



基于轮询调度的频谱接入机制研究^{*}

鲁进^{1,2}, 黄铭¹, 杨志军³

(1. 云南大学信息学院无线创新实验室 昆明 650091; 2. 云南财经大学物流学院 昆明 650223;
3. 云南省教育厅教育科学研究院 昆明 650223)

摘要: 动态频谱接入是提高无线电频谱利用率的有效方案, 基于轮询控制的接入机制易于实现对频谱资源的有效利用和合理分配。提出了一种授权用户和认知用户分别采用穷尽式服务和损失制服务的轮询排队模型, 采用嵌入马尔可夫链和概率母函数的分析方法, 通过求解平衡状态下系统的平稳分布, 得到了平均排队队长、信道利用率和强制中断率的关键参数解析结果。数值分析和仿真实验表明, 该机制提高了系统排队性能、有效利用了频谱空洞, 在以数据业务为中心的认知无线网络中有潜在应用。

关键词: 动态频谱接入; 轮询系统; 抢占优先权

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.11.010

Research on Spectrum Access Mechanism Based on Polling Scheduling

Lu Jin^{1,2}, Huang Ming¹, Yang Zhijun³

(1. Wireless Innovation Lab., School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China;
2. School of Logistics, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650223, China;
3. Educational and Scientific Institute, Educational Department of Yunnan Province, Kunming 650223, China)

Abstract: Dynamic spectrum access is an effective way to improve the spectrum utilization. The spectrum access mechanism based on polling control tends to realize the effective utilization of spectrum resources and rational allocation. A novel polling queuing model, in which the authorized users employ exhaustive service while the cognitive users employ loss service, was proposed. Based on the analysis method of embedded Markov chain and probability generating function, the key parameters of average queue length, bandwidth utilization and forced termination probability were obtained through solving the stationary distribution of equilibrium state. Numerical analysis and simulation results show that the mechanism improves the queuing performance and the bandwidth utilization of spectrum holes, and reveal its potential application in cognitive wireless network for data services.

Key words: dynamic spectrum access, polling system, preemptive priority

1 引言

随着无线通信的高速发展, 需要的频谱带宽逐渐增加, 导致频率资源贫乏问题日益严重。2002年, FCC研究

表明, 大部分授权频谱仅被零星地使用^[1], 频率利用率小于6%, 固定频谱分配方式是造成频率利用率低下的主要原因。2003年, FCC提出了通过认知无线电技术更灵活地利用频谱的方案^[2]。同时美国国防部高等研究计划署

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (No.61072079, No.61161007), 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2013M531989)

(DARPA)成立了下一代通信计划工作组^[3],其主要致力于制定一种动态频谱管理标准,在不与授权用户产生冲突的前提下,建立一种实时、伺机地使用空闲频谱的方法,对静态频谱分配方式进行补充,从而达到提高频谱利用率的目的,据称采用这种技术可以将目前的频谱利用率提高10~20倍,甚至可以完全解决频率资源贫乏问题^[4],这将是一种新的频谱资源管理模式^[5]。

动态频谱接入是认知无线电技术的基础,其中抢占优先权排队模型应用最为广泛^[6],机理是认知用户排队等待频谱接入的过程中,授权用户具有优先接入权。评价指标包括平均排队队长、服务中断率、等待时延和信道利用率等^[7]。这种排队模型的特点是控制较为简单,适用于单个认知用户队列且网络负载较小的情况。为了突破单个认知用户队列的限制,Hu J等人^[8]建立了多队列的优先权排队模型,并分析了中心调度器随机访问各队列时的平均服务率和最小等待时延;Boon等人^[9]发现轮询调度机制也可用于多队列的排队模型,并证实其控制方式的灵活性和有效性,它适用于有限资源和链路可靠性要求较高的场合,尤其是在网络负载较大的情况下,中心调度器可以开辟大容量的存储空间用于缓存排队等待请求,避免了较大的冲突碰撞和数据丢失。

