=r}^{\infty} r(r+1) C_{k+1}^{-1} [1-(A+B-AB)]^{k-r} (A+B-AB)^r \\ &= r(r+1) \sum_{k=r}^{\infty} C_{k+1}^{-1} [1-P]^{k-r} (P)^r = r(r+1) \sum_{k=r}^{\infty} C_{k+1}^{-1} [1-P]^{(k+2)-(r+2)} (P)^{r+2} P^{-2} \\ &= r(r+1) P^{-2} \sum_{k=r}^{\infty} C_{k-1}^{-1} [1-P]^{k-r} (P)^r = r(r+1) P^{-2} \quad (16) \end{aligned}$$

其中 $P = A + B - AB$. 将式(16)带入式(15)可得

$$\begin{aligned} E[(\tilde{X}_S)^2] &= \left\{ (1-A) A^{-1} B (A+B-AB)^{-2} \sum_{r=1}^{\infty} (A/(A+B-AB))^r r(r+1) \right\} - \frac{1}{B(1-A)} \\ &= \left\{ (1-A) A^{-1} B (A+B-AB)^{-2} \sum_{r=1}^{\infty} (A/(A+B-AB))^r r^2 \right\} \\ &\quad + \left\{ (1-A) A^{-1} B (A+B-AB)^{-2} \sum_{r=1}^{\infty} (A/(A+B-AB))^r r \right\} - \frac{1}{B(1-A)} \\ &= \left\{ (1-A) A^{-1} B (A+B-AB)^{-2} \sum_{r=1}^{\infty} (A/(A+B-AB))^r r^2 \right\} + \frac{1}{(A+B-AB)B(1-A)} - \frac{1}{B(1-A)} \\ &= (1-A) A^{-1} B (A+B-AB)^{-2} \frac{(A/(A+B-AB)) [A/(A+B-AB) + 1]}{(1-(A/(A+B-AB)))^3} + \frac{1}{(A+B-AB)B(1-A)} - \frac{1}{B(1-A)} \\ &= \frac{2-B(1-A)}{[B(1-A)]^2} = \frac{E[X_S] \{2E[X_S] - 1 + [P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}]\}}{[1 - [P_{fa} + P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}]]^2} \quad (17) \end{aligned}$$

3.3 PU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩

虚警事件对 PU 的数据传输时间没有影响, 利用和 3.2 节相似的推导过程可以得到实际 CR 环境中 PU 数据传输的一阶矩和二阶矩

$$E[\tilde{X}_P] = \frac{E[X_P]}{1 - (P_{m1} + P_{m2} + P_{m3})} \quad (18)$$

$$E[(\tilde{X}_P)^2] = \frac{E[X_P] \{2E[X_P] - 1 + [P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}]\}}{[1 - [P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}]]^2} \quad (19)$$

3.4 多优先级场景下, M/G/1-R 中的各优先级用户的数据传输的一阶矩和二阶矩

两优先级占先排队模型是多优先级排队模型的一种特例, 需要对 3.2 和 3.3 节所求出的 PU 和 SU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩进行修正.

对于 SU 而言, 虚警事件发生的概率 P_{fa} 仅和 ρ_P 有关, 所以 P_{fa} 仍用式(2)表示. 第三类漏检事件发生的概率仅和 T_S , T_D 及 λ_P , ρ_P 有关, 所以 P_{m3} 仍用式(5)表示.

第一类和第二类漏检事件发生的概率和不同优先级次级用户的数据传输特性有关. 式(3)中 $\Pr(Q_P = 0) \cdot$

$(1 - \exp(-\lambda_P T_S)) P_m$ 和 SU 无关, 所以第 j 优先级的次级用户的第一类漏检事件的第一子类事件发生等价于 SU 队列中优先级大于等于 j 的 SU 数为零, 且在 PU 的一帧数据传输时间内优先级高于 j 的用户没有出现, 且有大于等于 1 个的第 j 优先级的 SU 出现并发生漏检事件的概率. 所以

$$\begin{aligned} P_{m1,j} &= \Pr(Q_P = 0) \cdot (1 - \exp(-\lambda_P T_S)) \cdot P_m \\ &\quad + \Pr(Q_{S,i \leq j} = 0) \cdot (1 - \exp(-\lambda_j T)) \cdot P_m \\ &\quad \cdot \prod_{i=1}^{j-1} \exp(-\lambda_i T) \\ &= (1 - \exp(-\lambda_j T)) \cdot [\prod_{i=1}^{j-1} \exp(-\lambda_i T)] \cdot P_m \\ &\quad \cdot \prod_{i=2}^j (1 - \rho_i), i \geq 2, j \geq 2 \quad (20) \end{aligned}$$

第 j 优先级的次级用户的第二类漏检事件发生等价于 SU 队列中优先级大于 j 的 SU 个数为零, SU 队列中第 j 优先级的 SU 个数不为零, PU 队列长度不为零, 且发生漏检事件的概率.

$$\begin{aligned} P_{m2,j} &= \Pr(Q_{S,i < j} = 0) \cdot \Pr(Q_{S,i=j} \neq 0) \cdot \Pr(Q_P \neq 0) \cdot P_m \\ &= \rho_1 \cdot P_m \cdot \rho_j \prod_{i=2}^{j-1} (1 - \rho_i), i \geq 2, j \geq 2 \quad (21) \end{aligned}$$

将式(20)和(21)代入式(12)和(17)可以得到第 j 优先级 SU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩.

