

# 可任意阶扩展的认知无线 Ad Hoc 网络频谱共享模型

刘 干, 朱光喜

(华中科技大学电子与信息工程系武汉光电国家实验室, 湖北武汉 430074)

**摘 要:** 目前认知无线 Ad Hoc 网络(CRAHNs)频谱共享模型的研究大多忽视了未被授权频谱被占用过程对授权频谱被一、二级用户占用过程的影响.也有研究同时考虑了一、二级信道被占用的情况,提出了简化的排队模型,但是在进行性能分析时存在较大误差.主要挑战来自于高维马尔可夫状态转移图归纳的复杂性和计算的复杂性.本文研究提出一种新的分析方法,将原始复杂模型分解为易于分析的二维模型,然后将这些二维模型合成为三维模型,所建立的模型可任意阶扩展,可编程归纳实现.并可以用于分析任意一、二级信道数情形下 CRAHNs 的所有性能指标.大量的仿真和数值结果分析证实了模型的有效性.

**关键词:** 认知无线电 Ad Hoc 网络; 频谱共享; 马尔可夫模型; 性能分析

**中图分类号:** TP302.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2784-06

## Arbitrary Order Extendable Markov Model for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Ad Hoc Networks

LIU Gan, ZHU Guang-xi

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Department of Electronics and Information Engineering,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Most of works in modeling the spectrum sharing of Cognitive Radio Ad Hoc Networks (CRAHNs) ignored the relationships between processes of using primary channels and that of using secondary channels. Some works considered the relationship and set up simplified queue-based model. However, they are not accurate in analysing the performance of CRAHNs. The main challenge may come from the complexity of setting up states transfer graph and that of computation in the multiple-dimensions Markov model. This paper copes with the challenge by a novel method. We decompose the complex original model into multiple 2-D models which are much easier to analyse, and then compose them all into a structured 3-D Markov model, which is arbitrary order extendable and programmable computation of the stable probability. By the new model, the performance of CRAHNs with an arbitrary number of primary channels and secondary channels can be evaluated. Extensive experimental results testify the validity of the proposed model.

**Key words:** cognitive radio ad hoc networks; spectrum sharing; Markov model; performance analysis

### 1 引言

认知无线技术可以有效缓解非授权网络如无线 Ad Hoc 网络频谱紧张的危机.通过在 Ad Hoc 用户上配置认知无线电功能,使其能够机会地接入授权的空闲频谱(下文也称一级频谱).这里,可以使用授权频谱的用户为一级用户,其对授权频谱的使用具有绝对优先权.能感知频谱空穴并能机会使用授权频谱的非授权用户为二级用户,其容量可以得到显著提高<sup>[1]</sup>.因而引起了广

泛的研究兴趣,并提出了一些频谱共享算法,包括利用随机博弈论方法、线性规划方法、局部遗传算法等等<sup>[2~6]</sup>.而只有建立频谱共享模型才能对认知无线 Ad Hoc 网络(CRAHNs)进行性能分析与评估.但是当前,CRAHNs 频谱共享模型的研究还存在许多不足.

首先,大多研究没有考虑未被授权频谱的占用情况,只孤立地对一级频谱被一、二级用户占用的随机过程进行建模<sup>[7,8]</sup>.而这实际上忽略了在非授权频谱(下称二级频谱)被二级用户的占用过程对一级频谱被一、

二级用户的占用过程影响.例如,当二级信道被二级用户占用饱和时,二级用户在一级信道的到达率会明显增加.所以,应该将一、二级信道被占用过程联合起来考虑.

