

基于动态古诺博弈的认知无线电频谱贸易算法

李方伟, 柴源, 朱江, 张玉平

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 南岸区 400065)

【摘要】为解决认知无线电频谱分配问题,提出了一种新的基于动态古诺博弈的频谱租借贸易算法。该算法考虑认知无线网络中频谱租借市场容量及次用户频谱价值两者均动态变化的特点,将用户之间的频谱租借贸易建模成动态古诺博弈,同时根据用户之间的频谱供需关系动态调整用户贸易的频谱价格及收益,促使每阶段用户效用最大化并达到频谱分配的目的。分析了频谱供需关系变化对贸易的影响,并通过仿真证明了该算法相比于静态古诺博弈模型能达到更高的频谱利用率。

关键词 自适应机制; 认知无线电; 动态频谱分配; 频谱贸易

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.04.005

Spectrum Trading Algorithm of Cognitive Radio Networks Based on Dynamic Cournot Game

LI Fang-wei, CHAI Yuan, ZHU Jiang, and ZHANG Yu-ping

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nan'an Chongqing 400065)

Abstract To solve the spectrum allocation issue in cognitive radio network, a novel spectrum lease trading algorithm based on dynamic Cournot game is proposed. Considering the change of the spectrum market capacity and the spectrum value for secondary users, this algorithm models the spectrum lease trading as a dynamic Cournot game. Depending on the demand and supply for spectrum trading, users adjust the leasing price and profit to maximize the utility and complete the spectrum allocation. The method is analyzed and the performance is compared with the static Cournot game algorithm. Simulation results illustrate that the proposed algorithm has the higher spectral efficiency.

Key words adaptive algorithms; cognitive radio; dynamic spectrum allocation; spectrum trading

无线网络的静态频谱分配策略已不再适应大量增长的频谱需求,频谱资源短缺的问题促使了认知无线电技术的快速发展,其动态频谱分配策略则能更合理有效地利用频谱^[1-3]。当前,认知无线网中动态频谱分配研究已取得一定成果^[4-6]。文献[7]提出了频谱二级市场中动态频谱租赁及服务选择模型,分析了各用户在不同市场层级中的效益最大化的频谱博弈选择问题。文献[8]提出了一种基于合同贸易的频谱租借算法,用户之间根据频谱质量及价钱签订相应合同,达到各自效用最大并完成频谱贸易。文献[9]提出了一种基于合作博弈框架下纳什贸易方案的信道及功率分配算法,该算法在保证次用户性能的前提下最大化系统的吞吐量。文献[10]提出了一种新的基于联盟博弈的合作频谱共享分配算法,主次用户之间将通过付费机制激励合作完成频谱的再

利用。

本文提出了一种新的基于动态古诺博弈的频谱贸易分配算法。该算法根据频谱阶段市场容量、供需关系及价值变化因素,在博弈每个阶段动态调整用户行为策略,最大化用户效用并合理进行频谱分配。理论分析证明了纳什均衡的存在及频谱供需关系对用户之间的影响。随后仿真分析了不同情况下主次用户频谱租借策略之间的影响。相比于静态古诺博弈模式,本文算法考虑动态市场容量,拥有更高的频谱利用率。

1 频谱贸易模型

在分布式认知无线网络中,假设存在频谱贸易机制。主次用户之间将通过租借收费机制共享频谱。次用户根据自身情况从主用户处租借一定量的

收稿日期: 2013-05-22; 修回日期: 2013-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(61102062); 教育部科学技术研究重点项目(212145); 重庆市科委自然科学基金(cstc2011jjA1192); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110503)。

