

基于排队模型的混合 overlay/underlay 频谱共享优化策略研究

刘建平^{1,2,3,4}, 金顺福^{1,3,4}, 王宝帅^{1,3,4}

(1. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北科技师范学院数学与信息科技学院, 河北 秦皇岛 066004;
3. 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; 4. 河北省软件工程重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了更好地提高认知无线网络中授权频谱的利用率, 并为系统用户提供更高质量的服务, 采用排队博弈理论研究了混合 overlay/underlay 频谱共享方式的优化策略。面向认知用户建立了传输时间服从二相阶超指数分布的排队模型, 并给出排队模型稳态分布的求解方法。基于收益—支出结构, 研究了可视情形下认知用户的个体最优策略及不可视情形下认知用户的纳什均衡策略。以社会收益最优及授权频谱收入最大为目标, 给出了认知用户使用授权频谱的接入费用。进行数值实验, 揭示了不同策略之间的内在关系, 并验证了收费方案的合理性。通过将混合 overlay/underlay 频谱共享方式下的社会最优收益与 overlay 频谱共享方式和 underlay 频谱共享方式下的社会最优收益进行对比, 进一步表明了混合 overlay/underlay 频谱共享方式下的社会最优策略能更加稳定且高效地利用频谱资源。

关键词: 认知无线网络; 混合 overlay/underlay 频谱共享; 个体最优; 社会最优; 接入费用

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Study on optimization strategy for hybrid underlay/overlay spectrum sharing based on queuing model

LIU Jian-ping^{1,2,3,4}, JIN Shun-fu^{1,3,4}, WANG Bao-shuai^{1,3,4}

(1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. School of Mathematics and Information Science & Technology, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China;
3. Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China;
4. Key Laboratory for Software Engineering of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the licensed spectrum utilization in cognitive radio networks, and provide higher experience quality to system users, the optimizing strategies of the hybrid underlay/overlay spectrum sharing mode was studied. For secondary users, a queuing model with service time following two phase order exponential distribution was constructed, and a method to obtain the steady state distribution was presented for the system model. Based on reward-cost structure, individual optimization strategy with observable case and the Nash equilibrium strategy with unobservable case were discussed. With purpose of optimal social benefit and maximal spectrum incomes, the pricing policies for secondary users to use licensed spectrum were formulated. Using the system experiment, the relations among the different optimal strategies were investigated, and the rationality of the price mechanism was verified. By contrasting the optimal social benefits gained by hybrid underlay/overlay spectrum sharing mode, overlay spectrum sharing mode and underlay spectrum sharing mode, it is further shown that the social optimization strategy of hybrid overlay/underlay sharing mode is more effective and stable to fully use the spectrum resource.

Key words: cognitive radio networks, hybrid overlay/underlay spectrum sharing, individual optimization, socially optimization, access price

收稿日期: 2017-01-04; 修回日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61472342); 河北省自然科学基金资助项目 (No.F2017203141)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61472342), The Natural Science Foundation of Hebei Province (No.F2017203141)

1 引言

随着无线通信应用的快速发展,对性能较好的频谱资源的需求越来越多。受传统静态频谱分配方式的限制,目前,世界各国授权频段的平均利用率尚不足 5%。这表明性能较好的频谱大部分时间处于空闲浪费状态,不可再生的频谱资源并没有得到充分利用。因此,如何对频谱资源进行有效管理和合理利用,是无线通信领域亟待解决的问题之一。

1999 年, Mitola 博士^[1]首次提出了认知无线电(CR, cognitive radio)的概念,并将其成功应用于无线通信网络中。在认知无线网络中,将拥有频谱优先使用权的用户称为授权用户,将只能机会式接入频谱的用户称为认知用户。认知用户具有感知能力,能够从周围的环境中获取系统信息,从而实现动态频谱共享,有效提高了频谱利用率。

按照认知用户接入系统方式的不同,动态频谱共享^[2]通常分为 overlay 频谱共享方式和 underlay 频谱共享方式。

在 overlay 频谱共享方式下,认知用户通过侦测频谱环境,机会式地占用未被授权用户使用的授权频谱。若有授权用户接入时,认知用户需要再次切换到空闲频谱^[3]。文献[4]研究了认知用户非理想感知下空闲频谱的聚合与绑定技术,通过分析认知用户的收益,给出了 overlay 频谱共享方式下进入系统的决策过程。文献[5]研究了带有组间切换的频谱分配策略,利用三维 Markov 模型刻画了认知用户的阻塞率、数据丢失率及平均延迟等性能指标。

在 underlay 频谱共享方式下,基站采用扩频技术将认知用户的传输功率控制在干扰温度门限以下,实现了授权用户和认知用户的同时传输^[6]。文献[7]在授权用户的传输功率为固定值的情况下,研究了 underlay 频谱共享方式下的认知用户最大化允入控制算法。文献[8]研究了允入控制算法对系统总吞吐量、总传输速率及认知用户中断概率的影响,并针对 underlay 频谱共享方式下的系统功率与允入控制进行了联合优化。

研究表明, underlay 频谱共享方式相对于 overlay 频谱共享方式,认知用户的吞吐量大,但是受发射功率的限制,认知用户的传输速率较低^[9]。因此,部分学者针对混合 overlay/underlay 频谱共享方式进行了研究。文献[10]将系统能量分配问题转化为线性规划问题,以认知用户吞吐量为目标函

数,优化了混合 overlay/underlay 频谱共享方式的系统能量分配。文献[11]分析了认知用户合作博弈时系统能量分配及认知用户中断重试概率问题。文献[12]采用排队模型针对 overlay 频谱共享方式与混合 overlay/underlay 频谱共享方式之间切换的阈值进行了优化研究。文献[13]采用多相位 M/M/1 排队模型研究了混合 overlay/underlay 频谱共享方式,给出了认知用户的平均队长及平均延迟等性能指标,并且讨论了固定价格下认知用户的接入概率。

