

有限用户数多认知网络部分信道共享性能分析

衡玉龙^{*①} 黄天聪^① 冯文江^① 李林^②

^①(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

^②(重庆电子工程职业学院 重庆 401331)

摘要: 认知网络中动态信道共享是提高频谱资源利用率的关键。针对有限用户数下多认知网络共存场景, 该文建立3维马尔科夫链部分信道共享模型, 仿真分析用户有/无信道切换功能下认知网络间部分信道共享的性能。分别就阻塞概率、强迫终止概率、切换概率和系统吞吐量等, 与静态频谱分配策略和分级共享策略进行比较仿真测试, 结果表明, 采用部分信道共享策略的系统在容忍较小的切换概率和强迫终止概率下可以获得较大的系统吞吐量。

关键词: 认知无线电; 有限用户数; 马尔科夫链模型; 信道共享

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)02-0267-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00787

Performance Analysis on Partial Channel Sharing of Cognitive Networks with Finite User Population

Heng Yu-long^① Huang Tian-cong^① Feng Wen-jiang^① Li Lin^②

^①(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: Dynamic channel sharing policy is the key technology to improve the spectrum utilization in cognitive radio networks. First, the scenario is considered that several cognitive networks with finite user population coexist. Then, a three-dimensional Markov chain model is developed to analyze the performance of the partial channel sharing policy in the cases with and without channel handoff. Finally, the blocking probability, the forced termination probability, handoff probability of the users and the system throughput are analyzed by comparing with the static spectrum allocation policy and the hierarchical sharing policy. The simulation results show that the system with partial channel sharing policy will gain higher throughput by tolerating lower handoff probability and forced termination probability.

Key words: Cognitive radio; Finite user population; Markov chain model; Channel sharing

1 引言

认知无线电^[1]能缓解无线频谱资源紧缺、频谱利用率低下的现状, 动态信道共享是提高频谱资源利用率的关键。目前, 针对主用户与认知用户之间的动态信道共享技术已取得大量研究成果^[2-5], 文献[6]还研究了两个授权网络之间的信道共享, 但针对多认知网络共存场景下的信道共享技术鲜有研究。2009年, IEEE启动了802.19.1标准制定, 力图采用独立于无线接入技术规范的途径制定共享TVWS (TeleVision White Space)频段的、多认知无线网络之间的共存协调策略, 但大量关键技术和基本理论有待深入研究。文献[7]针对接入TVWS频段的多认

知网络共存问题提出了一种标准框架, 规范集中式和分布式认知网络下的共存信息的交换机制, 集中式网络采用共存数据库作为相关共存信息的知识库, 分布式网络采用广播信道来发布信标并直接在簇头设备之间传输共存信息。文献[8]则重点研究了802.19.1标准提供的搜索服务和空闲频道管理服务的性能。

本文以两个集中式认知网络共存为研究背景, 考虑更加实际的有限用户数应用场景^[9-11], 利用3维马尔科夫链建立部分信道共享模型, 分析用户有/无信道切换功能下认知网络间部分信道共享策略的性能, 分别就阻塞概率、强迫终止概率、切换概率和系统吞吐量等, 与静态频谱分配策略和分级共享策略进行比较仿真。

2 系统模型

如图1所示的应用场景, 在一定区域内存在两种

2012-06-21 收到, 2012-11-12 改回

国家自然科学基金(60872038), 中央高校基本科研业务费(CDJXS11162236, CDJZR12160004)和重庆市教委科技项目(KJ102201)资助课题