M/G/1-R 的系统协调器拥有调度 SU 的权利,可以避免 SU 之间的同频干扰.和 M/G/1-C 相比,M/G/1-R 中第 j 优先级用户数据传输时间延长等价于:第 $i, i < j$ 优先级 SU 的队列长度均为零,有一个 $k, k > j$ 优先级 SU 正在进行数据传输,有大于等于 1 个第 j 优先级 SU 在单帧长度 T 内到达信道,且第 $i, i < j$ 优先级 SU 没有在单帧长度 T 内到达,那么第 j 优先级 SU 等到下一帧进行数据传输.所以第 j 优先级 SU 因此类事件延长的数据时间最大为 1 帧.计算第 j 优先级 SU 数据延长一帧的概率为:

$$P_{j,E} = \{ \prod_{i=1}^{j-1} (1 - \rho_i) \} \cdot (1 - \exp(-\lambda_j T)) \cdot \{ \prod_{i=1}^{j-1} \exp(-\lambda_i T) \} \cdot \sum_{k=j+1}^N \rho_k \quad (22)$$

按照 5.1 节的参数,当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0.01$ 时,系统总繁忙率为 0.84, $P_{3,E} = 0.0047$.所以 M/G/1-R 中并不考虑 SU 因此类事件所导致的数据时间延长.

对于 PU 而言,不同优先级的 SU 对应的系统繁忙率不同,所以造成和 PU 同频干扰的概率各不相同.这里将对 PU 造成同频干扰的第一类和第二类漏检事件发生的概率修改为

$$P_{m1} = \sum_{i=2}^n \left[\frac{\rho_i}{\sum_{j=2}^n \rho_j} \cdot P_{m1,i} \right], i \geq 2 \quad (23)$$

$$P_{m2} = \sum_{i=2}^n \left[\frac{\rho_i}{\sum_{j=2}^n \rho_j} \cdot P_{m2,i} \right], i \geq 2 \quad (24)$$

将式(23)和(24)分别代入式(18)和(19)可以得到 PU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩.

4 一种冒泡式多优先级排队方式 B-M/G/1-R

由第 2 节可知,用户按优先级分为 U_1, U_2, \dots, U_N N 种.文献[11]假设用户的数据传输代价为系统停留时间的线性函数 $\Phi[T_k] = \zeta_k T_k$,其中 ζ_k 为第 k 优先级用户的系统停留单位时间的开销系数(即单位时间费用), T_k 表示第 k 优先级用户的系统停留时间均值.由于 PU 拥有最高优先级,且 SU 的排队方式不会对 PU 的系统停留时间造成影响,因此可以将系统代价函数 σ 设为所有 SU 加入队列直至服务完成所付出的开销

$$\sigma = \sum_{k=2}^N \zeta_k T_k \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{a < b} - \sigma_{a > b} &= \zeta_a \frac{\lambda E[\tilde{X}^2]}{\eta(\eta - \rho_a)} + \zeta_b \frac{\lambda E[\tilde{X}^2]}{(\eta - \rho_a)(\eta - \rho_a - \rho_b)} - \zeta_a \frac{\lambda E[\tilde{X}^2]}{(\eta - \rho_b)(\eta - \rho_a - \rho_b)} - \zeta_b \frac{\lambda E[\tilde{X}^2]}{\eta(\eta - \rho_b)} \\ &= \frac{\lambda E[\tilde{X}^2] \{ \zeta_a(\eta - \rho_b)(\eta - \rho_a - \rho_b) + \zeta_b \eta(\eta - \rho_b) - \zeta_a \eta(\eta - \rho_a) - \zeta_b(\eta - \rho_a)(\eta - \rho_a - \rho_b) \}}{\eta(\eta - \rho_a)(\eta - \rho_b)(\eta - \rho_a - \rho_b)} \\ &= \frac{\lambda E[\tilde{X}^2] (\rho_a \zeta_b - \zeta_a \rho_b) (2\eta - \rho_a - \rho_b)}{\eta(\eta - \rho_a)(\eta - \rho_b)(\eta - \rho_a - \rho_b)} \end{aligned} \quad (30)$$

其中 $\eta = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \rho_j$.由于 $\lambda E[\tilde{X}^2] > 0, (2\eta - \rho_a - \rho_b) > 0, \eta(\eta - \rho_a)(\eta - \rho_b - \eta - \rho_a - \rho_b) > 0$,所以 $\sigma_{a > b} -$

$\zeta_k T_k$ 为第 k 优先级用户的开销, σ 为系统代价函数.

