

认知无线网中一种基于博弈论的低复杂度联合资源共享机制

窦彦智^① 王满喜^② 白铂^{*①} 陈巍^① 曹志刚^①

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室 洛阳 471003)

摘要: 在一类典型的认知无线网络中, 多个次级用户通过支付费用竞争租用主用户授权频带的子带来传输信息。该文针对此类系统通过博弈论方法联合优化次级用户的发射功率和子带分配, 及主用户的定价系数, 同时最大化主用户和次级用户的收益。具体而言, 该文基于逆向归纳法, 将博弈问题分解为功率控制、子带分配和价格调整等3个耦合的子问题, 并逐一求解, 从而得到整个博弈的子博弈精炼纳什均衡。最后, 该文基于理论分析结果, 提出一种博弈均衡求解算法。仿真结果验证了该文的理论推导结果和该算法的有效性。

关键词: 认知无线电(CR); 动态完全信息博弈; 子带分配; 功率控制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)01-0158-05

DOI: 10.11999/JEIT140326

A Mechanism for Low-complexity Joint Resources Sharing Based on Game Theory in Cognitive Radio Networks

Dou Yan-zhi^① Wang Man-xi^② Bai Bo^① Chen Wei^① Cao Zhi-gang^①

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics & Information System, Luoyang 471003, China)

Abstract: In a typical cognitive wireless network, multiple secondary users compete to rent for the sub-bands in the authorized spectrum of primary users to transfer data. This paper focuses on simultaneously maximizing the payoff of both primary users and secondary users by jointly optimizing transmit powers of secondary users, sub-band allocation of secondary users, and pricing coefficients of primary users. Specifically, based on backwards induction, this paper decomposes the whole game into three sub optimization problems, *i.e.*, power control problem, sub-band allocation problem, and price adjustment problem. These problems are then solved one by one to obtain the sub-game perfect Nash equilibrium of the whole game. Finally, this paper proposes an algorithm to search for Nash equilibrium. Simulation results verify the theoretical deduction results and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Cognitive Radio (CR); Dynamic games of complete information; Sub-band allocation; Power control

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术旨在允许次级用户(Secondary User, SU)监测当前频谱环境, 在避免对授权用户(Primary User, PU)造成有害干扰的情况下利用空闲频谱来传输信息, 以达到大幅提高频谱利用率, 增加无线通信系统容量的目的。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)研究了美国境内的频谱利用情况, 发现已经注册的频谱并没有被充分利用, 提出将CR定位为未来通信的发展方向^[1]。

基于认知无线电的频谱共享主要探讨SU与PU之间、SU之间协同接入可用信道的方式。采用的主要理论工具和研究方法包括图论和竞价拍卖理论^[2,3]。功率控制则在经典注水功率分配算法的基础上, 采用博弈论方法来优化SU的发射功率, 避免对PU通信造成有害干扰^[4,5]。然而, 目前已有的认知无线网模型大多只包含一个PU, 如文献[2]。同时, 部分研究还规定每个频谱子带至多能被一个SU占用, 如文献[2,3]。文献[4,5]要求每个SU都知道所有PU所受的干扰情况, 来完成自身的功率控制过程。而文献[6-11]则分别提出了利用其他不同的无线网络模型进行动态频谱分配的方法。与前述研究成果不同, 本文针对多次级用户和多主用户并存的典型认知无线网络场景, 研究动态频谱共享和功率控制问题。本文研究的认知无线网络模型包含多个

2014-03-13 收到, 2014-08-07 改回

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室开放课题和清华大学电子工程系传信研究基金资助课题

*通信作者: 白铂 eebobai@tsinghua.edu.cn

PU, 且允许每个频谱子带被多个基于虚拟多天线技术的 SU 占用。这样通过提供给 SU 更多的选择性来进一步增加 SU 的收益。针对该网络模型, 本文采用博弈论方法联合优化次级用户的发射功率和子带分配, 以及主用户的定价系数, 以同时最大化主用户和次级用户的收益。

本文的结构如下: 第2节提出认知无线网络模型; 第3节建立资源共享博弈模型, 并将博弈均衡问题的求解分解为3个子优化问题; 第4节通过博弈分析, 求解每一个子问题, 并提出博弈均衡的求解算法; 第5节通过仿真验证所提出的理论; 第6节是本文的结论。

