

基于博弈论的认知无线动态频谱分配策略

滕志军^{1,2} 张爱玲² 付雨珊²

1 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学) 吉林 吉林 132012

2 东北电力大学电气工程学院 吉林 吉林 132012

(tengzhijun@163.com)

摘要 对于无线网络频谱分配过程中存在系统收益低和频谱利用率不理想等缺陷,引入干扰价格来控制认知用户发射功率引起的干扰,建立频谱租赁模型,并提出非合作博弈下的动态频谱分配策略,以提高频谱利用率,改善系统收益;创建非合作博弈下的效用函数,推导纳什均衡解,并在权衡网络效用后确定效用权重因子。仿真实验结果证实,所提算法最优发射功率小,频谱利用率高,可获得更优的系统收益。

关键词: 认知无线电;博弈论;频谱分配;纳什均衡;效用函数

中图分类号 TN925

Dynamic Spectrum Allocation Strategy for Cognitive Radio Based on Game Theory

TENG Zhijun^{1,2}, ZHANG Ailing² and FU Yushan²

1 Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin, Jilin 132012, China

2 School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, Jilin 132012, China

Abstract For the defects of low system revenue and unsatisfactory spectrum utilization in the process of spectrum allocation in wireless network, the interference price is introduced to control the interference caused by cognitive users' transmission power, a spectrum leasing model is established, and a dynamic spectrum allocation strategy under non-cooperative game is proposed to improve spectrum utilization and system revenue. Creating the utility function under the non-cooperative game, deducing the Nash equilibrium solution, and determining the utility weight factor after weighing the network utility. Experimental results show that the optimal transmission power of the proposed algorithm is small, the spectrum utilization rate is high, and better system benefits can be obtained.

Keywords Cognitive radio, Game theory, Spectrum allocation, Nash equilibrium, Utility function

随着互联网技术的不断发展,5G 通信系统的出现能满足多样化的场景和极致性能挑战,那么需要对支持 5G 新标准的候选频段进行全面充分的频谱分配。然而,我国正面临着前所未有的频谱资源短缺困境,经研究,认知无线电技术可以提高频谱利用率,有效缓解频谱危机^[1]。认知无线电是一种基于动态频谱分配原理的智能无线电,能够学习和适应外部环境,最大限度地利用未被使用的频谱,从而为 5G 的发展提供灵活性和适应性^[2-3]。

博弈论是“交互的决策论”,是交互式条件下“最优理性决策”^[4-5]。目前已有专家学者运用博弈论对认知无线电系统的频谱分配算法展开了研究。文献[6]采用了双天线降低路由中的信道冲突概率,提出了基于三角剖分分层的自适应路由,有效提高了全局搜索能力,提升了网络系统的吞吐量。文献[7]提出了基于后悔概率求解相关均衡,以小基站为博弈的参与者,将小基站分配给每个授权用户的信道带宽作为该用户的效用,优化了小基站的频谱分配策略,并没有提高各用户自身的效用收益。文献[8]通过引入分组机制、设置干扰半径等,提出了分组拍卖的算法,解决传统分配算法中认知用户收益低、用户自私等问题;文献[9]根据系统的收益函数变化

最快的方向,自适应地进行线性导数迭代,快速实现纳什平衡,授权用户的收益由频谱出租价格和成本等因素决定,但缺乏对认知用户接入频谱时所造成的干扰的考虑。文献[10]提出在不干扰授权用户的条件下使用博弈方法让认知用户利用频谱,该方法太过理想化,很难付诸实施。文献[11]提出了一种最大化业务承载力的碎片感知 RSA 算法,减少了资源分配过程中对相邻链路的干扰,提升了网络系统中频谱资源的可用性和连续性,减少了频谱碎片的产生。文献[12]将随机几何与博弈论相结合,构建一个多层博弈框架模拟用户之间的复杂交互,分析演化博弈模型中演化均衡的存在及其渐近稳定性。文献[13]提出了基于 Q 学习的多用户动态频谱分配算法,以最大化总吞吐量为目标,根据冲突情况和系统结果进行调配,减少了冲突情况,提升了总吞吐量。文献[14]设计了频谱分配 0-1 模型,根据空闲频谱信息、业务需求等信息构建效益矩阵,但该方法的计算量和复杂度都较大。