也有研究同时考虑了一、二级信道被占用的情况,提出了简化的排队模型,并进行了性能分析<sup>[9]</sup>.但是由于模型隐含不合理的独立性假设:忽略了二级用户占用一级信道与二级用户占用二级信道的相互影响,导致误差的存在.文献[10]建立了更为简单而精确的队列模型和精确而计算较为复杂的二维马尔科夫模型,但是大量研究发现,在该应用场景建立完整的三维 MARKOV 模型,是一件十分复杂的事情,在文献[9]中的三维 MARKOV 模型,只是针对一级信道和二级信道数均为 2 的简单情形,就有 18 个状态,而且无规律可循,这至少导致两个问题:(1)平衡方程需要手工得到,(2)最关键的是,简单情形的 MARKOV 模型都如此复杂,要建立一般情形的 MARKOV 模型复杂性可想而知,更谈不上实际应用.

本文针对以上问题,研究了认知无线 Ad Hoc 网络频谱共享的三维马尔可夫模型,为了便于分析任意一、二级信道数的情况,我们提出了一种新的建模方法——二维分解、三维合成.建立了可任意阶扩展三维马尔可夫模型,可以用于任意一、二级信道的情形下性能评价.更重要的是实际应用方面,可编程自动生成平衡方程并计算概率分布,即,不需要手工归纳关系和计算概率分布,运用文中研究得到的公式和算法,可以利用

计算机软件自动归纳任意阶平衡方程,并计算概率分布和求解性能指标.文中分析了认知无线 Ad Hoc 网络的阻塞率、掉线率和吞吐率等性能参数,以及已有二维模型无法得到的一些性能指标,包括一、二级信道空闲概率、饱和度等等.大量的仿真和数值结果分析证实了新模型的准确性和有效性.

## 2 任意阶可扩展随机模型与性能分析

我们对认知无线 Ad Hoc 网络中单个 Ad Hoc 节点的本地参数做如下假设:

(1)每个装有认知无线电的 Ad Hoc 二级用户(记作 SU)有能力通过用户之间互相合作,探知被授权频段的空闲频谱.二级用户有权使用任何被授权和未被授权频段的可用频段.

(2)认知无线电 Ad Hoc 网络节点相互独立.对每个节点,在其传输范围内,有两种可用频谱:被授权频谱(也称为一级信道,记作 PC)和未被授权频谱(也称为二级信道,记作 SC).

(3)假定给定节点的 PC 和 SC 最大数目分别为  $p_c$  和  $s_c$ .一级用户(记作 PU)和二级用户(记作 SU)都能接入 PC.

(4)当新 PU 业务到来时,正在使用 PC 的 SU,可能被 PU 的出现所取代,而等概率地切换到其他 PC 或 SC 中的空闲信道.如果没有空闲信道,SU 会被丢弃.

(5)当新 SU 业务到来时,如果有空闲信道,等概率地选择使用任何被授权和未被授权频段的可用频段.如果所有的一二级信道被占有,SU 会被阻塞.

(6)PU 和 SU 以泊松过程到达,平均到达率分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ .

(7)PU 和 SU 的服务时间满足参数为  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的负指数分布.

(8)随机变量  $N_1(t)$ ,  $N_2(t)$  和  $N_3(t)$  分别表示:在  $t$  时刻,占有 PC 的 PU 数目,占有 PC 的 SU 数和占有 SC 的 SU 数.

将  $\{N_1(t), N_2(t), N_3(t)\}$  作为三维马尔可夫模型的一个状态元素,显然不会忽略占有一级信道 PC 的二级用户数  $N_2(t)$  和占有二级信道的二级用户数  $N_3(t)$  的相互影响.也不会忽略  $N_1(t)$  对  $N_2(t)$  和  $N_3(t)$  的影响.所以,模型可以精确分析性能指标.

为了得到可扩展状态转移图,我们采用先分解,再合成的方法,我们先将原来的复杂模型分解为若干个低维状态转移空间,然后合成为高维的原系统状态转移图,为了区分不同二维平面之间的状态转移关系,我们以不同的颜色和符号来表示转移状态强度.