*通信作者: 衡玉龙 hyl5212006@163.com

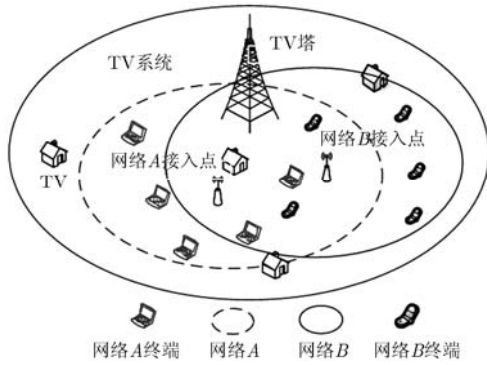


图1 多认知网络共存场景

针对不同应用的集中式认知网络A和网络B以及主用户系统TV, 网络A和网络B的终端接入均由各自网络接入点控制, 两类认知网络规划的目标频段都是TVWS频段, 但互不重叠。认知网络A和网络B分别执行频谱感知获取可用信道并利用该信道完成通信。需要说明的是, 虽然认知无线电对频谱的伺机接入可以扩展到全频段, 但目前主要关注TVWS频段, 原因在于随着模拟电视向数字电视过渡和演进, 该频段会有大量空闲片段, 且该频段具有良好的电波传播特性和空时可预测性。

基于图1所示的应用场景, 假定两种认知网络频谱获取和使用都基于频谱池思想, 即认知网络A和网络B分别执行频谱感知获取可用信道, 并利用可用信道资源建立各自的频谱池, 网络A和网络B的用户(分别用 SU_A 和 SU_B 表示)有业务传输请求时即接入归属频谱池。由于网络A和网络B处于同一TV塔覆盖范围内, 频谱池中可用信道构成对两种网络相同, 分别用 C_A 和 C_B 表示网络A和网络B频谱池中的可用信道集合。由于两类认知网络支撑不同应用, 假定网络A的业务传输需求少, 可用信道存在剩余, 从最大化频谱利用率角度考虑, 网络A的部分空闲信道可以与网络B共享, 共享信道集合用 C_R 表示, 其信道共享模型如图2所示。进一步假定在一次共享传输中共享信道划分将保持固定。

信道共享策略规定如下:

对于 SU_A : 任何 SU_A 的接入请求, 首先占用 $C_A - C_R$ 集合信道, 只有 $C_A - C_R$ 集合信道用尽后才接入 C_R 集合信道, 一旦 $C_A - C_R$ 集合出现空闲信道, 立即执行信道切换操作。

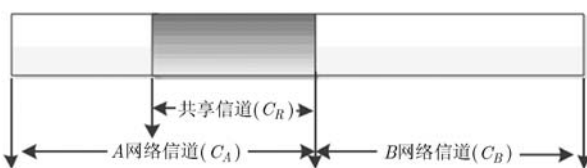


图2 部分信道共享模型

对于 SU_B : 任何 SU_B 的接入请求, 首先判断 C_R 与 C_B 集合中的空闲信道, 然后随机选择信道接入。由于 SU_A 对 C_R 集合信道拥有优先权, 当 SU_A 的信道需求大于 $C_A - C_R$ 集合时, SU_B 在 C_R 集合信道的传输可能会中断。此时, 有两种情况: (1) SU_B 具有切换功能, 当 SU_A 需要 C_R 集合信道时, SU_B 切换到其他空闲信道, 若无空闲信道, 传输终止; (2) SU_B 不具有切换功能, 当 SU_A 需要 C_R 集合信道时, SU_B 的传输终止。

为了分析不同共享策略对网络性能的影响, 假设 SU_A 和 SU_B 各自发起一次接入请求都只占用一个单位信道; 网络A和网络B均具有有限用户数, 最大用户数分别为 N_A 和 N_B , SU_A 和 SU_B 的呼叫到达分别服从参数为 λ_A 和 λ_B 的准随机分布^[12], 对应的平均传输时间分别服从参数为 $1/\mu_A$ 和 $1/\mu_B$ 的负指数分布。采用连续马尔科夫模型描述信道占用的各种状态, 其状态空间为

$$S = \left\{ (i, j, k) \left| \begin{array}{l} 0 \leq i + j \leq C_A \\ 0 \leq j \leq \min(C_R, C_A - i) \\ 0 \leq k \leq C_B \end{array} \right. \right\} \quad (1)$$

