

文章编号:1007-5321(2014)06-0077-04

DOI:10.13190/j.jbupt.2014.06.016

认知无线网络频谱聚合策略的性能优化

金顺福^{1,2}, 李 刚^{1,2}, 霍占强³

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了有效提高认知无线网络频谱共享的性能,综合考虑了集中控制模式下的数据传输质量及信道利用率,研究了基于主用户的频谱聚合策略. 针对一个聚合频谱中的多个信道,面向次级用户建立具有多服务台且传输过程可同步中断的离散时间排队模型. 使用矩阵几何解方法,求解出主用户数据包阻塞率、次级用户数据包平均延迟以及信道利用率等性能指标的表达式. 实验结果表明,在设置频谱聚合容量时,不同性能指标之间存在折中关系. 通过建立成本函数,给出了频谱聚合容量的设置方案,实现了认知无线网络频谱聚合策略的性能优化.

关 键 词: 认知无线网络; 频谱聚合; 多信道; 离散时间排队模型; 矩阵几何解

中图分类号: TN393

文献标志码: A

Performance Optimization of Spectrum Aggregation Strategy in Cognitive Radio Networks

JIN Shun-fu^{1,2}, LI Gang^{1,2}, HUO Zhan-qiang³

(1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China;

2. The Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Hebei Qinhuangdao 066004, China;

3. College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to effectively improve the spectrum sharing performance in cognitive radio network, considering the transmission quality and channel utilization with centralized control mode, the spectrum aggregation strategy for primary users is investigated. For an aggregated spectrum consists of multiple channels, considering that primary users have higher priority to secondary users, a discrete time queueing model with multiple servers and synchronous transmission interruption is built. Using the method of matrix geometric solution, the steady state distribution of the system is given. Accordingly, performance measures in terms of blocking ratio of primary users, average delay of secondary users and channel utilization are derived. Experimental results show that when setting the spectrum aggregation capacity, there is a trade-off between different performance measures. By establishing a system cost function, the scheme for setting spectrum aggregation capacity is carried out, and the spectrum aggregation strategy in cognitive radio networks is optimized.

Key words: cognitive radio networks; spectrum aggregation; multiple channels; discrete time queueing model; matrix geometric solution

认知无线网络中的次级用户机会式地接入授权频谱,提高了无线频谱资源的利用率^[1-2].

收稿日期: 2014-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472342)

作者简介: 金顺福(1966—), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: jsf@ysu.edu.cn.

面向多信道的频谱分配策略成为相关领域的研究热点. 国内外学者针对次级用户探索了信道绑定及频谱切换策略, 并给出了系统性能的分析框架^[3-5], 但是缺乏针对主用户频谱聚合策略的数学建模、性能分析与系统优化的相关研究.

笔者针对由若干信道聚合而成的一个授权频谱, 通过建立同步中断的多服务台优先级排队模型, 进行频谱聚合策略的性能分析与系统优化.

1 系统模型

认知无线网络中存在 2 类用户, 一类为主用户网络中对授权频谱拥有优先使用权的主用户, 另一类为次级用户网络中能机会式使用空闲频谱的次级用户. 次级用户具有频谱感知能力, 只在不干扰主用户的情况下机会式占用空闲的授权频谱. 在次级用户使用频谱时, 若有主用户到达, 次级用户便主动退出频谱, 无条件将授权频谱归还给主用户.

为了保证主用户的传输质量, 将若干信道聚合为一个频谱, 每个主用户数据包的传输都要占用聚合频谱中的全部信道. 为了降低次级用户对主用户的潜在干扰, 令每个次级用户数据包的传输只占用聚合频谱中的一个信道.

在集中式控制策略下, 中央控制器通过收集网络中尝试接入频谱的次级用户的感知信息掌握频谱使用的实时信息. 将次级用户数据包抽象为 I 类顾客, 把主用户数据包抽象为 II 类顾客. 针对次级用户将每个信道抽象为一个服务台; 针对主用户将由若干信道聚合而成的频谱抽象为一个服务台, 且不设置等待缓存. 中央控制器基于频谱的使用状态调度次级用户数据包. 当所有信道均有数据传输时, 新到达的次级用户数据包进入缓存, 按照先来先服务 (FCFS, first come first served) 规则等待传输. 在次级用户传输数据的过程中, 如果有主用户数据包到达, 则正在传输的全部次级用户数据包同时中断传输, 将频谱让给主用户. 由此, 面对次级用户建立一个多服务台且传输过程可同步中断的排队模型.