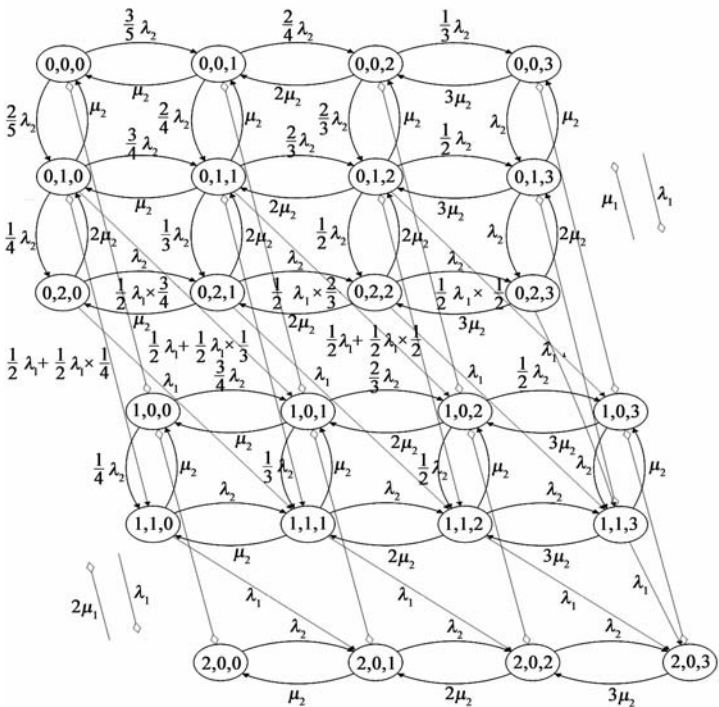


图1 在一、二级信道 $p_c=2, s_c=3$ 情况下,三维状态转移图

同时,为了区分简化三维状态的转移图,我们采用  $\diamond \leftrightarrow$  代表双向状态转移关系,转移强度在平面间由  $\diamond \rightarrow$  统一标出.  $\diamond \rightarrow$  也代表双向转移关系,其中,向右边的转移是切换或者掉线造成的转移.这样,得到的三维状态转移图简单而有规律.与文献[9]中的最大不同就是具有可扩展性,而且便于发现归纳错误.首先还是归纳状态转移关系以及转移强度,分解后合成的图尽量要体现出状态转移的层次结构.这样易于推广到一般情形.以一级信道数为2,二级信道数为3为例,先将原来的复杂模型分解为  $N_1(t) = 0, 1, 2$  的三个二维状态转移平面,然后合成为三维的原系统状态转移图,参见图1.如何归纳上述状态转移图,使得其对于一级网络信道数取任意值,二级网络信道数取任意值均有效,是解决问题的关键.我们分两步归纳.

**步骤1** 归纳最为常规的关系,即在一、二级信道中有空闲信道的状态节点  $(i, j, k)$  的平衡方程,其前后、上下、左右至多有6个状态节点.此时不会发生切换或掉线.

**步骤2** 归纳有切换和掉线发生的转移关系:

(1)当一、二级信道不饱和,且在一级信道中,存在二级用户,当一级用户到达时,一级用户占用空闲信道的概率为  $(pc - i - j)/(pc - i)$ , 占用被二级用户正在使用的信道的概率为  $j/(pc - i)$ , 此时,二级用户切换到一级空闲信道的概率为  $(pc - i - j)/(pc + sc - i - j - k)$ , 二级用户切换到二级空闲信道的概率为  $(pc - k)/(pc + sc - i - j - k)$ . 所以,状态节点  $(i, j, k)$  到状态节点  $(i + 1, j, k)$  的转移强度为:

$$\left( \frac{pc - i - j}{pc - i} + \frac{j}{pc - i} \times \frac{pc - i - j}{pc + sc - i - j - k} \right) \lambda_1$$

记作  $\alpha_1 \lambda_1$ . 状态节点  $(i, j, k)$  到状态节点  $(i + 1, j - 1, k + 1)$  的转移强度为:

$$\left( \frac{j}{pc - i} \times \frac{pc - k}{pc + sc - i - j - k} \right) \lambda_1$$

记作:  $\alpha_2 \lambda_1$ .