作者简介: 李方伟(1960-),男,教授,主要从事移动通信理论与技术方面的研究。

频谱通信产生效益, 主用户则通过出租频谱收取一定费用获益。

1.1 无线环境模型

信道建模为瑞利衰落信道。认知用户将采用可变功率可变速率的自适应调制技术传输数据, 利用信道反转(channel variation)调整传输功率以及改变速率, 补偿信道的瑞利衰落, 使接收端的信噪比能一直维持在一个恒定的值上, 则误码率和频带利用率将只与高斯噪声有关^[11]。考虑方形星座图的正交幅度调制(如4QAM、16QAM), 则认知用户在加性高斯白噪声环境下的比特错误率可近似为 $BER \approx 0.2 \exp[(-1.5\gamma)/(2^k - 1)]$, 其中 γ 为接收机信噪比, k 为调制方式的频带利用率。为保证传输质量, 认知用户传输的比特误码率应达到一定门限值 (BER_i^{tar}), 认知用户 i 的频带利用率为

$$k_i = lb(1 + K\gamma_i), \text{ 其中, } K = 1.5 / \ln\left(\frac{0.2}{BER_i^{tar}}\right)。$$

1.2 主用户频谱出租模型

假设认知无线网络中存在 M 个主用户

$$PU \triangleq \{PU_1, PU_2, \dots, PU_M\}$$

每个主用户拥有的可租借频谱数量为 B_j (为保证主用户自身业务需求, 另有带宽为 B_{re} 的频谱为主用户保留频谱)。主用户将根据网络中次用户租借频谱情况在每阶段出租一定量的频谱并收取相应费用获利。该场景可以采用动态古诺博弈模型进行分析。

定义 1 将上述认知网络视为一个频谱租借贸易市场, 出租方为主用户, 租借方为次用户。市场容量为主用户认为该阶段次用户需要租借的频谱数量(频谱需求量)。

假设频谱市场最大容量为 M 个主用户可租借频谱数量的总和, 每阶段的频谱市场容量为前一阶段市场容量减去前一阶段次用户实际租借总量, 再加上新增市场容量。

定义 2 假设主用户认为因次用户数量增减、兴趣改变、环境干扰等其他因素造成的每个阶段次用户需要租借的频谱数量的改变值为新增市场容量(新增市场容量也可能因为各种消极因素而为负值, 例如在某一阶段内有较多次用户的离去及通信干扰的增加, 导致该阶段次用户不愿再租借新频谱的同时还有退租已有频谱的打算)。

假设博弈前的频谱市场容量为 $d^{(0)}$, 每个阶段

新增市场容量为 e_t (该值为主用户根据次用户频谱需求情况在每阶段所做的评估值)。进入博弈后, 在阶段 t 的市场容量为 $d^{(t)}$, 则:

$$d^{(1)} = d^{(0)} + e_1 \quad (1)$$

$$d^{(t)} = d^{(t-1)} - \sum_{i=1}^N s_{(t-1)i} + e_t \quad (2)$$

式中, $\sum_{i=1}^N s_{(t-1)i}$ 为 $(t-1)$ 阶段时次用户实际从主用户处租借频谱的总量。

定义 3 考虑主用户对于租借频谱的定价将根据当前阶段频谱需求量而定, 在阶段 t 时的逆需求函数即主用户在阶段 t 时出租频谱的市场价格为:

$$P_t = hd^{(t)} - h \sum_{j=1}^M b_{tj} = hd^{(0)} + h \sum_{g=1}^t e_g - h \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi} - h \sum_{j=1}^M b_{tj} \quad (3)$$

式中, b_{tj} 表示在阶段 t 时主用户 j 所提供出租的频谱数量, 同时 $e_t < |d|$, 即要求新增频谱量不太大。

考虑主用户为次用户提供可用频谱进行租借将产生频谱租借管理费用, 为便于分析, 假设主用户在阶段 t 出租的频谱数量为 b_{tj} 时产生的租借成本服从线性关系, 即 $c_{tj}(b_{tj}) = \alpha b_{tj}$, 其中, α 为成本因子, 且 $\alpha > 0$ 。