4.1 用户停留时间及代价函数

对于第 k 优先级用户而言,在系统停留的时间由两部分组成:(1)等待队列之前所有用户数据传输完毕的时间,记为 $t_{1,k}$;(2)本身数据传输的时间以及由于 PU 的占先式接入所造成的延迟,记为 $t_{2,k}$, $T_k = t_{1,k} + t_{2,k}$.根据文献[7], $t_{1,k}$ 可以表示为

$$t_{1,k} = \frac{E[(\tilde{X})^2]}{2(1 - \sum_{i < k} \rho_i)(1 - \sum_{i \leq k} \rho_i)} \quad (26)$$

其中 $E[(\tilde{X})^2] = \sum_{i=1}^N \lambda_i E[(\tilde{X}_i)^2]$.根据文献[7], $t_{2,k}$ 可以表示为

$$t_{2,k} = E[(\tilde{X}_k)] + \lambda_1 E[(\tilde{X}_1)] t_{2,k} = \frac{E[(\tilde{X}_k)]}{1 - \lambda_1 E[(\tilde{X}_1)]} \quad (27)$$

这样系统代价函数 σ 就可以表示为

$$\begin{aligned} \sigma &= \sum_{k=2}^n \zeta_k T_k \\ &= \sum_{k=2}^n \frac{\zeta_k E[(\tilde{X})^2]}{2(1 - \sum_{i < k} \rho_i)(1 - \sum_{i \leq k} \rho_i)} \\ &\quad + \sum_{k=2}^n \frac{\zeta_k E[(\tilde{X}_k)]}{1 - \lambda_1 E[(\tilde{X}_1)]} \end{aligned} \quad (28)$$

式(28)中第二部分和排队顺序无关,这样 σ 中和排队顺序相关仅有 $t_{1,k}$,所以最小化 σ 等价于

$$\min\{\sigma\} = \min \left\{ \sum_{k=2}^n \frac{\zeta_k E[(\tilde{X})^2]}{2(1 - \sum_{i < k} \rho_i)(1 - \sum_{i \leq k} \rho_i)} \right\} \quad (29)$$

4.2 SU 的冒泡式排队原则

初始 SU 的优先级排序为 U_2, \dots, U_N ,这里需要寻找一种能够最小化系统代价函数 σ 的排队方式,转换后的优先级顺序为 U'_2, \dots, U'_N .假设在 U_2, \dots, U_N 中两个相邻优先级的 SU 为 U_i 和 U_{i+1} .为方便表示,设 $a = U_i, b = U_{i+1}$.这里用相邻比较的方法判断 $a > b$ 还是 $a < b$ 能够最小化 σ .用 $\sigma_{a > b}$ 表示转换后的优先级 $a > b$ 所得到的系统代价函数, $\sigma_{a < b}$ 则表示在转换后的优先级中 $a < b$ 所得到的系统代价函数.由于比较 a, b 并不影响 U_2, \dots, U_{i-1} 和 U_{i+2}, \dots, U_N 的优先级排列顺序,那么 $\sigma_{a > b} - \sigma_{a < b}$ 可以表示为

$\sigma_{a < b}$ 的正负取决于 $(\rho_a \zeta_b - \zeta_a \rho_b)$ 的正负.所以,可以得到以下结论:

$$\begin{cases} \sigma_{a < b} < \sigma_{a > b}, & \zeta_a / \rho_a > \zeta_b / \rho_b \\ \sigma_{a < b} > \sigma_{a > b}, & \zeta_a / \rho_a < \zeta_b / \rho_b \end{cases} \quad (31)$$

确定按照 ζ/ρ 转换相邻优先级的用户, 并按照冒泡排序的方式通过多轮依次比较得到所有 SU 的优先级排序, 因此这种多优先级排队方式称为冒泡式多优先级排队方式.

以上从式角度分析采用 ζ/ρ 降序排列 SU 优先级方式的合理性. 从宏观角度来看, 采用 ζ/ρ 降序对 SU 进行分级的原因有两个: (1) 在多优先级 SU 竞争信道, 单位系统停留时间开销更大的用户优先级应该更高; (2) 系统繁忙率 ρ 更低的 SU 数据传输量更小能够快速离开信道, 所以 ρ 更小的用户优先级应该更高.

4.3 SU 数据传输平均中断次数

由于 M/G/1-R 和 B-M/G/1-R 均不允许高优先级 SU 拥有抢占低优先级 SU 的权力, 所以该节仅分析多优先级 M/G/1-C 排队模型^[4,7,9]和本文所提出的 B-M/G/1-R 排队方式的 SU 单次数据传输被打断的平均次数的数值解. M/G/1-R、M/G/1-C 和 B-M/G/1-R 的第 k 优先级 SU 单次数据传输被打断次数分别表示为 $I_{R,k}$ 、 $I_{C,k}$ 和 $I_{BR,k}$.

根据式(27)可知, B-M/G/1-R 中第 k 优先级 SU 在数据传输过程中到达的 PU 的数量 $N_{BR,k}$ 为

$$N_{BR,k} = \lambda_1 E[\tilde{X}_k] / \{1 - \lambda_1 E[\tilde{X}_1]\} \quad (32)$$

但是并非在所有 $N_{BR,k}$ 个 PU 均会造成第 k 优先级 SU 的数据传输中断. 仅当 $P(Q_p = 0)$ 时, 到达的 PU 能打断其数据传输. 所以造成第 k 优先级 SU 数据传输中断的 PU 数量 $I_{BR,k}$ 为

$$\begin{aligned} I_{R,k} &= I_{BR,k} = N_{BR,k} \cdot P(Q_p = 0) \\ &= \{\lambda_1 E[\tilde{X}_k]\} \cdot \{1 - \rho_p\} / \{1 - \lambda_1 E[\tilde{X}_1]\} \\ &= \lambda_1 E[\tilde{X}_k] \end{aligned} \quad (33)$$