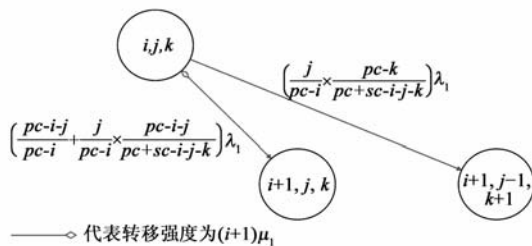


图2 切换发生时的状态转移图

(2)当一级信道饱和,而又存在二级用户时,当一级用户到达时,一级用户会强占被二级用户正在占用的一级信道,如果此时存在空闲的二级信道时,二级用户会切换到二级信道. 状态节点  $(i, j, k)$  到状态节点  $(i + 1, j - 1, k + 1)$  的转移强度为  $\lambda_1$ , 如果此时不存在空

闲的二级信道时,二级用户就会掉线:状态节点  $(i, j, k)$  (其中  $k = sc$ ) 到状态节点  $(i + 1, j - 1, k)$  的转移强度为  $\lambda_1$ .

由上面2步可得到完整的系数矩阵,或平衡方程:

$$\begin{aligned} & (\mu_1 u_1 + f_1 \lambda_1 + j \mu_2 + f_2 \lambda_2 + k \mu_2 + f_3 \lambda_2) p_{i,j,k} \\ & = f_4 \lambda_1 p_{i-1,j,k} + f_5 \lambda_1 p_{i-1,j+1,k-1} + f_6 \lambda_1 p_{i-1,j+1,k} \\ & \quad + f_7 \mu_1 p_{i+1,j,k} + f_8 \lambda_2 p_{i,j-1,k} + f_9 \mu_2 p_{i,j+1,k} \\ & \quad + f_{10} \lambda_2 p_{i,j,k-1} + f_{11} \mu_2 p_{i,j,k+1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $p_{i,j,k}$  为平稳概率,  $f_i$  由下面式子得到:

$$f_1 = \begin{cases} 0, & \text{if } (i = pc) \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0, & \text{if } (j = pc - i) \\ \frac{pc - i - j}{pc + sc - i - j - k}, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_3 = \begin{cases} 0, & \text{if } (k = sc) \\ \frac{sc - k}{pc + sc - i - j - k}, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_4 = \begin{cases} \frac{pc - (i - 1) - j}{pc - (i - 1)} + \frac{j}{pc - (i - 1)} \cdot \frac{pc - (i - 1) - j}{pc + sc - (i - 1) - j - k}, & \text{if } (i > 0) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_5 = \begin{cases} \frac{j + 1}{pc - (i - 1)} \cdot \frac{sc - (k - 1)}{pc + sc - (i - 1) - (j + 1) - (k - 1)}, & \text{if } (i > 0) \ \& \ (k > 0) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_6 = \begin{cases} 1 & \text{if } (i > 0 \ \& \ j = pc - i \ \& \ k = sc) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$f_7 = \begin{cases} 0, & \text{if } (j = pc - i) \\ i + 1, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

$$f_8 = \begin{cases} 0, & \text{if } (j = 0) \\ \frac{pc - i - j + 1}{pc + sc - i - j + 1 - k}, & \text{if } (j > 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$f_9 = \begin{cases} 0, & \text{if } (j = pc - i) \\ j + 1, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

$$f_{10} = \begin{cases} 0, & \text{if } (k = 0) \\ \frac{sc - k + 1}{pc + sc - i - j - k + 1}, & \text{if } (k > 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$f_{11} = \begin{cases} 0, & \text{if } (k = sc) \\ k + 1, & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

然后联立正则化条件  $\sum_{i=0}^{pc} \sum_{j=0}^{pc-i} \sum_{k=0}^{sc} p_{i,j,k} = 1$ , 可求解

平稳概率分布和相关的性能指标. 下面分析性能指标.