其中 S 为状态集合, i 为占用 C_A 集合信道的 SU_A 用户数; j 为占用 C_R 集合信道的 SU_B 用户数; k 为占用 C_B 集合信道的 SU_B 用户数。不同信道共享策略下, 状态 (i, j, k) 应满足相应的约束条件。

3 马尔科夫模型

用户是否具有切换功能对系统性能有重要影响, 以 SU_B 为参考, 分别针对两种情况建立状态转移模型。

3.1 SU_B 具有切换功能的状态转移模型

用 $\pi(i, j, k)$ 表示状态 (i, j, k) 的概率, 图3所示为 SU_B 有切换功能的部分信道共享策略的状态转移图, 状态 (i, j, k) 的转移状态分别是:

(1) 状态 $(i, j+1, k)$ 表明 SU_B 到达且占用了—个 C_R 集合信道, 指示函数为

$$\delta_1^{(i, j, k)} = \begin{cases} \frac{C_R - j}{C_B - k + C_R - j}, & i < C_A - C_R, j < C_R \\ \frac{C_A - i - j}{C_B - k + C_A - i - j}, & i \geq C_A - C_R, i + j < C_A \\ 0, & i + j = C_A \text{ or } j = C_R \end{cases} \quad (2)$$

(2) 状态 $(i, j, k+1)$ 表明 SU_B 到达且占用了—个 C_B 集合信道, 指示函数为

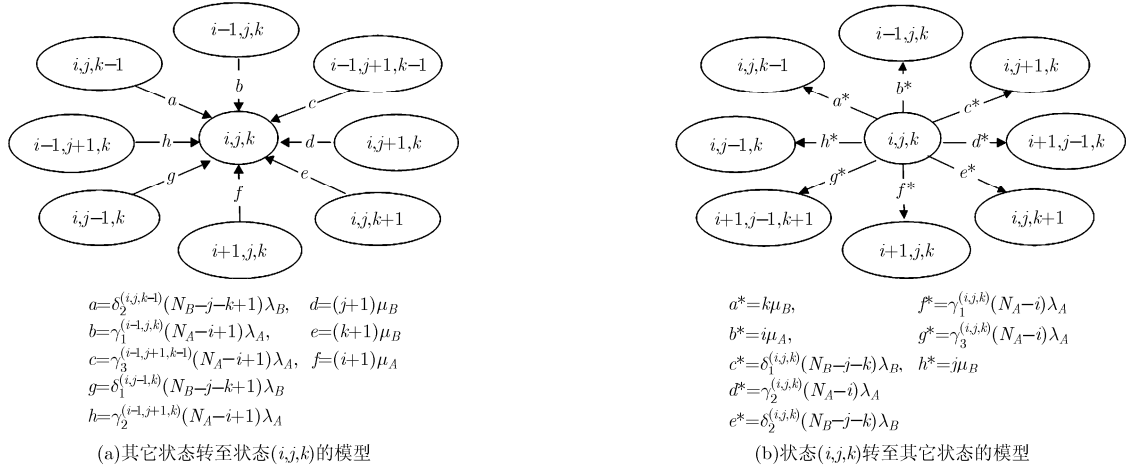


图3 SU_B 具有切换功能的状态转移模型

$$\delta_2^{(i, j, k)} = \begin{cases} \frac{C_B - k}{C_B - k + C_R - j}, & i < C_A - C_R, k < C_B \\ \frac{C_B - k}{C_B - k + C_A - i - j}, & i \geq C_A - C_R, k < C_B \\ 0, & k = C_B \end{cases} \quad (3)$$

(3) 状态 $(i+1, j, k)$ 表明 SU_A 到达且没有终止任何 SU_B 通信。可能的原因：(1) SU_A 的信道需求不超过 $C_A - C_R$ 集合信道；(2) 虽然 SU_A 的信道需求大于集合信道 $C_A - C_R$ ，但 C_R 集合信道中仍有空闲信道，或 SU_B 的传输中断，但成功切换至 C_R 集合中另外空闲信道，指示函数为

$$\gamma_1^{(i, j, k)} = \begin{cases} 1, & i < C_A - C_R \\ \frac{(C_A - i - j) + j \beta_1^{(i, j, k)}}{C_A - i}, & C_A - C_R \leq i < C_A \\ 0, & i = C_A \end{cases} \quad (4)$$