M/G/1-C 允许高优先级的 SU 打断低优先级 SU 进行数据传输, 设 M/G/1-C 排队系统中第 k 优先级 SU 的实际使用信道的时间为 $T_{C,k}$, 那么 $T_{C,k}$ 由第 k 优先级 SU 的实际传输时间 $E[X_k]$ 和被更高优先级用户打断导致的延迟 $T_{C,b,k}$ 组成.

$$T_{C,b,k} = T_{C,k} \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \{\lambda_i E[X_i]\} = T_{C,k} \sum_{i=1}^{k-1} \{\rho_i\} \quad (34)$$

$$T_{C,k} = E[X_k] + T_{C,k} \sum_{i=1}^{k-1} \{\rho_i\} = E[X_k] \left\{ 1 - \sum_{i=1}^{k-1} \rho_i \right\} \quad (35)$$

那么在 $T_{C,k}$ 期间到达的更高级别的用户 $U_i, i = 1, 2, \dots, k-1$ 数量 $N_{C,k}$ 为

$$N_{C,k} = T_{C,k} \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \{\lambda_i\} \quad (36)$$

并不是所有 $N_{C,k}$ 个高优先级 SU 都会打断第 k 优先级 SU 的数据传输, 仅当 $U_j, j = 1, 2, \dots, i-1, i < k, j < k$ 的数量均为零时, 到达的 U_i 能打断第 k 优先级 SU 的数据传输. 所以造成第 k 优先级 SU 数据传输中断用户数量 $I_{C,k}$ 为

$$I_{C,k} = N_{C,k} \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \rho_j) \quad (37)$$

B-M/G/1-R 排队方法和 M/G/1-C 相比较, 对于 U_k 而言, 能够减少的打断次数为

$$I_{d,k} = I_{C,k} - I_{BR,k} \quad (38)$$

4.4 PU 和 SU 的数据传输流程

PU 和 SU 采用 B-M/G/1-R 排队方式接信道并进行数据传输, 即 PU 拥有占先式入抢断优先权, 不同优先级次级用户之间采用 ζ/ρ 降序排队的方式接入信道, 同等优先级用户之间采用 FCFS 的顺序接入信道. PU 的数据传输流程如图 4 所示, SU 的数据传输流程如图 5 所示.

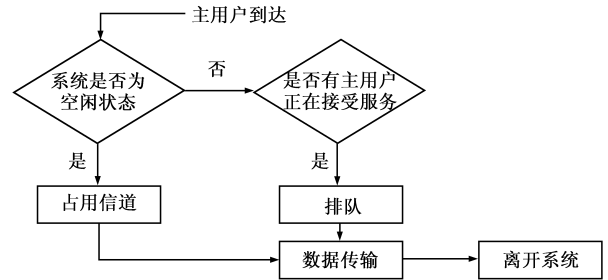


图4 PU数据传输流程图

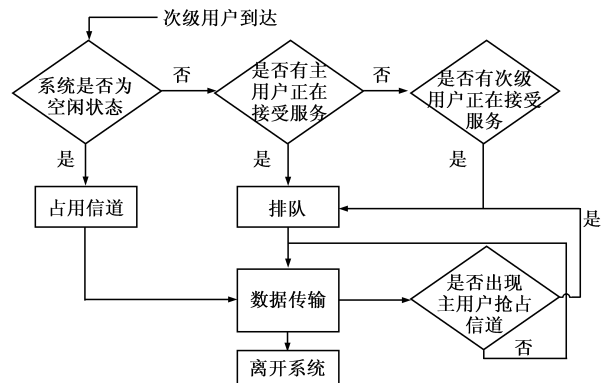


图5 SU数据传输流程图

5 数值结果及仿真分析

数值及仿真分析由以下几个部分组成: 5.1 节将介绍仿真参数设置; M/G/1-C^[8,9]和 M/G/1-R 对实际 CR 环境的适应性的分析将在 5.2 节中阐述; 5.3 节将比较下 M/G/1-C 和 M/G/1-R 在不同数据传输时间分布情况下的性能, 验证 M/G/1-R 可以适用于多样的服务时间分布; 5.4 节将比较 M/G/1-C、M/G/1-R 和 B-M/G/1-R 的性能, 验证 B-M/G/1-R 能够在实际 CR 环境下获得最小的系统代价函数和 SU 单次数据传输中断次数.

5.1 仿真参数

为有效评估所提出的分析模型,所建立的 CR 系统的数据传输时间是整数帧.根据 802.22 标准^[10],帧长为 $T = 10\text{ms}$,单帧频谱检测耗时为 $T_S = 0.15\text{frame}$,单帧数据传输时间为 $T_D = 0.85\text{frame}$.考虑 4 种不同优先级的用户,其中第一优先级为 PU,其他三个优先级为 SU.4 种用户的到达强度符合均值为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 的泊松分布. U_2, U_3, U_4 的 $P_m \in [0, 1], P_f \in [0, 1]$.