最近,笔者所在课题组提出了采用完全和门限服务以及服务过程并行的完全与限定($k=1$)的两类优先级模型^[10,11]。受上述工作的启发,本文建立了一种基于授权用户穷尽服务、认知用户损失制服务的轮询多址接入优先级排队模型,该模型定义授权用户为高优先级队列,认知用户为低优先级队列。通过构建概率空间、利用概率母函数和嵌入式马尔可夫链理论,解析了相应的轮询调度频谱接入模型的平均排队队长、信道利用率和强制中断率等关键性能参数,并通过仿真进行了分析验证,结论表明该轮询机制能提高系统的排队性能和认知服务质量。

2 频谱接入的轮询模型

如图1所示,授权用户系统为M/M/1排队系统,在信道的使用上具有最高优先权;认知用户系统的传输请求根据各自的需求形成不同的数据流,由基站通过上下行链路的媒体接入按逻辑顺序访问所有认知用户并控制其传输特性;基站在传输过程中需要进行发射端检测,感知授权用户的信号,如果检测到授权用户的存在,则暂停服务等待授权用户的传输完成。于是在时域、频域和空域的空间

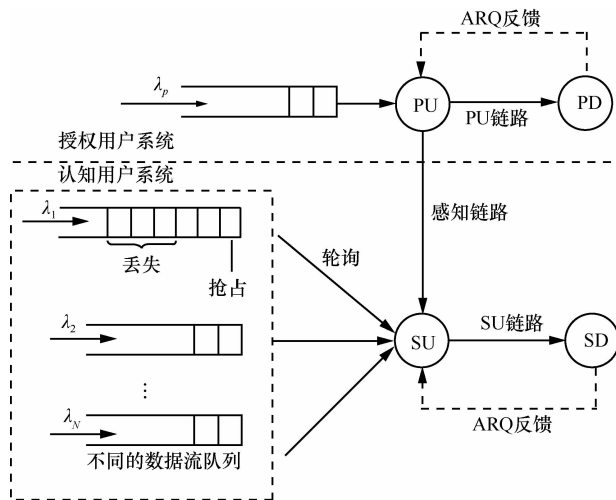


图1 授权用户和认知用户共存的轮询调度模型

中存在3条链路:授权用户源端到目的端的PU链路、认知用户源端到目的端的SU链路和认知用户检测授权用户信号的感知链路。其中PU链路和SU链路通过自动重发请求(ARQ)反馈验证感知过程的可靠性。

假定基站对覆盖区域内认知用户的请求进行服务的过程是周期性且时间无限长的过程。当基站访问到某个认知队列时,该认知用户将获得访问控制权,此刻基站在共享频谱池中选择可用空闲信道对其呼叫请求进行传输并一直停留在该队列中,而此时其他的认知用户队列对各自的呼叫请求进行排队缓存,而正在被服务的队列将不进行排队缓存或者说对进入的分组进行丢弃处理。当该队列所有的呼叫请求被动态分配到频谱空洞中后,它将以结束标志帧通知基站进入下一队列的访问。通过描述可以发现此轮询模型已没有门限服务和完全服务的区别,判断服务结束的标志就是队列为空。

模型的假设条件如下:

- 认知用户数为 N ,设系统分配的正交信道数为 m 个,且每个认知用户的缓存空间足以容纳和处理所有到达的呼叫请求;
- 各认知用户队列的数据流的概率分布是相互独立且同分布的,任意的 $\{i|i \in N\}$ 号认知用户队列在单位时间内到达的呼叫数的概率母函数、均值和方差分别为 $A(z)$ 、 $\lambda=A'(1)$ 和 $\sigma_A^2=A''(1)+\lambda-\lambda^2$;
- 授权用户队列到达的呼叫数的概率母函数、均值和方差分别为 $A_h(z)$ 、 $\lambda_h=A_h'(1)$ 和 $\sigma_{\lambda_h}^2=A_h''(1)+\lambda_h-\lambda_h^2$;
- 认知用户的一个呼叫的持续时间是相互独立且同分布的随机变量,其概率母函数、均值和方差分别



为 $B(z)$ 、 $\beta=B'(1)$ 和 $\sigma_\beta^2=B''(1)+\beta-\beta^2$;