2 模型解析

为了重点研究网络资源调度与频谱资源分配, 假设物理层无信号干扰且次级用户感知的结果是无差错的. 考虑 2 类用户的到达间隔和传输时间相互独立. 次级用户数据包的到达间隔服从参数为 λ_1 ($\bar{\mu}_1 = 1 - \lambda_1$) 的几何分布, 传输时间服从参数为

μ_1 ($\bar{\mu}_1 = 1 - \mu_1$) 的几何分布. 主用户数据包的到达间隔服从参数为 λ_2 ($\bar{\lambda}_2 = 1 - \lambda_2$) 的几何分布, 聚合频谱中的 c 个信道作为一个服务台为主用户服务, 传输时间服从参数为 μ_2 ($\bar{\mu}_2 = 1 - \mu_2$) 的几何分布. 设定 μ_0 为一个信道对主用户数据包的传输率, 则 $\mu_2 = c\mu_0$.

令 L_n^1 表示观察点 $t = n^+$ 时刻系统中的次级用户数据包数量, L_n^2 表示观察点 $t = n^+$ 时刻系统中的主用户数据包数量. $\{(L_n^1, L_n^2), n \geq 0\}$ 构成一个二维离散时间 Markov 链, 其状态空间为

$$\Omega = \{(m, l) : m = 0, 1, 2, 3, \dots; l = 0, 1\}$$

系统处于水平 i 表示系统中有 i 个次级用户数据包. 依系统水平的字典顺序, Markov 链 $\{(L_n^1, L_n^2), n \geq 0\}$ 的一步转移概率矩阵 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} A_{0,0} & A_{0,1} & & & & \\ A_{1,0} & A_{1,1} & A_{1,2} & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \\ A_{c,0} & A_{c,1} & \cdots & A_{c,c} & A_{c,c+1} & \\ & A_{c,0} & A_{c,1} & \cdots & A_{c,c} & A_{c,c+1} \\ & & A_{c,0} & A_{c,1} & \cdots & A_{c,c} & A_{c,c+1} \\ & & & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $A_{i,j}$ 为系统由水平 i 至水平 j 的转移概率子矩阵.

式 (1) 中转移概率矩阵 \mathbf{P} 呈现出 GI/M/1 形式, 可使用矩阵几何解方法进行模型的稳态解析.

定义系统稳态分布为 $\boldsymbol{\pi} = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots)$, 其中 $\pi_i = (\pi_{i,0}, \pi_{i,1})$, $i \geq 0$.

令 p_1 表示频谱被主用户占用的概率. 在次级用户理想感知的条件下, 次级用户对主用户传输是透明的. 基于 Geo/Geo/1/1 排队模型, 可得

$$p_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} P\{L_n^2 = 1\} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + c\mu_0}$$

3 性能指标与系统实验

当频谱正在被一个主用户数据包占用时, 新到达的主用户数据包将无法进入系统. 定义主用户数据包阻塞率 B_{pu} 为一个新到达的主用户数据包被系统阻塞的概率, B_{pu} 表示为

$$B_{pu} = p_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + c\mu_0} \quad (2)$$

稳态下系统中处于等待状态的次级用户数据包个数记为 L'_{su} , 其均值 $E[L'_{su}]$ 表示为

$$E[L'_{su}] = \sum_{i=0}^{\infty} i\pi_{i,1} + \sum_{i=c+1}^{\infty} (i-c)\pi_{i,0}$$

次级用户数据包延迟包括等待时间和传输时间. 由 Little 公式, 次级用户数据包平均延迟 W_{su} 为

$$W_{su} = \frac{E[L'_{su}]}{\lambda_1} + \frac{1}{\mu_1} \quad (3)$$

定义单位时隙内某信道被主用户或次级用户占用的概率为信道利用率 θ ,

$$\theta = p_1 + \sum_{i=0}^c \frac{i\pi_{i,0}}{c} + \sum_{i=c+1}^{\infty} \pi_{i,0} \quad (4)$$

为了进一步分析频谱聚合容量, 即一个聚合频谱中所包含的信道数对系统性能的影响, 结合理论分析结果与数值仿真实验定量刻画主用户数据包阻塞率、次级用户数据包平均延迟和信道利用率的变化趋势. 实验中设定 1 个时隙的长度为 1 ms, 每个信道对主用户数据包的传输率为 $\mu_0 = 0.1$, 聚合频谱对主用户数据包的传输率为 $\mu_2 = c\mu_0$.

主用户数据包阻塞率 B_{pu} 随频谱聚合容量 c 的变化趋势如图 1 所示.