近年来,基于博弈思想的排队经济学理论得到了迅速发展,在认知无线网络中也有了初步应用。文献[14]以最大化社会收益为目标,针对不可视情形研究了 overlay 频谱共享方式下的认知用户社会最优到达率。文献[15]面向随机接入方式,研究了可视情形下的认知用户止步策略,以社会收益为目标,优化了不可视情形下的认知用户到达率。

以上文献针对 overlay 频谱共享方式及 underlay 频谱共享方式的研究较为细致。其中多数文献进行了认知用户的数据分组传输时间服从单一指数分布这一假设,限制了对频谱共享方式的深入研究。因此,对面向混合 overlay/underlay 频谱共享方式下的认知无线网络进行多种优化策略的分析及比较值得研究。

基于以上考虑,本文构建服务时间服从二相超指数分布的排队模型,将基于博弈思想的经济学理论与认知无线电的频谱共享技术相结合,研究混合 overlay/underlay 频谱共享方式的优化策略。针对可视情形,研究认知用户的个体最优策略、社会最优策略及授权频谱收入最大化策略。针对不可视情形,研究认知用户的纳什均衡策略与社会最优策略。分别针对以上 2 种情形,给出认知用户使用授权频谱的接入费用,实现系统社会最优与频谱收入最大。将混合 overlay/underlay 频谱共享方式、overlay 频谱共享方式及 underlay 频谱共享方式下的社会最优收益进行了对比。本文的研究为排队理论进一步在认知无线网络中的应用提供有效途径,同时也为认知无线网络的控制与管理提供理论依据。

2 系统模型

Overlay 频谱共享方式的核心思想是认知用户采用“见缝插针”的方式使用授权频谱。虽然认知用户可以获得暂时性的高传输率,但其也面临着随

时被授权用户中断的问题，因此吞吐量较低。Underlay 频谱共享方式虽然可以通过频率的完全覆盖提高认知用户的吞吐量，但是认知用户必须限制自身的发射功率以降低对授权用户的干扰，导致了其传输速率较低。在混合 overlay/underlay 频谱共享方式下，当出现频谱空穴时，认知用户采用 overlay 共享方式接入，可以实现较高速率的传输；而当频谱被授权用户占用时，认知用户则采用 underlay 频谱共享方式接入，可以实现认知用户的持续传输，提高认知用户的吞吐量。

为了更好地提高认知无线网络中授权频谱的利用率，并为系统用户提供更高质量的服务，针对混合 overlay/underlay 频谱共享方式，采用博弈经济学理论，讨论不同信息水平下认知用户的均衡策略。

在集中式认知无线网络中有一条授权频谱，授权用户与认知用户在该频谱上的传输由中央控制器负责协调。本文将授权用户抽象为具有优先权的第一类顾客，认知用户抽象为第二类顾客。认知用户个体收益与频谱收入的和构成社会收益。为了讨论问题方便，给出以下假设。

1) 授权用户及认知用户的数据到达过程相互独立，分别服从参数为 λ_{pu} 及 λ_{su} 的泊松过程。

2) 授权用户的传输时间服从参数为 μ_{pu} 的指数分布。当频谱被授权用户占用时，认知用户的数据传输时间服从参数为 μ_1 的指数分布，否则服从参数为 μ_h 的指数分布。考虑到发射功率的限制，本文假设 $\mu_1 < \mu_h \leq \mu_{pu}$ 。

3) 授权用户与认知用户可以共享授权频谱。当频谱被认知用户占用时，新到达的授权用户优先使用授权频谱，高速传输的认知用户转为低速传输，即采用 underlay 频谱共享方式。若系统中没有授权用户，认知用户采用 overlay 频谱共享方式接入，以高速率进行数据传输。另外，本文针对 2 类用户均采用“先到先服务”的服务规则。考虑到频谱利用率较低现状及授权用户的低延迟要求，系统不为授权用户设置缓存。

4) 每个认知用户成功传输后可以获得的收益为 R ，单位时间的逗留费用为 C 。针对差错敏感的网络业务，认知用户对数据能否正确传输的要求较高，而对数据传输的实时性要求较低。这种情况下，相对于认知用户单位时间的逗留费用，认知用户成

功传输后获得的收益应设为较大值。而对于时延敏感的网络业务，认知用户更加注重数据传输的连续性及实时性，但是对传输可靠性的要求不高，则应进行相反的参数设置。另外，认知用户的传输是风险中立的，并且希望最大化自身的收益。为了保证到达的认知用户在低传输率下进入系统，从而获得收益，假设 $R > \frac{C}{\mu_1}$ 。认知用户到达时，根据掌握的系统信息决定是否进入系统，不允许进入系统之后中途退出或止步后重试。

用 $X(t)$ 表示时刻 t 系统中认知用户的个数， $Y(t)$ 表示时刻 t 授权用户的个数。 $Y(t)=0$ 意味着该频谱没有被授权用户占用，此时，占用频谱的认知用户可以被高速传输； $Y(t)=1$ 意味着授权用户占用频谱，此时，与其共享频谱的认知用户只能以低速传输。

授权用户的传输是透明的，即授权用户的传输不受认知用户传输的影响。依据 ON/OFF 排队模型的解析结果^[16]，频谱不被授权用户占用的概率 p_0 与被授权用户占用的概率 p_1 分别表示为

$$p_0 = \frac{\mu_{pu}}{\lambda_{pu} + \mu_{pu}}, \quad p_1 = \frac{\lambda_{pu}}{\lambda_{pu} + \mu_{pu}} \quad (1)$$

综合认知用户的低速与高速传输时间分布，可知认知用户传输时间 T 服从二相阶超指数分布，其密度函数为

$$f(x) = p_0 \mu_h e^{-\mu_h x} + p_1 \mu_1 e^{-\mu_1 x} \\ = \frac{\mu_{pu} \mu_h e^{-\mu_h x} + \lambda_{pu} \mu_1 e^{-\mu_1 x}}{\lambda_{pu} + \mu_{pu}}, \quad x \geq 0 \quad (2)$$

