

Modeling Spectrum Handoff Strategy of OSA Model and Evaluating Its Performance Using CPN*

Yuanyuan Yao, Yanhui Lu, Shouyi Yang

School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou
Email: ieyhlu@zzu.edu.cn

Received: Nov. 24th, 2012; revised: Dec. 16th, 2012; accepted: Dec. 23rd, 2012

Abstract: In Cognitive Radio Networks (CRN), spectrum mobility effectively improves the user's Quality of Service (QoS), and has become one of the important technologies to ensure the priority of primary users and solve the scarcity of spectrum resources. An executable top-down hierarchical Colored Petri Net (CPN) model is developed for spectrum handoff in CRN. It breaks through Markov Chain's (MC) explicit limitation, which includes MC's memoryless property and proneness to state space explosion in evaluating handoff process, and the simulation results show that CPN offers significant advantages over MC in modeling handoff strategies and evaluating their performance with less computational complexity in addition to its flexibility and adaptability to different scenarios.

Keywords: Cognitive Radio; Spectrum Mobility; Spectrum Handoff Probability; Colored Petri Net

OSA 模型下频谱切换策略的 CPN 建模及性能评价*

姚媛媛, 陆彦辉, 杨守义

郑州大学信息工程学院, 郑州
Email: ieyhlu@zzu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 11 月 24 日; 修回日期: 2012 年 12 月 16 日; 录用日期: 2012 年 12 月 23 日

摘要: 在认知无线电(Cognitive Radio, CR)网络中, 频谱切换技术是提高用户服务质量(QoS), 保证授权用户(Primary User, PU)优先使用权的重要技术之一。本文根据 CR 网络中认知用户的行为为其建立了可执行的自上而下的着色 Petri 网(CPN)模型, 克服了传统马尔科夫链(MC)为系统建模时的无记忆性, 以及易于产生状态空间爆炸等问题, 对不同场景的模拟更灵活, 计算量更低, 具有较强的开放性; 通过 Monitor 监控器分析模型性能, 验证了模型的正确性。

关键词: 认知无线电; 频谱移动性; 频谱切换概率; 着色 Petri 网

1. 引言

基于认知无线电(Cognitive Radio, CR)的机会频谱接入(Opportunistic Spectrum Access, OSA)系统最大的特点是允许认知用户在不干扰授权用户正常通信的前提下, 接入授权频段, 机会式地利用授权频谱进行通信^[1]。近几年, 认知无线技术得到了较大的发展,

但还远不够成熟, 目前大部分文章只是从概念上阐述了切换管理对于维持认知用户通信连续性的重要意义以及认知无线网络中切换所面临的问题, 或者将切换与频谱分配和接入等功能模块进行联合设计^[2,3]。而且, 在对切换策略和网络性能进行定量分析时, 这些文献基本上都使用马尔科夫链(MC)作为研究的理论基础^[4]。但是, 由于 MC 是无记忆的, 对于很多新型业务及复杂业务, 简单地将其到达规律假设为泊松分

*资助信息: 国家自然科学基金资助项目(61271421); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(No. 2011GGJS-002)。

布并不能反映业务的真实特性；此外，其状态数目往往随并发分量的增加呈指数增长，容易产生空间爆炸问题。这些限制使马尔科夫模型很难为多业务共存，多用户并发的 CR 网络建模^[5,6]。

为了克服 Markov 模型在分析目前宽带业务中的局限性，J. Fernando 在 1997 年首次将 Petri 网(PN)引入通信系统，并验证了其比 MC 具有优越性^[7]。着色 Petri 网(CPN)^[8,9]是具有层次性的高级 Petri 网，它有机地结合了数据结构和层次分解，通过层次分解还可以有效地缩减系统的状态空间，同时结合 ML 程序语言使得模型易于实现。是少有的能同时用于验证系统功能的正确性和评估系统性能的建模语言。

鉴于此，本文用 CPN 建立了一种认知无线网络中与时间有关的频谱切换模型，并通过性能分析求得频谱切换概率。通过与理论结果的对比，验证了该模型的正确性。论文的安排如下：本文首先介绍了切换策略，提出了在一次 CR 用户服务时间内的各种时间关系模型；接着介绍了认知无线电系统 OSA 模型下认知用户行为的 CPN 模型；文章在第 4 节进行了系统性能仿真分析；最后给出结论和下一步研究方向。