2 认知无线网络模型

考虑图1所示的认知无线网络, 其中, J 个 PU 记为 P_1, P_2, \dots, P_J ; K 个次级用户对记为 $(S_1, D_1), (S_2, D_2), \dots, (S_K, D_K)$ 。PU 的授权频带分为 M 个子带。在任何时刻, 每个 SU 只被允许使用至多一个子带。假设子带分配仅在 SU 网络里决定, 对 PU 不可见。

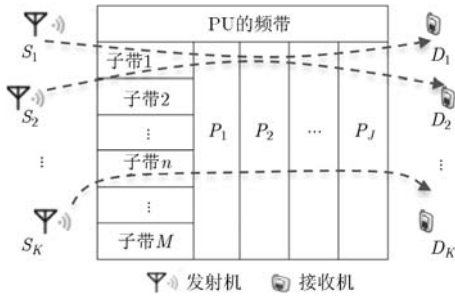


图1 典型认知无线网络模型, 其中 $\mathcal{L}_1 = \{S_1, S_2\}$

l_{S_k} 表示分配给 S_k 的子带, 并且 $l_{S_k} \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。那么, 每种子带分配策略可表示为向量 $\mathbf{l}_S = [l_{S_1}, l_{S_2}, \dots, l_{S_K}]$ 。如图1所示, 模型允许不同的 SU 接入同一个子带, 并用 \mathcal{L}_m 表示共享子带 m 的 SU 集合, 即 $\mathcal{L}_m = \{S_k : l_{S_k} = m, k = 1, 2, \dots, K\}$ 。 \mathcal{L}_m 为空集表示没有 SU 选择子带 m 。信道增益矩阵记为 \mathbf{H} 。

ω_{S_k} 表示 S_k 的发射功率, K 个 SU 的发射功率可表示为向量 $\boldsymbol{\omega}_S = [\omega_{S_1}, \omega_{S_2}, \dots, \omega_{S_K}]$ 。 \mathbf{Q}_P 表示 PU 的干扰容限矩阵, 即 $\mathbf{Q}_P = [Q_{P_1}, Q_{P_2}, \dots, Q_{P_J}]$, 则每个 PU 所受的干扰强度要小于其干扰容限, 即

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\omega}_S^T \leq \mathbf{Q}_P^T \quad (1)$$

其中, “ \leq ” 对向量中的每个元素成立。

3 资源共享博弈模型

3.1 博弈行为的时序

在认知无线电中, PU 对频带有优先使用权和出租定价权。SU 只能根据 PU 提出的定价系数选择

最优频带和最佳发射功率。本文的研究目标是同时最大化 PU 和 SU 的收益函数, 故 PU 可视为博弈的领导者(Leader), 而 SU 则为跟随者(Follower)。下面给出各参与者博弈行为的时序:

(1) PU 同时选择定价系数 β_j , 得到定价系数向量 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_J]$ 。

(2) 在 SU 网络中确定子带分配 l_{S_k} , 得到子带分配矩阵 $\mathbf{l}_S = [l_{S_1}, l_{S_2}, \dots, l_{S_K}]$ 。

(3) SU 决定其发射功率 ω_{S_k} , 得到发射功率矩阵 $\boldsymbol{\omega}_S = [\omega_{S_1}, \omega_{S_2}, \dots, \omega_{S_K}]$ 。

根据文献[12]的结论, 该博弈模型是一种动态完全信息博弈。

3.2 SU 的收益函数

SU 的收益 π_{S_k} 等于收入 R_k 减去支出 C_k , 即

$$\pi_{S_k} = R_k - C_k \quad (2)$$

其中, R_k 为 SU 租用某条子带时获得的信道容量, C_k 为 SU 支付给所有 PU 的租金之和。这里给每个 PU 的租金等于该 PU 的定价系数乘以该 PU 所受到来自各个 SU 的干扰, 即

$$C_k = \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_{\cdot k} \omega_{S_k} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{H}_{\cdot k}$ 表示 \mathbf{H} 矩阵的第 k 列。式(3)中的收入和支出都乘以系数 1 转化成价格, 以统一量纲。考虑 $|\mathcal{L}_m|$ 个 SU 共享子带 m 的情况。假设在子带 m , SU 网络中发射端距离较近, 故可视为 $|\mathcal{L}_m|$ -输入 $|\mathcal{L}_m|$ -输出的等效虚拟多输入多输出 (Multiple-Input and Multiple-Output, MIMO) 信道。根据文献[13]的结论, 子带 m 上等效虚拟 MIMO 信道的容量为

$$\sum_{S_k \in \mathcal{L}_m} R_k = \sum_{S_k \in \mathcal{L}_m} \sum_{D_l \in \mathcal{L}_m} I(S_k; D_l) = \sum_{S_k \in \mathcal{L}_m} \ln(1 + \lambda_k[m] \omega_{S_k}) \quad (4)$$