认知用户传输时间的期望与方差分别为

$$E[T] = \frac{\mu_{pu} \mu_1 + \lambda_{pu} \mu_h}{(\lambda_{pu} + \mu_{pu}) \mu_h \mu_1} \quad (3)$$

$$D[T] = \frac{\mu_{pu} \mu_1^2 + \lambda_{pu} \mu_h^2}{(\lambda_{pu} + \mu_{pu}) \mu_h^2 \mu_1^2} \quad (4)$$

从认知用户的角度看，该模型可以抽象成一个到达间隔服从指数分布、服务时间服从二相阶超指数分布的服务台的排队系统。

3 可视优化策略分析

3.1 个体最优策略

可视情形下，新到达的认知用户根据观察到的

系统队长决定是否进入系统。当一个认知用户到达系统时，若缓存中已经存在 i 个认知用户，则该新到达的认知用户选择进入系统后的平均收益为

$$G_i = R - C(i+1)E[T] \quad (5)$$

如果收益 G_i 非负，该认知用户会选择进入系统，否则止步离开。于是，将式(3)代入式(5)可以得到认知用户个体最优策略阈值为

$$n_e = \left\lfloor \frac{R(\lambda_{pu} + \mu_{pu})\mu_h\mu_l}{C(\mu_{pu}\mu_l + \lambda_{pu}\mu_h)} \right\rfloor \quad (6)$$

当新到达的认知用户观测到系统中已经有 i 个认知用户时，若 $i < n_e$ ，则进入系统等待传输；若 $i \geq n_e$ ，则选择止步而离开系统。

采用个体最优策略虽然可使每个认知用户的个体收益最优，但是个体的贪婪性会引起系统的过分拥塞，从而增加每个认知用户的传输时间，无法保障系统的社会收益达到最优。因此，有必要讨论系统社会最优策略。

3.2 社会最优策略

假设系统中认知用户的最大个数为 n ，即当认知用户到达时，如果观测到系统已经有 n 个认知用户，则该认知用户选择止步。此时，随机过程 $\{X(t), Y(t) : t \geq 0\}$ 可以看作是有限状态的马尔可夫链，其状态空间记作

$$\Omega = \{(i, j) : 0 \leq i \leq n, j = 0, 1\} \quad (7)$$

由于授权用户及认知用户到达过程是相互独立的泊松过程，即到达间隔服从指数分布。在极短时间段 Δt 内，一个认知用户与一个授权用户同时到达系统的概率可以表示为 $(\lambda_{su}\Delta t + o(\Delta t))(\lambda_{pu}\Delta t + o(\Delta t))$ ^[17]。所以系统有 2 个及以上用户同时到达系统的转移率为 0。同理，2 个及以上用户同时离开系统的转移率为 0，一类用户到达且另一类用户离开系统的转移率也为 0。因此，该随机过程在所有的非毗邻状态间的转移率都为 0。图 1 给出了系统毗邻状态间的转移率。

为了讨论系统社会收益，需给出该马尔可夫链的稳态解。令 $\pi_{i,j}$ 表示 $(X(t), Y(t))$ 的稳态分布，即

$$\pi_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) = i, Y(t) = j\}, (i, j) \in \Omega \quad (8)$$

且稳态分布 $\pi_{i,j}$ 满足如下方程组

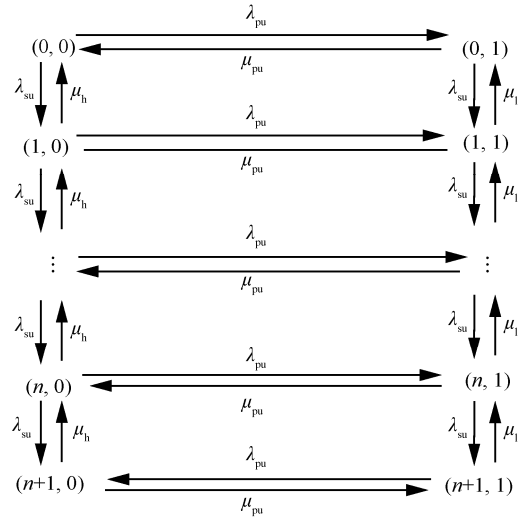


图 1 系统毗邻状态转移率

$$\begin{cases} (\lambda_{su} + \lambda_{pu})\pi_{0,0} = \mu_h\pi_{1,0} + \mu_{pu}\pi_{0,1} \\ (\lambda_{su} + \mu_{pu})\pi_{0,1} = \mu_l\pi_{1,1} + \lambda_{pu}\pi_{0,0} \\ (\lambda_{su} + \lambda_{pu} + \mu_l)\pi_{i,0} = \lambda_{su}\pi_{i-1,0} + \mu_{pu}\pi_{i,1} + \mu_h\pi_{i+1,1} \quad (1 \leq i \leq n-1) \\ (\lambda_{su} + \mu_l + \mu_{pu})\pi_{i,1} = \lambda_{su}\pi_{i-1,1} + \mu_l\pi_{i+1,1} + \lambda_{pu}\pi_{i,0} \quad (1 \leq i \leq n-1) \\ (\mu_l + \mu_{pu})\pi_{n,1} = \lambda_{pu}\pi_{n,0} + \mu_l\pi_{n+1,1} \\ (\mu_h + \lambda_{pu})\pi_{n,0} = \lambda_{su}\pi_{n,0} + \mu_{pu}\pi_{n,1} \end{cases} \quad (9)$$

由方程组(9)可知，任意 $\pi_{i,j}$ 均可表示成 $\pi_{0,0}$ 和 $\pi_{0,1}$ 的线性组合。为了求解方便，不妨设

$$\pi_{i,j} = a_{i,j}\pi_{0,0} + b_{i,j}\pi_{0,1}, (i, j) \in \Omega$$

求解 $a_{i,j}$ 与 $b_{i,j}$ 的递推式为

$$a_{1,0} = 1, \quad b_{1,0} = 0, \quad a_{0,1} = 0, \quad b_{0,1} = 1$$

$$a_{1,0} = \frac{\lambda_{su} + \lambda_{pu}}{\mu_h}, \quad b_{1,0} = -\frac{\mu_{pu}}{\mu_h}$$

$$a_{1,1} = -\frac{\lambda_{pu}}{\mu_l}, \quad b_{1,1} = \frac{\mu_{pu} + \lambda_{su}}{\mu_l}$$

