

基于 Markov 模型的分布式队列稳定频谱接入算法

李晓辉, 张金钊, 黑永强

(西安电子科技大学 综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对认知无线电系统中次级用户队列稳定性问题, 通过建立发送状态马尔科夫(Markov)模型, 提出了一种基于 CSMA 的自适应分布式频谱接入算法。次级用户根据感知结果自适应地调整退避时长参数, 使稳态服务速率逐渐趋近到达速率, 最终达到队列稳定。此外, 还在满足对主用户碰撞限制的条件下, 推导了次级用户的吞吐量上界, 并证明当次级用户的数据到达速率小于此上界时, 能够通过所提算法保证队列稳定。仿真结果证明了算法的有效性。

关键词: 马尔科夫; 队列稳定性; CSMA; 分布式

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)03-0022-08

Queue stability distributed spectrum access algorithm based on Markov model for cognitive radio network

LI Xiao-hui, ZHANG Jin-zhao, HEI Yong-qiang

(State Key Lab of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The queue stability of the secondary users in cognitive network was considered. A Markov chain model for the state of users in the cognitive network was constructed and a distributed CSMA algorithm was proposed. The secondary users adjust the parameters of back-off time due to the arrival and service rate to ensure the queue stability. Upper bound of the capacity of secondary users under the collision constraining to primary user was derived in closed form. If the arrival rate of secondary users is smaller than the upper bound of capacity, queue stability can be ensured by the proposed algorithm. Simulations verified the effectiveness of the algorithm.

Key words: Markov; queue stability; CSMA; distributed

1 引言

随着无线通信技术的飞速发展, 频谱资源日益紧缺, 人们提出了认知无线电的概念。在认知系统中, 次级用户通过动态地感知和接入主用户信道的频谱“空洞”获得服务, 提高频谱利用率。动态频谱接入(DSA)算法能够在满足对主用户干扰限制的基础上, 提高次级用户吞吐量和服务质量, 因此被广泛关注。

Tong 等提出了 WLAN 系统下信道忙闲状态的 CTMC 数据预测模型^[1], 并在此基础上, 用马尔科

夫决策的方法进行建模, 给出了最大化次级用户吞吐量的 DSA 算法^[2,3]。当感知和发送数据时间任意小时, 文献[4,5]给出了非时隙情况下次级用户的吞吐量上界。上述研究主要目标是提高吞吐量, 但用户的服务质量还需要考虑队列的稳定性。文献[6]在同步时隙制多信道下, 用大规模偏差法给出了一定到达率下次级用户队列的稳态分布。文献[7]提出了一种基于 CSMA 协议的分布式保障用户队列稳定的算法, 但未涉及认知无线电系统。由于集中式的 DSA 算法需要中心调度节点, 而时隙制的系统需要同步, 这些操作都会产生很大的开销, 因此对

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2012-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201135); 国家科技重大专项基金资助项目(2012ZX03001027-004); 111 引智基地基金资助项目(B08038); 中央高校基本科研业务费基金资助项目(72145696)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61201135); The National Science and Technology Major Project (2012ZX03001027-004); The 111 Project (B08038); The Fundamental Research Funds for the Central University (72145696)

分布式非时隙算法的研究具有很重要的意义。

笔者综合考虑了文献[1]中的 CTMC 数据预测模型和文献[7]中的保证队列稳定性的动态 CSMA 算法，建立了一种非时隙信道下的系统发送状态马尔科夫模型。在此基础上，通过最小化次级用户稳态服务速率和到达速率间的 Kullback-Leibler (KL) 距离，给出一种可以保障队列稳定性的分布式 CSMA 自适应频谱接入算法。该算法的优势在于无需中心调度节点和次级用户之间的任何信息交互，次级用户只需根据信道占用情况自适应地调整退避时长，便可实现一定到达速率限制下的队列稳定。此外，笔者推导了在满足对主用户碰撞限制的条件下次级用户的吞吐量上界，并证明当次级用户到达速率之和小于此上界时，所提算法能够保障队列稳定性并满足碰撞限制。该理论上界为确定实际时隙 CSMA 系统中次级用户队列稳定条件提供了参考。

2 系统模型

2.1 系统发送状态马尔科夫模型

本文研究 K 个次级用户共享频谱的情况。主用户采用 CTMC 数据发送模型^[1]，空闲时间和繁忙时间分别服从参数为 ν 和 μ 的指数分布。次级用户采用自适应 CSMA 协议的机制，动态调整退避时间，工作过程分为感知、退避、接入 3 个状态。

假设次级用户队列中始终存在分组并持续正确地感知信道。当感知结果为空闲时，次级用户进入退避状态，退避时间服从参数为 $\mathbf{R}=[R_1, \dots, R_K]$ 的指数分布，其中向量 \mathbf{R} 的第 i 个元素 R_i 对应第 i 个次级用户的退避时长参数。如果退避过程中没有主用户数据到达，退避时间最短的次级用户在退避完成后接入信道，其他次级用户转入感知状态。

