

授权链路保护的频谱分配算法

冯春燕, 郭义武, 薛钰, 郭彩丽

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 海淀区 100876)

【摘要】研究了在保护授权链路的前提下认知无线网络(CRN)的频谱优化分配问题。基于博弈论提出了一种新型的频谱分配模型,设计了一种保护授权链路的快速收敛的频谱分配算法(FCAPLL)。仿真分析证明,FCAPLL算法能在保护授权链路的前提下对认知无线电(CR)链路进行最优化频谱分配,有较快的收敛速度;同时仿真给出了网络性能参数与比例因子的关系,为FCAPLL应用于不同性能要求的CRN提供了依据。

关键词 认知无线网络; 严格势力场博弈; 保护授权链路; 频谱分配
中图分类号 TN915.01 **文献标识码** A

Spectrum Allocation Algorithm Based on Protecting Licensed Link

FENG Chun-yan, GUO Yi-wu, XUE Yu, and GUO Cai-li

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876)

Abstract The optimization of spectrum allocation based on protecting licensed link in Cognitive Radio Network is researched. A new model of spectrum allocation based on game theory is presented and a fast convergent spectrum allocation algorithm for protecting licensed link is proposed. The simulation analysis shows that the algorithm has fast convergent speed and achieves spectrum allocation optimization of cognitive radio link based on protecting licensed link; the simulation also presents the relation between network performance parameters and proportional factor, which provides a basis to algorithm application for cognitive radio network with different performance requirement.

Key words cognitive radio network; exact potential game; protect licensed link; spectrum allocation

认知无线电作为一种革命性智能频谱感知技术,能共享授权频谱,可显著提高频谱利用率^[1-4]。但CRN共享授权频谱会对授权网络造成干扰,如何协调CR链路在保护授权链路的基础上最优化频谱分配是一个需要解决的问题。本文针对现有频谱分配研究大多基于二进制干扰模型和不考虑授权用户存在的问题,基于博弈论提出了一种新型频谱分配模型,设计了一种保护授权链路的快速收敛的频谱分配算法(fast convergent spectrum allocation algorithm based on protecting licensed link, FCAPLL)。仿真分析证明,相对于只考虑CR链路的算法,FCAPLL算法在CR链路SINR基本没有减小的前提下显著减小了授权链路承受的干扰,有较快的收敛速度;同时仿真结果给出了授权链路承受干扰和CR链路的SINR与比例因子 λ 的关系,为FCAPLL应用于不同性能要求的CRN提供了参数。本文的“频谱”与“信

道”同义,文中交叉使用。

1 问题描述

分布式CRN和授权网络的共存网络如图1所示,图中箭头表示链路由发射机结点指向接收机结点。假定 $ch = \{a, b, c\}$ 为两种网络的共用信道集,授权链路A、B、C分别使用信道a、b、c,CR链路的可用信道集均为 $\{a, b, c\}$,即CR链路可接入任何一个信道。

在CR链路和授权链路共存的网络拓扑下,需要在保护授权链路的前提下对CR链路进行频谱最优化分配。现有的频谱分配研究大多先通过授权链路的干扰范围来定义可用频谱,基于着色原理建立二进制干扰模型来分配频谱,过分简化了授权链路的受干扰情况^[5-9],这种简化与实际情况不符。而文献[10-12]根据博弈论提出了各自的频谱分配模型和算法,但大多也是简化了授权链路受干扰情况。文献

收稿日期: 2007-06-19; 修回日期: 2007-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60772110)

作者简介: 冯春燕(1963-),女,教授,博士生导师,主要从事宽带通信网络理论与技术、无线通信理论与技术的研究。

[13]考虑了同信道上的累积干扰效应(aggregate interference effects),但是算法是基于CR链路之间的干扰大小来分配频谱的,没有考虑授权链路的存在。上述频谱分配模型和算法对于图1所示的问题都已经无能为力。为了解决这种问题,需要同时考虑授权链路和CR链路的累积干扰效应,并且需将授权链路的受保护地位放到首位。