为验证该模型适用于多种传输时间分布,这里考虑截断型 Pareto 分布和负指数分布.根据文献^[7],这两种分布能够较好的拟合实际数据和语音传输.截断型 Pareto 分布可以表示为

$$f_X(x) = \begin{cases} \alpha K^\alpha / x^{\alpha+1}, & K \leq x < m \\ K^\alpha / m^\alpha, & x = m \end{cases} \quad (39)$$

根据文献^[12],式(39)中的参数设为流量参数 $\alpha = 1.1$,尺度参数 $K = 81.5$,截断上限参数 $m = 66666\text{bytes}$.根据以上设定,PU 的单次数据传送量均值为 480bytes.为公平起见,假设负指数分布对应的 PU 的数据传输量均值也为 480bytes.当 PU 的数据速率为 19.2Kbps 时,可以得到负指数分布和截断 Pareto 分布条件下的 PU 数据传输时间均值为 24frames/arrival.取 $\rho_1 \in [0, 0.8]$,所以 $\lambda_1 \in [0, 0.0333]\text{arrival/frame}$.三个等级的次级用户的单帧损耗代价分别为 $\zeta = [3/6, 2/6, 1/6]$,次级用户的数据传输时间均值均为 $E[X_2] = E[X_3] = E[X_4] = 20(\text{arrival/frame})$.不同优先级的 SU 的到达强度 λ_i 在符合 $\sum_{i=1}^4 \rho_i < 1$ 的条件下随机选择.

5.2 M/G/1-C 和 M/G/1-R 的 PU 和 SU 数据传输时间一阶矩和二阶矩数值分析

该节设系统仅有 PU 和 SU 两个优先级,PU 和 SU 的到达强度分别为 $\lambda_P = 0.01$ 和 $\lambda_S = 0.02$,PU 和 SU 的数据传输均值和 5.1 节的设定相同.通过比较不同 P_m 和 P_f 条件下 PU 和 SU 的数据传输的一阶矩和二阶矩,分析实际 CR 环境的影响.PU 和 SU 数据传输的一阶矩和二阶矩表示为 $E[\tilde{X}_P], E[(\tilde{X}_P)^2], E[\tilde{X}_S]$ 和 $E[(\tilde{X}_S)^2]$.按照 5.1 节的设定, $E[X_P] = 24, E[X_S] = 20$,由式(17)和(19)可得 $E[(X_P)^2] = 1128, E[(X_S)^2] = 780$.

不同 P_m 影响下的 $E[\tilde{X}_P], E[(\tilde{X}_P)^2]$ 如图 6 和图 7 所示.由图 6 和图 7 可得到如下结论:(1)当 $P_m = 0$ 时, $E[\tilde{X}_P] - E[X_P] = 0.2, E[(\tilde{X}_P)^2] - E[(X_P)^2] = 17.1$;(2) $E[\tilde{X}_P]$ 和 $E[(\tilde{X}_P)^2]$ 随 P_m 的增大而增大;(3)当 $P_m = 0$ 时, $E[\tilde{X}_P] - E[X_P] = 3.13, E[(\tilde{X}_P)^2] - E[(X_P)^2] = 317.2$.原因分析:(1)由式(5)可知, P_{m3} 和 P_m 无关,仅和 T_S, T_D, λ_P 和 μ_P 有关,而这四个变量是固定的, P_{m3} 的值固定,由 P_{m3} 所造成的 PU 数据传输延迟时间长度也是

固定的,所以即使在完美感知的情况下仍然会导致 PU 数据传输时间延长;(2)由式(3)和(4)可知 P_{m1} 与 P_{m2} 和 P_m 成正比,由式(19)~(21)可知 $E[\tilde{X}_P]$ 与 $E[(\tilde{X}_P)^2]$ 是 P_{m1} 与 P_{m2} 的增函数,所以 $E[\tilde{X}_P]$ 和 $E[(\tilde{X}_P)^2]$ 随 P_m 的增大而增大.同时当 P_m 达到最大值 1 时, $E[\tilde{X}_P], E[(\tilde{X}_P)^2]$ 也达到最大值.

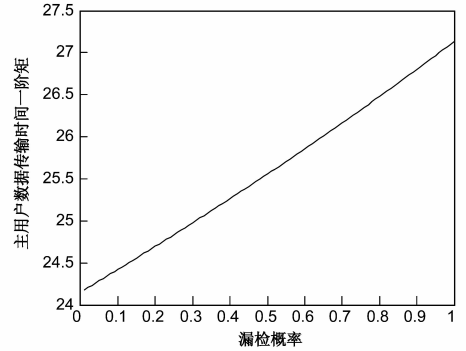


图6 不同 P_m 影响下的 $E[\tilde{X}_P]$

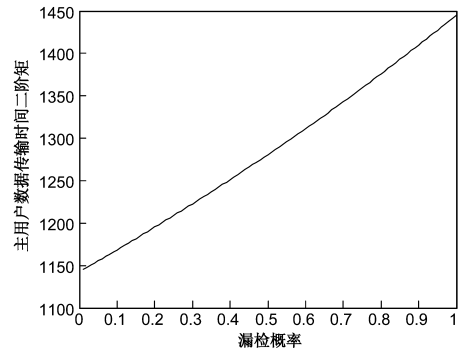


图7 不同 P_m 影响下的 $E[(\tilde{X}_P)^2]$

不同 P_m 和 P_f 影响下的 $E[\tilde{X}_S]$ 和 $E[(\tilde{X}_S)^2]$ 如图 8 和图 9 所示.由图 8 和图 9 可得到如下结论:(1)当 $P_m = 0$ 时, $E[\tilde{X}_S] - E[X_S] = 0.3, E[(\tilde{X}_S)^2] - E[(X_S)^2] = 24.2$;(2) $E[\tilde{X}_S]$ 和 $E[(\tilde{X}_S)^2]$ 随着 P_m 和 P_f 的增加而增加;(3)当 $P_m = 1$ 和 $P_f = 1$ 时, $E[\tilde{X}_S] - E[X_S] = 140.56, E[(\tilde{X}_S)^2] - E[(X_S)^2] = 50642$.原因分析:(1)和上段第