任意一个次级用户成功接入信道后，如果发送数据过程中没有主用户数据到达，则发送成功并转入感知状态。反之，如果发送数据过程中有主用户数据到达，则产生碰撞，次级用户将丢弃正在发送的分组并转入感知状态，等待下一次的退避和分组重传。由于次级用户的退避时长是服从指数分布的随机变量，所以任意 2 个次级用户退避时间相等并同时接入信道的概率可以忽略不计，即忽略次级用户之间的碰撞。假设次级用户发送数据时间服从参数为 T 的指数分布，且平均数据发送时间远小于主用户的平均空闲时间，即 $\nu \ll T$ ，系统的时域如图 1 所示。

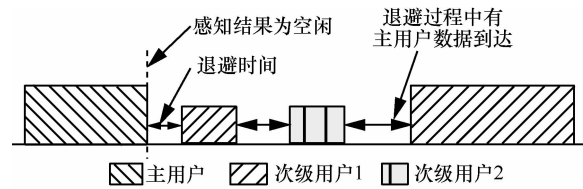


图 1 系统时域

采用向量 $\mathbf{x}=[(x_1, x_2, \dots, x_K), x_{PU}]$, $\forall x_i \in \{0, 1\}$ 表示所有用户的发送状态，1 代表发送，0 代表不发送。因为信道上同时最多只能有 1 个用户发送数据，所以向量 \mathbf{x} 中最多存在一个数字 1，其他都为 0。例如 $\mathbf{x}=[(0, 0, \dots, 0), 0]$ 表示信道空闲状态， $\mathbf{x}=[(1, 0, \dots, 0), 0]$ 表示第 1 个次级用户发送数据，其他次级用户处于感知状态。在没有碰撞发生的情况下，所有用户的发送数据时长和空闲（退避）时长均服从指数分布；在主用户和次级用户发生碰撞时，次级用户立即停止发送。这 2 种情况下，系统发送状态的转移均仅跟当前系统状态有关，因此所有的状态 x 构成了一个时间连续马尔科夫链。状态转移图如图 2 所示，其中 R_i 、 T 、 ν 和 μ 为状态转移速率^[8]。

在图 2 中，当信道处于空闲状态 $[(0, 0, \dots, 0), 0]$ 时，次级用户感知到信道空闲，开始退避。退避时间最短的第 i 个次级用户获得信道使用权，系统状态转移至 $[(0, 0, \dots, 1, \dots, 0), 0]$ 。当第 i 个次级用户数据发送完成后，系统回到空闲状态，次级用户进行新一轮的退避。对主用户而言，可以在任意时间发送数据，图中反映为所有状态都可以通往状态 $[(0, 0, \dots, 0), 1]$ 。当从任意次级用户发送状态转移到主用户发送状态时，发生碰撞。

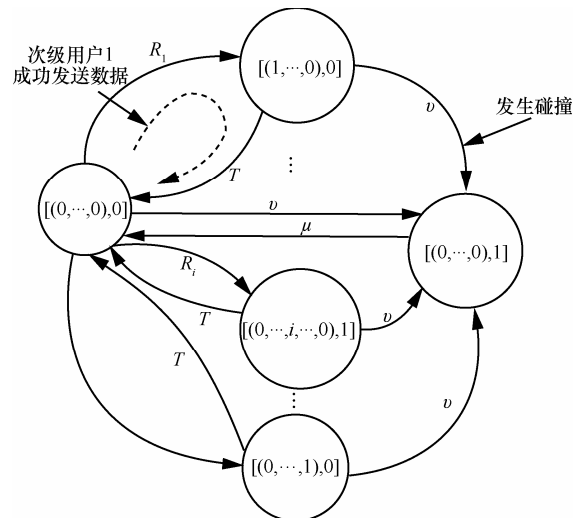


图 2 系统马尔科夫状态转移

根据图 2, 利用时间连续马尔科夫链稳态概率的求解公式, 可以得到所有系统状态的稳态概率为^[8]

$$\begin{cases} P_{SU_i} = \frac{\mu R_i}{(v + \mu)(v + T + R_1 + \dots + R_K)}, i \in \{1, 2, \dots, K\} \\ P_{PU} = \frac{v}{v + \mu} \\ P_{idle} = \frac{\mu(v + T)}{(v + \mu)(v + T + R_1 + \dots + R_K)} \\ P = \{P_{SU_1}, \dots, P_{SU_K}, P_{PU}, P_{idle}\} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_{SU_i}, i \in \{1, 2, \dots, K\}$ 表示第 i 个次级用户发送状态的稳态概率, P_{PU} 表示主用户发送状态的稳态概率, P_{idle} 表示信道空闲状态的稳态概率。通过观察可得, 主用户发送状态的稳态概率只和 v, μ 有关, 即主用户是否发送数据只取决于自身而不受次级用户影响, 这与假定的情况是相符的。