2. CR 用户行为及频谱切换时间关系

在认知无线网络中，频谱移动行为发生在当前信道性能下降或授权用户出现的时候。CR 用户是靠临时出现的“频谱空洞”进行通信的，由于授权用户的出现、离开，以及外界干扰造成信道质量下降都是随机的，所以频谱空洞的出现和消失也都是随机过程。也就是说，随着时间的推移，可用频谱是在不停的移动当中，CR 用户要想维持自己不间断的通信服务，必须进行相应的频谱切换。图 1 以四载频的情形为例，说明了可用频谱空洞随时间移动时($t_1 < t_2 < t_3$)，OFDM 子载波进行频谱切换的过程。频谱切换的目的是使 CR 在特定地域、可用频谱随时间变化的情况下依然能够维持不间断通信^[10]。

首先，假设认知用户在整个服务时间内地理位置并不发生改变，并且始终有空闲的频谱空洞可供使用，即不会因为当前服务的频谱空洞离开时，新的频谱空洞还没有出现而导致切换失败。另外，在验证所建立的 CPN 模型的正确性时，为了便于与理论结果对比，模型中的业务到达规律服从泊松分布，每个业务请求的服务时间服从负指数分布。授权用户平均到

达间隔即频谱孔的平均持续时间也服从负指数分布。本文直接使用文献[11]中给出的结果，即：

$$g(x) = \begin{cases} \mu e^{-\mu x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中， $1/\mu$ 为认知用户每次呼叫的平均服务时间， $g(x)$ 是相应的概率密度函数；授权用户的业务到达率为 λ ，平均到达时间间隔(即频谱孔的持续时间为 $1/\lambda$ ， $f(x)$ 是频谱孔保持时间的概率密度函数。

根据文献[11]给出的频谱切换时间关系图(如图 2 所示)，可以计算出用户在一次服务时间 R_0 内，进行 n 次频谱切换的概率 P_n ：

$$P_n = \begin{cases} \frac{\mu}{\lambda + \mu}, & (n = 0) \\ \frac{\mu \lambda^n}{(\lambda + \mu)^{n+1}}, & (n > 0) \end{cases} \quad (3)$$

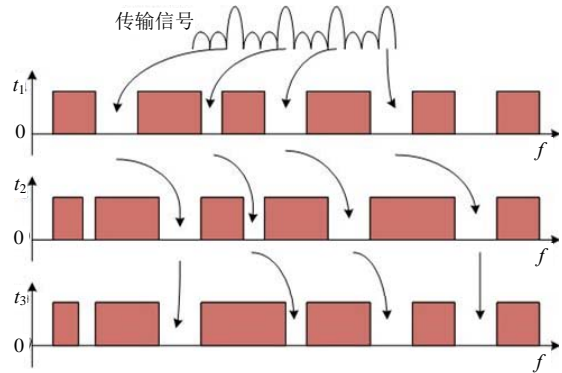


Figure 1. Spectrum handoff and mobility process
图 1. 频谱切换和移动过程

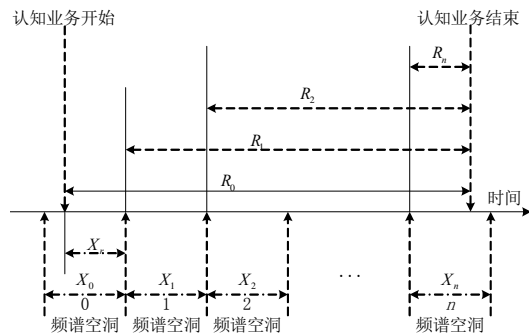


Figure 2. Graph of time relationship model
图 2. 时间关系模型

式(3)中 $n = 0$ 表示在一次服务时间内认知用户没有发生频谱切换。 P_n 只跟认知用户的平均服务率 μ 和授权用户到达率 λ 有关。

图 2 描述了 CR 用户一次呼叫服务过程中所有的时间关系, X_0 表示当一次呼叫服务开始时, 频谱孔 0 所剩余的时间, 频谱孔的离去代表授权用户的到达; X_i 表示被认知用户占用的频谱孔 i 持续的时间; R_i 则表示从第 i 次频谱切换开始到服务结束所用的时间。在 CR 用户一次业务请求服务时间 R_0 内, 频谱切换进行了 n 次, 假设 M 个用户中发生 n 次频谱切换的用户数为 Num_n , 则用户在一次服务时间 R_0 内发生 n 次频谱切换的概率为:

$$P_n = Num_n / M \quad (4)$$

3. OSA 模型下频谱切换策略的 CPN 模型

J. Fernando et al.^[12]对着色 Petri 网(CPN)已做了详细的介绍, CPN 能对复杂系统建模主要在于它具有两个重要特性: 一是标记的颜色可以是任意复杂的数据, 因此大大简化了网络的复杂度; 二是具有层次结构, 可以从整体到局部, 由粗到精对系统分页, 逐步细化, 突出重点。

基于这一思想, 我们建立了 OSA 模型下认知用户行为的 CPN 模型, 图 3 是它的一般结构, 即移动性管理的父页, 它使用五个替代变迁(双线方框)和四个库所(椭圆)给出了系统的功能和数据流。模型中各个模块的作用如表 1 所示。

其中的每个替代变迁都可以扩展成 CPN 子网, 即 CPN 子页。

模型中的五个库所分别为用户队列、授权用户接入、可用资源、认知用户离开和授权用户离开, 它们触发了系统中的数据流。比如, 用户队列表示系统中资源不足时用户应该在此库所中排队等待服务; 授权用户接入表示授权用户返回系统, 认知用户应该归还所占用的资源; 可用资源表示系统中有空闲资源存在时, 系统将为用户分配资源; 授权用户离去和认知用户离去表示服务结束时, 用户离去并释放占用的频谱。

基于上述研究, 我们为文献[11]中的频谱切换问题建立了如图 4 所示的 CPN 模型, 它是图 3 移动性管理模型的具体化。利用该模型我们仿真了认知用户的切换概率与认知用户平均服务率 μ 及授权用户到达率 λ 的关系。

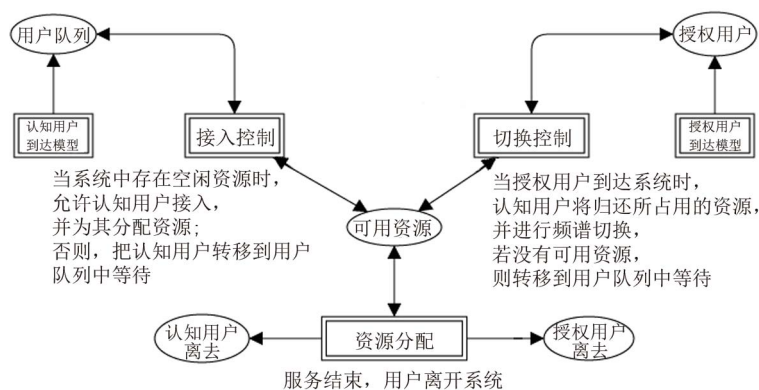


Figure 3. CPN model of spectrum mobility
图 3. 移动性管理的 CPN 模型

Table 1. The functions of substitution transitions
表 1. 各替代变迁的作用

替代变迁	作用
认知用户到达模型、授权用户到达模型	模拟认知用户和授权用户的行为, 特别是他们的到达规律和对频谱的使用规律
接入控制	实现认知用户的接入控制, 即判断系统中是否存在足够的满足认知用户 QoS 要求的空闲资源, 如果存在, 则允许认知用户接入, 否则, 把认知用户转移到用户队列中等待服务
切换控制、资源分配	模拟系统中授权用户与 CR 用户之间的频谱切换和资源分配