针对现有博弈模型应用存在的缺陷,本文分别构造认知用户收益和授权用户收益函数,提出了一种由认知用户收益和授权用户收益共同组成的效用函数,结合博弈论思想,设计频谱租赁方案,设置干扰价格,对比传统的频谱分配方案,进

一步提高了频谱分配过程中的系统总收益。

1 基本原理

博弈论通过调整不同用户之间竞争的行为,来获得最大化收益。本文对用户及相应环境进行如下设定^[15]:

1)完整认知网络中存在授权用户和认知用户,且一个基站内有数据传输;

2)全部授权用户、认知用户均能够自适应调制,拥有固定的误码率;

3)授权用户在较宽的频带上工作,认知用户最多从授权用户租用一条信道;

4)频谱池中信道的质量以及相应信道的价格决定认知用户的需求。

其系统网络模型如图 1 所示。

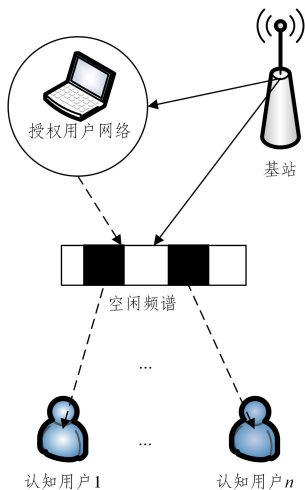


图 1 网络模型

Fig. 1 Network model

2 基于博弈论的频谱分配算法

2.1 博弈论数学模型

博弈论是“交互的决策论”,是交互式条件下“最优理性决策”,是研究具有斗争或竞争性现象的数学理论和方法。频谱分配问题是关系到不同用户频谱策略选择的博弈过程,假设把频谱的分配等价于信道的分配,信道分配问题就可以等价于博弈模型^[16]的输出。在整体模型中,每个认知用户都竞争可用的频谱以最大化其效用,这可以建模为 N 人非合作博弈。然而,这也表示着每个认知用户都为自己的利益而行动,最终使得系统频谱利用率低。从任意角度来看,这对任何用户以及系统都是不利的。因此,本文基于判断系统收益来解决这 N 人非合作博弈,最大程度地提高整体性能并实现相关均衡。

博弈模型各式各样,内容也有所差异,本文所构建的博弈论数学模型的形式如下:

$$T = \{N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\} \quad (1)$$

其中, $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示博弈中的参与者集合,即表示认知用户的集合。定义 $S_i, i \in N$ 是策略空间, S_i 表示在博弈过程中参与者 i 所选择的策略,即由认知用户的发射功率所构成的策略集合。对于每个参与者,效用函数 U_i 表示使用策略 S_i 时自身所能获得的效益。本文中,效用函数由系统收益构

成,系统收益由授权用户和认知用户两部分收益构成。

2.2 效用函数的构建

由于认知用户具有自私性,在频谱分配过程中,总是追求自身利益最大化,因此要求在提高每个认知用户的收益的同时最大化系统的整体收益。本文采用一种频谱出租的方案解决该问题,频谱出租的方案是个人理性的。每个认知用户在授权用户能够承受的干扰范围内租用频谱资源,并根据其获得的权益支付费用。在认知用户向授权用户租用频谱的同时,认知用户使用频谱也会给其他用户带来一定的干扰,授权用户设置干扰价格,干扰价格根据频谱的状态以及认知用户的自身条件动态调整。

必须满足授权用户的信噪比(SINR)大于等于干扰阈值才能保障授权用户的最低服务质量,即:

$$\text{SINR} = \frac{p_i (d_i)^{-\alpha}}{\sum_{j \neq i} p_j (d_j)^{-\alpha} + \sigma^2} \geq b^{\min} \quad (2)$$

其中, p_i 表示认知用户 i 的发射功率; d_i 表示认知用户 i 与授权用户之间的距离, α 表示路径损耗^[17]参数; $\sum p_j (d_j)^{-\alpha}$ 表示用户 j 在通信周期内受到其他用户的干扰之和, p_j 表示认知用户 j 的发射功率; d_j 表示认知用户 j 与授权用户之间的距离,其中 $j \in \{1, 2, \dots, n\}, j \neq i$; σ^2 是一个常量,表示背景噪声; b^{\min} 为授权用户的最低信噪比。