市场中, 假设主用户的策略集合为 $B \triangleq \{b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1M}\}$, 其中 b_{tj} 为主用户 j 在博弈阶段 t 时所选择提供出租的频谱数量, 则主用户的效用为其提供一定量的租借频谱所获得的收益减去由租借造成的管理成本, 故主用户在阶段 t 的效用函数可表示为:

$$R_{jt}(B) = P_t b_{tj} - c_{tj}(b_{tj}) b_{tj} = [hd^{(0)} + h \sum_{g=1}^t e_g - h \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi} - h \sum_{j=1}^M b_{tj} - \alpha b_{tj}] b_{tj} \quad (4)$$

其最佳策略为:

$$b_{tj}^* = \arg \max [R_{jt}(B)] \quad (5)$$

1.3 次用户租借频谱模型

假设认知无线网络中存在 N 个次用户 $SU \triangleq \{SU_1, SU_2, \dots, SU_N\}$, 所有次用户的策略集合可以表示为 $S \triangleq \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1N}\}$ 。每个次用户的行为策略为向主用户租借一定量的频谱进行自身的信息通信并向主用户支付租金; 同时, 次用户将在自身信息通信的过程中获得利润。因此, 次用户的最终收益应为利用频谱通信所获得的利润减去租借频谱所产生的成本, 其效用函数为:

$$R_{ii}(S) = V_{ii} - P_t s_{ii} \quad (6)$$

式中, s_{it} 为次用户 i 在阶段 t 的频谱租借量策略; P_t 为阶段 t 时主用户出租频谱的价格; V_{it} 则为次用户 i 在阶段 t 时租借频谱使用所能获得的利润。

为了更符合实际情况, 现假设次用户 i 在租借频谱通信所能获得的利润与租借量并非线性关系。考虑弹性业务模型^[12], 即次用户在租借到较少频谱通信时所获得的单位利润较高(为了满足基本通信量), 而随着租借到的频谱数量增多, 新增的单位利润将会减少(当租借到的频谱数量已经能满足次用户的基本通信后, 该用户对于获得更多频谱进行通信的意愿就不会那么强烈, 所收到的利润也会降低)。即次用户效用(满意程度)和租借到的频谱量呈现对数关系。此外, 在每个阶段中, 次用户租借的频谱总量不能超过主用户出租的频谱数量, 即

$$\sum_{i=1}^N s_{it} \leq \sum_{j=1}^M b_{jt}。$$

定义 4 考虑弹性业务模型, 频谱利润 V_{it} 随次用户租借到的频谱数量增多而呈现对数关系, 表示为:

$$V_{it}(s_{it}) = \sigma \ln(1 + \beta_{it} k_{it} s_{it}) \quad (7)$$

式中, β_{it} 为阶段 t 时次用户 i 的频谱需求因子, 取值越大表明当前对频谱的需求程度越高; k_{it} 为次用户的频谱利用率; σ 为调整因子。

因此, 次用户 i 在阶段 t 的效用函数为:

$$R_{it}(S) = \sigma \ln(1 + \beta_{it} k_{it} s_{it}) - \left(hd^{(0)} + h \sum_{g=1}^t e_g - h \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi} - h \sum_{j=1}^M b_{jt} \right) s_{it} \quad (8)$$

其最佳策略为:

$$s_{it}^* = \arg \max [\sigma \ln(1 + \beta_{it} k_{it} s_{it}^*) - (hd^{(0)} + h \sum_{g=1}^t e_g - h \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi} - h \sum_{j=1}^M b_{jt}) s_{it}^*] \quad (9)$$

此外, 随着博弈阶段数的增加, 次用户所租借到的频谱数量增加, 租借新频谱进行通信的兴趣不再强烈。因此, 次用户的频谱需求 β_{it} 也将随博弈阶段的增长而降低。为便于分析, 可表示为:

$$\beta_{it} = Q_i - q_i t \quad (10)$$

其中, Q_i 、 q_i 均为正常数。

2 纳什均衡

根据纳什均衡点原理, 如果没有一个参与者能够靠自身行动的改变提高自身收益时, 整个参与者集合对应的行动向量就称为纳什均衡。如果满足以下条件, 则本文博弈过程就能定性判断纳什均衡存在:

- 1) 用户集合是有限的;
- 2) 用户策略集是封闭的、有界的凸集;
- 3) 效用函数是在行动空间上的连续的拟凹函数。

很明显主用户之间博弈符合上述条件1)和条件2), 现证明其符合条件3)。

定理 1 上述认知主用户的效用函数收敛, 该博弈存在纳什均衡。

证明: 对 $R_{jt}(B)$ 求导可得:

$$\frac{\partial R_{jt}(B)}{\partial b_{jt}} = \left(hd^{(0)} + h \sum_{g=1}^t e_g - h \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi} \right) - \left(h \sum_{j=1}^M b_{jt} + hb_{jt} \right) - 2\alpha b_{jt} \quad (11)$$

同时, 再对 $\frac{\partial R_{jt}(B)}{\partial b_{jt}}$ 求导, 得:

$$\frac{\partial^2 R_{jt}(B)}{\partial b_{jt}^2} = -2h - 2\alpha \quad (12)$$

很明显, $\frac{\partial^2 R_{jt}(B)}{\partial b_{jt}^2} < 0$ 。

主用户的效用函数 $R_{jt}(B)$ 为拟凹函数, 故该博弈存在纳什均衡, 证毕。

定理 2 M 个主用户在阶段 t 选择出租的频谱数量均衡解同为:

$$b_t = \frac{d^{(0)} + \sum_{g=1}^t e_g - \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi}}{M + \frac{2\alpha}{h} + 1} \quad (13)$$

证明: 计算 $\frac{\partial R_{jt}(B)}{\partial b_{jt}} = 0$, 有:

$$\frac{\partial R_{jt}(B)}{\partial b_{jt}} = \left(hd^{(0)} + h \sum_{g=1}^t e_g - h \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi} \right) - \left(h \sum_{j=1}^M b_{jt} + hb_{jt} \right) - 2\alpha b_{jt} = 0 \quad (14)$$

当 t 固定时, 联立上式中关于 i 的 N 个方程, 可得:

$$b_{jt} = b_{jt}^* \quad (15)$$

由此可见, 每个主用户在阶段 t 的频谱数量均衡解相同。为简便起见, 假设每个主用户在阶段 t 的频谱数量均衡解均为 b_t , 其对应的效用函数为 $R_t(B)$, 则式(14)可化为:

$$\left(hd^{(0)} + h \sum_{g=1}^t e_g - h \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi} \right) - (Mhb_t + hb_t) - 2\alpha b_t = 0 \quad (16)$$

求得:

$$b_t = \frac{d^{(0)} + \sum_{g=1}^t e_g - \sum_{g=1}^{t-1} \sum_{i=1}^N s_{gi}}{M + \frac{2\alpha}{h} + 1} \quad (17)$$

证毕。

3 频谱供需关系分析

定义新阶段的频谱市场容量为前一阶段市场容量减去前一阶段的租借总量, 再加上当前阶段的新增市场容量 e_t 。而 e_t 的取值将对当前市场频谱供需产生影响, 进而影响主用户对于出租频谱的定价取值。现对其做如下详细分析。

1) $0 \leq e_t$ 。即在当前阶段, 主用户认为市场容量仍在继续扩大, 需求频谱的人数正在增多。由上文分析及主用户效用函数可知, 在阶段 t , e_t 取何值或者服从何种分布对于主用户策略收敛及存在纳什均衡没有任何影响, 它只会影响每个阶段主用户的均衡解取值大小(具体影响将由其具体取值而定)。