- 授权用户的一个呼叫的持续时间是相互独立且同分布的随机变量,其概率母函数、均值和方差分别为 $B_h(z)$ 、 $\beta_h=B_h'(1)$ 和 $\sigma_{\beta_h}^2=B_h''(1)+\beta_h-\beta_h^2$;
- 基站处理完成一个认知用户队列的传输服务后,切换到下一队列的轮询转换时间服从于一个相互独立、同分布的概率分布,其分布的概率母函数、均值和方差分别为 $R(z)$ 、 $\gamma=R'(1)$ 和 $\sigma_\gamma^2=R''(1)+\gamma-\gamma^2$;
- 各认知用户队列的缓冲区具有无限的容量,不会出现因顾客不耐烦而退出系统产生的呼叫丢失,缓冲区内的呼叫按先到先服务(first come first serve, FCFS)规则被服务。

3 性能分析

假设基站在 t_n 时刻轮询到第 $\{i|i \in N\}$ 号认知用户队列,此时该队列中等待传输的呼叫数为 $\xi_i(n)$,那么系统状态变量可以表示为向量 $\{\xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_N(n)\}$,它们分别表示此轮询时刻各认知队列的缓冲区内排队等待发送的认知呼叫数。假设每一个认知用户队列的状态变量的概率分布为 $P[\xi_j(n)=x_j, j \in N]$,且具有 $S\{x_j/x_j \in N^*\}$ 的状态空间,那么描述系统中 N 个队列的状态变量的联合概率分布函数为 $P(x_1, x_2, \dots, x_N)$,并且在稳态条件下其概率空间构成分布为 $\pi_i\{\xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_N(n)\}$ 的 N 维马尔可夫过程;假设基站在一个循环周期中对 i 号认知队列中的呼叫提供服务的时间是 $\nu_i(n)$,在此服务时间内进入第 $\{j|j \in N\}$ 号站点的呼叫数为 $\eta_j(\nu_i)$;此后基站经过一个转移时间访问第 $i+1$ 号认知队列,设基站从 i 号认知队列转向 $i+1$ 号认知队列的查询转移时间为 $u_i(n)$,在此转移时间内进入 j 号认知队列的认知呼叫数为 $\mu_j(u_i)$;接下来系统在 t_{n+1} 时刻对第 $i+1$ 号认知队列进行传输服务,那么此时系统状态变量为 $\{\xi_1(n+1), \xi_2(n+1), \dots, \xi_N(n+1)\}$,随后系统将按轮询顺序依次更新其状态变量。假定该模型在 t_{n+1} 时刻的系统状态变量不依赖于 t_n 时刻之前的系统状态,仅与 t_n 时刻的系统状态有关,即该轮询系统的状态变量是齐次的,于是可以采用嵌入式马尔可夫链进行描述;在系统稳定条件下,该马尔可夫过程是齐次、非周期、不可约和各态历经的,并且有唯一的稳态分布。

根据上述系统状态变量定义及系统工作条件,系统状态变量在 $1-\rho_h > (N-1)\rho(\rho=\lambda\beta, \rho_h=\lambda\beta_h)$ 条件下达到稳态分布,此时系统状态变量的概率母函数满足以下关系:

$$G_i(z_1, z_2, \dots, z_N) = \sum_{\xi_i=0}^{\infty} \sum_{\xi_2=0}^{\infty} \dots \sum_{\xi_N=0}^{\infty} \pi_i(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) \times z_1^{\xi_1} z_2^{\xi_2} \dots z_N^{\xi_N} \quad (1)$$

根据该系统的轮询接入控制机制, t_n 时刻基站对 i 号认知队列已到达的认知呼叫开始提供访问服务,在此访问服务期内到达的认知呼叫均被丢弃;根据认知无线电的抢占优先权排队频谱接入模型的思想^[6],授权用户会随机地出现于认知用户的信道中,基站将中断服务等待授权用户传输完成后恢复服务过程,于是系统的状态变量有以下关系式:

$$\begin{cases} \xi_i(n+1) = \xi_i(n) + \mu_i(u_i + n(m(u_i))) + \eta_i(\nu_i + n(m(\nu_i))) \\ \xi_j(n+1) = \mu_j(u_i + n(m(u_i))) \end{cases} \quad (2)$$