本文将选取在频谱出租过程中的系统所产生收益,来作为整个博弈模型的效用函数,而系统收益主要由两部分构成:认知用户的收益和授权用户的收益。授权用户将其空闲的频谱资源暂时租赁给认知用户使用,通过采取这种租用的方法,授权用户便可获取超额收益,而认知用户则取得了频谱的暂时使用权,以此均能获取巨大利润。

认知用户的收益为:

$$U_i(p_i) = \log_2 \left(1 + \frac{p_i (d_i)^{-\alpha}}{\sum_{j \neq i} p_j (d_j)^{-\alpha} + \sigma^2} \right) - \gamma p_i (d_i)^{-\alpha} \quad (3)$$

其中, p_i 表示认知用户 i 的发射功率; d_i 是认知用户 i 与授权用户之间的距离, α 表示路径损耗参数; $\sum p_j (d_j)^{-\alpha}$ 表示认知用户 j 在通信周期内收到其他用户的干扰总和; σ^2 是一个常量,表示背景噪声; γ 表示干扰价格。

授权用户的收益为:

$$V_m(q_m) = r q_m + \sum_i \gamma p_i (d_i)^{-\alpha} \quad (4)$$

其中, r 表示单位发射功率的收益, q_m 代表授权用户的发射功率。

系统效用函数为:

$$\begin{aligned} Q(p_i, q_m) &= c_1 \sum_m V_m(q_m) + c_2 \sum_{i=1}^N U_i(p_i) \\ &= c_1 r \sum_m q_m + \\ &\quad c_2 \sum_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i (d_i)^{-\alpha}}{\sum_{j \neq i} p_j (d_j)^{-\alpha} + \sigma^2} \right) + \\ &\quad (c_1 - c_2) \sum_i \gamma p_i (d_i)^{-\alpha} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, c_1 和 c_2 代表效用权重因子,本文设置 $c_1 + c_2 = 1$ 。

定义 1 认知用户 j 综合考虑周围通信环境,动态调整自身策略,根据文献^[18]可知,当满足纳什均衡时,产生最大效益时的最优功率应为:

$$p_j^* = \arg \max Q(p_j, q_m) \quad (6)$$

2.3 纳什均衡分析

策略式博弈指基本博弈重复的博弈过程,虽然在形式上

没有较大的差别,但是过程中产生的行为和结果却是完全不同的,所有用户需要考虑当前利益的同时兼顾未来收益,用户的策略选择和结果就更复杂。

由文献[19]可知,若满足如下条件,则该博弈存在纳什均衡:

- 1)策略集合是欧几里得空间 R^N 中非空的闭凸集;
- 2)效用函数能够在其策略集上连续且为拟凹函数,即满足:

$$\frac{\partial^2 Q(p_i, q_m)}{\partial p_i^2} < 0 \quad (7)$$

定理 1 该博弈模型存在纳什均衡解。

证明:对于博弈模型 $T = \{N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\}$,考虑到本文将每个认知用户策略空间的范围都定义在 $[0, p_j^{\max}]$,这正满足非空、有界、闭合区间的条件,因此满足条件 1 的要求。而且效用函数 $Q(\cdot)$ 在这个策略空间上是连续的,因此只需证明条件 2 的要求,即效用函数在该策略空间上为拟凹函数就可证明纳什均衡的存在性。

为了证明效用函数 $Q(p_i, q_m)$ 是拟凹函数,对其求功率 p_i 的二阶偏导数,求关于发射功率的一阶偏导为:

$$\frac{\partial Q}{\partial p_i} = (\ln 2)^{-1} c_2 \cdot \frac{\sum_i (d_i)^{-\alpha_i}}{\sum_i p_i (d_i)^{-\alpha_i} + \sum_{j \neq i} p_j (d_j)^{-\alpha_j} + \sigma^2} + (c_1 - c_2) \sum_i \gamma (d_i)^{-\alpha_i} \quad (8)$$