其中, $I(S_k; D_l)$ 表示子带 m 中 S_k 和 D_l 的互信息, $\lambda_k[m]$ 是 $\mathbf{G} \{S_k \in \mathcal{L}_m\} \mathbf{G}^T \{S_k \in \mathcal{L}_m\}$ 中第 k 个非零特征值, 而 $\mathbf{G} \{S_k \in \mathcal{L}_m\}$ 是 SU 网络中满足 $S_k \in \mathcal{L}_m$ 的收发端信道增益矩阵 \mathbf{G} 的子阵。

基于比例公平原则 (Proportional Fairness Criterion, PFC), 本文将 \mathcal{L}_m 集合的总收入分配给每一个 SU。根据文献[14]的结论, 如果收入分配满足 PFC, 则合作博弈的纳什议价解可保证整个系统达到帕累托最优。

定理 1 如果采用 PFC 将 \mathcal{L}_m 集合总收入分配给每个 SU, 则每个 SU 的速率为

$$R_k = \ln(1 + \lambda_k[m] \omega_{S_k}) \quad (5)$$

相应收益为

$$\pi_{S_k}(\omega_{S_k}, \mathbf{l}_S, \boldsymbol{\beta}) = \ln(1 + \lambda_k[m] \omega_{S_k}) - \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_{\cdot k} \omega_{S_k}, \quad \forall S_k \in \mathcal{L}_m \quad (6)$$

3.3 PU 的收益函数

每个PU的收益等于从所有SU收取的租金和,即

$$\pi_{P_j}(\omega_S, l_S, \beta_j) = \beta_j \omega_S \mathbf{H}_j. \quad (7)$$

其中, \mathbf{H}_j 表示 \mathbf{H} 矩阵的第 j 行。

3.4 均衡的定义

本文已说明前述博弈模型属于动态完全信息博弈,下面要求解该博弈模型的子博弈精炼纳什均衡。根据文献[12],本文有如下定义:

定义 1 若定价系数 $\beta^* = [\beta_1^* \beta_2^* \cdots \beta_J^*]$, 子带分配 $l_S^* = [l_{S_1}^*(\beta^*) \ l_{S_2}^*(\beta^*) \ \cdots \ l_{S_K}^*(\beta^*)]$, 发射功率 $\omega_S^* = [\omega_{S_1}^*(l_S^*, \beta^*) \ \omega_{S_2}^*(l_S^*, \beta^*) \ \cdots \ \omega_{S_K}^*(l_S^*, \beta^*)]$ 满足功率限制式(1)和式(8)~式(10):

$$\beta_j^* = \arg \max_{\beta_j \geq 0} \pi_{P_j} \left(\omega_S^* \left(\beta_j, \beta_{-j}^*, l_S^* \left(\beta_j, \beta_{-j}^* \right) \right), l_S^* \left(\beta_j, \beta_{-j}^* \right), \beta_j, \beta_{-j}^* \right); \forall j \quad (8)$$

$$l_{S_k}^* \left(\beta^* \right) = \arg \max_{l_{S_k} \in \{1, 2, \dots, M\}} \pi_{S_k} \left(\omega_S^* \left(\beta^*, l_{S_k} \left(\beta^* \right), l_{-S_k}^* \left(\beta^* \right) \right), l_{S_k} \left(\beta^* \right), l_{-S_k}^* \left(\beta^* \right), \beta^* \right); \forall \beta^*, k \quad (9)$$

$$\omega_{S_k}^* \left(l_S^*, \beta^* \right) = \arg \max_{\omega_{S_k} \geq 0} \pi_{S_k} \left(\omega_{S_k} \left(l_S^*, \beta^* \right), \omega_{-S_k}^* \left(l_S^*, \beta^* \right), l_S^* \left(\beta^* \right), \beta^* \right); \forall \beta^*, l_S^*, k \quad (10)$$

则 $(\beta^*, l_S^*, \omega_S^*)$ 构成子博弈精炼纳什均衡。其中 β_{-j}^* , $l_{-S_k}^*(\beta^*)$ 和 $\omega_{-S_k}^*(l_S^*, \beta^*)$ 分别代表在给定 β_j , $l_{S_k}(\beta^*)$, $\omega_{S_k}(l_S^*, \beta^*)$ 时的纳什均衡。