其中，满足 $i \geq C_A - C_R, i + j < C_A, k \leq C_B$ 时， $\beta_1^{(i, j, k)} = (C_A - i - j) / (C_B - k + C_A - i - j)$ ，否则为 0。 $\beta_1^{(i, j, k)}$ 表示 SU_B 被 SU_A 中断通信后成功切换至 C_R 集合中其它空闲信道的概率。

(4) 状态 $(i+1, j-1, k)$ 表明 C_B 和 C_R 集合中的信道都被占满， SU_A 到达终止了 SU_B 的传输，指示函数为

$$\gamma_2^{(i, j, k)} = \begin{cases} 1, & C_A - C_R \leq i < C_A, i + j = C_A, k = C_B \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

(5) 状态 $(i+1, j-1, k+1)$ 表明在 C_B 集合还有空闲信道， SU_A 到达中断了 SU_B 的传输，但 SU_B 成功切换到 C_B 集合中的空闲信道，指示函数为

$$\gamma_3^{(i, j, k)} = \begin{cases} \frac{j(1 - \beta_1^{(i, j, k)})}{C_A - i}, & C_A - C_R \leq i < C_A \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

(6) 状态 $(i-1, j, k)$ ， $(i, j-1, k)$ 和 $(i, j, k-1)$ 分别表明 C_R 集合中 SU_A ， C_R 和 C_B 集合中 SU_B 成功完成业务传输并释放信道。

基于以上分析，该状态转移模型对应的平衡方程为

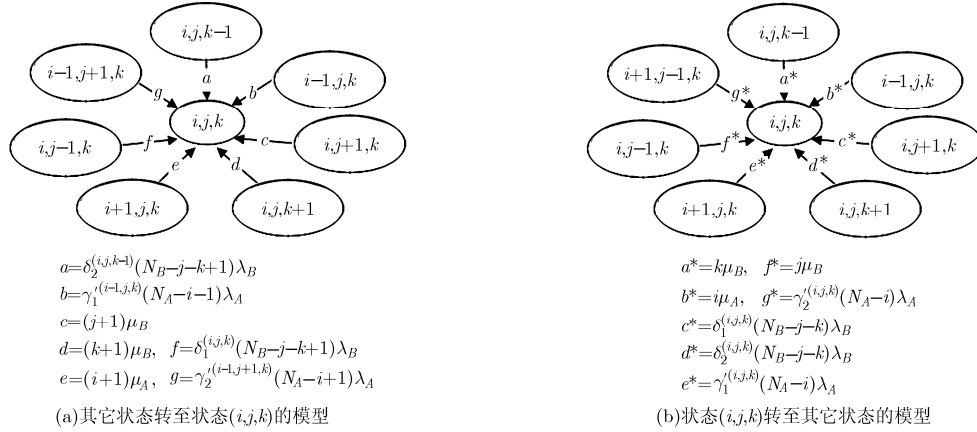
$$\begin{aligned} & [\delta_1^{(i, j, k)} (N_B - j - k) \lambda_B + j \mu_B + \delta_2^{(i, j, k)} (N_B - j - k) \lambda_B \\ & + k \mu_B + \gamma_1^{(i, j, k)} (N_A - i) \lambda_A + i \mu_A + \gamma_2^{(i, j, k)} \\ & \cdot (N_A - i) \lambda_A + \gamma_3^{(i, j, k)} (N_A - i) \lambda_A] \pi(i, j, k) \\ & = (j+1) \mu_B \pi(i, j+1, k) + \delta_1^{(i, j-1, k)} (N_B - j - k + 1) \\ & \cdot \lambda_B \pi(i, j-1, k) + \delta_2^{(i, j, k-1)} (N_B - j - k + 1) \lambda_B \pi \\ & \cdot (i, j, k-1) + (k-1) \mu_B \pi(i, j, k+1) + (i+1) \mu_A \pi \\ & \cdot (i+1, j, k) + \gamma_1^{(i-1, j, k)} (N_A - i + 1) \lambda_A \pi(i-1, j, k) \\ & + \gamma_2^{(i-1, j+1, k)} (N_A - i + 1) \lambda_A \pi(i-1, j+1, k) \\ & + \gamma_3^{(i-1, j+1, k-1)} (N_A - i + 1) \lambda_A \pi(i-1, j+1, k-1) \end{aligned} \quad (7)$$