$n(m(t))$ 表示在队列的服务时间和转移时间内,系统对抢占接入的授权用户进行穷尽式服务所需要的时间,于是基站转移前后的概率母函数满足如下关系式:

$$\begin{aligned} G_{i+1}(z_1, z_2, \dots, z_N) &= R\left(\Phi\left(\prod_{j=1}^N A(z_j)\right)\right) \times \\ &G_i(z_1, \dots, z_{i-1}, B\left(\Phi\left(\prod_{j=1, j \neq i}^N A(z_j)\right)\right), z_{i+1}, \dots, z_N) \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$\Phi(x) = xA_h(B_h(x))F(A_h(B_h(x))) \quad (4)$$

$F(z)$ 函数为表示对授权用户的呼叫进行穷尽式服务所需时间的随机变量的概率母函数,参考文献[10]中指出 $F(z) = A_h(B_h(zF(z)))$ 。

3.1 平均排队队长

用 $g(j)$ 表示在 t_n 时刻第 i 号认知队列开始传输服务时,第 j 号认知队列缓存区中排队等待的呼叫数,那么 $g_i(i)$ 表示平均排队队长,根据概率母函数的性质, $g_i(i)$ 具有一阶偏导的特性:

$$g_i(j) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, z_2, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad (5)$$

对式(3)的概率母函数求一阶偏导得:

$$\begin{cases} g_{i+1}(j) = g_i(j) + \frac{\gamma\lambda + g_i(i)\rho}{1-\rho_h}, j \neq i \\ g_{i+1}(i) = \frac{\gamma\lambda}{1-\rho_h} \end{cases} \quad (6)$$

根据系统模型的对称特性,对式(6)的方程进行迭代、化简解析,得到基站访问时刻认知用户的平均顾客数为:

$$g_i(i) = \frac{N\gamma\lambda}{1-\rho_h - (N-1)\rho} \quad (7)$$

3.2 信道利用率

由于基站对空闲频谱进行动态分配并且感知授权用户

的信号,那么信道的空闲状态仅出现在查询转换过程中,据此可以推导出信道利用率为:

$$\delta = 1 - \frac{\gamma}{(g(i)\beta + \gamma)(1 + \rho_h)} \quad (8)$$

3.3 强制中断率

强制中断率指基站因授权呼叫的出现而出现阻塞的概率,正在被服务的认知呼叫被缓存到先前的队列中重新排队。由于这种中断发生在认知用户被服务的过程中,于是基站在转移过程中发生的服务中断不属于强制中断率的讨论范围,根据稳态条件下的统计平均解析得到强制中断率为:

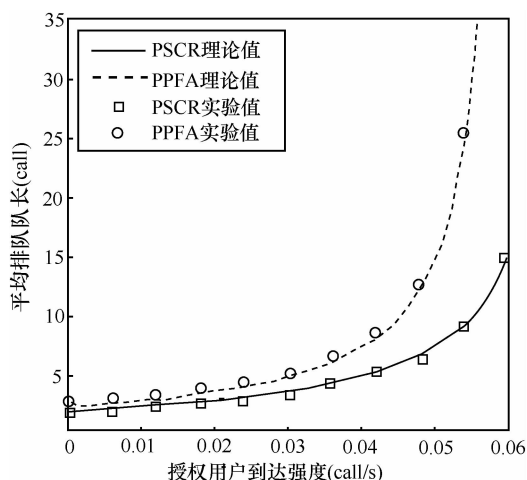
$$P_i = 1 - e^{-\frac{g(i)\beta\gamma_h}{N}} \quad (9)$$

4 理论结果与仿真实验

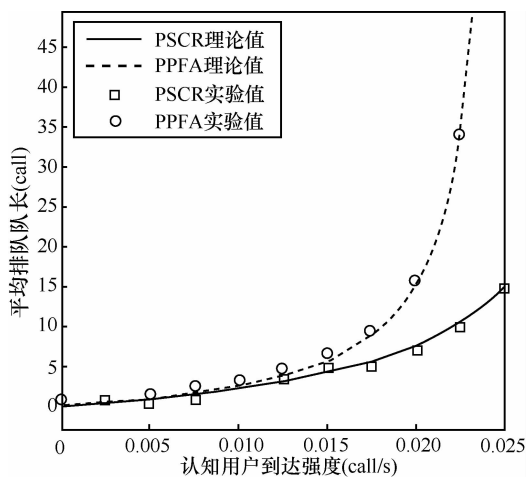
本节在 MATLAB 环境下对本文提出的授权用户抢占频谱接入的认知无线电轮询系统 (polling system of cognitive radio, PSCR) 进行数值分析和仿真实验,计算机仿真验证的参数值与理论相同。