3.5 逆向归纳法分解博弈模型

按照逆向归纳法^[12],本文提出的博弈模型可以分解为3个子优化问题。

(1)功率控制问题:PU定价系数 β^* 、次级网络子带分配 l_S^* 已知且固定。对 S_k 求满足纳什均衡的发射功率 $\omega_{S_k}^*$ 的问题,可表示成式(11)所示的优化问题

$$\max_{\omega_{S_k} \geq 0} \pi_{S_k} \left(\omega_{S_k} \left(l_S^*, \beta^* \right), \omega_{-S_k}^* \left(l_S^*, \beta^* \right), l_S^* \left(\beta^* \right), \beta^* \right) \quad (11)$$

(2)子带分配问题:PU定价系数 β^* 已知且固定,通过上一个功率控制问题可求最优发射功率 ω_S^* 。对 S_k 求满足纳什均衡的子带选择 $l_{S_k}^*$ 的问题,可表示成式(12)所示的优化问题:

$$\max_{l_{S_k} \in \{1, 2, \dots, M\}} \pi_{S_k} \left(\omega_S^* \left(\beta^*, l_{S_k} \left(\beta^* \right), l_{-S_j}^* \left(\beta^* \right) \right), l_{S_k} \left(\beta^* \right), l_{-S_j}^* \left(\beta^* \right), \beta^* \right) \quad (12)$$

(3)价格调整问题:通过之前功率控制问题和子带分配问题可求得最优发射功率 ω_S^* 和最优子带分配 l_S^* 。对 P_j 求满足功率约束式(1)和纳什均衡的定价系数 β_j^* 的问题,可表示成式(13)所示的优化问题

$$\begin{aligned} & \max_{\beta_j \geq 0} \pi_{P_j} \left(\omega_S^* \left(\beta_j, \beta_{-j}^*, l_S^* \left(\beta_j, \beta_{-j}^* \right) \right), l_S^* \left(\beta_j, \beta_{-j}^* \right), \beta_j, \beta_{-j}^* \right), \\ & \text{s.t. } \mathbf{H} \omega_S^T \leq \mathbf{Q}_P^T \end{aligned} \quad (13)$$

4 资源共享博弈分析

4.1 最优功率控制

对 π_{S_k} 求极大值点,且发射功率要大于0,得

$$\omega_{S_k}^* = \max \left\{ \frac{1}{\beta \mathbf{H}_{\bullet k}} - \frac{1}{\lambda_k [m]}, 0 \right\} \quad (14)$$

因为 $\omega_{S_k}^*$ 在给定 β^* 和 l_S^* 的情况下最大化了收益 π_{S_k} ,所以 $\omega_{S_k}^*$ 就是功率控制问题的纳什均衡解。

把式(14)代入到式(6),得最大收益表达式为

$$\pi_{S_k} = \ln \left(1 + \max \left\{ \frac{\lambda_k [m]}{\beta \mathbf{H}_{\bullet k}} - 1, 0 \right\} \right) - \max \left\{ 1 - \frac{\beta \mathbf{H}_{\bullet k}}{\lambda_k [m]}, 0 \right\} \quad (15)$$

4.2 子带分配算法

在SU从一个子带跳转到另外一个子带的过程中,需要考虑的参数有 $\lambda_k [m]$ 和 $h_{jk} [m]$ 。所以很难找到一个非穷举搜索的算法求解纳什均衡。本文则通过记录已经比较过的结果来减少将来的比较次数。

下面给出一个搜索子带分配博弈纳什均衡的算法流程。该算法分为两个步骤,(1)计算所有子带分配情况下每个SU的收益。对于 M 个子带, K 个SU,一共有 M^K 种子带分配方式。(2)比较响应情况,如果某种子带分配下所有SU收益都高于“邻近”情况,则可以判断其为纳什均衡。“邻近”的定义是保持其他 $K-1$ 个SU所选子带不变,仅改变剩下的一个SU的占用子带,共有 $M-1$ 种情况。