**二级用户阻塞率:** 当一个二级用户到达的时候, 如果系统饱和: 所有一、二级信道均被占用, 那么, 二级用户就会被阻塞, 所以, SU 的阻塞概率, 应该等于所有一、二级信道均被占用的概率.

$$p_b^{(SU)} = \sum_{i=0}^{pc} p_{i, pc-i, sc} \quad (13)$$

**二级用户掉线率:** 二级用户 SU 选择授权信道后, 其所用一级信道被新进一级用户占用, 而系统饱和, 导致无处切换信道, 不得不中断的概率.

$$p_d^{(SU)} = \frac{\lambda_1 \sum_{i=0}^{pc-1} p_{i, pc-i, sc}}{\lambda_2 (1 - p_b^{(SU)})} \quad (14)$$

**二级用户吞吐率:**

$$R^{(SU)} = \lambda_2 (1 - p_b^{(SU)}) (1 - p_d^{(SU)}) \quad (15)$$

二维模型足以分析以上阻塞率、掉线率、吞吐率等性能指标. 但是, 由二维模型只能求出二级用户占用一、二级信道数之和为一个值的概率分布, 不能得到二级用户占用一、二级信道数不同值的概率分布, 以下性能指标只能通过三维模型才能得到:

**一级信道的饱和概率:**

$$p_f^{(PC)} = \sum_{i=0}^{pc} \sum_{k=0}^{sc} p_{i, pc-i, k} \quad (16)$$

该性能指标与二级用户感知一级信道所用策略直接相关, 例如, 当一级信道的饱和概率接近于 1 时, 二级用户成功感知空闲信道的概率接近于 0. 而二级用户感知空闲信道的代价却是不容忽视的. 与此相关的还有, 一级信道完全空闲的概率:

$$p_e^{(PC)} = \sum_{k=0}^{sc} p_{0,0,k} \quad (17)$$

该性能指标也与二级用户感知一级信道的策略直接相关, 例如, 当一级信道的空闲概率接近于 1 时, 二级用户成功感知空闲信道的概率接近于 1. 此时正是需要一级信道的二级用户感知空闲信道的最佳时机. 另外, 还有平均一级信道空闲概率可以作为研究高效率感知策略的基本依据. 平均一级信道空闲信道数为:

$$\overline{N_e^{(PC)}} = \sum_{i=0}^{pc-1} \sum_{j=0}^{pc-i-1} \sum_{k=0}^{sc} (pc - i - j) p_{i,j,k} \quad (18)$$

平均一级信道空闲概率:

$$p_e^{(PC)} = \sum_{i=0}^{pc-1} \sum_{j=0}^{pc-i-1} \sum_{k=0}^{sc} \frac{pc - i - j}{pc} p_{i,j,k} \quad (19)$$

而平均二级信道饱和度也是二级用户感知必要性的依据, 二级信道饱和度越大, 感知一级信道的必要性越高. 平均二级信道饱和度:

$$\overline{p_{oc}^{(SC)}} = \sum_{i=0}^{pc} \sum_{j=0}^{pc-i} \sum_{k=0}^{sc} \frac{k}{sc} p_{i,j,k} \quad (20)$$

而在一级信道有空闲条件下, 平均二级信道饱和度和更是感知必要性的依据.

一级信道有空闲条件下, 平均二级信道饱和度:

$$\overline{p_{oc}^{(SC|PC)}} = \sum_{i=0}^{pc-1} \sum_{j=0}^{pc-i-1} \sum_{k=0}^{sc} \frac{k}{sc} p_{i,j,k} \quad (21)$$

计算的时间复杂度主要来自于求解平稳概率分布, 如果用一般高斯消去法, 解线性方程组求出平稳概率分布的关键操作(主要是乘)的时间复杂度是  $O(n^3)$ ,  $n$  是总的状态数, 由  $pc, sc$  得到:

$$n = (sc + 1) \frac{(pc + 1)^2 + (pc + 1)}{2} \quad (22)$$

当  $pc, sc$  增加时,  $n$  会急剧增加, 所幸  $pc, sc$  实际值不太大. 另外, 实际应用中还有离线计算后, 建立查询表实时查询的方法.

