

认知无线网络中具有服务质量支持的机会频谱共享

刘 凯, 贺丽阳, 张晨宇, 刘 锋

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种具有服务质量(QoS)支持的机会频谱共享(OSS)算法,来协调解决多个主用户(PU)和次级用户(SU)接入使用频谱资源的问题. SU 具有不同的接入优先级和中断优先级,从而满足 SU 不同的服务质量需求;利用一个六维马尔科夫模型分析了两个具有不同中断概率和接入概率的 SU 群情况下该算法的性能,包括 SU 的中断概率、阻塞概率和系统吞吐量. 数值结果表明,所提频谱共享算法在保证主用户通信质量的前提下,可以满足不同 SU 群的 QoS 需求,并且在频谱利用率上优于其它频谱共享策略.

关键词: 认知无线网络;机会频谱共享;服务质量保证;马尔科夫模型

中图分类号: TN92 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.018

0 引言

认知无线电技术是解决当前无线电频谱资源日益紧张问题的有效手段,而频谱分配技术是其能否实现的关键技术之一<sup>[1]</sup>. 随着对频谱分配策略的深入研究,目前的主要问题是如何在主用户(PU)不受干扰的情况下为次级用户(SU)分配频谱资源<sup>[2]</sup>. 文献[3]给出了阻止机会频谱共享策略应用的挑战. 为协调动态频谱接入,文献[4]提出了一种异构优先级频谱共享策略,但其马尔科夫模型较为复杂. 文献[5]提出了一种集中动态频谱分配算法来计算用户之间相互影响的等级,并利用动态缩减相互影响来提高频谱利用,使服务质量(QoS)保持在一个满意的范围.

现有研究工作主要关注主用户和同一类次级用户群或者仅具有不同接入优先级的次级用户,这不适用于目前的认知无线网络,因为它需要提供语音、数据、视频、图像等多种业务服务,而这些业务具有不同的 QoS 要求. 文献[6]考虑了多个主用户和多个次级用户种类条件下的动态频谱共享模型,其中主用户愿意租赁一部分带宽给次级用户来获取额外的收入,该模型的系统吞吐量不是很高. 在多数研究中,每个主用户的频谱带宽被分为多个次级用户频谱带宽,这样很难控制,并

给商业应用带来了巨大挑战.

为了解决上述问题,笔者提出了具有 QoS 支持的机会频谱共享(OSS)算法. 在该算法中,次级用户根据自身的接入优先级和中断优先级来利用主用户的空闲信道. 此外,笔者利用马尔科夫链来分析次级用户的性能,如中断概率、阻塞概率和系统吞吐量. 数值结果表明,所提算法在保证不同用户 QoS 的同时可以明显提高频谱利用率.

1 机会频谱共享算法

为了利用授权频谱中暂时未被利用的信道,考虑如图 1 所示的认知无线网络,其中存在两类次级用户和一个主用户,由基站控制所有用户的频谱接入. 次级用户包括具有不同 QoS 需求和中断概率的实时次级用户(RT-SU)和非实时次级用户(NRT-SU). 实时次级用户和非实时次级用户具有不同的接入概率.

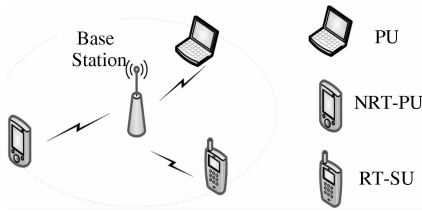


图 1 认知无线网络模型

Fig.1 Cognitive radio network model

收稿日期:2014-03-06;修订日期:2014-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61231013,61271195);国家创新研究群体科学基金项目(61221061)

作者简介:刘凯(1973-),男,山西孝义人,北京航空航天大学副教授、博士,主要从事无线通信网络研究,Email: liuk@buaa.edu.cn.

次级用户的接入概率函数为

$$f(x) = 1 - a \cdot \frac{x}{N}. \tag{1}$$

式中: $a$  为接入概率限制因子; $N$  为频率信道数,且有  $0 \leq a \leq 1, 0 \leq x \leq N$ .