2.2 系统碰撞分析

针对次级用户和主用户, 分别定义碰撞概率为

$$P_{c_SU} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\text{发生碰撞的SU分组个数}}{[0, T] \text{发送的SU分组个数}} \quad (2)$$

$$P_{c_PU} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\text{发生碰撞的PU分组个数}}{[0, T] \text{发送的PU分组个数}} \quad (3)$$

当 $T \rightarrow \infty$ 时, 假设系统达到稳态。根据马尔科夫链的性质, 式(2), 式(3)等效表示形式如下。

对每个次级用户而言, 碰撞发生在接入信道之后, 稳态碰撞概率为从次级用户发送状态转移到主用户发送状态的概率, 因此式(2)等效为^[8]

$$P_{c_SU} = \frac{v}{v + T} \quad (4)$$

对主用户而言, 稳态下发生碰撞的概率为主用户开始发送数据时, 信道被次级用户占用的稳态概率, 因此式(3)等效为

$$\begin{aligned} P_{c_PU} &= \left(\sum_{i=1}^K P_{SU_i} \right) / \left(P_{idle} + \sum_{i=1}^K P_{SU_i} \right) \\ &= \frac{\mu \sum_{i=1}^K R_i}{(v + \mu) \left(v + T + \sum_{i=1}^K R_i \right)} / \frac{\mu}{v + \mu} \\ &= \sum_{i=1}^K R_i / \left(v + T + \sum_{i=1}^K R_i \right) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可得, 对于每个次级用户而言, 发生碰撞的概率为定值 $v/(v + T)$ 。这是因为, 主用户空闲时长服从指数分布, 由于指数分布的无记忆

性, 使得对次级用户而言, 从任意时刻接入信道开始, 发生碰撞的概率都一样。对于主用户而言, 随着 R_{total} 增大, 次级用户退避时间减小, 接入信道概率增大, 碰撞概率增大, 这和实际情况是相符的。

2.3 稳态服务速率和可行到达速率

次级用户的稳态服务速率和数据发送速率、发送状态的稳态概率以及碰撞概率有关, 第 i 个次级用户的稳态服务速率表示为^[7]

$$S_{SU_i} = \text{数据发送速率} \times P_{SU_i} \times (1 - P_{c_SU}) \quad (6)$$

其中, $(1 - P_{c_SU})$ 表示发生碰撞的数据没有被算入次级用户的吞吐量。

将次级用户的数据发送速率归一化 (例如取 1 data/ms)

$$\begin{aligned} S_{SU_i}(R) &= 1 \times P_{SU_i} \times (1 - P_{c_SU}) \\ &= \frac{\mu R_i}{(v + \mu) \left(v + T + \sum_{i=1}^K R_i \right)} \times \left(1 - \frac{v}{v + T} \right) \\ &= \frac{\mu T R_i}{(v + T)(v + \mu) \left(v + T + \sum_{i=1}^K R_i \right)} \end{aligned} \quad (7)$$

定义稳态服务速率向量

$$\mathbf{S} \equiv \{S_{SU_1}, \dots, S_{SU_K}, S_{K+1}\}$$

其中,

$$S_{K+1} \equiv \frac{\mu T (v + T)}{(v + T)(v + \mu) \left(v + T + \sum_{i=1}^K R_i \right)}$$

根据式(7)可得

$$\sum_i S_i = \frac{\mu T}{(v + T)(v + \mu)} \quad (8)$$

假设次级用户到达数据流相互独立且分别服从参数为 $\lambda_{SU_i} \in (1, 0), i \in \{1, \dots, K\}$ 的泊松分布。定义归一化的到达速率向量 $\lambda \equiv \{\lambda_{SU_1}, \dots, \lambda_{SU_K}, \lambda_{K+1}\}$, λ_{K+1} 为引入变量。将满足如下条件的将满足限制条件 λ 称为可行到达速率向量

$$\sum_i \lambda_i = \frac{\mu T}{(v + T)(v + \mu)} \text{ 和 } \sum_{i=1}^K \lambda_i < \frac{\mu T}{(v + T)(v + \mu)}$$

所有可行到达率向量构成可行到达速率向量空间 ζ 。

3 数学模型

3.1 KL 距离优化模型

根据排队论可知, 如果稳态服务速率向量 \mathbf{S} 和

到达速率向量 λ 相等, 则能够保证队列稳定。此目标可以通过最小化 S 和 λ 之间的 KL 距离来实现。

为此, 构造 KL 距离为

$$\begin{aligned} D_{\text{KL}}(\lambda, S) &= \sum_i (\lambda_i \ln(\lambda_i / S_i(r)) - \lambda_i + S_i(r)) \\ &= \sum_i \lambda_i \ln \lambda_i - \sum_i \lambda_i \ln S_i(r) - \\ &\quad \sum_i \lambda_i + \sum_i S_i(r) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $r = \{r_1, \dots, r_K\}, r_i = \ln(R_i)$ 。