利用归一化方程 $\sum_{(i, j, k) \in S} \pi(i, j, k) = 1$ 可以求解稳定状态的概率分布。

3.2 SU_B 不具有切换功能的状态转移模型

图4所示为 SU_B 无切换功能的部分信道共享策略的状态转移图。状态 (i, j, k) 的转移状态除了部分与前述相似外，几种特殊状态为：

(1) 状态 $(i+1, j, k)$ 表明 SU_A 到达未中断 SU_B 通信。可能的原因：(1) SU_A 的信道需求不超过 $C_A - C_R$ 集合信道；(2) 虽然 SU_A 的信道需求大于 $C_A - C_R$ 集合信道，但并不需要 SU_B 占用的 C_R 集合信道，指示函数为

图4 SU_B 不具有切换功能的状态转移模型

$$\gamma_1^{(i, j, k)} = \begin{cases} 1, & i < C_A - C_R \\ \frac{C_A - i - j}{C_A - i}, & C_A - C_R \leq i < C_A \\ 0, & i = C_A \end{cases} \quad (8)$$

(2)状态 $(i+1, j-1, k)$ 表明 SU_A 的信道需求大于 $C_A - C_R$,且 SU_A 到达会终止正在占用 C_R 集合信道的 SU_B 的传输,概率为 $j/(C_A - i)$,指示函数为

$$\gamma_2^{(i, j, k)} = \begin{cases} \frac{j}{C_A - i}, & C_A - C_R \leq i < C_A \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

如前所述,列出平衡方程,然后结合归一化方程 $\sum_{(i, j, k) \in S} \pi(i, j, k) = 1$ 导出稳定状态的概率分布。

4 性能度量指标

为了评估多认知网络间部分信道共享策略的性能,分别定义两个认知网络的性能度量指标,包括 SU_A 和 SU_B 的阻塞概率、系统吞吐量, SU_B 的强迫终止概率、切换概率。

(1) SU_A 的阻塞概率 如果 C_A 集合信道被 SU_A 占满,后续的 SU_A 接入请求将发生阻塞,其阻塞概率为

$$P_{b_A} = \sum_{k=0}^{C_B} \pi(C_A, 0, k) \quad (10)$$

(2) SU_B 的阻塞概率 如果 C_B 和 C_R 集合信道均被 SU_B 占满,后续的 SU_B 接入请求将发生阻塞,其阻塞概率为

$$P_{b_B} = \sum_{i=0}^{C_A - C_R} \pi(i, C_R, C_B) + \sum_{i=C_A - C_R + 1}^{C_A} \pi(i, C_A - i, C_B) \quad (11)$$

(3) SU_B 的强迫终止概率 如果 $C_A - C_R$ 集合信道占满,后续的 SU_A 接入请求引起 C_R 集合中 SU_B 的信道切换,如果没有空闲信道, SU_B 将强迫终止,其强

迫终止概率为

$$P_{ft_B} = \begin{cases} \frac{\lambda_A^{\text{avg}} \sum_{(i, j, k) \in S} \gamma_2^{(i, j, k)} \pi(i, j, k)}{\lambda_B^{\text{avg}} (1 - P_{b_B})}, & \text{具有切换功能} \\ \frac{\lambda_A^{\text{avg}} \sum_{(i, j, k) \in S} \gamma_1^{(i, j, k)} \pi(i, j, k)}{\lambda_B^{\text{avg}} (1 - P_{b_B})}, & \text{不具有切换功能} \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\lambda_A^{\text{avg}} = \sum_{i=0}^{C_A} \min(C_R, C_A - i) \sum_{j=0}^{C_B} \sum_{k=0}^{C_B} (N_A - i) \lambda_A \pi(i, j, k)$, $\lambda_B^{\text{avg}} = \sum_{i=0}^{C_A} \min(C_R, C_A - i) \sum_{j=0}^{C_B} \sum_{k=0}^{C_B} (N_B - j - k) \lambda_B \pi(i, j, k)$ 。