用  $A = [\alpha_1, \alpha_2 \cdots, \alpha_s]$  和  $B = [\beta_1, \beta_2 \cdots, \beta_r]$  分别表示实时次级用户和非实时次级用户的接入概率因子,其中  $\alpha_1 < \alpha_2 \cdots < \alpha_s, \beta_1 < \beta_2 \cdots < \beta_r$ . 设  $s$  和  $r$  分别表示具有不同接入概率用户的个数. 为了简单起见,文中假设  $s = 2, r = 2$ ,并且  $\alpha_1 = 0, \beta_1 = 0$ . 这样  $A$  和  $B$  可以表示为  $A = [0, \alpha]$  和  $B = [0, \beta]$ ,而实时次级用户和非实时次级用户可以表示为  $\text{RT-SU}_1, \text{RT-SU}_2$  和  $\text{NRT-SU}_1, \text{NRT-SU}_2$ .

所有用户要占用频谱资源时必须告知基站自己所处的状态. 基站利用收集到的用户信息来判断用户是否可以接入频谱. 整个频谱分为  $N$  个不同的频率信道,分别记为  $F_1, F_2, \cdots, F_N$ . 每个主用户或次级用户仅需要一个信道进行数据传输. 主用户比次级用户有更高的优先级来使用信道.

当主用户需要使用信道时,它会随机选择一个没有被其它用户使用的信道并将选择结果告知基站. 如果被选择的信道被非实时次级用户占用,非实时次级用户必须马上中断通信并退出信道. 如果被选择的信道是被实时次级用户占用,基站会查看是否有空闲信道存在. 如果有空闲信道,基站就把该主用户安排到空闲信道上,否则实时用户通信将被中断. 通过这一方案,实时次级用户比非实时次级用户有更低的的中断概率,可以在保持主用户优先级的同时提高频谱利用率.

图 2 为  $N = 8$  时的机会频谱共享算法. 在  $t_0$  时刻,主用户占用  $F_2$ ,实时用户占用  $F_3, F_4$ ,而非实时用户占用  $F_7, F_8$ .  $t_1$  时刻,刚到新业务的主用户拟使用被实时次级用户使用的  $F_3$  信道,基站首先检查系统中是否有空闲信道存在. 当基站发现  $F_1$  是空闲的,就会立即将  $F_1$  分配给主用户.  $t_2$  时刻,刚到新业务的主用户拟使用被非实时次级用户使用的  $F_7$  信道. 考虑到非实时次级用户有较低的 QoS 优先级,它的当前通信立即被中断,主用户直接接入该信道.  $t_3$  和  $t_4$  时刻,系统中不存在空闲信道. 为保证主用户的最高优先级,当主用户试图接入信道时,实时次级用户和非实时次级用户必须中断传输.

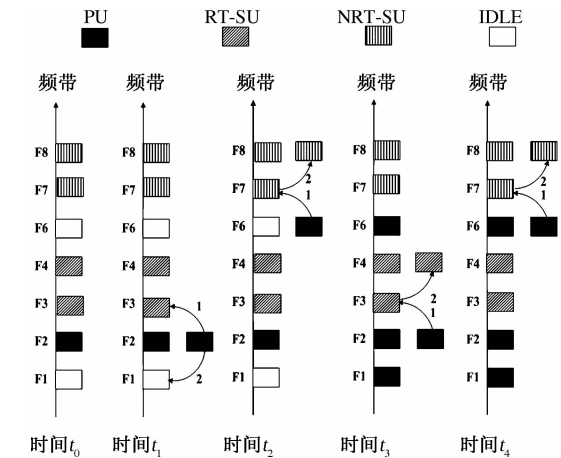


图 2 具有 QoS 支持的 OSS 算法  
Fig. 2 QoS-guaranteed OSS algorithm

2 性能分析

2.1 马尔科夫链模型

这部分利用了马尔科夫链模型分析了所提机会频谱共享算法的系统性能. 假设  $\text{PU}, \text{RT-SU}_1, \text{RT-SU}_2$  和  $\text{NRT-SU}_1, \text{NRT-SU}_2$  的业务请求服从独立的泊松过程,到达率分别为  $\lambda_{\text{PU}}, \lambda_{\text{RT}_1}, \lambda_{\text{RT}_2}$  和  $\lambda_{\text{NRT}_1}, \lambda_{\text{NRT}_2}$ ,而它们的通信时长服从均值分别为  $\mu_{\text{PU}}^{-1}, \mu_{\text{RT}_1}^{-1}, \mu_{\text{RT}_2}^{-1}$  和  $\mu_{\text{NRT}_1}^{-1}, \mu_{\text{NRT}_2}^{-1}$  的指数分布.