由于引入了变量 S_{K+1} 和 λ_{K+1} , 所以 $\sum_i \lambda_i =$

$$\sum_i S_i(r) = \frac{\mu T}{(v+T)(v+\mu)}, \text{ 最小化式(9)相当于最大}$$

化 $\sum_i \lambda_i \ln S_i(r)$, 因此定义如下

$$\begin{aligned} F(r) &= \sum_i \lambda_i \ln(S_i(r)) \\ &= \sum_{i=1}^K \lambda_i \ln \frac{\mu T \exp(r_i)}{(v+T)(v+\mu) \left(v+T + \sum_{i=1}^K \exp(r_i) \right)} + \\ &\quad \lambda_{K+1} \ln \frac{\mu T (v+T)}{(v+T)(v+\mu) \left(v+T + \sum_{i=1}^K \exp(r_i) \right)} \\ &= \sum_{i=1}^K \lambda_i \ln(\mu T \exp(r_i)) - \\ &\quad \sum_{i=1}^{K+1} \lambda_i \ln \left((v+T)(v+\mu) \left(v+T + \sum_{i=1}^K \exp(r_i) \right) \right) + \\ &\quad \lambda_{K+1} \ln(\mu T (v+T)) \end{aligned} \quad (10)$$

给出下面的优化模型

$$\max F(r) \quad (11)$$

因为 $\ln(P_i(r)) < 0, F(r) < 0$, 所以 $F(r)$ 存在上界。

引理 1 如果到达率向量 $\lambda \in \zeta$, 那么 $\max F(r)$ 存在最优解 (即存在 \bar{r}^* 满足 $F(\bar{r}^*) = \max F(r)$), 且最优解满足 $S_{\text{SU}_i}(\bar{r}^*) = \lambda_{\text{SU}_i}$ 。

证明 因为 $\lambda \in \zeta$, $\sum_i \lambda_i = \mu T / ((v+T)(v+\mu))$ 且 $\lambda_{K+1} > 0$, 所以

$$\begin{aligned} F(r) &= \sum_i \lambda_i \ln(S_i(r)) \\ &= \sum_{i=1}^K \lambda_i \ln(\mu T \exp(r_i)) - \frac{\mu T}{(v+T)(v+\mu)} \cdot \\ &\quad \ln \left((v+T)(v+\mu) \left(v+T + \sum_{i=1}^K \exp(r_i) \right) \right) + \\ &\quad \lambda_{K+1} \ln(\mu T (v+T)) \end{aligned} \quad (12)$$

可以证明 $F(r)$ 是个凸函数, 在最优解 $r = r^*$ 处, 应满足

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(r)}{\partial r_i} &= \lambda_i - \frac{\mu T \exp(r_i)}{(v+T)(v+\mu) \left(v+T + \sum_{i=1}^K \exp(r_i) \right)} \\ &= \lambda_{\text{SU}_i} - S_{\text{SU}_i}(r^*) = 0 \quad i \in \{1, \dots, K\} \end{aligned} \quad (13)$$

即

$$S_{\text{SU}_i}(r^*) = \lambda_{\text{SU}_i} \quad (14)$$

值得注意的是, 可行到达率必须满足条件 $\lambda_{K+1} > 0$, 即 $\sum_{i=1}^K \lambda_{\text{SU}_i} < \frac{\mu T}{(v+T)(v+\mu)}$ 。如果 $\sum_{i=1}^K \lambda_{\text{SU}_i} = \frac{\mu T}{(v+T)(v+\mu)}$, 那么只有当 $r^* \rightarrow \infty$ 时, 才能满足 $S_{\text{SU}_i}(r^*) \rightarrow \lambda_{\text{SU}_i}$ 。

3.2 分布式的自适应频谱接入算法

本节将通过求解式(11)中的优化模型, 给出一种分布式的自适应 DSA 算法。由式(13)可得

$$\frac{\partial F(r)}{\partial r_i} = \lambda_{\text{SU}_i} - S_{\text{SU}_i}(r), \quad i \in \{1, \dots, K\} \quad (15)$$

所以, 一种求解式(11)中优化模型的次梯度算法为

$$r_i(t+1) = r_i(t) + a(t) \cdot (\lambda_{\text{SU}_i} - S_{\text{SU}_i}(r(t))) \quad (16)$$

其中, t 表示第 t 个时段 (将系统时间划分为等间隔的时段, 每个时段长度为 b)。在每个时段的开始, 次级用户调整退避时间参数 r 。 $a(t)$ 表示第 t 时段的调整步长。 λ_{SU_i} 、 $S_{\text{SU}_i}(r(t))$ 为数据到达速率和稳态下的服务速率。分布式的系统中, 由于次级用户不能得知其他次级用户的退避时间参数, 所以无法通过 $S_{\text{SU}_i}(r(t))$ 的表达式计算得到准确的稳态服务速率。因此, 式(16)中的算法不能在实际中直接应用。针对此问题, 给出下面的解决方法。