2) $\sum_{i=1}^N s_{(t-1)i} - d^{(t-1)} \leq e_t \leq 0$ 。此时因次用户个数增减、兴趣改变、环境干扰等其他因素造成在阶段 t 时主用户认为新增市场容量为负值, 但根据 $d^{(t)} = d^{(t-1)} - \sum_{i=1}^N b_{(t-1)i} + e_t$ 可知, 在阶段 t , 市场容量 $d^{(t)}$ 仍为正数, 即当前阶段还有次用户愿意租借新的频谱, 主用户仍旧可以根据市场需求进行频谱定价出租。而该取值范围对主用户效用函数及其策略影响仍旧是稳定的, 如同阶段1)的影响分析。

3) $e_t \leq \sum_{i=1}^N s_{(t-1)i} - d^{(t-1)} \leq 0$ 。即因各种因素退出频谱租借需求的次用户过多, 导致当前阶段不仅没有次用户愿意租借新的频谱, 且之前阶段已租借出去的部分频谱将被次用户释放交还给主用户。此时, 主用户的实际频谱出租量将有所降低。根据之前定义的逆需求函数, 主用户会因为出租量降低而对剩余的已出租频谱进行提价处理, 这将有可能会导致在剩余继续租借主用户频谱的次用户群中会有用户因为主用户的提价而选择放弃租借, 从而进一步降低了频谱租借需求, 加剧了主用户实际频谱提供量的减少。因此, 在该情况下主用户的均衡策略应维持上一阶段的原价不变即不采取任何措施(根据逆需求函数定义, 主用户不可能在阶段内对定量的租借

频谱进行降价处理)。

4 仿真分析

仿真考虑2个主用户, 3个次用户的认知无线网络场景。具体参数设置如下: 主用户成本因子 $\alpha = 10$, 单位频谱收益 $h = 0.5$; 次用户误码率门限值 $BER_i^{\text{tar}} = 10^{-5}$, 调整因子 $\sigma = 200$, 博弈前市场容量 $d^{(0)} = 80 \text{ kHz}$, 主用户评估阶段新增市场容量服从 $e_t = 15 - 0.5t$ 的线性关系, 为便于分析, $-15 \leq |e_t| \leq 15$ 且当所有次用户不再租借频谱时, 博弈停止。同时, 因古诺博弈中, 主用户频谱租借均衡解均相同, 故仿真结果中, 所有关于主用户的相应数据结果均为 M 个主用户的总和。

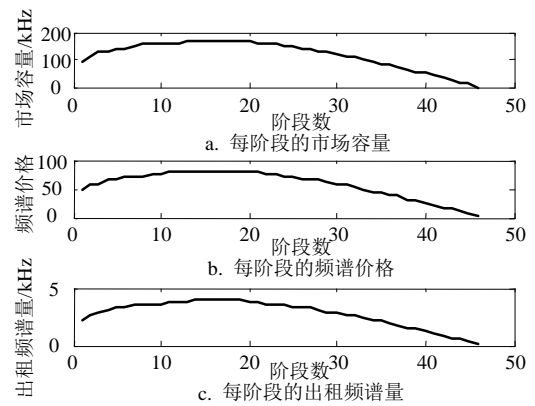


图1 主用户每阶段的频谱出租情况

主用户在每阶段对于租借频谱的定价及租借量情况如图1所示。结合图1a~图1c可以看出, 主用户能自适应地根据当前阶段新增市场容量及上一阶段次用户频谱租借情况评估当前阶段市场容量, 每阶段都能根据次用户实际频谱需求情况提供相应的频谱出租量及设定对应价格。博弈初期, 次用户对于频谱租借的需求促使主用户对市场需求容量评估较高, 同时也提高了单位频谱出租的价格及出租量, 这有利于主用户阶段效用的快速增加。在第15个阶段左右, 市场容量、价格及租借量增长达到峰值随后开始降低, 这是因为前期主用户对每阶段的新增市场容量评估较高且高于阶段次用户实际租借量, 因而市场容量累积增长; 随后新增市场容量降低, 次用户持续的频谱租借造成了市场容量的回落; 到后期次用户考虑到成本及需求因素, 对于新频谱的需求兴趣减少, 新增市场容量为负, 因而主用户的频谱出租量及价格随市场容量下降明显。