设系统工作在单信道的传输无差错的理想频谱环境,授权用户的单个呼叫持续时间的均值为 $\beta_h = s$, 认知用户的队列数为 4 个,每一个队列上的认知呼叫持续时间的均值为 $\beta = 4 s$;基站的转移时间 $\gamma = 15 s$ 。预设授权用户业务量强度 $\gamma_h = 0.01 \text{ call/s}$ 和认知用户业务量强度 $\gamma = 0.1 \text{ call/s}$ 。接下来分别考察 λ_h 和 λ 对系统性能的影响。首先,比较 PSCR 与固定分配型优先级轮询(priority polling of fixed allocation, PPFA)^[10]机制的排队性能,仿真实验运行 500 000 s,并在稳定条件下以等间隔步长选择 10 组数据进行对比。

由图 2 可见,本文采用的理论分析方法能准确地描述 PSCR 性能,理论数值曲线和仿真实验的同一性结果较好。从图 2(a)的比较看出,PSCR 由于授权用户的抢占而使得每次轮询时积累的授权呼叫数减少,因而平均排队队长总是比固定分配型优先级轮询小,当 $\lambda_h < 0.01$ 时,频谱池中几乎没有授权呼叫,此时认知队列在被服务期间损失呼叫的因素占主导地位,可以认为 PSCR 的性能优势不大,此后随着 λ_h 的增加和频谱空间的缩小,两者性能差距逐渐增加;图 2(b)表明当 $\lambda < 0.01$ 时,两者的平均排队队长几乎相同且具有相同的增长趋势,此后随着认知用户业务量强度的提高,固定分配型优先级轮询的平均排队队长急剧增加,而 PSCR 的增长趋势相对比较缓,节省了排队空间且排队性能得到优化。



(a) 排队性能随 λ_h 的变化

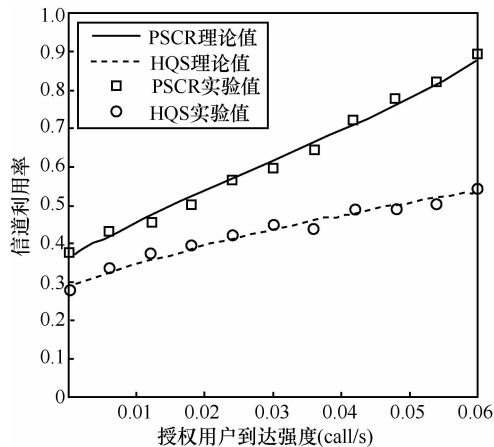


(b) 排队性能随 λ 的变化

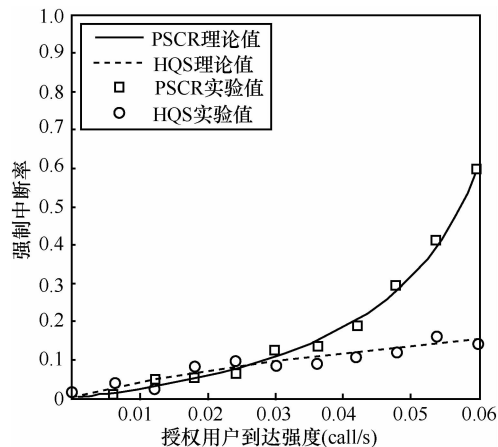
图 2 排队性能随 λ_h 和 λ 的变化

下面考察授权用户业务量强度 λ_h 和认知用户业务量强度 λ 对网络性能的影响。实验分析比较了 PSCR 和切换请求排队机制(handoff queuing scheme, HQS)^[7]的方案 1, 设平均容忍时延为 $\gamma_d = 1/3 s$, 参考文献[7]中的参数与本文存在如下对应关系: 认知用户的平均服务率为 $\mu_c = 1(m\beta) \text{ call/s}$, 授权用户的平均服务率为 $\mu_p = 1/\beta_h \text{ call/s}$, 所有认知用户的到达率 $\lambda_c = N\lambda \text{ call/s}$, 授权用户的到达率为 $\lambda_p = \lambda_h \text{ call/s}$ 。