用第 $t+1$ 到第 t 个时段之间的平均到达速率表示第 t 个时段的到达速率, 记为 $\lambda'_{\text{SU}_i}(t)$; 用第 t 到第 $t+1$ 个时段之间的平均服务速率表示第 t 个时段的稳态服务速率, 记为 $S'_{\text{SU}_i}(t)$ 。因此, 给出一种在实际中更为可行的算法

$$r_i(t+1) = r_i(t) + a \cdot (\lambda'_{\text{SU}_i}(t) - S'_{\text{SU}_i}(t)) \quad (17)$$

其中, a 为固定的调整步长参数。次级用户通过统计每个时段的到达和服务数据量, 再除以时段长度来获得平均到达速率和服务速率。下面证明该算法能够保障队列的稳定性。

根据排队论, 第 i 个次级用户的队列长度可动态地表示为

$$Q_i(t+1) = [Q_i(t) + b \cdot (\lambda'_{\text{SU}_i}(t) - S'_{\text{SU}_i}(t))]_+ \quad (18)$$

令 $Q_i(t-1) = 0$, $r_i(t-1) = r_{\min}$, r_{\min} 为一个较小的常数 (原则上 r_{\min} 的取值可以无限小, 但太小会

影响算法的收敛速度), 由式(17)和式(18)得

$$r_i(t) = \frac{a}{b} Q_i(t) + r_{\min} \quad (19)$$

可以看到, 如果 r_i 达到稳定值, Q_i 也将达到稳定值。因此, 式(17)中算法能够保障队列稳定性。

关于参数 a 和 b , 如果 b 很大, 能够保证系统马尔科夫链在每个时段内收敛, 那么平均服务速率 $S'_{SU_i}(t) \approx S_{SU_i}(t)$ 而且 $\lambda'_{SU_i}(t) \approx \lambda_{SU_i}$ 。如果 b 不是很大, 但是 a 很小, r 将会缓慢变化。假设这种缓慢变化可以跟踪马尔科夫链稳态概率的缓慢变化过程, 那么也会有 $S'_{SU_i}(t) \approx S_{SU_i}(t)$ 。因此, 在不同情况下, 可以通过调整 a 使 r 达到最优解或者最优解的附近值。关于 a 的取值对算法性能的影响将在下文仿真部分给出。

3.3 碰撞干扰限制下的数学建模及求解

通过引理 1 得出, 如果 KL 距离能够取到最优值, 会有 $S_{SU_i}(r^*) = \lambda_{SU_i}$, 但是式(11)中的优化模型并没有考虑次级用户对主用户的碰撞限制, 而考虑碰撞限制后的优化模型为

$$\begin{aligned} & \max F(r) \\ & s.t. P_{c_PU} \leq \gamma \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $P_{c_PU} = \frac{R_{total}}{(v+T)+R_{total}}$, γ 为系统规定的对主

用户的最大碰撞概率。由限制条件得到 $\sum_{i=1}^K R_i \leq \frac{(v+T)\gamma}{1-\gamma}$, 此时 $F(r)$ 有可能无法取到最优解值满足 $S_{SU_i}(r^*) = \lambda_{SU_i}$, 次级用户的队列稳定性也就无法保障。针对此问题, 给出下面的引理。

引理 2 当主用户采用 CTMC 模型时, 如碰撞限制 P_{c_PU} 上限为 γ , 则次级用户的吞吐量满足

$$\sum_i S_{SU_i} \leq \gamma \cdot (1 - P_{PU}) \cdot P_{c_SU} \equiv S_{SU_max}$$

当次级用户的输入速率满足 $\sum_{i=1}^K \lambda_{SU_i} < S_{SU_max}$ 时, 式(11)中优化模型的最优解和式(20)中优化模型的最优解相等。

证明 碰撞限制为 γ 带来的约束为

$$\sum_{i=1}^K R_i \leq \frac{(v+T)\gamma}{1-\gamma} \equiv R_{max} \quad (21)$$

又由式(7)得

$$\sum_{i=1}^K S_{SU_i}(R) = \frac{\mu T \sum_{i=1}^K R_i}{(v+T)(v+\mu)(v+T + \sum_{i=1}^K R_i)} \quad (22)$$

所以

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K S_{SU_i}(R) & \leq \frac{\mu T R_{max}}{(v+T)(v+\mu)(v+T + R_{max})} \\ & = \gamma \cdot \frac{\mu}{v+\mu} \cdot \frac{T}{v+T} \end{aligned} \quad (23)$$

即

$$\sum_i S_{SU_i} \leq \gamma \cdot (1 - P_{PU}) \cdot P_{c_SU} \equiv S_{SU_max} \quad (24)$$

由式(24)有

$$S_{SU_max} = \gamma \cdot \frac{\mu}{v+\mu} \cdot \frac{T}{v+T} < \frac{\mu}{v+\mu} \cdot \frac{T}{v+T}$$