效用函数关于发射功率的二阶偏导为:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial p_i^2} = -c_2 (\ln 2)^{-1} \cdot \frac{\sum_i \{(d_i)^{-\alpha_i}\}^2}{[\sum_i p_i (d_i)^{-\alpha_i} + \sum_{j \neq i} p_j (d_j)^{-\alpha_j} + \sigma^2]^2} \quad (9)$$

由式(9)可看出 $\frac{\partial^2 Q}{\partial p_i^2} < 0$,该效用函数在 p_i 上是拟凹的,

符合判断条件,说明该博弈模型能使认知用户产生最优功率解,存在纳什均衡解。

令 $\frac{\partial Q}{\partial p_i} = 0$ 可得出最优功率为:

$$p_i = \frac{c_2}{\gamma \ln 2 (c_2 - c_1)} \frac{\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j (d_j)^{-\alpha_j}}{\sum_i (d_i)^{-\alpha_i}} \quad (10)$$

综上所述,本文提出的博弈模型算法存在纳什均衡解。

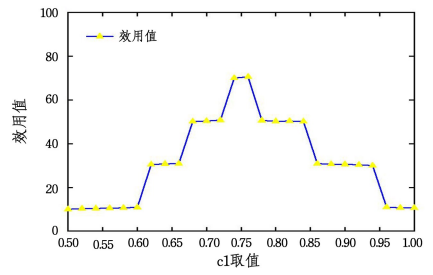
根据式(10)可知,随着权重因子 c_2 的减小,最优发射功率呈现下降的趋势,由于本文建立了信噪比的约束条件,在 c_2 下降到一定的范围之内,最优发射功率变化幅度减缓,对授权用户的干扰减小,同时也对网络的损耗减小,延缓网络的生命周期。

3 仿真结果及性能分析

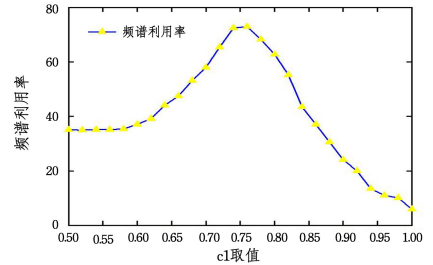
3.1 权重因子的确定

本文中,权重因子的总和设置为 1,即 $c_1 + c_2 = 1$,由于效用函数的最后一项是两个项的减法形式, c_1 取值过小将可能导致效用函数为负,因此仿真中研究 $c_1 \geq 0.5$ 的情况。

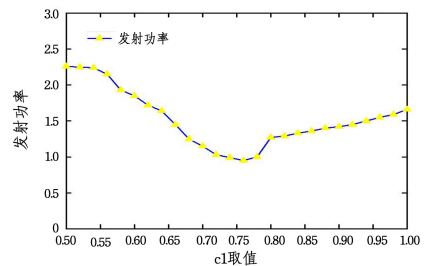
图 2(a)给出了选择不同权重因子时通过此算法获得的网络效用,可以看出 $c_1 = 0.76, c_2 = 0.24$ 时,效用最大;由图 2(b)可知,在 $c_1 = 0.75, c_2 = 0.25$ 时,频谱利用率达到最大;由图 2(c)可知,在 $c_1 = 0.76, c_2 = 0.24$ 时,得到的发射功率最小。因此,综合考虑图 2 的实验结果,选取 $c_1 = 0.76, c_2 = 0.24$ 。



(a)不同权重因子下的网络效用



(b)不同权重因子下的频谱利用率



(c)不同权重因子下的发射功率

图 2 权重因子对系统性能的影响

Fig. 2 Influence of weight factor on system performance

3.2 算法性能分析

为了验证本文方法的性能,设置本文仿真参数如下:带宽 $B = 30$ MHz,误码率 $BER = 10^{-4}$,授权用户最低信噪比设为 $b_{\min} = 9$ dB。为验证本文算法的有效性,选取同频博弈频谱分配算法^[7](Spectrum Allocation Algorithm based on the same frequency game Theory, SAGT)、超模博弈算法^[20](Dynamic spectrum allocation algorithm based on super model game, SGDSA)、频谱随机分配算法^[7](spectrum random allocation algorithm, RSA)、用户竞价算法^[21](Vickrey-Clarke-Groves, VCG)进行实验对比。