当 $2 \leq i \leq n, j = 0$ 时，有

$$a_{i,0} = \frac{\lambda_{su} + \mu_h + \lambda_{pu}}{\mu_h} a_{i-1,0} - \frac{\lambda_{su}}{\mu_h} a_{i-2,0} - \frac{\mu_{pu}}{\mu_h} a_{i-1,1}$$

$$b_{i,0} = \frac{\lambda_{su} + \mu_h + \lambda_{pu}}{\mu_h} b_{i-1,0} - \frac{\lambda_{su}}{\mu_h} b_{i-2,0} - \frac{\mu_{pu}}{\mu_h} b_{i-1,1}$$

当 $2 \leq i \leq n, j = 1$ 时，有

$$a_{i,1} = \frac{\lambda_{su} + \mu_{pu} + \mu_l}{\mu_l} a_{i-1,1} - \frac{\lambda_{su}}{\mu_l} a_{i-2,1} - \frac{\lambda_{pu}}{\mu_l} a_{i-1,0}$$

$$b_{i,1} = \frac{\lambda_{su} + \mu_{pu} + \mu_l}{\mu_l} b_{i-1,1} - \frac{\lambda_{su}}{\mu_l} b_{i-2,1} - \frac{\lambda_{pu}}{\mu_l} b_{i-1,0}$$

由于授权用户的传输是透明的，则有

$$\sum_{i=0}^n a_{i,j} \pi_{0,0} + \sum_{i=0}^n b_{i,j} \pi_{0,1} = p_i, \quad j=0,1 \quad (10)$$

解式(10)得到

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_{0,0} &= \frac{p_0 \sum_{i=0}^n b_{i,1} - p_1 \sum_{i=0}^n b_{i,0}}{\sum_{i=0}^n a_{i,0} \sum_{i=0}^n b_{i,1} - \sum_{i=0}^n b_{i,0} \sum_{i=0}^n a_{i,0}} \\ \pi_{0,1} &= \frac{p_1 \sum_{i=0}^n a_{i,0} - p_0 \sum_{i=0}^n a_{i,1}}{\sum_{i=0}^n a_{i,0} \sum_{i=0}^n b_{i,1} - \sum_{i=0}^n b_{i,0} \sum_{i=0}^n a_{i,0}} \end{aligned} \right.$$

将 $\pi_{0,0}$ 、 $\pi_{0,1}$ 及迭代系数 $a_{i,j}$ 、 $b_{i,j}$ 代入方程组(9)，

即可得到系统的稳态解。

进一步求得认知用户的平均队长 L_n 为

$$L_n = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^n i \pi_{i,j}$$

对于有限缓存的排队系统，认知用户的阻塞率可以通过 $\pi_{n,0} + \pi_{n,1}$ 计算。单位时间内的平均社会收益 $S(n)$ 可以写为

$$S(n) = \lambda_{su} (1 - \pi_{n,0} - \pi_{n,1}) R - C \sum_{i=0}^{+\infty} (i \pi_{i,0} + i \pi_{i,1})$$

当认知用户的最大队长为 $n_s = \arg \max_{n \in N} \{S(n)\}$

时，单位时间内的平均社会收益到达最大值，即社会最优策略阈值为 n_s 。

由于认知用户贪婪行为会引起系统的过度拥塞，从而个体最优策略阈值 n_e 与社会最优策略阈值 n_s 必然存在关系式 $n_s \leq n_e$ 。为了使认知用户的传输接受社会最优策略阈值 n_s ，授权频谱需向到达系统的认知用户征收一定的费用，以抑制认知用户的贪婪行为，从而实现系统社会最优。假设认知用户的接入费用 k_s ，则认知用户的收益满足

$$\begin{cases} G_{n_s} = R - k_s - C n_s E[T] \geq 0 \\ G_{n_s+1} = R - k_s - C (n_s + 1) E[T] < 0 \end{cases} \quad (11)$$

结合式(3)与式(11)可知接入费用 k_s 满足

$$R - C \gamma (n_s + 1) < k_s \leq R - C \gamma n_s$$

其中， $\gamma = \frac{\mu_{pu} \mu_l + \lambda_{pu} \mu_h}{(\lambda_{pu} + \mu_{pu}) \mu_h \mu_l}$ 。

本文以 $k_s = R - C \gamma n_s$ 作为社会最优接入费用。

3.3 频谱收入最大化策略

当授权频谱面向认知用户征收接入费用时，认知用户综合考虑接入费用及系统中认知用户队长，决定是否进入排队。当系统中的认知用户最多为 n 时，所征收的接入费用为 $R - C n E[T]$ 。由此可知，单位时间授权频谱收入为

$$Z(n) = \lambda_{su} (1 - \pi_{n,0} - \pi_{n,1}) (R - C n E[T])$$

频谱收入最大化阈值 n_m 满足不等式

$$\begin{cases} Z(n_m - 1) \leq Z(n_m) \\ Z(n_m + 1) < Z(n_m) \end{cases}$$

此时，频谱收入最大化接入费用为

$$k_m = R - C n_m E[T]$$

4 不可视优化策略分析

4.1 纳什均衡策略

在不可视的混合 overlay/underlay 频谱共享方式下，新到达的认知用户对系统中认知用户的队长信息一无所知。为了找到认知用户的纳什均衡策略 q_e ，假设每个新到达的认知用户均以概率 $q (0 \leq q \leq 1)$ 进入系统，则认知用户的有效到达率为 $q \lambda_{su}$ 。根据 M/G/1 排队模型的解析结果^[18]，认知用户的平均逗留时间 W_{su} 为

$$W_{su} = E[T] + \frac{q \lambda_{su} (E[T]^2 + D[T])}{2(1 - q \lambda_{su} E[T])} \quad (12)$$