所以, 当次级用户的到达速率之和满足 $\sum_{i=1}^K \lambda_{SU_i} <$

S_{SU_max} 时

$$\sum_{i=1}^K \lambda_{SU_i} < S_{SU_max} < \frac{\mu}{v+\mu} \cdot \frac{T}{v+T} \quad (25)$$

由上文中可行到达速率的定义, 有 $\lambda \in \zeta$, 根据引理 1, $\max F(r)$ 存在最优解, 且满足 $S_{SU_i}(r^*) = \lambda_{SU_i}$ 。所以

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K S_{SU_i}(r^*) & = \frac{\mu T \sum_{i=1}^K \exp(r_i^*)}{(v+T)(v+\mu)(v+T + \sum_{i=1}^K \exp(r_i^*))} \\ & < S_{SU_max} = \gamma \cdot \frac{\mu}{v+\mu} \cdot \frac{T}{v+T} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^K \exp(r_i^*)}{v+T + \sum_{i=1}^K \exp(r_i^*)} = \frac{\sum_{i=1}^K R_i^*}{v+T + \sum_{i=1}^K R_i^*} = P_{c_PU} < \gamma \quad (27)$$

由式(27)可以看出, 式(11)中优化模型的最优解 r^* 满足式(20)中优化模型的约束条件, 而 2 个模型的目标函数一样, 都是 $\max F(r)$ 。所以, r^* 也是式(20)中优化模型的最优解。

根据引理 2 得出结论: 当次级用户到达速率满足 $\sum_{i=1}^K \lambda_{SU_i} < S_{SU_max}$ 时, 式(11)中优化模型的最优解和

式(20)的最优解相等。因此, 求解式(11)中优化模型最优解的分布式算法可以用于求解式(20)中的优化模型, 并能够得到最优的 r^* , 即能够在满足对主用户的碰撞概率小于 γ 的基础上, 保证队列的稳定性。

4 仿真分析

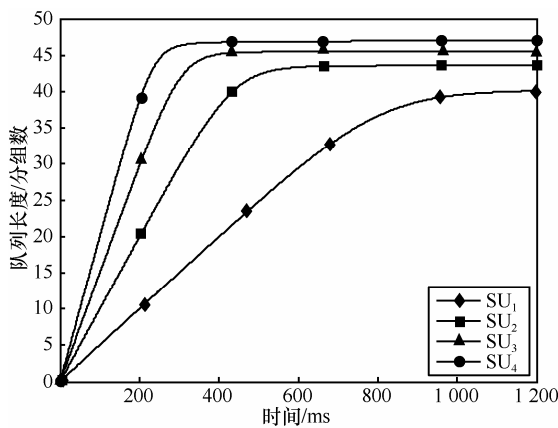
仿真中验证 5 个次级用户共享信道时的算法性能。研究不同次级用户到达速率和算法步长因子对队列稳定性的影响并给出相关结论。主要的参数设置如表 1 所示。根据主用户 CTMC 模型的性质, 此时主用户信道繁忙概率为 $v/(v+\mu) \approx 0.1667$ 。次级用户平均发送时长为 0.1 ms, 远小于主用户的平均空闲时长 5 ms。

1) 次级用户到达速率对队列稳定性的影响

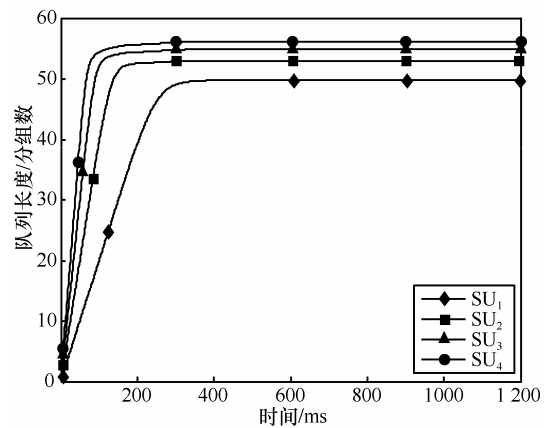
图 3 为不同到达速率下, 次级用户的稳态队列长度随时间的变化情况。表 2 为对应图 3 的实验数据。

参数	值
时段长度 b	5 ms
步长因子 a	1
主用户空闲时长参数 v	0.2 ms^{-1}
主用户繁忙时长参数 μ	1 ms^{-1}
次级用户发送数据时长参数 T	10 ms^{-1}
次级用户初始队列长度	0
次级用户初始退避时长参数 r_{\min}	-10