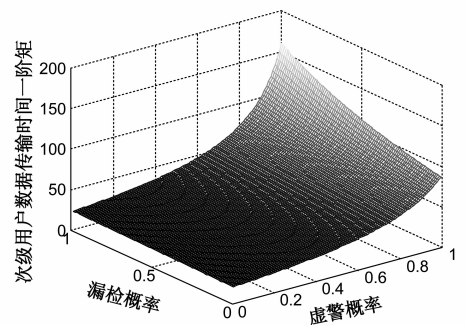


图8 不同 P_m 和 P_f 影响下的 $E[\tilde{X}_S]$

一条原因相似,由 P_{m3} 所造成的 SU 数据传输延迟时间长是固定的;(2)由式(2)可知, P_{fa} 和 P_f 成正比,由式(12)和(17)可知, $E[\tilde{X}_S]$ 和 $E[(\tilde{X}_S)^2]$ 是 P_m 和 P_f 的增函数,所以 $E[\tilde{X}_S]$ 和 $E[(\tilde{X}_S)^2]$ 随着 P_m 和 P_f 的增大而增大,当 P_m 和 P_f 达到最大值 1 时, $E[\tilde{X}_S]$ 和 $E[(\tilde{X}_S)^2]$ 达到最大值.

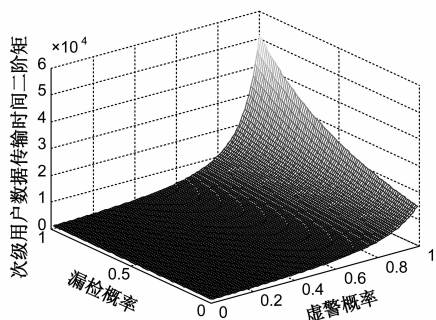


图9 不同 P_m 和 P_f 影响下的 $E[(\tilde{X}_S)^2]$

综上所述,在 CR 的帧式数据传输、周期检测方式、虚警事件和漏检事件的综合影响下,SU 和 PU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩会增大.即使在完美感知的情况下,帧式数据传输和周期检测方式也会造成 $P_{m3} \neq 0$,从而导致 SU 和 PU 的数据传输时间的一阶矩和二阶矩与初始值不同.在 $0 < P_m \leq 1, 0 < P_f \leq 1$ 的情况下,SU 和 PU 数据传输时间的一阶矩和二阶矩会随着 P_m 和 P_f 的增大而增大.

5.3 多样的服务时间分布下的 SU 系统停留时间数值和仿真结果分析

这里设系统仅拥有两个优先级, $\lambda_s = 0.01, P_m = P_f = 0.1$,PU 和 SU 的数据传输均值和 5.1 节的设定相同.该节将比较本文提出的 M/G/1-R 和 M/G/1-C^[8,9]的 SU 在不同服务时间分布场景下的系统停留时间,二者的系统停留时间分别表示为 T_R 和 T_C .到目前为止,大多数 CR 系统的 M/G/1 排队模型^[7-9]均基于 M/G/1-C.

不同 PU 系统繁忙率 ρ_p 条件下,数据传输时间符合 Pareto 和负指数分布情况下,M/G/1-R 和 M/G/1-C 的 SU 系统停留时间如图 10 所示.由图 10 可以得到如下结论:(1)M/G/1-R 和 M/G/1-C 的仿真和理论结果拟合较好,这说明两种模型在各自的假设前提下的正确性,也说明 M/G/1-R 基于帧结构传输分析方法的正确性;(2)服从 Pareto 分布和负指数分布情况下的 T_R 相同;(3) T_R 和 T_C 均随着 ρ_p 的增大而增大,且 $|T_R - T_C|$ 也随着 ρ_p 的增大而增大.原因分析:(1)根据式(28)($\zeta_2 = 1$),当 P_m, P_f, T_s 和 T_D 为常量时,SU 的系统停留时间仅和变量 $\lambda_s, \lambda_p, E[X_p], E[X_S]$ 有关,而两种分布的 SU 数据传输均值相同,到达强度也相同,所以这两种分布得到相同的 SU 系统停留时间;(2)从宏观上分析,当 ρ_p 增

大时,PU 的信道占用概率增大,SU 接入系统的机会减小,导致 T_R 和 T_C 增加.当 $E[X_p]$ 固定时, ρ_p 的增大导致 λ_p 增大,SU 数据传输被 PU 打断的概率增大,从而导致 T_R 和 T_C 增加.从微观上分析,由式(3)~(5)可知 P_{m1}, P_{m2} 及 P_{m3} 均是 ρ_p 的增函数,由式(12)、(17)~(19)可知, T_R 是 P_{m1}, P_{m2} 及 P_{m3} 的增函数,而 T_C 与 P_{m1}, P_{m2} 及 P_{m3} 并无关系,所以 $|T_R - T_C|$ 随着 ρ_p 的增大而增大,当 $\rho_p = 0.78$ 时, $|T_R - T_C| = 185\text{frames}$.