则认知用户进入系统的平均收益为

$$U(q) = R - C W_{su} \quad (13)$$

将式(12)代入到式(13)，可得

$$U(q) = R - C E[T] - \frac{q \lambda_{su} C (E[T] + D[T])}{2(1 - q \lambda_{su} E[T])}$$

令 $U(q) = 0$ ，可得方程的一个非负根为

$$q = \frac{2(R - C E[T])}{\lambda_{su} (2 R E[T] + C (D[T] - (E[T])^2))}$$

如果 $q \leq 1$ ，则纳什均衡策略 $q_e = q$ ；如果 $q > 1$ ，则纳什均衡策略 $q_e = 1$ 。

4.2 社会最优策略

当认知用户免费接入时，单位时间内的平均社会收益为

$$S_w(q) = \lambda_{su} q \left(R - CE[T] - \frac{Cq\delta_1}{2(1-q\delta_2)} \right)$$

其中， $\delta_1 = \lambda_{su}(E[T] + D[T])$ ， $\delta_2 = \lambda_{su}E[T]$ 。可以证明 $S_w(q)$ 关于 q 是上凸函数（证明过程省略）。令 $S'_w(q) = 0$ ，可得

$$q = \frac{\zeta - \sqrt{C\zeta((E[T])^2 + D[T])}}{\lambda_{su}\zeta E[T]}$$

其中， $\zeta = 2RE[T] + C(D[T] - (E[T])^2)$ 。

由假设 $R \geq \frac{1}{\mu_1}$ ，必有 $q \geq 0$ 。如果 $q \leq 1$ ，则社会最优策略 $q^* = q$ ；如果 $q > 1$ ，则社会最优策略 $q^* = 1$ 。

4.3 社会最优费用方案

当授权频谱被认知用户免费占用时，不可避免地会使授权频谱的过度拥塞。为控制认知用户的无节制进入，促使认知用户的纳什均衡策略与社会最优策略一致，频谱针对每个接入的认知用户征收一定的费用。需要说明的是，认知用户缴纳一定的接入费用，并没有影响系统社会收益，只是将认知用户的部分收益转移到了授权频谱。

为了保证社会收益的最优，每个认知用户均需采用社会最优策略 q^* ，则认知用户进入系统后的平均收益为

$$U_w(q^*) = R - k - CE[T] - \frac{Cq^*\xi}{2(1-q^*E[T])}$$

其中， $\xi = D[T] + (E[T])^2$ 。令 $U_w(q^*) = 0$ ，可以解得最优接入费用

$$k = R - CE[T] - \frac{Cq^*(D[T] + (E[T])^2)}{2(1-q^*E[T])} \quad (14)$$

由于该费用方案将社会收益完全转移到费用的征收方，因此，该方案也是频谱收入最大化费用方案。

5 数值实验

本节通过数值实验揭示混合 overlay/underlay 频谱共享下，认知用户到达率 λ_{su} 及成功传输收益 R 对认知用户策略阈值及授权频谱定价的影响，并通过优化策略的对比说明该混合策略的优越性。设

置系统参数如下： $\lambda_{pu} = 0.10$ ， $\mu_{pu} = 2.00$ ， $\mu_1 = 1.00$ ， $\mu_h = 1.50$ ， $C = 4.00$ 。

以认知用户成功传输收益 $R = 16$ 为例，图 2 展示了可视情形下认知用户个体最优策略阈值 n_c 、社会最优策略阈值 n_s 及频谱收入最大化策略阈值 n_m 随认知用户到达率 λ_{su} 增加的变化趋势。

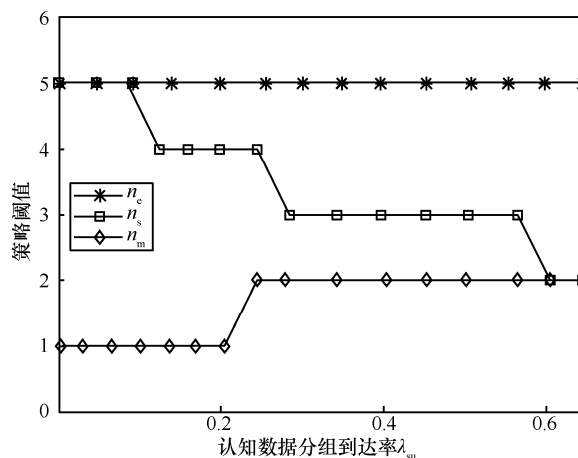


图 2 认知用户到达率 λ_{su} 对策略阈值的影响

图 2 表明，随着认知用户到达率 λ_{su} 的增加，个体最优策略阈值 n_c 恒定；社会最优策略阈值 n_s 阶梯减小；频谱入场收入最大化策略阈值 n_m 阶梯增加。当认知用户掌握系统负载信息时，其决策只是取决于系统本身的性质，并不受自身到达率的影响，因此，个体最优策略阈值恒定。考虑社会收益的构成，一方面受到认知用户到达率的影响，另一方面受到认知用户逗留时间的影响。当认知用户到达率较低时，较高的阈值可以提高认知用户的吞吐量，同时也能保证认知用户的逗留时间不会受到大的影响；当认知用户到达率较高时，认知用户采用较小的策略阈值，认知用户的阻塞率有所增加，吞吐量也有所降低，但是可以大幅度地减少认知用户的逗留时间。因此，随着认知用户到达率的增加，社会最优策略阈值会减小。不同于系统社会收益，频谱收入主要取决于进入系统的认知用户的数目及单个认知用户的接入费用。为了最大化自身收入，当认知用户到达率较低时，频谱通过较小的阈值来提高单个认知用户的接入费用；而当认知用户到达率较高时，较大的策略阈值虽然使单个认知用户的接入费用降低，但是进入系统的认知用户数目增加。因此，认知用户到达率越大，频谱收入最大化策略阈值越大。

另外，图 2 也表明对于固定的认知用户到达率 λ_{su} ，社会最优策略阈值 n_s 介于个体最优策略阈值 n_e 与频谱收入最大化策略阈值 n_m 之间，即 $n_m \leq n_s \leq n_e$ 成立。由于个人行为的贪婪性，认知用户为了追求自身收益的最大化，会采用较大的阈值，进而引起系统的过度拥塞，造成整个社会的利益锐减，即个体最优策略阈值偏离了社会最优策略阈值。另一方面，授权频谱为了最大化自身收入，往往会采取较高的价格，促使更多的认知用户止步离开，因此，频谱收入最大化策略阈值不大于社会最优策略阈值。