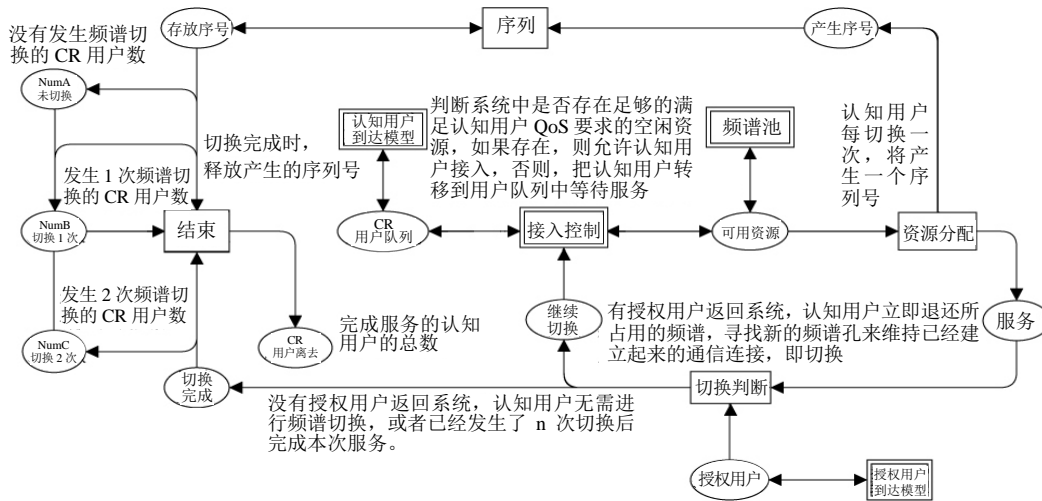


Figure 4. Spectrum handoff CPN model
图 4. 频谱切换的 CPN 模型

图 4 描述了频谱切换的整体流程, 在 CR 网络中, 认知用户动态感知和利用授权用户频谱。当存在空闲频谱时, 系统接入 CR 用户并为其分配频谱; 当授权用户出现时, CR 用户必须让出使用的频谱资源, 进行频谱切换, 重新接入新的频谱资源来维持已经建立起来的通信连接, 直到服务结束。产生切换序号可以在仿真过程中用监控工具方便统计出用户切换的次数。在一次认知用户服务过程中, 如果 CR 用户没有发生频谱切换, 则 NumA 自增 1, 因此, 库所 NumA, NumB 和 NumC 分别用来存放未发生频谱切换的 CR 用户数, 发生一次频谱切换的 CR 用户数和发生两次频谱切换的 CR 用户数, 若 P_n 表示在一次服务时间内进行 n 次频谱切换的概率, 则进而可以得到频谱切换的概率 P_0 、 P_1 和 P_2 的值, 分别表示 CR 网络中 CR 用户在服务时间内发生零次、一次及两次频谱切换的概率。通过类似的方式, 用户在服务时间内发生 n 次切换的概率 P_n 也很容易通过 CPN 模型得到, 这大大降低了模型的复杂度和理论推导的计算量。为了简化模型, 建模时只研究了 $n < 3$ 的情况。

另外, 图 4 中的替代变迁授权用户到达和认知用户到达可以模拟各种用户的行为, 这些用户的到达规律既可以服从泊松分布, 也可以服从正态分布、爱尔兰分布等其它分布。也就是说 CPN 模拟复杂系统的随机服务特性时, 除了克服 Markov 模型中的状态空间爆炸问题外, 特别适合支持多媒体业务的认知无线电系统。

4. 性能评价及比较

为了验证该模型的正确性, 我们对文献[11]中频谱移动性管理和频谱切换问题进行了研究, 本文中所有的仿真都是在 CPN Tools 中完成的, 假设系统总带宽为 5MHz, 信道池中的可用信道数为 $N = 512$, 我们分两种情况改变相关参数来对比仿真结果与理论结果。