图2显示了在频谱贸易过程中, 频谱需求因子及价格对次用户单一阶段的频谱交易量影响。图3则显

示了次用户在信噪比 $\gamma = 20 \text{ dB}$ 时, 不同需求下整个博弈阶段的频谱租借情况。在单一博弈阶段内的同一价格下, 频谱需求因子的降低将会减少次用户在单一阶段内租借的频谱数量, 且需求因子越接近零, 次用户需要的频谱就越少; 同样, 相比于需求因子, 频谱价格上升将对次用户租借频谱的数量造成更大的影响, 主用户提出的租借价格越高, 则次用户愿意租借的频谱量就越少。而在整个博弈过程中, 需求低的次用户在每阶段将会租借较少的频谱且会在较早的博弈阶段因无租借需求而停止频谱贸易。

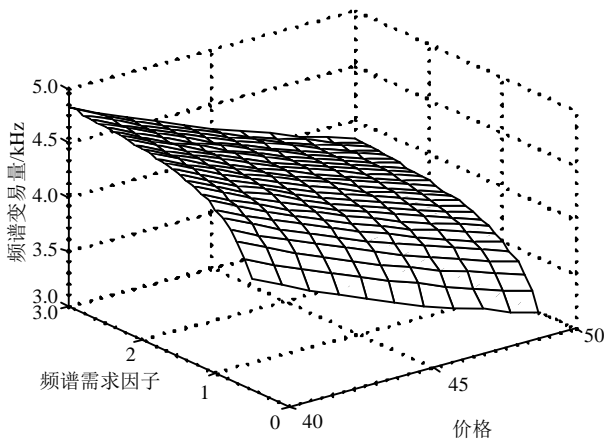


图2 单一阶段次用户频谱交易量

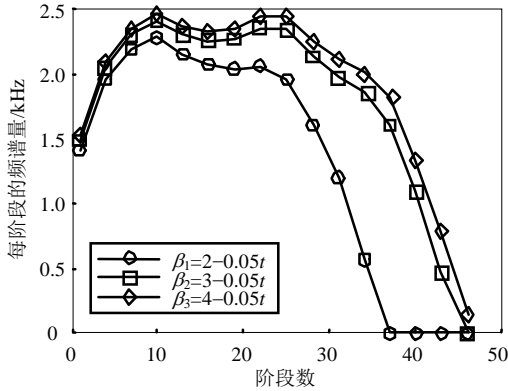
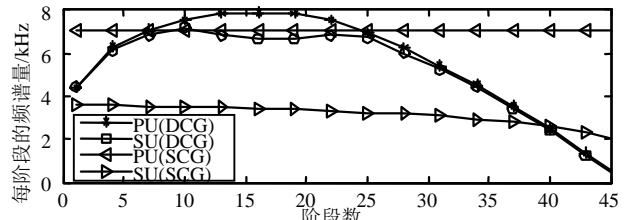


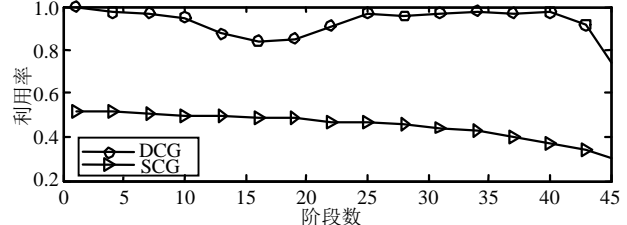
图3 次用户每阶段租借频谱量

图4~图6显示了在主用户频谱维护成本和单位频谱收益不同时, 采用静态古诺博弈(static Cournot game, SCG)和动态古诺博弈(dynamic Cournot game, DCG)两种方法的频谱租借量及频谱利用率对比。