值得说明的是，受到认知用户成功传输收益 R 及逗留费用 C 的限制，随着认知用户到达率的增加，社会最优策略阈值的下限值与频谱收入阈值的上限值趋于一致，均为 $\left\lfloor \frac{R}{CE[T]} \right\rfloor$ 。在图 2 中体现为社会最优策略阈值曲线与频谱收入最大化策略阈值曲线重合。

采用与图 2 相同的参数配置，图 3 展示了可视情形下社会最优接入费用 k_s 及频谱收入最大化接入费用 k_m 随认知用户到达率 λ_{su} 增加的变化趋势。

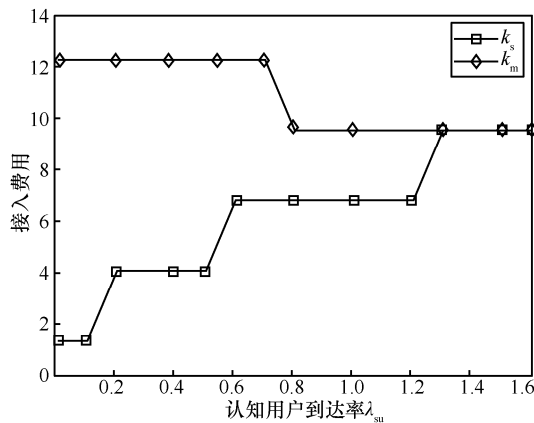


图 3 认知用户到达率 λ_{su} 对接入费用的影响

图 3 表明，当以社会收益为目标函数时， k_s 随认知用户的到达率 λ_{su} 增加而阶梯增加；以频谱收入为目标函数时， k_m 随认知用户到达率 λ_{su} 增加而阶梯减少。在可视情形下，授权频谱的接入费用与策略阈值是负线性关系。结合图 2 结果，随认知用户到达率增加，社会最优阈值阶梯减小，造成认知用户的接入费用增加；频谱收入最大化阈值增加，导致认知用户的接入费用降低。

另外，图 3 的结果表明社会最优接入费用不大

于入场收入最大化接入费用，即 $k_s \leq k_m$ 。也就是说，如果以社会最优为目的，接入费用的实施是有意义的，而以频谱收入最大化为目的，接入费用的实施不能实现社会收益的最优。

以认知用户到达率 $\lambda_{su} = 0.60$ 为例，图 4 展示了可视情形下 3 种策略阈值随着认知用户成功传输收益 R 的变化趋势。

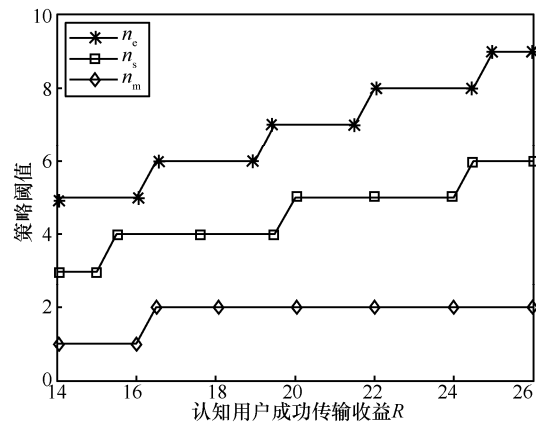


图 4 认知用户成功传输收益 R 对策略阈值的影响

图 4 进一步揭示了策略阈值之间的数值关系。另外，图 4 也表明 3 种策略阈值均随着认知用户成功传输收益 R 的增加而阶梯增加。在单位时间逗留费用固定的情况下，认知用户成功传输收益越大，新到达的认知用户越倾向于进入系统，从而导致 3 种策略阈值不同程度的增加。

采用与可视情况相同的参数设置，图 5 展示了不可视情形下，认知用户的纳什均衡策略 q_e 和社会最优策略 q^* 随认知用户到达率 λ_{su} 增加的变化趋势。

图 5 表明纳什均衡策略 q_e 和社会最优策略 q^* 均随认知用户到达率 λ_{su} 的增加而减小。认知用户的到达率越大，认知用户的平均逗留时间越长，从而进入系统的认知用户的平均收益减少，打击了新到达认知用户进入系统的积极性。另外，由图 5 也可以看出，在认知用户到达率 λ_{su} 相同的情况下，较大的认知用户成功传输收益 R 会产生相对较大的纳什均衡策略 q_e 与社会最优策略 q^* 。如果单位时间的逗留费用固定，认知用户成功传输收益越大，新到达的认知用户越倾向进入系统，因此，会产生相对较大的纳什均衡策略与社会最优策略。

图 5 也表明在相同的认知用户到达率 λ_{su} 与成功传输收益 R 情况下，认知用户的纳什均衡策略不

小于社会最优策略，即 $q_c \geq q^*$ 。在队长不可视的情况下，认知用户具有自私性，每个新到达的认知用户只是考虑最大化自身的收益而忽略了对其他认知用户收益的影响。无节制的进入将导致系统过度拥塞，增加了认知用户的平均逗留时间，造成了个体最优到达率偏移了社会最优到达率。