### 3 数值结果

本节, 我们给出三维马尔可夫模型性能分析的结果. 参数设定如下: 二级信道的数目, 图中标示为  $c_2$ , 设置为 3, 一级信道的数目, 图中标示为  $c_1$ , 在 3, 4, 5, 6 中取值, 二级用户到达率和服务率设定为:  $\lambda_2 = 0.2, \mu_2 = 0.4$  (用户/秒). 评估在一级用户到达率、服务率变化时, 二级用户的性能指标.

图 3 显示了一级用户到达率的增加对二级用户阻塞率的影响, 随着一级用户 PU 到达率  $\lambda_1$  的增大, 一级用户占用一级信道数增加, 二级用户所能感知和使用的一级信道数减少, 二级用户可用信道饱和的概率增加, 导致阻塞概率增加. 另外, 可以看到一级信道数  $c_1$  越大, 二级用户可利用的一级信道数也越大, 二级用户阻塞率越小. 图 4 显示, 随着一级用户到达率的提高, 二级用户掉线率, 二级用户在占用一级信道被挤掉的概率增加, 掉线率随之增加. 而且, 一级信道越多, 机会占用一级信道的二级用户被中断的概率越小, 二级用户掉线率越小. 另外, 经过对比发现: 由文献[10]中二维马

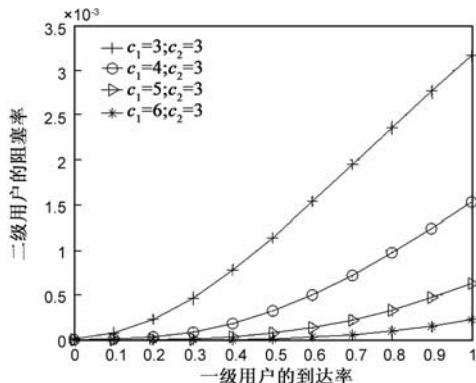


图 3 在  $\mu_1=0.5, \lambda_2=0.2, \mu_2=0.4$  下, 二级用户阻塞率

尔可夫模型得到的以上两个计算结果以及吞吐率与三维马尔科夫模型得到的结果完全一致,二维模型在这些指标上验证了三维模型的正确性.下面结果二维马尔科夫模型无法得到.

图5显示一级信道的平均空闲概率,因为一级用户到达率增加,一级可用信道就会减少,平均空闲概率就会减小.一级信道数越大,一级信道平均空闲概率越大.

图6显示一级用户到达率增加时,一级可用信道就会减少,饱和概率就会增加.而一级信道数越小,饱和概率越大.