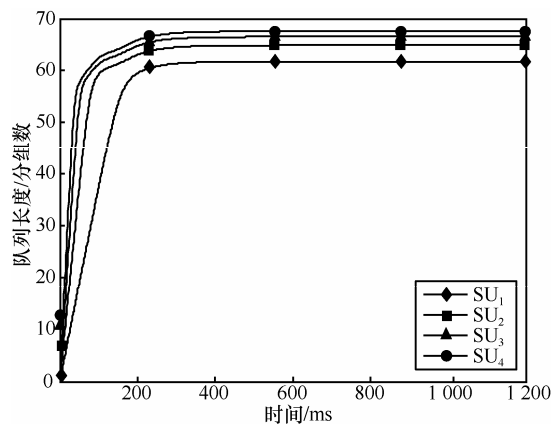
从表 2 可以看出, 随着次级用户到达速率不断增大, 次级用户退避时间不断减小, 更积极地接入信道, 次级用户占用信道的概率、最优退避时间也都逐渐增大。当到达速率超过可行的到达速率范围, 即到达速率之和超过 $\mu T/(v+T)(v+\mu) = 0.8170$ 时, 次级用户占用信道的概率逼近极限值 0.8333, 退避时间趋于无穷小, 无法保障次级用户的队列稳定性。这说明, 如果不考虑对主用户的碰



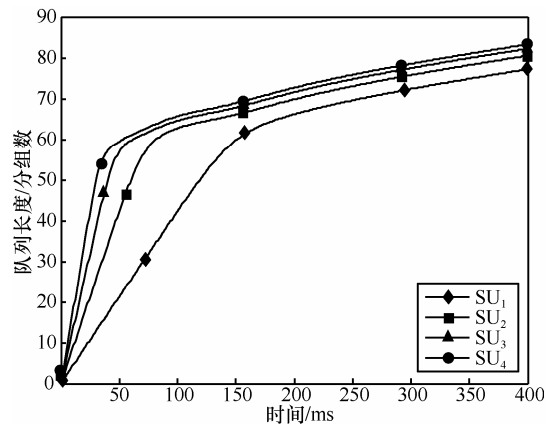
(a) 各次级用户到达率为[0.01 0.02 0.03 0.04]



(b) 各次级用户到达率为[0.04 0.08 0.12 0.16]



(c) 各次级用户到达率为[0.075 0.15 0.225 0.3]



(d) 各次级用户到达率为[0.085 0.17 0.225 0.34]

图 3 不同输入速率下的次级用户队列稳定性

表 2 不同输入速率下的仿真数据

次级用户到达速率	占用信道概率	碰撞概率	最优退避时长参数	队列是否稳定
[0.01 0.02 0.03 0.04]	0.102 0	0.122 4	[0.142 1 0.284 5 0.426 8 0.569 0]	是
[0.04 0.08 0.12 0.16]	0.408 0	0.489 6	[0.978 4 1.956 9 2.935 3 3.913 7]	是
[0.075 0.15 0.225 0.3]	0.765 0	0.918 0	[11.419 22.83 8 34.25 7 45.676 1]	是
[0.085 0.17 0.255 0.34]	0.833 3	1	$+\infty$	否

撞，次级用户的最大吞吐量为 0.817 0。由于假设退避时间可以无限短，而且没有考虑感知错误以及次级用户之间的碰撞等问题，所以 0.817 0 是理想情况下次级用户的吞吐量上限。

图 4 中给出次级用户的吞吐量和对主用户碰撞概率的关系。可以看出，对主用户的碰撞概率随着次级用户吞吐量的增加而线性增加，这和文献[4]中所给出的结论一致。当次级用户的吞吐量趋近理论值上限时，对主用户的碰撞概率也将趋近于 1。换个角度讲，图 4 中纵轴上一定碰撞概率对应的横坐标即为该碰撞概率限制下次级用户吞吐量的上限。

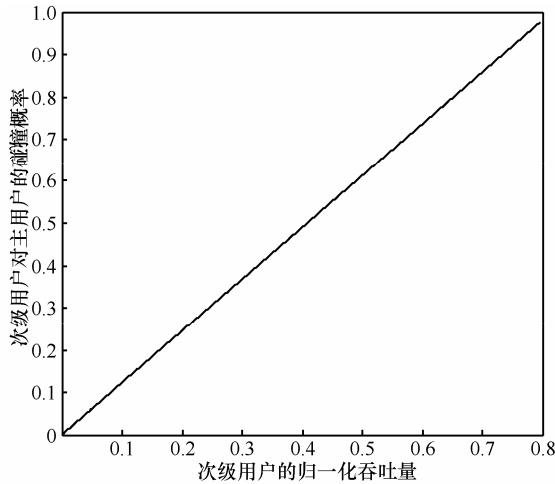


图 4 次级用户的吞吐量和碰撞概率的关系

2) 步长因子 a 对队列稳定的影响

图 5 为 $\lambda_{SU} = [0.03 \ 0.06 \ 0.09 \ 0.12 \ 0.15]$ 时，次级用户 1 在不同步长因子下的稳态队列长度随时间变化情况。可以看出，当步长因子 a 增大时，次级用户队列达到稳定的时间越短，而且稳定后的队列长度也越小。如果 a 过大，会造成算法无法收敛到最优值 r^* ，会造成队列震荡。如图 6 所示，当 $a = 20$ 和 $a = 30$ 时，由于 a 过大，造成 r 值的震荡，次级用户队列无法稳定。