马尔科夫链模型的状态用  $(i, j, k, l, m, n)$  表示,其中  $i, j, k, l$  和  $m$  分别表示  $\text{PU}, \text{RT-SU}_1, \text{RT-SU}_2$  和  $\text{NRT-SU}_1, \text{NRT-SU}_2$  占用系统信道的数目.  $n$  表示事件状态的示数,其值如表 1 所示.

表 1 事件状态表  
Tab. 1 Indicator of event states

$n$	事件
0	主用户和次级用户没有发生冲突
1	当 $i + j + k + l + m < N$ 时 $\text{NRT-SU}_1$ 被中断
2	当 $i + j + k + l + m < N$ 时 $\text{NRT-SU}_2$ 被中断
3	当 $i + j + k + l + m < N$ 时 $\text{NRT-SU}_2$ 阻塞
4	当 $i + j + k + l + m < N$ 时 $\text{RT-SU}_2$ 阻塞
5	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{NRT-SU}_1$ 被中断
6	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{NRT-SU}_2$ 被中断
7	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{RT-SU}_1$ 被中断
8	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{RT-SU}_2$ 被中断
9	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{NRT-SU}_1$ 阻塞
10	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{NRT-SU}_2$ 阻塞
11	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{RT-SU}_1$ 阻塞
12	当 $i + j + k + l + m = N$ 时 $\text{RT-SU}_2$ 阻塞

$\pi(i, j, k, l, m, n)$  表示状态为  $(i, j, k, l, m, n)$  时的稳态概率. 在本文中,主用户和次级用户的到达事件是相互独立的,那么就可以将没有冲突情况下的稳态概率表示为

$$\pi(i, j, k, l, m, 0) = e_i \cdot d_j \cdot f_k \cdot g_l \cdot h_m. \quad (2)$$

各部分的分布函数为

$$e_i = e_{i-1} \cdot \frac{\theta_{PU}}{i}. \quad (3)$$

$$d_j = d_{j-1} \cdot \frac{\theta_{RT-SU1}}{j}. \quad (4)$$

$$f_k = (1 - \alpha \cdot \frac{k}{N}) \cdot f_{k-1} \cdot \frac{\theta_{RT-SU2}}{k}. \quad (5)$$

$$g_l = g_{l-1} \cdot \frac{\theta_{NRT-SU1}}{l}. \quad (6)$$

$$h_m = (1 - \beta \cdot \frac{m}{N}) \cdot h_{m-1} \cdot \frac{\theta_{NRT-SU2}}{m}. \quad (7)$$

其中  $\theta = \lambda / \mu$  表示服务强度.

由式(3)~(7),可以得到

$$\pi(i, j, k, l, m, 0) = \prod_{a=1}^k (1 - \alpha \cdot \frac{a}{N}) \cdot \prod_{b=1}^m (1 - \beta \cdot \frac{b}{N}) \cdot \frac{\theta_{PU}^i}{i!} \cdot \frac{\theta_{RT1}^j}{j!} \cdot \frac{\theta_{RT2}^k}{k!} \cdot \frac{\theta_{NRT1}^l}{l!} \cdot \frac{\theta_{NRT2}^m}{m!} \cdot \pi(0, 0, 0, 0, 0, 0). \quad (8)$$

其中  $\pi(0, 0, 0, 0, 0, 0) = e_0 \cdot d_0 \cdot f_0 \cdot g_0 \cdot h_0$ .

在上述基础上,可以进一步得到马尔科夫链模型的状态转换图,如图3所示.基于状态转移概率图,可以得到各稳态状态的概率.

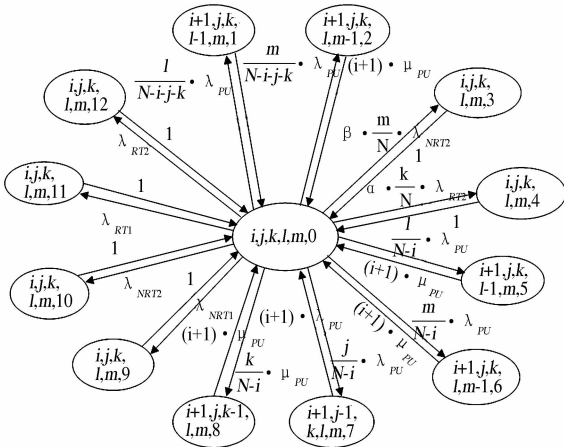


图3 马尔科夫链模型的状态转换图

Fig.3 State transition diagram of the Markov chain model

对于  $i + j + k + l + m < N$ ,可以得到  $n = 1, 2, 3, 4$  时的稳态概率:

$$\pi(i, j, k, l, m, 1) = \frac{l+1}{N - (i-1) - j - k} \cdot \frac{\theta_{PU}}{i} \cdot \pi(i-1, j, k, l+1, m, 0). \quad (9)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 2) = \frac{m+1}{N - (i-1) - j - k} \cdot \frac{\theta_{PU}}{i} \cdot \pi(i-1, j, k, l, m+1, 0). \quad (10)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 3) = \beta \cdot \frac{m}{N} \cdot \lambda_{NRT2} \cdot \pi(i, j, k, l, m, 0). \quad (11)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 4) = \alpha \cdot \frac{k}{N} \cdot \lambda_{RT2} \cdot \pi(i, j, k, l, m, 0). \quad (12)$$

方程(9)和(10)分别表示中断概率;方程(11)和(12)分别表示还有空闲信道时的阻塞概率.

对于  $i + j + k + l + m = N$ ,可以得到:

$$\pi(i, j, k, l, m, 5) = \frac{l+1}{N - (i-1)} \cdot \frac{\theta_{PU}}{i} \cdot \pi(i-1, j, k, l+1, m, 0). \quad (13)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 6) = \frac{m+1}{N - (i-1)} \cdot \frac{\theta_{PU}}{i} \cdot \pi(i-1, j, k, l, m+1, 0). \quad (14)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 7) = \frac{j+1}{N - (i-1)} \cdot \frac{\theta_{PU}}{i} \cdot \pi(i-1, j+1, k, l, m, 0). \quad (15)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 8) = \frac{k+1}{N - (i-1)} \cdot \frac{\theta_{PU}}{i} \cdot \pi(i-1, j, k+1, l, m, 0). \quad (16)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 9) = \lambda_{NRT1} \cdot \pi(i, j, k, l, m, 0). \quad (17)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 10) = \lambda_{NRT2} \cdot \pi(i, j, k, l, m, 0). \quad (18)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 11) = \lambda_{RT1} \cdot \pi(i, j, k, l, m, 0). \quad (19)$$

$$\pi(i, j, k, l, m, 12) = \lambda_{RT2} \cdot \pi(i, j, k, l, m, 0). \quad (20)$$

方程(13)~(16)分别表示系统没有空闲信道时所有次级用户的中断概率;方程(17)~(20)分别表示系统没有空闲信道时所有次级用户的阻塞概率.

显然,还有:

$$\sum_{n=0}^{12} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \sum_{m=0}^{N-i-j-k-l} \pi(i, j, k, l, m, n) = 1. \quad (21)$$

由式(9)~(21),可以计算得到初始稳态概率  $\pi(0, 0, 0, 0, 0, 0)$ . 基于此,就可以计算其它任何的状态概率.

## 2.2 性能参数

实时次级用户的中断概率分别用  $p_{F, RT1}$  和  $p_{F, RT2}$  表示  $RT-SU_1$  和  $RT-SU_2$  的中断概率.

$$P_{F, RT1} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k}$$

$$\pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 7). \quad (22)$$

$$P_{F, RT2} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 8). \quad (23)$$

非实时次级用户的中断概率:分别用  $p_{F, NRT1}$  和  $p_{F, NRT2}$  表示 NRT-SU<sub>1</sub> 和 NRT-SU<sub>2</sub> 的中断概率.

$$P_{F, NRT1} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1-i} \sum_{k=0}^{N-1-i-j} \sum_{l=0}^{N-1-i-j-k} \sum_{m=0}^{N-1-i-j-k-l} \pi(i, j, k, l, m, 1) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 5). \quad (24)$$

$$P_{F, NRT2} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1-i} \sum_{k=0}^{N-1-i-j} \sum_{l=0}^{N-1-i-j-k} \sum_{m=0}^{N-1-i-j-k-l} \pi(i, j, k, l, m, 2) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 6). \quad (25)$$

实时用户的阻塞概率:分别用  $p_{B, RT1}$  和  $p_{B, RT2}$  表示 RT-SU<sub>1</sub> 和 RT-SU<sub>2</sub> 的阻塞概率.

$$P_{B, RT1} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 11). \quad (26)$$

$$P_{B, RT2} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1-i} \sum_{k=0}^{N-1-i-j} \sum_{l=0}^{N-1-i-j-k} \sum_{m=0}^{N-1-i-j-k-l} \pi(i, j, k, l, m, 4) + \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 12). \quad (27)$$