定义 5 静态古诺博弈即主用户对所有阶段的市场容量评估值都为同一固定值。相应地, 主用户在所有阶段提供的频谱出租量及频谱出租价都为同一固定值。即主用户将仅以静态的市场需求量在博弈初始计算出每阶段提供的频谱数量及价格, 不再考虑随后次用户实际的租借需求及市场阶段变化情况。假设静态古诺博弈下市场需求固定为 $d^{(0)} = 150$ 。

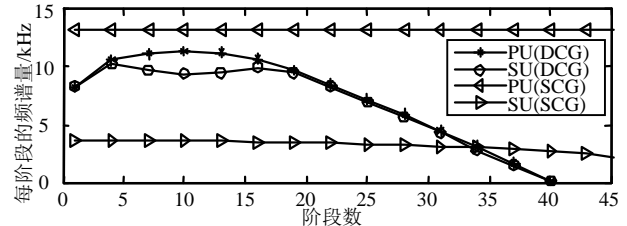


a. 用户的频谱租借量

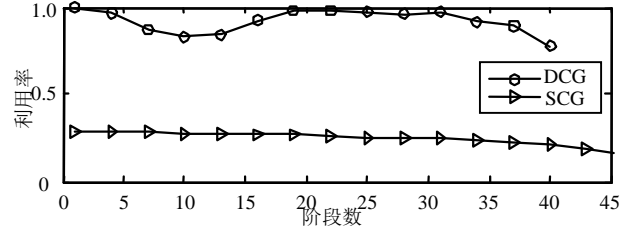


b. 用户的频谱利用率

图4 $\alpha = 10, h = 0.5$ 时用户的频谱租借量及频谱利用率

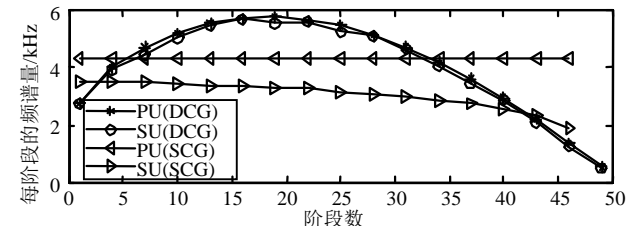


a. 用户的频谱租借量

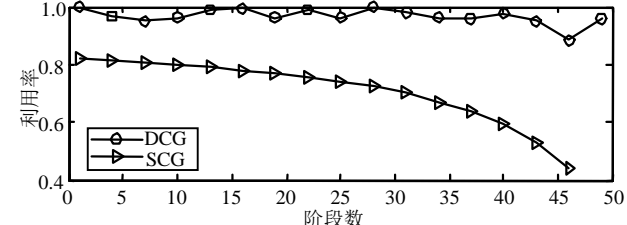


b. 用户的频谱利用率

图5 $\alpha = 5, h = 0.5$ 时用户的频谱租借量及频谱利用率



a. 用户的频谱租借量



b. 用户的频谱利用率

图6 $\alpha = 10, h = 0.3$ 时用户的频谱租借量及频谱利用率

首先对比图4和图5以及式(13)可知, 在主用户单位频谱收益相同($h = 0.5$)的情况下, 频谱成本的降低(从 $\alpha = 10$ 降低到 $\alpha = 5$)将使主用户在博弈每个阶段向次用户提供更多的频谱以达到获得更多总收益的目的。其次结合图4和图5可以看出, 相对于动态

古诺博弈, 频谱成本的降低减少了动态博弈的阶段数, 即加快了频谱分配的速度; 同时其频谱利用率均处于较高水平。而频谱成本的降低虽然也使静态古诺博弈算法提高了频谱提供量, 但其不考虑次用户需求情况, 频谱提供量远大于次用户需求量, 反而加大了频谱利用率的下滑, 造成了资源的浪费。