图 3 给出了 5 种不同模型在最优收敛后获得的认知用户的最优发射功率,SGDSA 算法的发射功率最大,SAGT 算法的发射功率次之,两种算法的收敛速度较慢,RSA 算法和 VCG 算法实现收敛的迭代次数分别为 16 次和 15 次,该算法在第 11 次迭代时达到收敛,实现了较低的发射功率^[22],有效减弱了用户之间产生的干扰,提高了信道的通信水平。

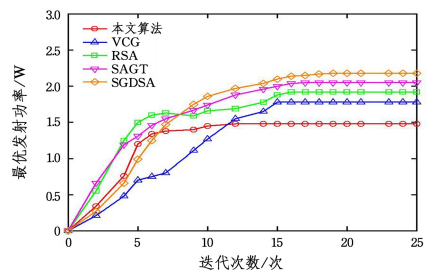


图 3 不同算法的认知用户最优发射功率比较

Fig. 3 Comparison of optimal transmission power of cognitive users with different algorithms

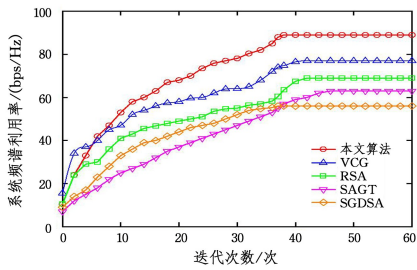


图4 不同算法的频谱利用率比较

Fig. 4 Comparison of spectrum utilization of different algorithms

从图4的仿真结果可以看出, RSA 频谱利用率较低, VCG 算法和 SAGT 算法都可以抑制同频干扰, 但 SAGT 频谱利用率较低, 比 RSA 算法提高了 11.6% 左右, 但算法复杂度较高; SGDSA 算法频谱利用率低且算法复杂度高。对本文算法进行优化, 达到一个相对稳定的状态, 与 VCG 算法相比性能提升了 15.9% 左右。本文算法建立频谱租赁模型, 干扰定价作为一种经济杠杆, 在平衡用户双方博弈策略时, 在经济调控中发挥了不错的作用, 对充分激发授权用户共享授权频段的积极性, 保护自身合理利益起到积极作用。在提高频谱利用率的同时, 仅略微降低了网络吞吐量, 反而获得了授权用户共享授权频谱的积极性, 进一步体现了本文算法在识别网络资源分配方面的有效性。

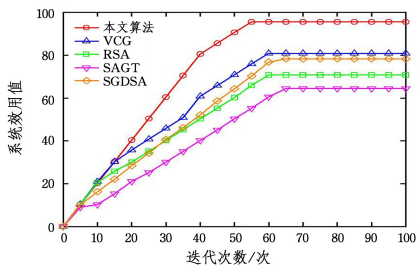


图5 不同算法效用值的收敛情况

Fig. 5 Convergence of utility values of different algorithms

由图5可以看出, 各算法产生的网络收益逐渐收敛, 但本算法收敛速度更快。可以看出, 算法迭代了约 50 次后, 所有算法效用不变, 系统达到纳什均衡, 验证了算法的收敛性。当 5 种算法全部收敛时, 该算法的效用分别比 VCG 算法、RSA 算法、SAGT 算法、SGDSA 算法提高了约 18.12%, 35.01%, 48.26%, 21.98%。因此更加证实了采用本文算法能够进一步获得频谱分配过程中的系统总收益, 提高了系统效用。

结束语 本文针对认知无线网络频谱分配过程中频谱利用率低、网络总收益不高的问题, 引入博弈论, 设计了频谱租赁方案, 调整认知用户的发射传输功率, 引入干扰价格衡量授权用户受到的干扰因素, 利用不断更新的网络信息寻找最优发射功率提高网络效用价值, 得到较高的频谱利用率。仿真实验结果验证了本文算法的有效性及其可行性。由于本文采用博弈的方式, 在一定程度上并未考虑分配的公平性, 造成易陷入局部最优。因此, 下一阶段将在这项研究的基础上优化算法, 以实现分配的公平性, 提高系统性能。

参考文献

[1] KIM S. Heterogeneous network spectrum allocation scheme

based on three-phase bargaining game[J]. *Computer Networks*, 2020, 177: 107301-107318.