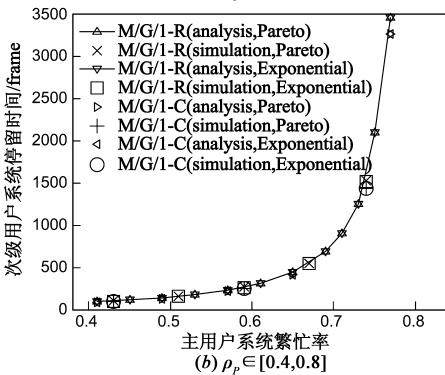
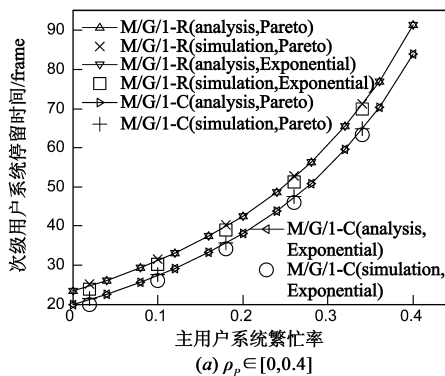


图10 Pareto和负指数服务时间分布条件下,M/G/1-R和 M/G/1-C模型的SU系统停留时间比较

5.4 B-M/G/1-R 的系统目标函数数值和仿真结果分析

该节的参数设定和 5.1 节相同.由于 5.3 节已经证明 M/G/1-R 同时适用于 Pareto 和负指数分布.为简便起见,该节设 PU 和 SU 数据传输时间符合负指数分布.该节将比较本文所提出 B-M/G/1-R、M/G/1-R 与 M/G/1-C 的系统性能.在多优先级场景下,三者的区别在于 M/G/1-R 和 M/G/1-C^[8,9]使用单位时间损耗代价 ζ 降序判定 SU 的优先级,而 B-M/G/1-R 按照 ζ/ρ 降序判定 SU 的优先级.此外 M/G/1-C 并未考虑实际 CR 环境的影响,并且 M/G/1-C 允许高优先级 SU 打断低优先级 SU 的数据传输.需要分析的系统性能参数为:(1)系统代价函数 σ ,由式(24)得到;(2)SU 平均被打断的次数由式(33)和(38)得到.

不同 PU 系统繁忙率 ρ_p 条件下,三种排队模型的

系统代价 σ 如图 11 所示. 由图 11 可以得到如下结论: (1) 三种排队模型的仿真和理论结果拟合较好, 说明本文提出的 M/G/1-R 和 B-M/G/1-R 模型的正确性; (2) 就 σ 而言, B-M/G/1-R 低于 M/G/1-R, 但高于 M/G/1-C. 原因分析: σ 是 PU 及 SU 的数据传输时间的一阶矩和二阶矩的增函数, 由于 M/G/1-C 并未考虑一类虚警事件和三类漏检事件的影响, 所以其一阶矩略小于 M/G/1-R 和 B-M/G/1-R, 但是二阶矩远小于二者, 例如当 $P_m = P_f = 0.1$ 时, $E[(\tilde{X}_S)^2] - E[(X_S)^2] = 568.7$, 所以 M/G/1-C 的 σ 最小. 此外 M/G/1-R 按照单位时间损耗代价 ζ 降序判定 SU 的优先级, 而 B-M/G/1-R 的 SU 按照 ζ/ρ 降序判定 SU 的优先级, 由式(29) ~ (31) 可知, B-M/G/1-R 可使 σ 最小化, 所以 B-M/G/1-R 的 σ 小于 M/G/1-R.

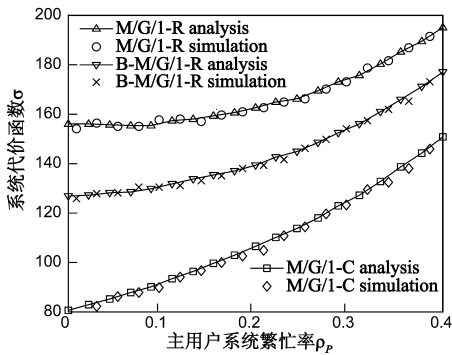


图11 负指数服务时间条件下, M/G/1-R、B-M/G/1-R 和 M/G/1-C 模型的系统代价函数的比较

不同 PU 系统繁忙率 ρ_p 条件下, 三种排队模型的 SU 单次数据传输被打断次数如图 12 所示, 由图 12 可以得到以下结论: (1) 三种排队模型的仿真和理论结果拟合较好, 说明本文提出的 M/G/1-R 和 B-M/G/1-R 模型的正确性; (2) B-M/G/1-R 和 M/G/1-R 的打断次数相等, 小于 M/G/1-C 的打断次数. 原因分析: M/G/1-C 允许高优先级的 SU 打断低优先级 SU 的数据传输, 而 B-M/G/1-R 和 M/G/1-R 不允许高优先级的 SU 打断低优先级 SU 的数据传输, 由式(33) 可知 $I_{R,k}$ 及 $I_{BR,k}$ 仅和 λ_p

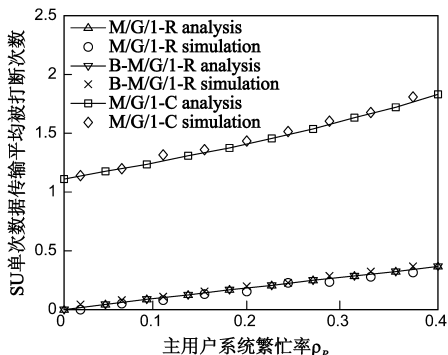


图12 负指数服务时间条件下, M/G/1-R、B-M/G/1-R 和 M/G/1-C 模型的 SU 单次数据传输被打断次数的比较

及 $E[\tilde{X}_S]$ 有关, 所以二者的打断次数相等且低于 M/G/1-C.