1) 固定 CR 用户平均服务率 μ , 通过改变授权用户的到达率 λ 的值来观察 PU 的到达时间间隔 $1/\lambda$ (即频谱孔的持续时间) 对切换概率的影响。假设认知用户平均服务率 $\mu = 120$, 授权用户的到达率 λ 取值从 40 变化到 320, μ 和 λ 的单位是用户数/小时。为了使仿真结果更加精准, 每改变一次 λ 的值, 则 CPN 仿真十万步, 用 monitor 监控工具跟踪业务服务情况。分别得到 P_0 、 P_1 和 P_2 的值。仿真结果及利用公式(3)计算出的数值结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 采用 CPN 模型得到的切换概率与理论结果基本吻合, 图 6 是文献[11]中的仿真结果图, 这验证了 CPN 模型的正确性。仿真结果和数值计算都表明, 授权用户到达率 λ 值越大, 认知用户所占用的频谱孔持续时间 $1/\lambda$ 就越短, 发生频谱切换的次数自然也就越多, P_1 和 P_2 依次呈上升趋势; 而不发生频谱切换的概率 P_0 也就越小。

另外当授权用户到达率分别为 $\lambda = 120$ 和 $\lambda = 240$ 时, 发生一次频谱切换的概率 P_1 和两次切换的概率 P_2 达到最大。

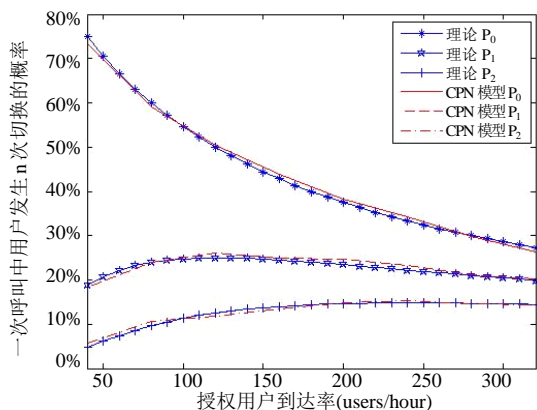


Figure 5. Impact of λ on the spectrum handoff
图 5. λ 值对切换概率的影响

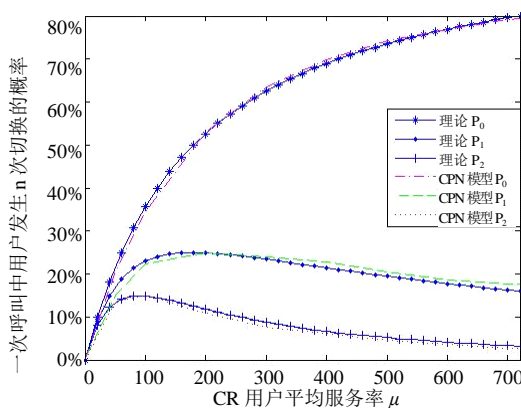


Figure 7. Impact of μ on the spectrum handoff
图 7. μ 值对切换概率的影响

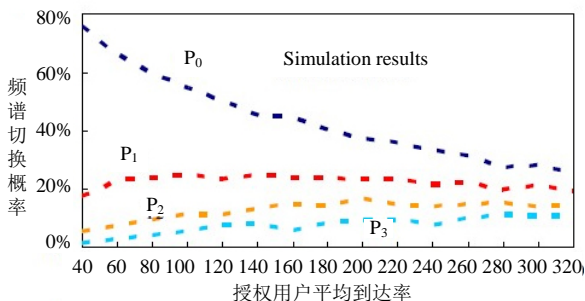


Figure 6. Impact of λ on the spectrum handoff (simulation)
图 6. λ 值对切换概率的影响(仿真)

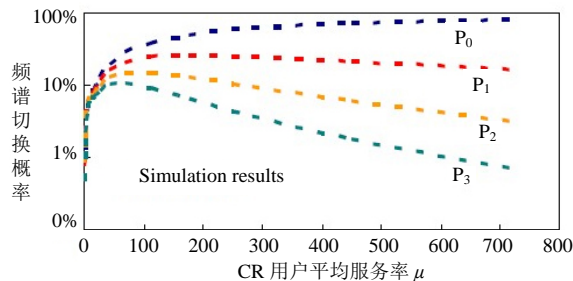


Figure 8. Impact of μ on the spectrum handoff (simulation)
图 8. μ 值对切换概率的影响(仿真)