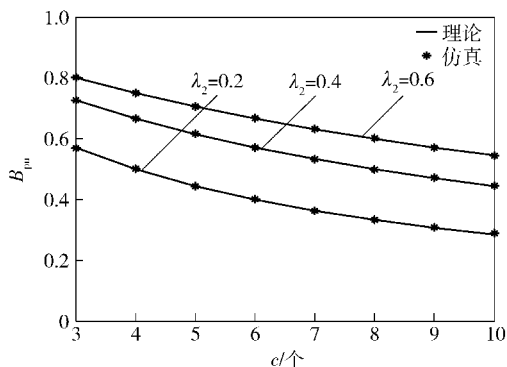


图 1 主用户数据包阻塞率的变化趋势

理想感知情况下次级用户对主用户是透明的, 只有当前占用频谱的主用户数据包才会对新到达的主用户数据包造成影响. 由图 1 可知, 频谱聚合容量 c 越大, 频谱对主用户数据包的传输率越高, 频谱被主用户占用的概率越低, 主用户数据包发生阻塞的概率也就越小. 对于相同的频谱聚合容量, 主用户数据包到达率越大, 系统的主用户数据包负载就越重, 频谱被主用户数据包占用的概率也就越大, 主用户数据包发生阻塞的概率增加.

次级用户数据包平均延迟 W_{su} 随频谱聚合容量 c 的变化趋势如图 2 所示.

由图 2 可以看出, 频谱聚合容量 c 越大, 次级用户数据包平均延迟 W_{su} 越小. 随着频谱聚合容量的

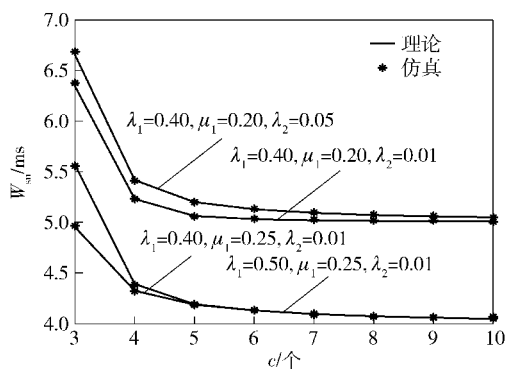


图 2 次级用户数据包平均延迟的变化趋势

增大, 次级用户数据包被服务的机会加大, 系统中次级用户数据包的等待队长变小, 平均等待时间也减少, 次级用户数据包平均延迟呈下降趋势. 由图 2 上面一对曲线可以看出, 随着主用户数据包到达率的增大, 频谱被主用户占用的概率加大, 次级用户数据包等待的时间变长, 次级用户数据包平均延迟加大. 比较图 2 下面一对曲线可知, 次级用户数据包的到达率越大, 系统的次级用户数据包负载就越重, 次级用户数据包的等待时间变长, 因此次级用户数据包平均延迟增大. 对比图 2 中两对曲线还可以看出, 次级用户数据包传输率的增大使得次级用户数据包的传输时间变短, 缓存中次级用户数据包的等待时间也变小, 次级用户数据包平均延迟呈下降趋势.

信道利用率 θ 随着频谱聚合容量 c 的变化趋势如图 3 所示.

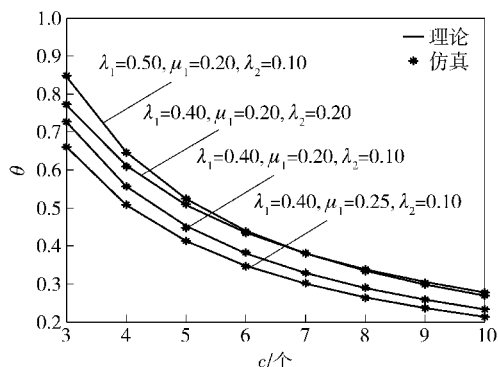


图 3 信道利用率变化趋势

由图 3 可以看出, 聚合频谱的信道数越多, 信道被闲置的概率就会越大, 导致信道利用率变低. 对于相同的频谱聚合容量, 次级用户数据包到达率的增加使得系统的次级用户数据包负载变大, 信道被次级用户占用的概率增加, 信道利用率变大; 主用户数据包的到达率越大, 信道被主用户占用的概率增