(4) SU_B 的切换概率 针对 SU_B 具有切换功能的情况,如果 SU_B 需要将信道让给 SU_A , SU_B 就会执行信道切换,其切换概率为

$$P_{hf_B} = \frac{j}{C_A - i} \sum_{i=C_A - C_R}^{C_A - 1} \sum_{j=1}^{\min(C_R, C_A - i)} \sum_{k=0}^{C_B} \pi(i, j, k) \quad (13)$$

(5)系统吞吐量 系统吞吐量定义为 SU_A 和 SU_B 单位时间传输的比特数,假设 SU_A 和 SU_B 具有相同的标准化数据速率1比特/单位时间,则系统吞吐量为

$$T = (1 - P_{nc}^A) \lambda_A^{\text{avg}} (\mu_A)^{-1} + (1 - P_{nc}^B) (1 - P_{ft_B}) \lambda_B^{\text{avg}} (\mu_B)^{-1} \quad (14)$$

其中 $P_{nc}^A = P_{b_A}$ 和 $P_{nc}^B = P_{b_B} + (1 - P_{b_B}) P_{ft_B}$ 分别是 SU_A 和 SU_B 未完成传输的概率。

5 仿真分析

为了分析有限用户数下多认知网络采用不同信道共享策略的性能,将本文采用的部分信道共享与静态信道分配(信道不共享)、分级共享策略进行对比分析。分级共享策略中, SU_A 、 SU_B 均可以接入所有信道,但是 SU_A 较 SU_B 对信道具有更高的使用优先级, SU_A 为一级用户, SU_B 为二级用户。不失一般性,

构建如下仿真环境：网络A和网络B的预分配信道数为 $C_A=C_B=8$, $\mu_A=\mu_B=0.5$, $\lambda_A=0.05$, $\lambda_B=0.3$, SU_A 用户数 $18 \leq N_A \leq 32$, SU_B 用户数 $N_B=20$ ；在分级共享策略中, SU_A 为一级用户, SU_B 为二级用户, $C_A=16$, $C_R=16$, $C_B=0$ 。平均信道利用率 U 定义为

$$U_m = \frac{(1 - P_{b_m})\lambda_m^{avg}}{C_m\mu_m}, \quad m \in \{A, B\} \quad (15)$$

由此计算出网络A的平均信道利用率为20.5%–36.2%，网络B的平均信道利用率为76.2%。

图5为不同 SU_A 用户数下 SU_A 的阻塞概率变化曲线。仿真结果和分析结果是一致的，由图可知分级共享策略的阻塞概率最小，因为此时 SU_A 为一级用户，对 $C_A=16$ 个信道有优先接入权；而对于部分信道共享策略 (SU_B 有/无切换功能两种情况) 和静态信道分配策略， SU_A 对 $C_A=8$ 个信道有优先接入权，其阻塞概率相同。此外，对于部分共享策略，即使增大共享信道数， SU_A 的阻塞概率并不增加，因为 SU_B 的行为对 SU_A 而言是透明的。

图6为不同 SU_A 用户数下 SU_B 的阻塞概率变化曲线。由图可知，相比于静态信道分配策略，部分信道共享策略 ($C_R=4$) 具有更低的阻塞概率；分级共享策略的阻塞概率低于 $C_R=4$ 时的部分信道共享策略和静态信道分配策略，因为 SU_B 可以接入全部16条信道。由于部分信道共享策略 ($C_B=8$, SU_B 具有切换功能) 中 C_B 集合信道仅供 SU_B 接入，而分级共享策略中 SU_A 也可以接入 C_B ，所以在 $C_R=8$ 时，部分信道共享策略的阻塞概率更低。此外，对于部分信道共享策略 ($C_B=8$, SU_B 不具有切换功能)， SU_B 具有最小的阻塞概率，因为 SU_B 被 SU_A 抢占信道后终止传输，导致 SU_B 的强迫终止概率增大 (如图7所示)，信道被全部占用的概率反而减小。