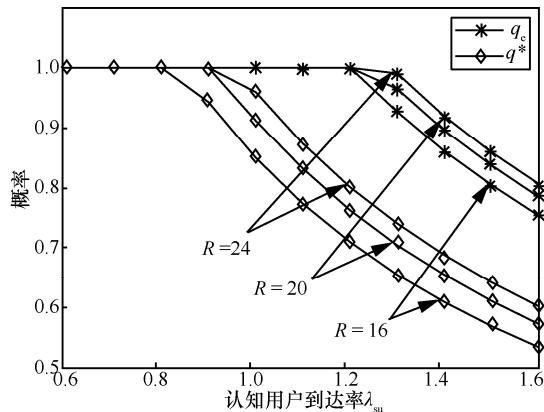


图 5 认知用户到达率对纳什均衡概率及社会最优接入概率的影响

设置与图 5 相同的系统参数，表 1 给出了不可视混合 overlay/underlay 频谱共享优化策略及相应的接入费用。

表 1 认知用户优化策略数值结果

λ_{su}	R	q_c	q^*	k	$S_w(q^*)$
0.70	16	1.00	1.00	10.76	7.53
0.70	20	1.00	1.00	14.76	10.33
0.70	24	1.00	1.00	18.75	13.13
1.20	16	1.00	0.72	9.38	8.06
1.20	20	1.00	0.77	12.60	11.63
1.20	24	1.00	0.81	15.89	15.41
1.40	16	0.87	0.62	9.38	8.06
1.40	20	0.90	0.66	12.60	11.63
1.40	24	0.95	0.69	15.89	15.41

从表 1 可以看出，在认知用户到达率较低的情况下，即使到达的认知用户全部进入也没有到达最优的社会收益。较小的认知用户到达率引起了系统配置浪费，系统较多时间处于空闲状态。授权频谱通过降低接入费用来吸引更多的认知用户进入系统。

从表 1 也可以看出，针对相同认知用户成功传输收益 R ，当认知用户到达率 λ_{su} 较高时，有相同

的社会收益与相同的认知用户接入费用。在不可视情形下，社会收益主要受认知用户的实际进入率的影响。因此，较高的认知用户到达率只会影响社会最优策略，而并不影响社会最优收益。而频谱接入费用又是根据社会收益制定的，故接入费用相同。

图 6 展示了可视与不可视情形下，系统社会最优收益随认知用户到达率 λ_{su} 增加的变化趋势。

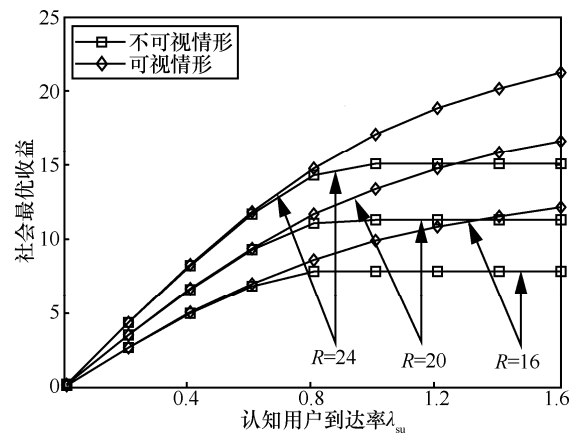


图 6 可视与不可视情形下社会最优收益对比

图 6 表明可视情况下的社会最优收益随认知用户到达率的增加而增加。由于认知用户到达率越大，进入系统的认知用户越多，促使社会收益增加。而在不可视的情况下，随着认知用户到达率增加，社会最优收益增长到一定程度之后不再变化。在不可视情形下，由于认知用户的接入是在信息量较小的情况下发生的，没有将认知用户队长的影响考虑在内。因此，当认知用户到达率持续增加时，社会最优收益不会再增加。

另外，图 6 也表明在认知用户到达率较低时，认知用户对队长信息的掌握情况并不影响系统社会最优收益。当认知用户到达率较高时，可视情形下的社会最优收益高于不可视情形下的社会最优收益。系统社会收益是由认知用户利用授权频谱创造的，不可视情形下的社会收益无法充分考虑认知用户的创造能力，只是从系统负载出发。

以认知用户成功传输收益 $R = 20$ 为例，图 7 展示了可视情形下，认知用户分别采用混合 overlay/underlay 频谱共享方式、overlay 频谱共享方式和 underlay 频谱共享方式接入系统时，社会最优收益随认知用户到达率增加的变化趋势。

图 7 表明不同的频谱共享方式下，授权用户到达率对社会最优收益的影响是不同的。Underlay 频

谱共享方式下，认知用户的传输功率控制在干扰温度门以下，且传输速率固定，社会最优收益不受授权用户到达率的影响。当授权用户的到达率较小时，即使授权信道中出现较多的频谱“空穴”，受认知用户的传输速率不能再次提高的制约，频谱“空穴”也不能得到进一步的充分利用，系统因此无法获取更多的社会收益。当授权用户的到达率较低时，overlay 频谱共享方式下的社会最优收益高于 underlay 频谱共享方式下的社会最优收益；当授权用户的到达率较高时，overlay 频谱共享方式下的社会最优收益低于 underlay 频谱共享方式下的社会最优收益。在 overlay 频谱共享方式下，当授权信道空闲时，认知用户可以机会式地占用授权信道，但是，该信道有可能被新到达的授权用户抢占，正在传输的认知用户不得不停止数据传输，导致社会最优收益受授权用户到达率的影响较大。

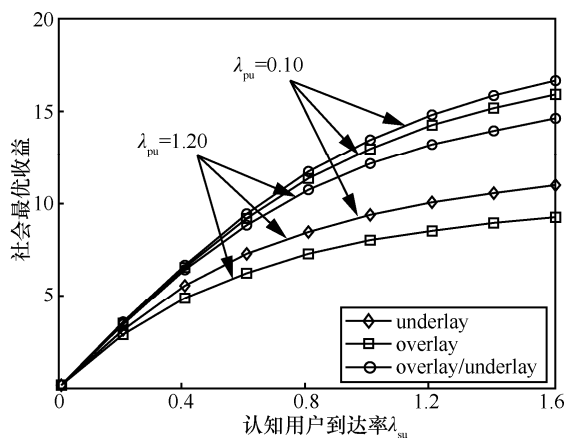


图7 可视频谱共享策略社会收益对比

图7也表明在相同的系统负载下，与以上2种共享方式下社会最优收益相比，混合 overlay/underlay 频谱共享方式下的社会最优收益最大。当授权用户到达率较高时，相对于 overlay 频谱共享方式，更多的认知用户能够以较低的速率在信道中持续传输；当授权用户到达率较低时，相对于 underlay 频谱共享方式，系统中的认知用户可以及时地切换到高速率传输模式，即认知用户的传输速率具有很强的自适应性。混合 overlay/underlay 频谱共享方式的自适应性弥补了 underlay 频谱共享方式灵活性较差、overlay 频谱共享方式稳定性不足的缺点。该实验结果揭示出混合 overlay/underlay 频谱共享方式下的社会最优策略可以稳定且高效地利用频谱资源。