4.3 最优定价系数

通过解决功率控制问题,可知固定子带分配 l_S^* ,在对于任意给定的定价系数 β 的情况下,可以唯一确定SU的最优发射功率 ω_S^* 。PU要在不违反功率限制的情况下通过相互竞争来最大化它们的收益。现在,在固定子带分配的情况下,分析博弈模型均衡的存在性。文献[15]中证明 n 人博弈问题,如果每个参与者的纯战略空间 S_i 是欧式空间上的非空凸集,且收益函数 $\pi_i(S)$ 连续且对 S_i 拟凸,则这一博弈一定存在纯战略纳什均衡。依此可以方便证明对于给定满足式(8)规定的SU集合 $\Omega \subset \{1, 2, \dots, K\}$ 和给定的子带分配策略 l_S^* ,一定存在纯战略纳什均衡 (β^*, ω_S^*) 。定价系数博弈的均衡并不是唯一的,这里选择一个特例,考虑令 $\beta = \alpha \mathbf{c}$,其中 \mathbf{c} 是一个预定的常向量,表示PU定价系数间的相对关系。可以得到如下结论:

定理 2 如果PU选择 $\beta = \alpha \mathbf{c}$,其中 \mathbf{c} 是一个常矩阵, α 是一个正实数,那么SU最优子带分配

是独立于 α 的。

该定理表明如果定价系数 β_j 以一个固定速率增大或者减小，那么子带分配博弈的纳什均衡是固定的，这样就可以把子带分配问题从博弈模型中分离出来。

5 仿真验证

本节给出仿真结果，验证前述理论推导和所提算法。考虑 2 个 PU，2 个子带，2 个 SU 的情形。可知子带分配一共有 4 种策略，分别为： S_1 和 S_2 共用子带 1，记为 $\{l_{s_1} = 1, l_{s_2} = 1\}$ ； S_1 占用子带 2， S_2 占用子带 1，记为 $\{l_{s_1} = 2, l_{s_2} = 1\}$ ； S_1 占用子带 1， S_2 占用子带 2，记为 $\{l_{s_1} = 1, l_{s_2} = 2\}$ ； S_1 和 S_2 共用子带 2，记为 $\{l_{s_1} = 2, l_{s_2} = 2\}$ 。把这 4 种策略分别标记为策略 1，策略 2，策略 3，策略 4。

固定 c ，改变 α ，求解纳什均衡策略，得到图 2。可以看到，在 $\alpha \in [1, 10]$ ，策略 2 一直都是纯策略纳什均衡，验证了定理 2。在 $\alpha = 4$ 点之后，策略 4 也成为纳什均衡策略。

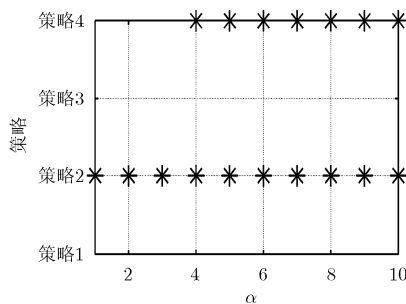


图 2 固定 c ，改变 α 时的纳什均衡

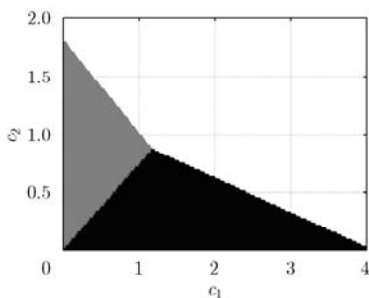


图 3 不同的定价系数组合对子带分配的影响

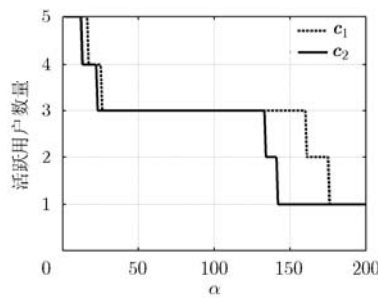


图 4 α 和 c 对活跃用户数量的影响

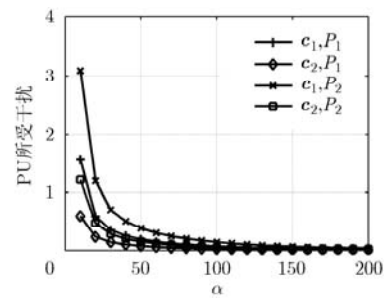


图 5 α 和 c 对 PU 所受干扰的影响

通过改变定价系数组合 $c = (c_1, c_2)$ ，研究不同定价系数对于子带分配的影响。如图 3， c_1 从 0 取到 4， c_2 从 0 取到 2，2 维平面被分成了 3 部分。灰色区域代表策略 2 是纳什均衡的，黑色部分表示策略 4 是纳什均衡的。白色区域表示因为定价太高，两个 SU 都负担不起租用子带的费用，所以没有纳什均衡。