图7为不同 SU_A 用户数下 SU_B 的强迫终止概率变化曲线。由图可知，静态信道分配策略不会出现强迫终止的情况，概率为0；如果 SU_B 具有切换功能，

部分信道共享策略比分级共享策略具有更低的强迫终止概率，且 $C_R=8$ 比 $C_R=4$ 大，这是由于 SU_A 与 SU_B 选择相同接入信道的概率增大造成的；如果 SU_B 不具有切换功能，部分信道共享策略的强迫终止概率最大。

图8为不同 SU_A 用户数下 SU_B 的切换概率变化曲线。由图可知，部分信道共享策略的切换概率低于分级共享策略。综合图5和图6可知，分级共享策略是通过增大 SU_B 的切换次数使得 SU_A 和 SU_B 具有较低的阻塞概率；同样，部分信道共享策略也必须在阻塞概率和切换性能之间权衡。显然，静态信道分配策略和 SU_B 不具有切换功能的部分信道共享策略的切换概率为0。

图9统计了网络A和网络B的总系统吞吐量。采用以上3种共享策略，系统吞吐量都随 λ_A 的增大而增大。采用分级共享策略的系统比采用其它策略的系统具有更高的系统吞吐量，因为此时 SU_A 和 SU_B 都可以接入任何信道，但是，大吞吐量的代价是优先级较低的 SU_B 具有较高的阻塞概率和强迫终止概率。当 $C_R=8$ 且 SU_B 不具有切换功能时，系统吞吐量增长缓慢，当 $N_A \geq 20$ 时，系统吞吐量最低，因为 SU_B 的强迫终止概率增加，未完成的传输增多造成的。

6 结束语

针对有限用户数下的多认知网络共存场景，建立3维马尔科夫链部分信道共享模型，仿真分析了有/无切换功能两种情况下认知网络间部分信道共享策略的性能。结果表明，静态分配策略的系统具有最高的 SU_B 阻塞概率和最大的强迫终止概率，系统吞吐量也低于其它信道共享策略；分级共享策略具有最高的系统吞吐量和最低的 SU_A 阻塞概率，但 SU_B 的切换概率也最高；部分信道共享策略下， SU_B 的阻塞概率随共享信道数的增加而下降，代价是