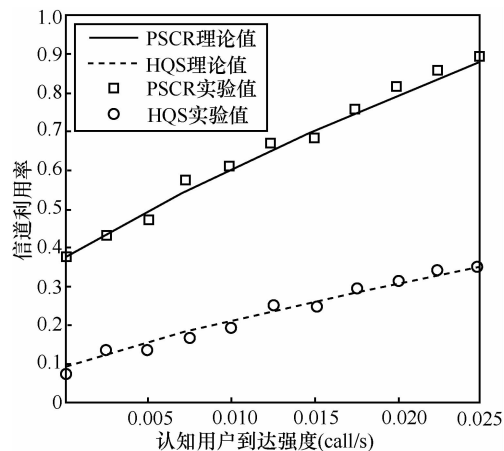
图 3 和图 4 给出了在 λ_h 和 λ 不断增加的过程中,信道利用率和强制中断率的变化情况。图 3(a)表明当 $\lambda_h < 0.06$ 时,系统工作在稳态条件下,当 $\lambda_h < 0.06$ 时,PSCR 的信道利用率比 HQS 提高了 65.4%, 此时系统在时域和空域上的频谱得到了有效利用,同时认知用户没有过多的中断切换;图 3(b)表明当 $\lambda_h < 0.06$ 时,PSCR 的强制中断率比 HQS 低且均维持在较低水平,此时授权用户的业务强度也不会造成过多的频谱切换,当 $0.024 < \lambda_h < 0.06$ 时,PSCR 的强制



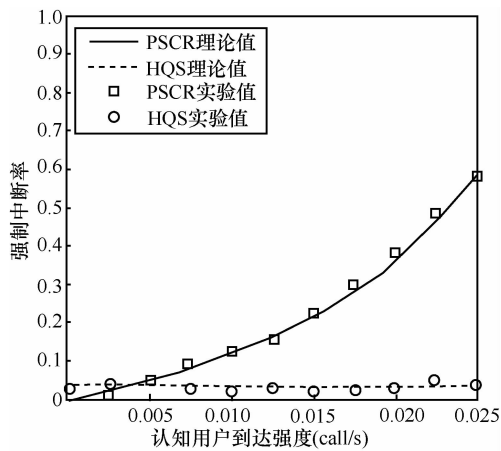
(a)信道利用率性能



(b)强制中断率性能

图3 网络性能随 λ_h 变化

(a)信道利用率性能



(b)强制中断率性能

图4 网络性能随 λ 变化

中断率急剧增加,当 $\lambda_h < 0.06$ 时最高达到 58.8%,认知 QoS 的质量已经难以保证。

图4(a)表明,PSCR的信道利用率受 λ 的变化更为敏感,当 $\lambda_h=0.025$ 时信道利用率为87.4%,已接近饱和状态,而HQS的信道利用率仅有34.5%且增长趋势较缓;图4(b)表明,PSCR的强制中断率比HQS有明显增加,曲线的增加趋势和图3(b)的几乎一致,当 $\lambda_h=0.025$ 时最高达到57.8%,说明认知用户的到达强度对强制中断率的影响和授权用户的到达强度对强制中断率的影响是相同的,因此在PSCR中信道的高效利用是以认知服务质量的下降为代价的。

5 结束语

本文针对认知用户动态频谱接入过程的排队特性,提出了一种授权用户采用穷尽服务,认知用户采用损失制服务的轮询排队模型,采用嵌入马尔可夫链和多维概率母函

数的分析方法,通过求解平衡状态方程的一阶特性,得到了平均排队队长、信道利用率和强制中断率的关键参数解析结果。数值分析和仿真实验的结果表明,相比于固定分配式轮询机制和切换请求缓存排队机制,轮询机制在通信业务量较大时充分提高了系统排队性能,并使得信道能够达到饱和利用,轮询的频谱接入方式在以数据业务为中心的频谱环境中具有潜在的应用价值。同时需指出,轮询控制的频谱接入方式对于复杂的频谱干扰环境和网络拓扑结构动态性较强的场合难以有效实施,信道资源的分配方式和接入策略需要更为灵活,相应地对各种认知场景的排队模型解析也有待深入探讨。