非实时用户的阻塞概率:分别用  $p_{B, NRT1}$  和  $p_{B, NRT2}$  表示 NRT-SU<sub>1</sub> 和 NRT-SU<sub>2</sub> 的阻塞概率.

$$P_{B, NRT1} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 9). \quad (28)$$

$$P_{B, NRT2} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1-i} \sum_{k=0}^{N-1-i-j} \sum_{l=0}^{N-1-i-j-k} \sum_{m=0}^{N-1-i-j-k-l} \pi(i, j, k, l, m, 3) + \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \pi(i, j, k, l, N - i - j - k - l, 10). \quad (29)$$

系统总的吞吐量定义为每秒钟完成服务的平均值,可以表示为

$$S = \sum_{n=0}^2 \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \sum_{m=0}^{N-i-j-k-l} \pi(i, j, k, l, m, n) \cdot (i\mu_{PU} + j\mu_{RT1} + k\mu_{RT2} + l\mu_{NRT1} + m\mu_{NRT2}) + \sum_{n=5}^8 \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-j} \sum_{l=0}^{N-i-j-k} \sum_{m=0}^{N-i-j-k-l} \pi(i, j, k, l, m, n) \cdot (i\mu_{PU} + j\mu_{RT1} + k\mu_{RT2} + l\mu_{NRT1} + m\mu_{NRT2}). \quad (30)$$

### 3 性能评估

这部分给出了该系统性能的数值计算结果.

设  $N = 8, \alpha_1 = 0.1, \beta_1 = 0.2, \lambda_{PU} = \lambda_{RT1} = \lambda_{RT2} = \lambda_{NRT1} = \lambda_{NRT2} = 0.6$ , 而  $\mu_{PU} = \mu_{RT1} = \mu_{RT2} = \mu_{NRT1} = \mu_{NRT2} = 0.4$ .

图4和图5给出了主用户到达率从0.1到1变化时次级用户的中断概率和阻塞概率情况.显然,随着主用户到达率的增加,越来越多的主用户需要接入信道,导致次级用户的中断概率和阻塞概率都会随之增加.在图中,RT-SU<sub>1</sub>和RT-SU<sub>2</sub>的中断概率一样,这是因为它们中断的条件一样.同理,NRT-SU<sub>1</sub>和NRT-SU<sub>2</sub>的中断概率也一样.但是非实时次级用户的中断概率比实时次级用户的中断概率明显要高许多,这就在一定程度上保障了实时次级用户的数据传输.NRT-SU<sub>2</sub>的阻塞概率比其它用户的要高,这表明接入概率限制因子越大、阻塞概率越高.

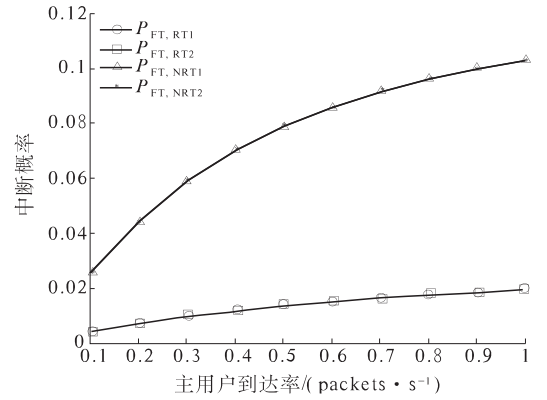


图4 主用户的业务到达率对中断概率的影响

Fig. 4 Impact of packet arrival rate of PU on forced termination probability

图6给出了所提算法与文献[4]、[6]所提算法的总体吞吐量比较,其中, $\alpha$ 为文献[6]中主用户愿意租给次级用户的频带占有率.笔者所提算法在吞吐量上明显比文献[6]的算法要高.因为在文献[6]中,当主用户到达率低时,次级用户不能利用主用户所有的频带;当主用户到达率高时主用户也不能利用自己所有的频带.当  $\lambda_{PU} < 0.7$  时,笔者所提算法比文献[4]提出的算法在吞吐量上要高出10%~40%.这是因为文献[4]中的次级用户不能使用受保护信道中的空闲信道(仿真中,受保护信道、限制信道和共享信道的数目分别为4,2,2).当  $\lambda_{PU} > 0.7$  时,文献[4]中的吞吐量会比笔者所提算法的要高一些,这是因为主用户可以接入所有信道而不受实时次级用户的影响.