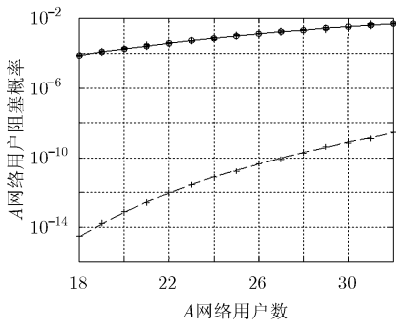


图5 不同 SU_A 用户数下 SU_A 的阻塞概率

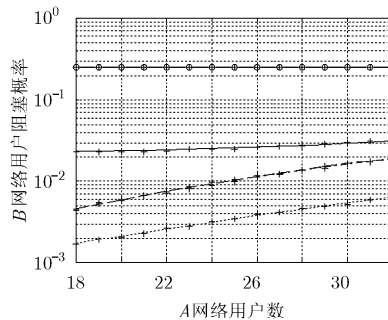


图6 不同 SU_A 用户数下 SU_B 的阻塞概率

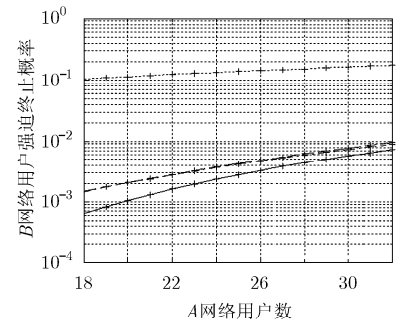


图7 SU_B 的强迫终止概率

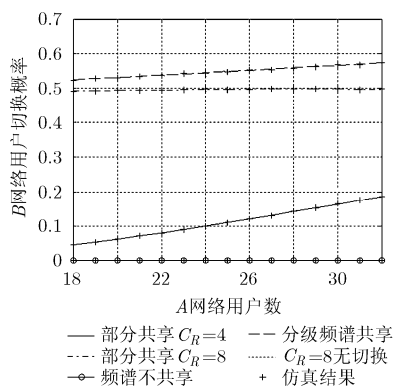
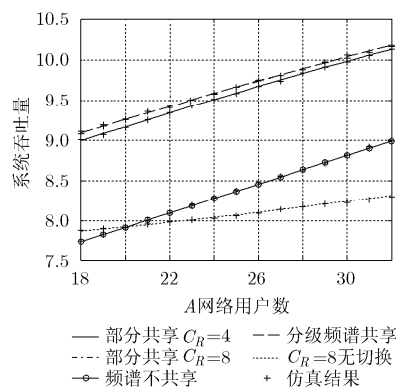
图8 SU_B 的切换概率

图9 系统吞吐量

SU_B 的强迫终止概率和切换概率将增大。综上所述,相比于静态信道分配策略和分级共享策略,部分信道共享策略的系统在容忍较小的切换概率和强迫终止概率下可以获得较大的系统吞吐量,可灵活地在不同性能指标间权衡。

参考文献

- [1] Mitola J and Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Ning G Q, Cao X G, Duan J Q, *et al.* A spectrum sharing algorithm based on spectrum heterogeneity for centralized cognitive radio networks[C]. 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Budapest, 2011: 1-5.
- [3] Ning G Q, Duan J Q, Su J, *et al.* Spectrum sharing based on spectrum heterogeneity and multi-hop handoff in centralized cognitive radio networks[C]. 2011 20th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), New Jersey, 2011: 1-6.
- [4] Song Y and Xie J. Common hopping based proactive spectrum handoff in cognitive radio Ad hoc networks[C]. 2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), Miami, 2010: 1-5.
- [5] Tumuluru V K, Wang P, and Niyato D. Performance analysis of cognitive radio spectrum access with prioritized traffic[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(4): 1895-1906.
- [6] Jiang X Y, Zhang Y Y, Wong K K, *et al.* On partial spectrum sharing of two licensed networks using cognitive radios[C]. 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Budapest, 2011: 1-5.
- [7] Villardi G P, Alemseged Y D, Sun C, *et al.* Enabling

coexistence of multiple cognitive networks in TV white space[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(4): 32-40.

- [8] Filin S, Baykas T, Rahman M A, *et al.* Performance evaluation of IEEE 802.19.1 coexistence system[C]. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, 2011: 1-6.
- [9] Wong E W and Foh C H. Analysis of cognitive radio spectrum access with finite user population[J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(5): 294-296.
- [10] 冯文江, 夏育才, 蒋卫恒. 有限用户数下认知无线电接入模型和性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(2): 118-135.
- Feng Wen-jiang, Xia Yu-cai, and Jiang Wei-heng. Cognitive radio access model and performances analysis with finite user population[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(2): 118-135.
- [11] Tian Q M, Ma C, Yu G D, *et al.* Analysis of cognitive radio spectrum access with finite primary users and infinite secondary users[C]. 2010 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), China, 2010: 1-5.
- [12] 盛友招. 排队论及其在现代通信中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- Sheng You-zhao. *Queueing Theory and Its Application in Modern Communication*[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2007.

衡玉龙: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为认知无线电。

黄天聪: 男, 1971年生, 博士, 讲师, 研究方向为通信信号处理。

冯文江: 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等。

李林: 男, 1976年生, 硕士, 副教授, 主要研究方向为通信信号处理。