加,信道利用率增大;次级用户数据包的传输率越大,传输一个次级用户数据包所用的时间越短,信道利用率因此减小。

图1~图3中实线为理论分析结果,星号为仿真统计结果,可以看出理论分析结果与仿真统计结果吻合。实验结果表明,随着频谱聚合容量的增加,主用户数据包阻塞率降低及次级用户数据包平均延迟降低,但信道利用率也会降低。因此,频谱聚合策略中的不同性能指标之间存在折中关系。为了提高频谱聚合策略对系统性能的有利影响,需要对频谱聚合容量进行优化设计。

4 系统优化

权衡系统的各性能指标,从经济学角度构造系统成本函数为

$$F(c) = r_1 B_{pu} + r_2 W_{su} + \frac{r_3}{\theta} \quad (5)$$

其中: r_1 为主用户数据包阻塞率对系统成本的影响因子, r_2 为次级用户数据包延迟单位时间的花费对系统成本的影响因子, r_3 为信道利用率对系统成本的影响因子。

令 $\mu_1 = 0.2, \mu_0 = 0.1, \lambda_2 = 0.1$,并假设不同性能指标对系统成本具有相同的影响因子,即 $r_1 = r_2 = r_3 = 1$ 。系统成本 $F(c)$ 随着频谱聚合容量 c 的变化趋势如图4所示。

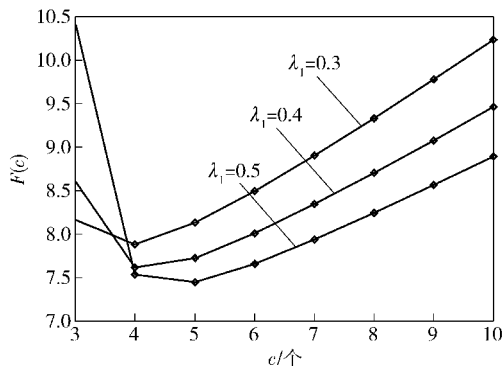


图4 系统成本随频谱聚合容量的变化趋势

由图4可以看出,当频谱聚合容量 c 较小时,系统成本随着频谱聚合容量的增加而降低,这是因为主用户数据包阻塞率和次级用户数据包平均延迟随频谱聚合容量增加而变小,引起系统成本降低;当频谱聚合容量 c 较大时,系统成本随着频谱聚合容量的增加而增加,这是因为频谱聚合容量越大,信道利用率越低,导致系统成本增加。因此,对于所有次级

用户数据包到达率均存在一个最优频谱聚合容量,使得系统成本最低。

当次级用户数据包的到达率为0.3时,最优频谱聚合容量为4,最低成本为7.88;当次级用户数据包的到达率为0.4时,最优频谱聚合容量为4,最低成本为7.61;当次级用户数据包的到达率为0.5时,最优频谱聚合容量为5,最低成本为7.46。

5 结束语

针对集中式频谱聚合策略,考虑主用户使用整个频谱进行数据传输,而每个次级用户数据包的传输则使用频谱中的一个信道,面向次级用户建立了多服务台且传输过程可同步中断的排队模型。通过构造GI/M/1型结构矩阵,结合理论推导和系统仿真,揭示了频谱聚合策略可以有效降低主用户数据包阻塞率和次级用户数据包平均延迟,但信道利用率会有所下降。基于此,折中考虑多性能指标构造成本函数,给出了频谱聚合容量的优化设计方案。

参考文献:

- [1] Nguyen T N, Nguyen V T. Medium access control design for cognitive radio networks: a survey[J]. IEICE Transactions on Communications, 2014, 97(2): 359-374.
- [2] 申滨,王舒,黄琼,等. 认知无线电最优用户选择协作频谱感知[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(2): 32-37.
- [3] Shen Bin, Wang Shu, Huang Qiong, et al. Optimal user selection algorithm based cooperative spectrum sensing for cognitive radio[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(2): 32-37.
- [4] Wang Jian, Huang Aiping, Cai Lin, et al. On the queue dynamics of multiuser multichannel cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1314-1328.
- [5] Yasuharu K, Hiroyuki M, Shoji K, et al. Performance analysis of dynamic spectrum handoff scheme with variable bandwidth demand of secondary users for cognitive radio networks[J]. Wireless Networks, 2013, 19(5): 607-617.
- [6] 金顺福,解洪亭,赵媛. 带有组间切换的认知无线网络混合式信道分配策略及性能研究[J]. 通信学报, 2013, 34(12): 11-19.
- [7] Jin Shunfu, Xie Hongting, Zhao Yuan. Hybrid channel allocation strategy with group switching and performance evaluation in cognitive radio network[J]. Journal on Communications, 2013, 34(12): 11-19.