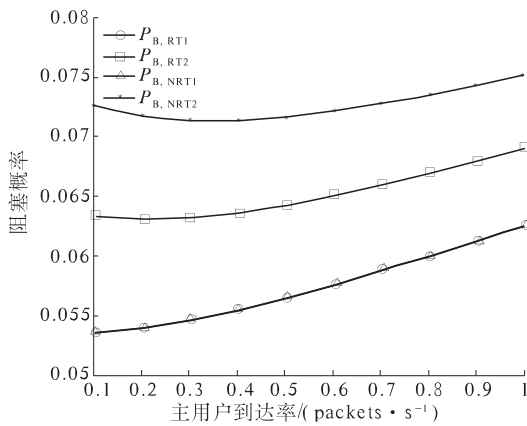


图 5 主用户的业务到达率对阻塞概率的影响  
Fig.5 Impact of packet arrival rate of PU on blocking probability

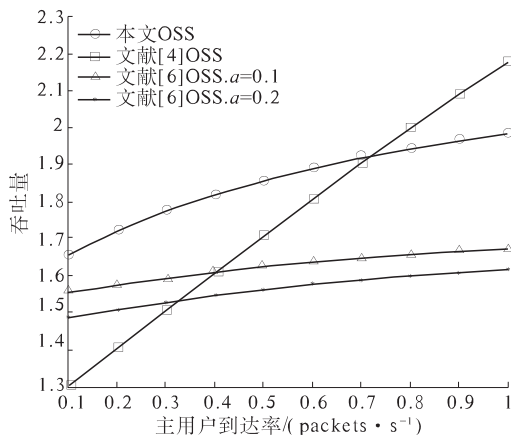


图 6 主用户的业务到达率对系统吞吐量的影响  
Fig.6 Impact of packet arrival rate of PU on throughput

4 结论

为了满足不同次级用户的 QoS 需求,笔者提

Opportunistic Spectrum Sharing Algorithm with Quality-of-Service Support in Cognitive Radio Networks

LIU Kai, HE Li-yang, ZHANG Chen-yu, LIU Feng

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In this paper, we propose an opportunistic spectrum sharing (OSS) algorithm with quality-of-service (QoS) support to coordinate the spectrum access of primary users (PUs) and secondary users (SUs) for cognitive radio networks (CRNs). We also analyze its performance in the presence of two secondary users (SUs) groups with different terminated-priorities and access-priorities, which are defined to satisfy different QoS requirements of SUs. In addition, we use a six-dimensional Markov approach to derive system performance, such as SU forced termination probability, blocking probability and system throughput. Numerical results show that the QoS requirements of different SUs can be guaranteed in the presence of guaranteeing the communication quality of PUs, and the system throughput is significantly improved compared with other typical spectrum sharing schemes.

**Key words:** cognitive radio network CRN; opportunistic spectrum sharing (OSS); quality-of-service (QoS) support; Markov approach

出了一种保证 QoS 的机会频谱共享算法,并利用六维马尔科夫链模型分析了该算法的频谱共享性能,如中断概率、阻塞概率和吞吐量.最后,数值结果表明该 OSS 算法在保证主用户通信质量的前提下能够提高频谱的利用率,并且可以满足不同次级用户的 QoS 需求.

参考文献:

[1] 李二龙. 认知无线电频谱分配技术的研究[J]. 信息通信, 2010(2): 40-44.  
[2] CHEN Sun, GABRIEL P V, ZHOU Lan, et al. Optimizing the coexistence performance of secondary-user networks under primary-user constraints for dynamic spectrum access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Oct. 2012, 61(8): 3665-3675.  
[3] SONG MIN, XIN Chun-sheng, ZHAO Yan-xiao, et al. Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(1): 23-29.  
[4] JIANG Xue-yuan, ZHANG Yang-yang, WONG Kai-Kit, et al. [J]. Quality of service-aware coordinated dynamic spectrum access: prioritized Markov model and call admission control[J]. Wireless Communications and Mobile computing, 2011, 13(5): 510-524.  
[5] ALNWAIMI G, ARSHAD K, MOESSNER K. Dynamic spectrum allocation algorithm with interference management in co-existing networks[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(9): 932-934.  
[6] TANG P K, CHEW Y H. On the modeling and performance of three opportunistic spectrum access schemes[J]. IEEE Trans. Vehicular Technology, 2010, 59(8): 4070-4078.