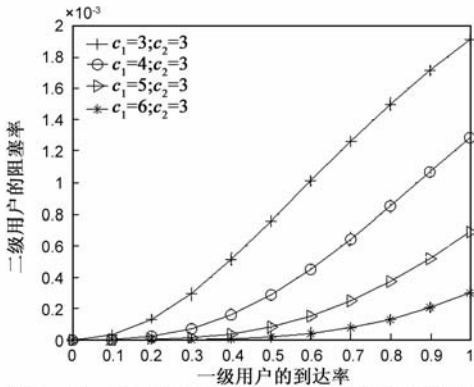


图4 在 $\mu_1=0.5, \lambda_2=0.2, \mu_2=0.4$ 下,二级用户掉线率

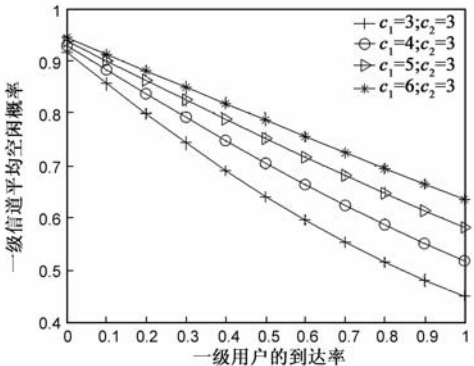


图5 一级用户到达率与一级信道平均空闲概率的关系

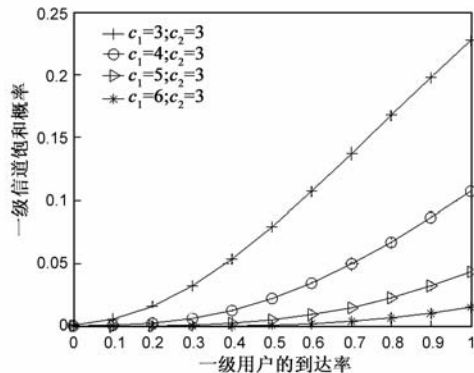


图6 一级用户到达率与一级信道饱和概率的关系

图7显示了二级信道饱和度指标,可以看到:一级用户到达率增加时,一级信道饱和度增加,二级用户选

择二级信道的概率增加,二级信道饱和度也随之增高.但是,当一级用户到达率增加到一定值后,一级信道趋于饱和,对二级信道的饱和度影响越来越小.另外,一级信道数越小,二级信道数饱和度越高.

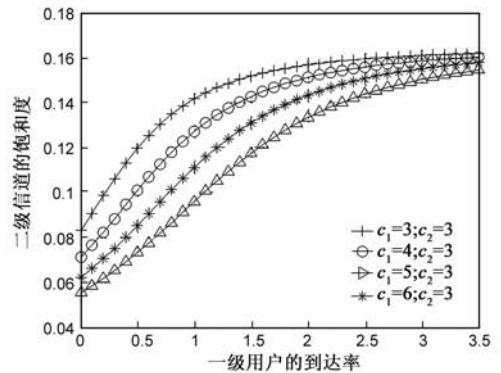


图7 一级用户到达率与二级信道饱和度的关系

图8显示了一级信道有空闲条件下二级信道饱和度指标,该指标并非随一级用户到达率而单调递增,对二级用户感知一级信道的高效率算法具有重要意义.可以看到:一级用户到达率很小时,一级信道数越小,二级信道饱和度越高.当一级用户到达率增加到一定值后,一级信道中有空闲的概率会减小,一级信道中有空闲条件下,二级信道饱和度达到最大值后会减小.一级信道数越小,一级信道中有空闲的概率越小,一级信道有空闲条件下二级信道饱和度越小.

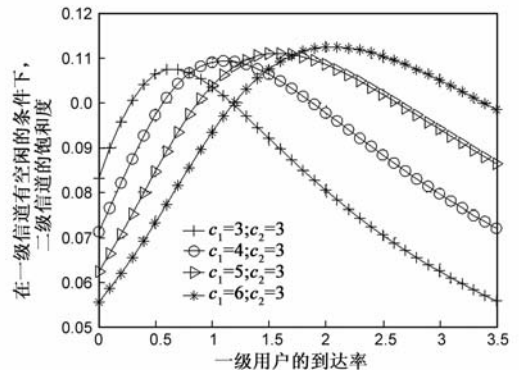


图8 一级信道有空闲条件下的二级信道饱和度

### 4 总结

由于目前大多数 CRAHNS 频谱共享研究没有考虑未被授权的二级频谱被占用过程,只孤立地对一级频谱被一、二级用户占用的随机过程进行建模.从而忽略了在二级频谱被二级用户占用过程对一级频谱被占用过程的影响,以及二级用户占用一级信道与二级用户占用二级信道的相互影响,存在较大误差,而且不能分析二级用户在一、二级信道中的不同性能指标.虽然多维马尔科夫模型可以得到所有性能指标的精确分析值,但目前研究只分析了一、二级信道很少的特殊情