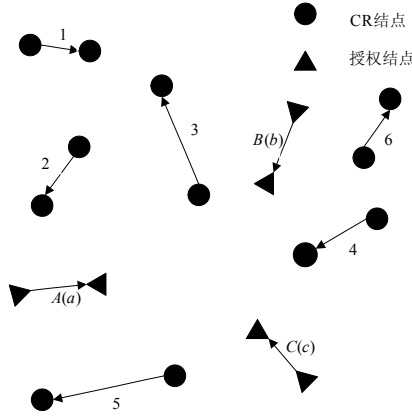


图1 分布式CRN和授权网络的共存关系

2 授权链路保护的频谱分配模型

2.1 模型定义

本文在文献[13]的基础上,不仅考虑了CR链路的信息,而且考虑了授权链路的信息,提出了保护授权链路的频谱分配模型为:

$$G = \left\langle N_c, N_p, \{A_i\}_{i \in N_c}, \{S_k\}_{k \in N_p}, \{U_i\}_{i \in N_c} \right\rangle \quad (1)$$

式中 $N_c = \{1, 2, \dots, n\}$ 为CR链路的集合, $|N_c|$ 表示CR链路数; $N_p = \{1, 2, \dots, m\}$ 为授权链路的集合, $|N_p|$ 表示授权链路数; A_i 为CR链路*i*的信道策略集合,一般来说,策略集合是在博弈模型中的特有名称,而策略集合需要是CR链路*i*可用的信道,对应图1中所示的CR链路*i*的可用信道集合, $a_i \in A_i$ 表示CR链路*i*策略集合 A_i 中的一个策略, $A = \prod_{i \in N_c} A_i$ 表示全部CR链路的策略空间, $a = (a_1, a_2, \dots, a_{|N_c|}) \in A$ 是全部CR链路的策略构成的一个策略矢量,在博弈模型中称为全部CR链路的一个策略剖面; S_k 为授权链路*k*的策略,在一次博弈过程中,假设授权链路的策略是固定不变的,即为常量; U_i 为CR链路*i*的效用函数,考虑到分配频谱时需保护授权链路,设计 U_i 为:

$$U_i(a) = \lambda \left[- \sum_{j \in N_c, j \neq i} p_j G_{ji} f(a_j, a_i) - \sum_{j \in N_c, j \neq i} p_i G_{ij} f(a_i, a_j) - \sum_{k \in N_p} P_k G_{ki} f(S_k, a_i) \right] - (1 - \lambda) \sum_{k \in N_p} p_i G_{ik} f(a_i, S_k) \quad (2)$$

式中 $f(x, y) = \begin{cases} 1 & x = y \\ 0 & x \neq y \end{cases}$ 含义为任何两条链路使用

相同信道值为1,否则为0; G_{ij} 表示链路*i*的发射机结点和链路*j*的接收机结点之间的路径增益; p_i 和 P_k 分别表示CR链路*i*和授权链路*k*的发射功率,相对于策略 a_i 均为常量; $\lambda \in (0, 1)$ 为比例因子,体现了保护授权链路的程度。式(2)中第1项和第3项分别表示CR链路*i*选择策略 a_i 承受的其他CR链路和授权链路的干扰,第2项和第4项分别表示CR链路*i*选择策略 a_i 对其他CR链路和授权链路造成的干扰。

2.2 模型性质

在任何一种博弈模型中,如果存在确定策略剖面 a^* 满足 $U_i(a_i^*, a_{-i}^*) \geq U_i(a_i, a_{-i}^*), i \in N, a_i \in A_i$, 则称 a^* 为该博弈的纯纳什平衡点^[14]。从文献[13]可知,其频谱分配模型是有较好收敛特性的,能够收敛到纯纳什平衡点。但是由于加入了授权链路的信息,所以本文的模型 G 的收敛特性需要验证。在证明其收敛性前需引入一种收敛性较好的经典博弈模型:

对于一种博弈,如果存在一个严格势力场函数(exact potential function, EPF) Pot 能反映用户*i*策略单独发生改变时效用函数的变化量,即:

$$U_i(a_i, a_{-i}) - U_i(a'_i, a_{-i}) = Pot(a_i, a_{-i}) - Pot(a'_i, a_{-i}) \quad (3)$$

式中 $a_i, a'_i \in A_i, a_{-i} \in \prod_{k \in N \setminus i} A_k, Pot: A \rightarrow R$ 。则该博弈为严格势力场博弈(exact potential game, EPG)^[15]。

如果一种博弈模型满足EPG时,则当用户以最佳响应动态(best response dynamic, BRD)连续调整策略时,博弈就会收敛到纯纳什平衡点,并且使 Pot 取得最大值^[15]。所以只需证明式(1)满足EPG即可。经本文证明,得到以下定理:

定理 G 为严格势力场博弈EPG。

证明: G 的效用函数为:

$$U_i(a) = \lambda \left[- \sum_{j \in N_c, j \neq i} p_j G_{ji} f(a_j, a_i) - \sum_{j \in N_c, j \neq i} p_i G_{ij} f(a_i, a_j) - \sum_{k \in N_p} P_k G_{ki} f(S_k, a_i) \right] - (1 - \lambda) \sum_{k \in N_p} p_i G_{ik} f(a_i, S_k)$$

设 $w(a_i, a_j) = \lambda [-p_j G_{ji} f(a_j, a_i) - p_i G_{ij} f(a_i, a_j)]$, 则可以得到:

$$w(a_j, a_i) = \lambda [-p_j G_{ji} f(a_i, a_j) - p_i G_{ij} f(a_j, a_i)] = w(a_i, a_j)$$

进一步得到:

$$\sum_{j \in N_c, j \neq i} w(a_i, a_j) = \lambda \left[- \sum_{j \in N_c, j \neq i} p_j G_{ji} f(a_j, a_i) - \sum_{j \in N_c, j \neq i} p_i G_{ij} f(a_i, a_j) \right]$$

因为在一次博弈中 λ 、 p_i 、 P_k 和 S_k 均为常量,所以 $-\lambda \sum_{k \in N_p} P_k G_{ki} f(S_k, a_i) - (1-\lambda) \sum_{k \in N_p} p_i G_{ik} f(a_i, S_k)$ 只与 a_i 有关。设 $v_i(a_i) = -\lambda \sum_{k \in N_p} P_k G_{ki} f(S_k, a_i) - (1-\lambda) \sum_{k \in N_p} p_i G_{ik} f(a_i, S_k)$,故 $U_i(a) = \sum_{j \in N_c \setminus i} w(a_i, a_j) + v_i(a_i)$ 。所以G为双边对称交互博弈(bilateral symmetric interaction games, BSIG)^[14]。由文献[14]可知BSIG为EPG,所以本文的频谱分配模型G为严格势力场博弈EPG。

证毕

由此可以建立严格势力场函数EPF Pot为:

$$\text{Pot}(a) = \sum_{i \in N_c} \left\{ \lambda \left[-\frac{1}{2} \sum_{j \in N_c \setminus i} p_j G_{ji} f(a_j, a_i) - \frac{1}{2} \sum_{j \in N_c \setminus i} p_i G_{ij} f(a_i, a_j) - \sum_{k \in N_p} P_k G_{ki} f(S_k, a_i) \right] - (1-\lambda) \sum_{k \in N_p} p_i G_{ik} f(a_i, S_k) \right\} \quad (4)$$

Pot能反映CRN网络整体的干扰性能,并且能够体现CR链路策略单独发生改变时干扰的变化量。效用函数和严格势力场函数中的负号的作用是将干扰最小化问题转化为最大化问题。

3 FCAPLL算法

3.1 算法描述

本文基于上述频谱分配模型,提出了FCAPLL算法。算法基本思想为每条CR链路根据轮循规则和最佳响应动态进行信道策略调整,直至博弈的纯纳什平衡点。具体的算法描述如下:

(1) 初始化。假设 z 为时隙号,令初始化时隙为 $z=0$ 。随机选取一个策略剖面 $a^0 = (a_1^0, a_2^0, \dots, a_n^0)$, $a^0 \in A$ 作为信道的初始化分配。

(2) 设立CR链路轮循规则。假设 N_{remain} 为没有退出博弈的CR链路数(算法开始时 $N_{\text{remain}} = |N|$), n^z 为第 z 个时隙同时调整策略的CR链路数($n^z \geq 0$), z^1 为第一个 $n^z \geq 1$ 的时隙, Δz 为第 z 个时隙与上一个 $n^{z-\Delta z} \geq 1$ 的时隙的距离($\Delta z \geq 1$)。考虑到CRN为分布式结构,设立规则如下:

在 $1 \leq z \leq z^1$ 时隙时,每个CR链路以 $1/N_{\text{remain}}$ 的概率进行策略调整;在 $z > z^1$ 时隙时,第 $z - \Delta z$ 个时隙调整策略的 $n^{z-\Delta z}$ 个CR链路调整策略的概率为零,其他 $N_{\text{remain}} - n^{z-\Delta z}$ 个CR链路调整策略的概率为 $1/(N_{\text{remain}} - n^{z-\Delta z})$ 。