2) 固定授权用户到达率 λ 的值, 通过改变 CR 用户平均服务率 μ 的值来观察 CR 用户的平均服务时间 $1/\mu$ 对切换概率的影响。假设 CR 用户平均服务率 μ 从 50 变化到 720; 授权用户的到达率 $\lambda = 180$, μ 和 λ 的单位是用户数/小时。同理, 每改变一次 μ 的值, CPN 仿真十万步, 得到结果如图 7 所示。

图 7 表明, CPN 仿真结果也能够与理论数值很好地吻合。图 8 是文献[11]中的仿真结果图。从图 7 可以看出, 当授权用户的到达率 λ 取定值时, 授权用户的平均到达间隔 $1/\lambda$ (即频谱孔的持续时间)一定。随着 CR 用户平均服务率 μ 值的增大, CR 用户的平均服务时间 $1/\mu$ 变小, 则 CR 用户离开系统的速率越快, 即在服务完成前不发生频谱切换的概率 P_0 就会越大, 从而发生切换的概率 P_1 和 P_2 逐渐减小; 当 CR 用户平均服务率分别取 $\mu = 180$ 和 $\mu = 90$ 时, 发生一次频谱切换的概率 P_1 和两次切换的概率 P_2 达到最大。

5. 结论

论文根据 CR 网络中的频谱切换时间关系图, 建

立了相应的着色 Petri 网模型, 通过仿真和理论分析验证了模型的正确性, 进一步评价了用户在一次服务时间内发生切换的概率。结果表明, 该模型对不同场景的模拟更加灵活, 计算量更低, 并且具有较强的开放性, 能直观描述系统过程。下一步将细化不同的业务类型, 根据用户的行为进一步研究 CR 系统的频谱切换策略, 评价系统的性能。该模型也可以用于 MIMO OFDM 认知无线系统移动性管理策略的研究, 以减少多天线的自由度对状态空间数的影响。

参考文献 (References)

- [1] X. R. Zhu, L. F. Shen and T.-S. P. Yum. Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation. IEEE Communications Letters, 2007, 11(4): 304-306.
- [2] Y. Song, J. Xie. ProSpect: A proactive spectrum handoff framework for cognitive radio Ad Hoc networks without common control channel. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(7): 1127-1139.
- [3] D.-J. Lee, M.-S. Jang. Optimal spectrum sensing time considering spectrum handoff due to false alarm in cognitive radio networks. IEEE Communications Letters, 2009, 13(12): 899-901.
- [4] O. Jo, D.-H. Cho. Seamless spectrum handover considering differential path-loss in cognitive radio systems. IEEE Communications Letters, 2009, 13(3): 190-192.

- [5] 张宇琼, 陆彦辉, 杨守义. 基于 CPN 的接纳控制系统建模与仿真[J]. 计算机工程, 2011, 37(17): 288-290.
- [6] Y. H. Lu, Y. Q. Zhang, S. Y. Yang and X. M. Mu. Modeling radio resource management in cognitive radio system based on OFDMA using Colored Petri Net. Journal of Electronics, 2010, 27(5): 671-676.
- [7] 马玉琨, 陆彦辉, 杨守义. OFDMA 系统中接纳控制的 Petri 网模型[J]. 系统仿真学报, 2009, 23(12): 7675-7677.
- [8] L. Lei, C. Lin and J. Cai. Performance analysis of wireless opportunistic schedulers using stochastic Petri nets. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 2076-2087.
- [9] R. Robidoux, H. P. Xu, L. D. Xing and M. C. Zhou. Automated modeling of dynamic reliability block diagrams using Colored Petri Nets. IEEE Systems, Man and Cybernetics, 2010, 40(2): 337-351.
- [10] L.-C. Wang, C.-W. Wang. Spectrum handoff for cognitive radio networks: Reactive-sensing or proactive-sensing. IEEE International Conference on Performance, Computing and Communications, Texas, 7-9 December 2008: 343-348.
- [11] H.-J. Liu, Z.-X. Wang, S.-F. Li and M. Yi. Study on the performance of spectrum mobility in cognitive wireless network. Communication Systems, Guangzhou, 19-21 November 2008: 1010-1014.
- [12] K. Jensen, L. M. Kristensen and L. Wells. Colored Petri Nets and CPN tools for modeling and validation of concurrent systems. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007, 9(3): 213-254.