况,而没有分析一般的情形.主要挑战来自于一般情形状态转移图归纳的复杂性和计算的复杂性.本文针对以上具有挑战性的问题,研究了认知无线 Ad Hoc 网络频谱共享的三维马尔可夫模型,为了便于分析任意一、二级信道数的情况,我们提出了一种新的建模方法——二维分解、三维合成.建立了可任意阶扩展三维马尔可夫模型,可以用于一、二级信道数任意情形下的性能评价.更重要的是,可编程自动生成平衡方程并计算概率分布,即,不需要手工归纳关系和计算概率分布,运用文中研究得到的公式和算法,可以利用计算机软件自动归纳任意阶平衡方程,并计算概率分布和求解性能指标.文中分析了认知无线 Ad Hoc 网络的阻塞率、掉线率、吞吐率等性能指标,以及已有二维模型无法得到的一些其他性能指标,包括一、二级信道空闲概率、饱和度等等.而这些指标的评估,对于进一步研究高效的二级用户感知空闲频谱算法和频谱分配算法,具有重要意义.

#### 参考文献

- [1] I F Akyildiz, W Y Lee, M C Vuran, S Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. *Computer Networks* 50(13): 2006, 2127 – 2159.
- [2] 马志 ■, 曹志刚. 分布式认知无线网络用户有效吞吐量的优化 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2008, 48(4): 506 – 509.  
MA Zhiyao, CAO Zhigang. Goodput optimization based on distributed cognitive radio network [J]. *J Tsinghua Univ: Sci & Tech*, 2008, 48(4): 506 – 509. (in Chinese)
- [3] Y Xing, R Chandramouli, S Mangold, S Shankar N. Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks [J]. *IEEE J Select Areas Communication*, 2006, 24(3): 626 – 637.
- [4] Long Bao Le, Ekram Hossain. Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transaction on Wireless Communication*, 2008, 7(12): 5306 – 5315.
- [5] L Wang, A Chen, D S Wei. A cognitive MAC protocol for QoS provisioning in overlaying Ad Hoc networks [A]. *Proc 4th IEEE CCNC 2007 [C]*. Las Vegas, USA: IEEE, 2007. 1139 – 1143.

- [6] 韩小博, 罗涛. Ad Hoc 认知无线网络中基于博弈论的公共信道建立算法 [J]. *电子学报*, 2010, 38(7): 1699 – 1704.  
HAN Xiao-bo, LUO Tao. common channel establishing algorithms based on game theory in Ad Hoc cognitive radio networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(7): 1699 – 1704. (in Chinese)
- [7] X Zhu, L Shen, T P Yum. Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation [J]. *IEEE Communication Letter*, 2007, 11(4): 304 – 306.
- [8] W Ahmed, J Gao, H A Suraweera, M Faulkner. Comments on ‘Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation’ [J]. *IEEE Transaction on Wireless Communication*, 2009, 8(9): 4488 – 4491.
- [9] H Al-Mahdi, M Kalil. Increasing spectrum capacity for Ad Hoc networks using cognitive radios: an analytical model [J]. *IEEE Communication Letter*, 2009, 13(9): 676 – 678.
- [10] G Liu, X Zhu, L Hanzo. Dynamic spectrum sharing models for cognitive radio aided Ad Hoc networks and their performance analysis [A]. *Proc IEEE GIOBECOM 2011 [C]*. Houston, Texas, USA: IEEE, 2011. 1 – 5.

#### 作者简介



刘 干 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. 1969 年 3 月出生于武汉. 华中科技大学电子与信息工程系副教授, 武汉光电国家实验室(筹)研究员. 研究兴趣为无线通信系统资源分配与管理, 无线网络性能分析, 认知无线 Ad hoc 网络随机模型.  
E-mail: liugan@mail.hust.edu.cn



朱光喜 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员. 1945 年 3 月出生于广西. 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)光通信与智能网络部筹备组组长. 主要从事宽带移动通信系统, 数字视频编码、传输及应用, 智能交通中的视频处理、识别关键技术及应用, 光电融合的多媒体信息处理与应用.  
E-mail: gzhu@mail.hust.edu.cn