(3) 策略调整。CR链路按照步骤(2)进行博弈,

假设在第 z 个时隙CR链路 i 进行策略调整,则CR链路 i 选取满足 $a_i^z = \arg \max_{a_i^z \in A_i} U_i^z(a_i^z, a_i^{z-1})$ 的策略 a_i^z ,作为一次策略调整(多个 a_i^z 同时满足要求,则随机选取)。若 $U_i^z = U_i^{z-1}$,则CR链路 i 退出博弈过程,更新 N_{remain} 为 $N_{\text{remain}} = N_{\text{remain}} - 1$ 。其中 a_i^z 和 U_i^z 分别表示CR链路 i 在第 z 个时隙的策略和效用函数。

(4) 终止判断。如果在第 z 个时隙 $N_{\text{remain}} = 0$,则算法结束,否则进入(3)。

3.2 算法分析

FCAPLL算法的轮循规则避免了同一CR链路在连续两个 $n^z \geq 1$ 的时隙都进行策略调整而导致机会浪费的情况,此外FCAPLL算法将不能取得效用函数增加的CR链路及时退出博弈,再次避免了机会的浪费,所以有较快的收敛速度。在算法的策略调整中,CR链路综合考虑了CR链路之间的干扰与CR链路和授权链路之间的干扰,所以能在保护授权链路的基础上最优化频谱分配。比例因子 λ 体现了CR链路对授权链路的干扰与其他干扰的比例。 λ 越小,授权链路承受干扰所占的比重越大,说明对授权链路的保护程度越高。但较小的 λ 会使得CR链路的性能下降,所以在选择 λ 时要综合考虑授权链路和CR链路的性能要求。

4 仿真分析

4.1 仿真环境

仿真在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 拓扑区域进行。取可用信道数为5,为了简化问题,假设每个可用信道上只有1条授权链路,对应取授权链路数 $|N_p| = 5$;令CR链路 $|N_c| = 20$,比例因子 $\lambda = 0.2$,CR链路和授权链路发射功率分别为 $p_i = 10 \text{ mW}$ 和 $P_k = 20 \text{ mW}$,路损模型采用路损指数为3的对数路径损耗模型,背景噪声 $N_0 = 5 \times 10^{-15} \text{ mW}$ 。

4.2 仿真结果

4.2.1 算法性能比较

为了使仿真数据准确可信,采用统计平均方法。首先固定CR链路数 $|N_c|$,在一个 $|N_c|$ 下取1 000次随机拓扑,在每个拓扑下执行算法1次,取1 000次平均,得到一个 $|N_c|$ 下的性能指标比较值。令 $10 \leq |N_c| \leq 40$,得到算法的性能指标随 $|N_c|$ 的变化规律。

为了验证FCAPLL能够在保护授权链路的基础上最优化频谱分配,选取随机分配算法(random allocation algorithm, RAA)和文献[13]的只考虑CR链

路干扰的基于频谱共享礼仪的合作算法 (cooperation algorithm based spectrum sharing etiquette, CASSE) 作为衡量标准。需衡量的指标为:

(1) CR链路对授权链路的干扰:

$$I_k = \sum_{i \in N_c} p_i G_{ik} f(a_i, S_k)$$

(2) CR链路的信干噪比:

$$SINR_i = \frac{p_i G_{ii}}{\sum_{j \in N_c, j \neq i} p_j G_{ji} f(a_j, a_i) + \sum_{k \in N_p} P_k G_{ki} f(S_k, a_i) + N_0}$$

而对于 I_k 要衡量最大干扰 $I_{\max} = \max_{k \in N_p} I_k$ 和平均干扰

$$\bar{I} = \frac{1}{|N_p|} \sum_{k=1}^{|N_p|} I_k$$

对于 $SINR_i$ 要衡量最小信干噪比

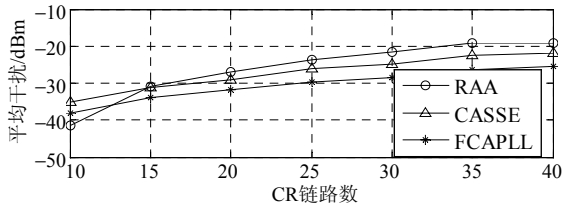
$$SINR_{\min} = \min_{i \in N_c} SINR_i$$