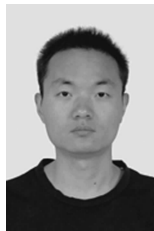
参考文献

- 1 FCC Spectrum Policy Task Force. FCC Report of the Spectrum Efficiency Working Group, 2002

- 2 Commission F C. Notice of proposed rule making and order: facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies. ET Docket, 2005(3/108)
- 3 DARPA X Working Group. The XG Vision Request for Comments (Version 2.0), 2003
- 4 Wang B, Liu K. Advances in cognitive radio networks: a survey. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 5~23
- 5 郭永明, 李宁, 李军芳. 未来智能无线电将对频谱管理带来深刻影响. 电信科学, 2012, 28(7): 94~100
- 6 Li H, Han Z. Socially optimal queuing control in cognitive radio networks subject to service interruptions: to queue or not to queue. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(5): 1656~1666
- 7 郭彩丽, 曾志民, 冯春燕等. 机会频谱接入系统的切换请求排队机制及性能分析. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1505~1508
- 8 Hu J, Yang L L, Hanzo L. Maximum average service rate and optimal queue scheduling of delay-constrained hybrid cognitive radio in nakagami fading channels. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2220~2229
- 9 Boon M, Van Der Mei R, Winands E. Applications of polling systems. Surveys in Operations Research and Management Science, 2011, 16(2): 67~82
- 10 杨志军, 赵东风, 丁洪伟等. 两级优先级控制轮询系统研究. 电子学报, 2009(7): 1452~1456
- 11 Guan Z, Zhao D, Zhao Y. A discrete time two-level mixed service parallel polling model. Journal of Electronics (China),

2012, 29(1): 103~110

[作者简介]



鲁进, 男, 云南大学博士研究生, 主要研究方向为认知无线电、轮询系统和多址接入。



黄铭, 男, 博士, 云南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为频谱传感与无线电监测。



杨志军, 男, 博士, 云南省教育厅教育科学研究院副院长、高级工程师, 主要研究方向为计算机通信与网络、无线通信和轮询系统。

(收稿日期: 2013-05-02)

(上接第 59 页)

- 12 Li J, Vuong S. A scalable semantic routing architecture for grid resource discovery. Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems, Fukuoka, Japan, 2005: 29~35
- 13 Lser A, Naumann F, Siberski W, *et al.* Semantic overlay clusters within super-peer networks. Databases, Information Systems and Peer-to-Peer Computing, 2004(2944): 35~38
- 14 Hassan M I, Abdullah A. A semantic description and registration framework for large grid resource discovery systems. Computer Science Letters, 2009, 1(1)
- 15 Hassan M I, Abdullah A. A new grid resource discovery framework. The International Arab Journal of Information Technology, 2011, 8(1): 99~107
- 16 熊曾刚, 杨扬, 曾明. 基于 Petri 网的两阶段网格任务调度模型与分析. 通信学报, 2009, 30(8): 69~77
- 17 孙瑞志, 杨璐, 欧阳娅. 基于改进遗传算法的网格任务调度. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012, 13(4)
- 18 Jensen K. Colored Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Berlin: Springer, 1996

- 19 刘卫东, 宋佳兴, 林闯. 基于价格时间 Petri 网的网格计算应用模型及分析. 电子学报, 2005, 33(8): 1416~1420

[作者简介]



潘善亮, 男, 博士, 宁波大学计算机科学技术研究所副教授, 主要研究方向为服务计算、信息检索。

黄希, 男, 宁波大学计算机科学技术研究所硕士研究生, 主要研究方向为网格计算, Petri 网理论与应用。

茅琴娇, 女, 西安交通大学电子与信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为个性化推荐、用户兴趣建模、统计学习。

(收稿日期: 2013-07-31)