6 结论

认知无线电系统中, 排队模型不仅需要考虑到 802.22 标准所规定的帧结构、周期检测方式、虚警事件以及漏检事件的影响, 并且需要使系统代价函数及次级用户数据传输中断次数最小化. 为修正已有的多优先级 M/G/1 模型, 本文首先定义第三类漏检事件, 并推导得到一类虚警事件和三类漏检事件影响下的主用户及次级用户数据传输时间的一阶矩和二阶矩的解析解, 得到 M/G/1-R 排队模型, 解决 M/G/1 模型和认知无线电系统的衔接问题. 数值分析和仿真结果验证 M/G/1-R 模型的有效性. 其次, 本文在多优先级次级用户场景下, 利用类似于冒泡排序的方法提出一种 B-M/G/1-R 排队方式, 给出 B-M/G/1-R 能够最小化系统代价函数 σ 的证明过程. 数值分析和仿真结果验证 B-M/G/1-R 能够在实际认知无线电系统环境下实现系统目标函数和次级用户数据传输中断次数最小化.

参考文献

- [1] Tang S S, Mark B L. Modeling and analysis of opportunistic spectrum sharing with unreliable spectrum sensing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1948 - 1984.
- [2] Zhao Q, Ye J. Quickest detection in multiple on-off processes [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(12): 5994 - 6006.
- [3] Zhang T Y, Wu Y, Lang K. Optimal scheduling of cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE System Journal, 2010, 4(4): 549 - 585.
- [4] Do C T, Tran N H, Mui V N. Social optimization strategy in unobserved queuing systems in cognitive radio [J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(12): 1944 - 1947.
- [5] Wang S S, Js Z. A characterization of delay performance of cognitive medium access [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11(2): 800 - 809.
- [6] Yoon S U, Ekici E. Voluntary spectrum handoff: a novel approach to spectrum management [A]. IEEE International Conference on Communication [C]. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010. 1 - 5.
- [7] Ng C H, Soong B H. Queuing Modeling Fundamental with Applications in Communication Networks [M]. United Kingdom: John Wiley & Sons Press, 2008. 235 - 433.
- [8] Shiang H P, Schaar V D. Queuing-based dynamic channel selection for heterogeneous multimedia applications over cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10

(5):896 – 909.

- [9] Khabazian M, Aissa S. Performance modeling of a two-tier primary-secondary network operated with IEEE 802.11 DCF mechanism[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11(9):3047 – 3057.
- [10] Stevenson C, Chouinard G, Lei Z D. IEEE 802.22: the first cognitive radio wireless regional area network standard[J]. IEEE Communication Magazine, 2009, 47(1):130 – 138.
- [11] Li H, Han Z. Socially optimal queuing control in cognitive radio networks subject to service interruption: to queue or not to queue[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2011, 10(6):1656 – 1666.
- [12] Kasmi C, Helier M, Darces M. Generalised Pareto distribution for extreme value modelling in electromagnetic compatibility[J]. IET Electronics Letters, 2013, 49(5):334 – 335.
- [13] 唐应辉, 黄蜀娟, 云曦. 离散时间多重度假的 Geom/G/1 排队系统的队长分布[J]. 电子学报, 2009, 37(7):1407 – 1414.

Tang Y H, Huang S J, Yun X. Queue-length distribution for discrete time Geom/G/1 queue with multiple vacations[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7):1407 – 1411. (in Chinese)

- [14] 马志奎, 曹志刚. 认知无线网络用户合作机制接入方案的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4):678 – 686.
Ma Z Y, Cao Z G. Secondary user cooperative opportunistic access scheme in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4):678 – 683. (in Chinese)
- [15] 荣玫, 朱世华, 李锋. 认知无线网络基于 F 范数的频谱共享[J]. 电子学报, 2011, 39(1):95 – 103.
Rong M, Zhu S H, Li F. Spectrum sharing based on Frobenius norm in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1):95 – 100. (in Chinese)
- [16] 滑楠, 曹志刚. 认知无线网络路由研究综述[J]. 电子学报, 2010, 38(4):910 – 918.
Hua N, Cao Z G. Routing of cognitive radio networks: a survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4):910 – 918. (in Chinese)

作者简介



许瑞琛 男, 1984 年生于河南焦作. 现为北京邮电大学信息与通信工程学院博士研究生, 主要研究方向为认知无线电频谱接入机制和隐马尔科夫理论.

E-mail: xurchen@126.com



蒋挺 男, 1962 年生于四川威远. 现为北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为通信技术, 信息理论研究和应用.