和平均信干噪比 $\overline{SINR} = \frac{1}{|N_c|} \times$

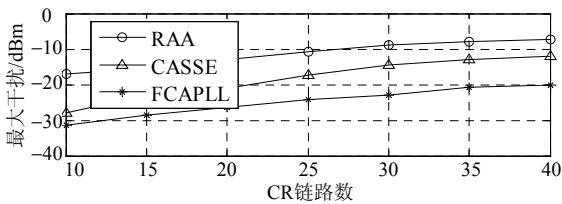
$$\sum_{i=1}^{|N_c|} SINR_i$$

3种算法的性能比较如图2、图3所示。

由图2和图3可见, FCAPLL的 I_{\max} 和 \bar{I} 都要明显小于CASSE和RAA, 而FCAPLL和CASSE的 \overline{SINR} 和 $SINR_{\min}$ 基本是相同的, 且都要明显高于RAA。说明FCAPLL能在保护授权链路的前提下最优化频谱分配。



a. 授权链路受到的平均干扰

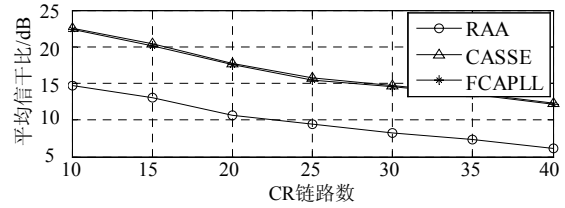


b. 授权链路受到的最大干扰

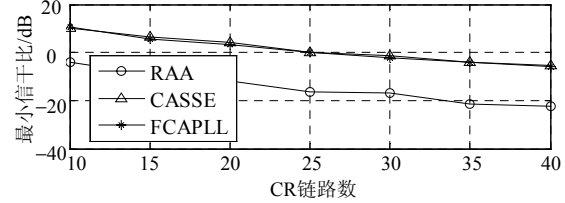
图2 授权链路干扰性能比较

在本文严格势力场博弈模型下来比较FCAPLL和CASSE的收敛速度的差异。需衡量收敛所需的时隙数 S 和收敛时严格势力场函数值 P 的大小。由于 P 为负值, 这里取 $P = 10 \lg(-P)$ 。FCAPLL和CASSE的性能比较如图4所示。

由图4可见, FCAPLL的 S 的减小量随CR链路数增大而增大, 在 $|N| \geq 10$ 时相对减小量基本达到40%以上。FCAPLL在减小 S 的同时, CRN网络的干扰 P 并没有增大, 基本和CASSE相同。

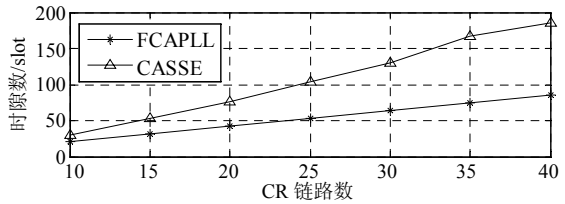


a. CR链路的平均信干比

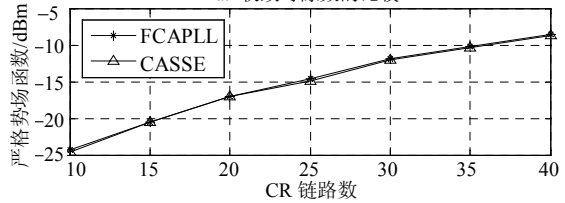


b. CR链路的最小信干比

图3 CR链路信干噪比性能的比较



a. 收敛时隙数的比较

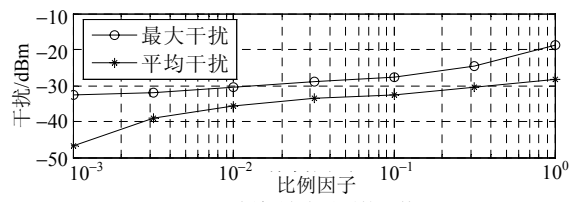


b. 收敛时严格势力场函数的比较

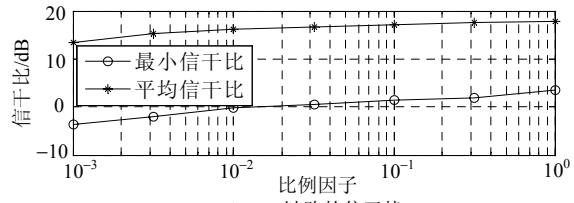
图4 FCAPLL和CASSE的性能比较

4.2.2 比例因子的影响

比例因子 λ 的取值决定了保护授权链路的程度。为了衡量 λ 的特性, 需要得到 I_k 和 $SINR_i$ 与 λ 的关系。取 $\lambda \in [10^{-3}, 10^0)$, 对每个 λ 进行1 000次随机拓扑下的统计平均, 得到如图5所示的对应关系。



a. 授权链路受到的干扰



b. CR链路的信干比

图5 I_k 和 $SINR_i$ 与 λ 的关系

由图5可见, 随着比例因子 λ 的增大, I_{\max} 和 \bar{I} 与 $SINR_{\min}$ 和 \overline{SINR} 都是逐渐增大的。说明CR链路在保护授权链路时会使 $SINR$ 性能有所下降, 但是 \overline{SINR}