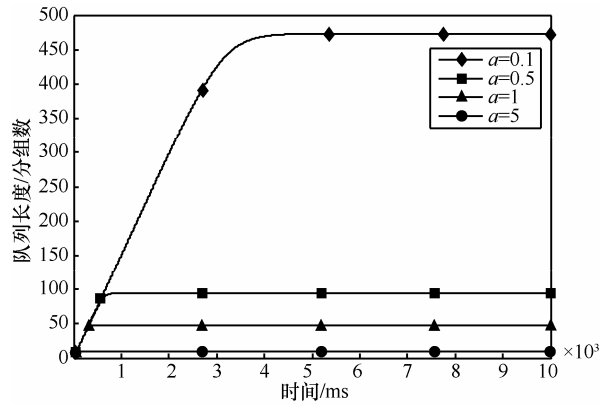
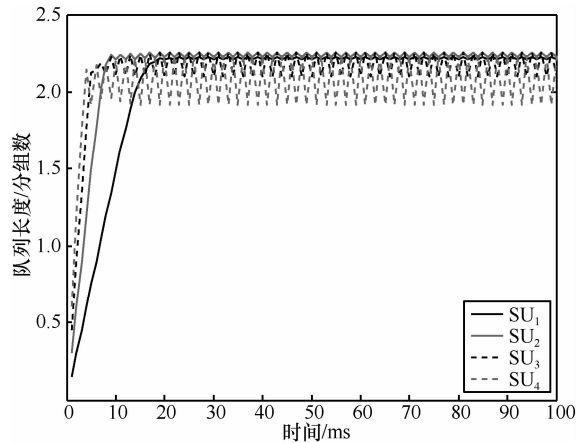
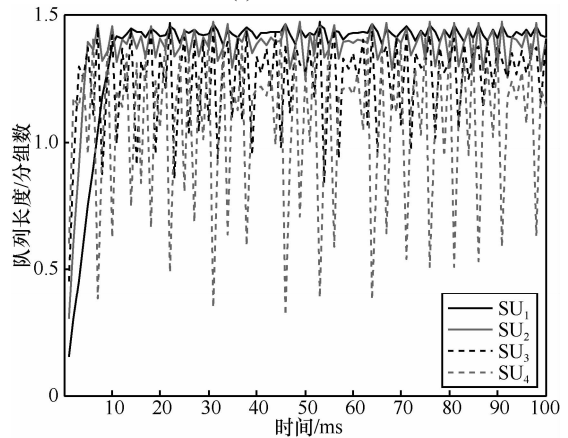


图 5 步长因子 α 对队列稳定的影响



(a) $a = 20$



(b) $a = 30$

图 6 步长因子过大时的队列震荡

5 结束语

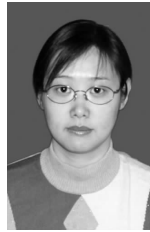
本文给出了多个次级用户共享频谱的系统发送状态马尔科夫转移模型。在此基础上,给出了一种分布式的自适应 CSMA 频谱接入算法,推导了在满足对主用户碰撞限制条件下,保障次级用户队列稳定性的条件。仿真结果证明了所提算法的有效性。在后续的研究中,将考虑次级用户的感知时延和感知错误等问题对所提算法的影响。

参考文献:

- [1] GEIRHOFER S, TONG L, SADLER B M. Dynamic spectrum access in the time domain modeling and exploiting white space[J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(5): 66-72.
- [2] GEIRHOFER S, TONG L, SADLER B M. Cognitive medium access: constraining interference based on experimental models[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 95-105.
- [3] LI X, ZHAO Q, GUAN X, *et al.* Optimal cognitive access of Markovian channels under tight collision constraints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(4):746-756.
- [4] HUANG S, LIU X, DING Z. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[A]. IEEE INFOCOM 2008[C]. Phoenix, USA, 2008. 1427-1435.
- [5] HUANG S, LIU X, DING Z. Optimal sensing-transmission structure for dynamic spectrum access[A]. IEEE INFOCOM 2009[C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2009. 2295-2303.
- [6] LAOURINE A, CHEN S, TONG L. Queuing analysis in multichannel cognitive spectrum access: a large deviation approach[A]. IEEE INFOCOM 2010[C]. San Diego, USA, 2010.1-9.

- [7] JIANG L, WALRAND J. A distributed CSMA algorithm for throughput and utility maximization in wireless network[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3): 960-972.
- [8] RESNICK S I. Adventures in Stochastic Processes[M]. Boston: Birkhauser, 1992.

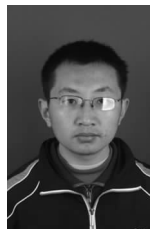
作者简介:



李晓辉 (1972-), 女, 河北衡水人, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为宽带无线接入、无线资源管理。



张金钊 (1988-), 男, 陕西渭南人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电、移动通信。



黑永强 (1983-), 男, 陕西绥德人, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为认知无线电、无线通信。