现在考虑 2 个 PU，2 个子带，5 个 SU 的情形。令 α 从 1 取到 200， c 分别等于 c_1 和 c_2 ，图 4 给出了活跃用户数量的曲线图。这里活跃用户定义为发射功率大于 0 的 SU。可以看出，随着 α 的增加，活跃用户数量越来越少。但是对于不同的定价系数组合 c ，变化的情况是不同的。

图 5 给出 α 和 c 对 PU 所受干扰的影响。从图中可以看出， α 越高，则 PU 所受干扰越小，所以 PU 可以通过修改定价系数来实现功率控制。

6 结束语

本文研究了多 PU、多 SU、多可用子带的认知无线网络中的频谱分配和功率控制问题。首先构建认知无线网络的博弈模型，该模型将 SU 网络等效为虚拟 MIMO 信道，并采用比例公平原则分配收益，从而允许不同的 SU 通过共享子带的方式收发数据。通过给出 PU 和 SU 的行为时序，证明了该模型是一种动态完全信息博弈，同时定义了该博弈的子博弈精炼纳什均衡。随后，基于逆向归纳法将上述博弈模型分解成 3 个子优化问题，并逐一求解。在此基础上，提出了一种搜索纯策略纳什均衡的算法。理论分析证明了 PU 定价系数满足固定的线性关系时，子带分配结果稳定不变，即子带分配问题可独立求解。因此，本文的理论分析和所提算法为未来认知无线网络的设计提供了理论基础。

参考文献

[1] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force report[R]. United States: FCC, 2002.

[2] Xiao Y, Bi G, and Niyato D. Distributed optimization for cognitive radio networks using Stackelberg game[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), Singapore, 2010: 77-81.

[3] Xiao Y, Bi G, and Niyato D. A simple distributed power control algorithm for cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(11): 3594-3600.

[4] Ghasemi A and Sousa E S. Fundamental limits of

- spectrum-sharing in fading environments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(2): 649-658.
- [5] Hou Y T, Shi Y, and Sherali H D. Spectrum sharing for multi-hop networking with cognitive radios[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 146-155.
- [6] Ni Q, Zhu R, Wu Z, et al. Spectrum allocation based on game theory in cognitive radio networks[J]. *Journal of Networks*, 2013, 8(3): 712-722.
- [7] Lam A, Li V O K, and Yu J J Q. Power-controlled cognitive radio spectrum allocation with chemical reaction optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(7): 3180-3190.
- [8] Zhang Z, Long K, and Wang J. Self-organization paradigms and optimization approaches for cognitive radio technologies: a survey[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(2): 36-42.
- [9] Gardellin V, Das S K, and Lenzini L. Self-coexistence in cellular cognitive radio networks based on the IEEE 802.22 standard[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(2): 52-59.
- [10] Tachwali Y, Lo B F, Akyildiz I F, et al. Multiuser resource allocation optimization using bandwidth-power product in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(3): 451-463.
- [11] Treeumnuk D, Macdonald S L, and Popescu D C. Optimizing performance of cooperative sensing for increased spectrum utilization in dynamic cognitive radio systems[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, Hungary, 2013: 4656-4660.
- [12] Robert G. A Primer in Game Theory[M]. 1st Edition, London: FT Prentice Hall Publisher, 1992: 122-129.
- [13] Telatar E. Capacity of multi antenna Gaussian channels[J]. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, 10(6): 585-595.
- [14] Kelly F P, Maulloo A K, and Tan D K H. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1998, 49(3): 237-252.
- [15] Debreu G. A social equilibrium existence theorem[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1952, 38(10): 886.
- 窦彦智: 男, 1990 年生, 博士生, 研究方向为认知无线电、频谱共享、功率控制等.
- 王满喜: 男, 1979 年生, 助理研究员, 研究方向为无线通信与信道建模、复杂电磁环境效应机理等.
- 白 铂: 男, 1982 年生, 讲师、硕士生导师, 研究方向为无线通信、信息论、随机图、组合优化等.
- 陈 巍: 男, 1980 年生, 教授、博士生导师, 研究方向为认知与协同通信、信息论、网络编码等.
- 曹志刚: 男, 1939 年生, 教授、博士生导师, 研究方向为无线通信、数字通信、卫星通信等.