综合实验结果发现，可视情形下的个体最优策略阈值高于社会最优策略阈值，系统需要配置较高的认知用户缓存，从而系统成本相对较高。虽然频谱收入最大化策略阈值较小，但是认知用户的接入费用较高。因此，社会最优策略是相对折中的策略。不可视情形下，虽然在认知用户到达率较低时，认知用户纳什均衡策略与社会最优策略基本相同。但是，当认知用户到达率较高时，认知用户的纳什均衡策略相对较小，直接导致了认知用户实际进入率低，不利于系统认知用户吞吐量的提高。2种情形下社会收益的对比又表明可视情形下的社会收益高于不可视情形下的社会收益。以上结论表明，当认知用户采用混合 overlay/underlay 频谱共享方式接入系统时，面向认知用户公布队长信息更有利于频谱利用率的提高。另外，与 overlay 频谱共享方式、underlay 频谱共享方式下的社会最优收益的对比，表明混合 overlay/underlay 频谱共享方式下的社会最优策略能稳定且高效地利用频谱资源。

6 结束语

针对认知无线网络中的混合 overlay/underlay 频谱共享方式，分为可视与不可视2种情形，讨论了认知用户的均衡策略，基于社会最优与频谱收入最大化，给出了面向认知用户的定价机制。通过数值实验揭示了各策略之间的关系，验证了价格机制的正确性。通过对比2种情形下的社会最优收益随认知用户到达率的变化，揭示了面向认知用户公布队长信息更有利于提高频谱利用率。通过对比可视情况下认知用户采用3种不同频谱共享方式系统社会最优收益，进一步表明了混合 overlay/underlay 频谱共享方式的优越性。本文的研究成果对混合 overlay/underlay 频谱共享方式在无线网络中的实际应用具有一定的理论和实际意义。

参考文献：

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] RICHMOND R L, AUSTIN A, WEBSTER I W. Optimal spectrum utilization in cognitive network using combined spectrum sharing approach: overlay, underlay and trading[J]. International Journal of Business Information Systems, 2013, 12(4): 423-454.
- [3] SUN S, JU Y, YAMAO Y. Overlay cognitive radio OFDM system for 4G cellular networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2): 68-73.
- [4] LIAO L, PLA V, LI F Y. Analysis on channel bonding/aggregation for multi-channel cognitive radio networks[C]//Proceedings of the 12th

- IEEE European Wireless Conference. Lucca, Italy, 2010:468-474.
- [5] 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.
JIN S F, XIE H T, ZHAO Y. Hybrid channel allocation strategy with group switching and performance evaluation in cognitive radio network[J]. Journal on Communications, 2013, 34(12): 11-19.
- [6] TOURKI K, QARAQE K A, ALOUINI M S. Outage analysis for underlay cognitive networks using incremental regenerative relaying[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(2): 721-734.
- [7] IM S, KIM W, KANG Y, et al. Joint power and admission control for underlay spectrum sharing in cognitive radio networks[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Technologies for Communications. Gangwon-Do, South Korea, 2010: 56-61.
- [8] 任晓岳, 陈长兴. Underlay 认知无线网络功率与准入控制优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2395-2404.
REN X Y, CHEN C X. Optimization algorithms based on power and admission control for underlay cognitive radio networks[J]. System Engineering and Electronics, 2016, 38(10): 2395-2404.
- [9] GIUPPONI L, IBARS C. Distributed cooperation in cognitive radio networks: overlay versus underlay paradigm[C]//The 69th IEEE Vehicular Technology Conference. Barcelona, Spain, 2009: 1-6.
- [10] MANOSHA K B S, RAJATHEVA N, LATVA-AHO M. Overlay/underlay spectrum sharing for multi-operator environment in cognitive radio networks[C]//The 73th IEEE Vehicular Technology Conference. Budapest, Hungary, 2011: 1-5.
- [11] YAN Z, ZHANG X, WANG W B. Outage performance of relay assisted hybrid overlay/underlay cognitive radio systems[C]//2011 IEEE Wireless Communication and Networking Conference. Cancun, Mexico, 2011:1920-1925.
- [12] SENTHURAN S, ANPALAGAN A, DAS O, et al. Opportunistic channel sharing based on primary user transition probabilities in dual mode cognitive radio networks[C]//The 21th IEEE International Conference on Communications. Kyoto, Japan, 2011:1-6.
- [13] DO C T, HONG C S, HONG J. Pricing control for hybrid overlay/underlay spectrum access in cognitive radio networks[C]//The 14th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium Conference. Seoul, Korea, 2012: 1-6.
- [14] DO C T, TRAN N H, NGUYEN M V, et al. Social optimization strategy in unobserved queueing systems in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 1944-1947.
- [15] WANG J, LI W. Non-cooperative and cooperative joining strategies in cognitive radio networks with random access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(7): 5624-5636.
- [16] 孙荣恒, 李建平. 排队论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
SUN R H, LI J P. Fundamentals of queueing theory[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [17] 唐加山. 排队论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
TANG J S. Queueing theory and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [18] CHU T M C, PHAN H, ZEPERNICK H J. On the performance of underlay cognitive radio networks using M/G/1/K queueing model[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(5): 876-879.

作者简介:



刘建平 (1980-), 男, 河北滦南人, 燕山大学博士生, 河北科技师范学院讲师, 主要研究方向为网络资源分配与优化、排队论研究与应用等。



金顺福 (1966-), 女, 朝鲜族, 内蒙古满洲里人, 燕山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络资源分配与优化、排队论研究与应用等。



王宝帅 (1993-), 男, 河北保定人, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为网络资源分配与优化。