的下降变化率比授权链路承受干扰的下降变化率要小。所以针对不同性能要求CRN网络, 只要通过上述曲线选取合适的比例因子 λ 就能使其合理而有效地工作。

5 结束语

本文基于博弈论给出了一种新型的频谱分配模型, 提出了一种保护授权链路的频谱分配算法FCAPLL。仿真分析证明, 相对于只考虑CR链路的频谱分配算法, FCAPLL在基本没有减小CR链路SINR的前提下显著减小了授权链路承受的干扰, 达到了频谱的最优化分配; 同时仿真结果给出了授权链路承受干扰和CR链路的SINR与比例因子的关系, 为FCAPLL应用于不同性能要求的CRN提供了参数。为了进一步减小授权链路承受的干扰, 增大CR链路的SINR, 可以采用功率控制, 这也是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE JSAC, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] WEISS T A, JONDRAL F K. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. Communications Magazine, 2004, 42(3): 8-14.
- [3] GUO C L, ZHANG T K, ZENG Z M, et al. Investigation on spectrum sharing technology based on cognitive radio[C]//CHINACOM 2006. Beijing: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [4] 陈 劼, 李少谦. 认知无线中的一种协作式频谱礼仪[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 645-648.
CHEN Jie, LI Shao-qian. A cooperative spectrum etiquette for cognitive radio[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(4): 645-648.
- [5] WANG W, LIU X. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks[C]//IEEE Fall VTC 2005. Dallas: IEEE Press, 2005: 690-694.
- [6] ZHENG H, PENG C. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access[C]//IEEE ICC 2005. Seoul: IEEE Press, 2005: 3132-3136.
- [7] CAO L, ZHENG H. Distributed spectrum allocation via local bargaining[C]//IEEE SECON 2005. Santa Clara: IEEE Press, 2005: 475-486.
- [8] ZHENG H, CAO L. Device-centric spectrum management[C]//IEEE DySPAN 2005. Baltimore: IEEE Press, 2005: 56-65.
- [9] ZHAO J, ZHENG H, YANG G. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks[C]//IEEE DySPAN 2005. Baltimore: IEEE Press, 2005: 259-268.
- [10] NIYATO D, HOSSAIN E. A game-theoretic approach to competitive spectrum sharing in cognitive radio networks[C]//IEEE WCNC 2007. Hong Kong, China: IEEE Press, 2007: 1-5: 16-20.
- [11] JI Z, RAY K J. Belief-assisted pricing for dynamic spectrum allocation in wireless networks with selfish users[C]//IEEE SECON 2006. Linthicum, Maryland: IEEE Press, 2006: 119-127.
- [12] HAN Z, PANDANA C, RAY K J. Distributive opportunistic spectrum access for cognitive radio using correlated equilibrium and no-regret learning[C]//IEEE WCNC 2007. Hong Kong, China: IEEE Press, 2007: 11-15.
- [13] NIE N, COMANICIU C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(6): 779-797.
- [14] NEEL J, REED J, GILLES R. Convergence of cognitive radio networks[C]//IEEE WCNC. Atlanta, USA: IEEE Press, 2004: 2250-2255.
- [15] MONDERER D, SHAPLEYS L. Potential Games[J]. Games and Economic Behavior, 1996, 14(44): 124-143.
- [6] ZOU W, WU Y. COFDM: an overview[J]. IEEE Trans Broadcast, 1995, 41(1): 1-8.
- [7] PETROPULU A P, ZHANG R, LIN R. Blind OFDM channel estimation through simple linear precoding[J]. IEEE Trans Wireless Communication, 2004, 3(2): 647-655.
- [8] LIN R, PETROPULU A P. Linear precoding assisted blind channel estimation for OFDM systems[J]. IEEE Trans Vehicle Technology, 2005, 54(3): 983-995.
- [9] STROBACH P. Low-rank adaptive filters[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44(12): 2932-2692.
- [10] 3GPP. 3GPP TR 25.996 V6.1.0 (2003) Universal mobile telecommunications system (UMTS) [EB/OL]. [2007-05-11]. <http://www.3gpp.org/ftp>.

编辑 漆 蓉

(上接第850页)

编辑 税 红