对比图4和图6以及式(3)可知, 频谱成本相同($\alpha = 10$)时, 主用户单位频谱收益的降低(从 $h = 0.5$ 降低到 $h = 0.3$)导致频谱贸易的价格也随之降低, 这加大了次用户对频谱租借的兴趣, 相对于主用户的高单位频谱收益, 低单位频谱收益将更容易达到频谱贸易的供需平衡。因此, 动态古诺博弈下每阶段的频谱利用率都接近100%; 而静态古诺博弈下虽然单位频谱收益的降低使整体频谱利用率有所上升, 但相比于本文算法其频谱利用率依旧处于较低水平。

综上所述, 采用静态古诺博弈的情况下每阶段主用户均提供了比次用户需求更多的频谱且差距随博弈阶段数增加而加大, 这将导致频谱资源的二次空闲浪费。而本文算法中, 主用户根据阶段市场容量调整博弈策略, 促使每阶段频谱租借供需趋于平衡, 根据频谱需求定价的模式提高了频谱租借贸易量, 防止了过多频谱“待租”的情况, 提高了频谱利用率。

5 结 论

本文从经济学的角度对认知无线电中动态频谱分配问题进行建模分析, 提出了一种新的基于动态古诺博弈的频谱贸易分配算法。本文首先给出了主用户之间的动态古诺博弈模型, 主用户根据频谱供需变化决定自身频谱出租量及价格, 随后建立了主次用户之间频谱租借博弈模型, 次用户根据频谱需求价值及主用户租借价格决定租借频谱数量。文中详细说明了频谱供需关系变化对用户行为策略的影响, 证明了纳什均衡的存在及有效性。仿真分析了频谱市场容量的改变对用户行为决策的影响, 以及不同情况下本文算法和静态古诺博弈两种算法的主次用户租借策略的影响。相比于静态古诺博弈算法, 本文算法拥有更高的频谱利用率。

参 考 文 献

- [1] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [2] WANG B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(1): 5-23.
- [3] WANG B, WU Y, LIU K J. Game theory for cognitive radio networks: an overview[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(14): 2537-2561.
- [4] 柴争义, 刘芳. 基于免疫克隆选择优化的认知无线网络频谱分配[J]. *通信学报*, 2010, 31(11): 92-100.
CHAI Zheng-yi, LIU fang. Spectrum allocation of cognitive wireless network based on immune clone selection optimization[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(11): 92-100.
- [5] 汤海冰, 胡志刚. 认知无线网络空闲频谱共享的竞争与合作定价[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(1): 173-178.
TANG Hai-bing, HU Zhi-gang. Competitive and cooperative pricing for idle spectrum sharing in cognitive radio networks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(1): 173-178.
- [6] 张北伟, 朱云龙, 胡琨元. 认知无线电中频谱分配方法研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(10): 1304-1309.
ZHANG Bei-wei, ZHU Yun-long, HU Kun-yuan. Spectrum allocation method research of cognitive radio[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(10): 1304-1309.
- [7] ZHU K, NIYATO D, WANG P, et al. Dynamic spectrum leasing and service selection in spectrum secondary market of cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(3): 1136-1145.
- [8] GAO L, WANG X, XU Y, et al. Spectrum trading in cognitive radio networks: a contract-theoretic modeling approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(4): 843-855.
- [9] NI Q, ZARAKOVITIS C C. Nash bargaining game theoretic scheduling for joint channel and power allocation in cognitive radio systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(1): 70-81.
- [10] LI D, XU Y, WANG X, et al. Coalitional game theoretic approach for secondary spectrum access in cooperative cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(3): 844-856.
- [11] GOLDSMITH A J, CHUA S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [12] JIANG Z, GE Y, LI Y. Max-utility wireless resource management for best-effort traffic[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(1): 100-111.