- [2] SHE R, ZHANG N C, WANG Y R, et al. Research on NOMA system of 5G communication cognitive radio for power Internet of things[J]. *China Electric Power*, 2021, 54(5): 35-45.
- [3] YU L Z, XIAO B, SUN L G. Conditional depth convolution generation countermeasure network method for wind and light output scene generation[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2021, 41(6): 90-99.
- [4] MA G, JIA S M. Immune optimization of spectrum allocation in cognitive car networking[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Edition)*, 2021, 42(5): 62-67.
- [5] MISHRA S, SINGH S S, MISHRA B S P, et al. Spectrum allocation in cognitive radio: A PSO-based approach[J]. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2019, 63(1): 23-42.
- [6] JIANG Z H, QIN N N. Cognitive spectrum allocation based on frog leaping game optimization algorithm[J]. *Journal of Sensing Technology*, 2022, 35(6): 800-808.
- [7] HAN Z H, ZHAO D L, WANG G. Research on spectrum allocation strategy based on game theory in ultra-dense networks[J]. *Radio Engineering*, 2021, 51(1): 19-24.
- [8] CHEN H L, TENG Z M, SUN H Y, et al. Spectrum allocation algorithm for cognitive radio based on block auction[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2021, 41(2): 72-78.
- [9] XIE H, LI Q L, XIE W. Idle spectrum allocation for multiple authorize users base on game theory[J]. *Applied Science and Technology*, 2014, 41(6): 17-21.
- [10] JOSE R V, PLA V, GUIJARRO L, et al. Flexible dynamic spectrum allocation in cognitive radio networks based on game-theoretical mechanism design[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, 64(11): 164-177.
- [11] WANG S C, CHEN X J, HE R X. Fragment-aware routing and spectrum allocation algorithm based on traffic carrying capacity in optical networks[J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2022, 59(7): 122-130.
- [12] DU H L, SHAO X, ZHANG W D. Analysis of multi-layer game model construction for dynamic spectrum allocation[J]. *Telecommunications Technology*, 2022, 62(7): 922-928.
- [13] ZHOU X, HE P F, CHEN Y, et al. Multi-user dynamic spectrum allocation algorithm in hybrid spectrum sharing mode[J]. *Journal of Radio Science*, 2021, 36(6): 977-985.
- [14] DONG X Q, CHEN L L, ZHENG G Z, et al. Spectrum resource allocation method for maximizing transmission rate in heterogeneous cognitive wireless networks[J]. *Journal of Communication*, 2019, 40(9): 124-135.
- [15] SUN L, MAO Z Y, KANG J F, et al. Spectrum allocation algorithm for maritime relay communication based on maximizing energy efficiency[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(8): 2661-2667.
- [16] XIE X Z, LI C W, YANG H L. Dynamic spectrum allocation scheme based on game theory in D2D communication[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 40(2): 43-48.
- [17] ZHANG D M, WANG Y R, XU H, et al. Spectrum allocation

strategy based on energy efficiency optimization in cognitive smart grid[J]. *Control and Decision-making*, 2021, 36(8): 1901-1910.

[18] YU Y S, LI C R, XIE J L. Spectrum sharing algorithm of main service game based on recognition[J]. *Computer Applications and Software*, 2020, 37(3): 109-116.

[19] CHEN X Y, CAO J D, ZHAO F, et al. Nash equilibrium analysis of hybrid dynamic game system based on event-driven control [J]. *Control Theory and Application*, 2021, 38(11): 1801-1808.

[20] LI X L, HOU D, TIAN J. Distributed power control technology for cognitive wireless Ad-hoc network based on super model game[J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(9): 117-131.

[21] KASBEKAR G S, SARKAR S. Spectrum pricing games with spatial reuse in cognitive radio networks[J]. *IEEE Areas Commun*, 2012, 30(1): 153-164.

[22] WANG P C, YIN X J, LI L R. An Improved Seagull Optimization Algorithm with Learning[J]. *Journal of Zhengzhou University(Engineering Science)*, 2022, 43(6): 8-14.



TENG Zhijun, born in 1973, doctor, professor. His main research interest includes wireless communication technology.



ZHANG Ailing, born in 1998, master. Her main research interest includes cognitive radio spectrum allocation.