

具有约束条件的认知无线网络 最优频谱价格函数

罗丽平^{1,2}, 邱焕新¹, 张广驰³, 秦家银¹

(1. 中山大学信息科学与技术学院, 广东广州 510006; 2. 广西民族大学物理与电子工程学院, 广西南宁 530006;
3. 广东工业大学信息工程学院, 广东广州 510006)

摘 要: 保证主用户的 QoS 是认知无线网络中必须遵循的原则之一. 本文利用伺机频谱共享方式中的实际约束条件, 求解出既能保证主用户的 QoS, 又能使主业务运营商获得较大利润的最优频谱价格函数. 该价格函数能反映实际的通信环境(如信道质量、业务动态性)对频谱价格的影响, 同时在动态环境下, 通过迭代可以使频谱价格收敛到最优价格. 仿真结果表明, 相对于基于市场均衡的价格策略, 主业务运营商采用本文提出的最优价格函数, 能保证主用户的 QoS 要求, 同时获得的利润不会降低.

关键词: 认知无线电; 伺机频谱共享; 价格函数; 服务质量

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0562-05

Optimal Pricing Function with Spectrum Constraint in Cognitive Radio Networks

LUO Li-ping^{1,2}, QIU Huan-xin¹, ZHANG Guang-chi³, QIN Jia-yin¹

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;
2. Department of Physics and Electronics Engineering, Guangxi university for Nationalities, Nanning, Guangxi 530006, China;
3. Faculty of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: Protecting the Quality-of-Service (QoS) of the primary user is very important in cognitive radio networks. In this paper, a practical constraint is considered that the available spectrum for the secondary users is limited in opportunistic spectrum sharing. An optimal pricing function is derived, which can provide QoS-guaranteed for the primary users and more revenue for the primary service provider. Moreover, some practical environment parameters (such as channel quality, traffic fluctuation) are taken into account in spectrum pricing. In dynamic scenarios, the price can converge to the optimal value by iteration. Simulation results show that the QoS of the primary user can be guaranteed in the proposed pricing, while the profit is not less than that in market-equilibrium-based price.

Key words: cognitive radio; opportunistic spectrum sharing; pricing function; QoS

1 引言

随着无线通信新技术的快速发展和业务量的迅猛增加, 频谱需求量随之快速增大, 因此有限的频谱资源已成为制约无线通信发展的瓶颈之一. 另一方面, 频谱利用率却不高, FCC 的研究表明, 在现有的固定频谱分配机制下, 平均频谱利用率仅有 10% 左右^[1], 存在大量未利用的频谱(称为“频谱空洞”). 因此认知无线电^[2]作为一种提高频谱效率的新技术近年来倍受关注. 目前, 它已成为无线通信领域一个新的研究热点, 其基本思想是通过安装认知无线电设备, 次用户(即非授权用户)可

以发现并且“伺机”利用主用户(授权用户)的频谱空洞, 从而提高频谱利用率. 这种伺机共享频谱的方式打破了目前固定频谱分配和独占频谱使用权的原则, 使动态频谱分配成为可能.

在认知无线电的研究中, 引入价格机制一方面激励频谱所有者(主用户)共享空闲频谱, 另一方面可以通过调整价格控制次用户的频谱需求. 从经济学的角度讲, 价格在资源贸易中起着非常重要的作用. 在无线通信研究中, 文献[3]引入价格机制来研究无线传感器网络资源分配, 价格作为中介, 可以平衡节点间资源(如功率、速率)分配与需求, 达到资源合理配置. 文献[4]研究了

认知无线网络频谱管理策略,提出基于价格的迭代功率注水算法和相应的 MAC 协议.文献[5]提出了动态频谱分配的经济学框架,文献[6]研究了动态频谱分配方式下的价格策略,文献[7]提出频谱贸易的概念和基于市场均衡的价格模型,文献[8,9]研究了多个主业务运营商之间的频谱竞价问题.在频谱贸易活动中,主业务运营商以转卖或租借的方式将部分频谱让给次用户使用,以获取额外的利润.频谱贸易的目的就是最大化频谱所有者(即主业务运营商)的利益,同时又满足次用户的频谱需求,其中价格是频谱贸易中的关键因素.因此,从频谱所有者角度出发,如何设定一个合适的频谱价格,既保证主用户的 QoS 要求,同时又能使主业务运营商获得较大的利润,是一个有重要研究意义的课题.

文献[7~9]依据市场均衡的原理,即主用户的频谱供应等于次用户的频谱需求,推导出频谱价格,旨在最大化主业务运营商的利润,但是次用户的频谱需求没有设置上限,存在次用户过度占用频谱的情况,因而主用户的 QoS 不能得到保障.要保证主用户的 QoS,次用户占用的频谱不能超过某个上界,即次用户可利用的动态频谱资源是有限制的.在伺机频谱共享中,该约束条件就是次用户可用的频谱不能超过主用户的空闲频谱(即频谱空洞).增加约束条件后,主业务运营商的利润函数和价格函数与上述文献不同,需要重新分析和推导.为此,本文主要研究动态频谱共享方式下具有频谱约束条件的最优价格函数,旨在保证主用户的 QoS 要求,同时使主业务运营商获得最大利润.本文利用该约束条件,推导出最优价格函数,该函数能反映实际的通信环境(如信道质量、业务动态性)对频谱价格的影响,而不是借用经济学中的价格模型.仿真结果表明,本文提出的最优价格函数能保证主用户的 QoS 要求,同时能使主业务运营商获得最大利润.与基于市场均

衡的价格策略相比,主业务运营商获得的利润相差不大,但主用户的 QoS 不会受到影响.

2 系统模型

2.1 网络结构

本文采用与文献[7]类似的集中式网络结构,包括一个主业务运营商 PSP(Primary Service Provider, 简称为 PSP),一个次业务运营商 SSP(Secondary Service Provider, 简称为 SSP)以及各自支持的用户,如图 1 所示.定义 W 为授权给 PSP 的频谱带宽,SSP 伺机利用 PSP 的空闲频谱 W_i .由于主用户业务的动态性, W_i 为一变化量.SSP 负责收集各个次用户的频谱需求 b_i ,计算总的频谱需求 W_d ,并与 PSP 进行频谱供求信息交互和价格协商.

2.2 频谱共享方式

文献[10]综述了几种动态频谱接入方式的特点,本文采用 overlay 方式,即伺机频谱共享方式,次用户使用的频谱为 PSP 的空闲频谱,其频谱需求要满足约束条件 $W_d \leq W_i$,与文献[7~9]无约束的频谱共享方式不同.采用这种频谱共享方式的最大好处是可以保证主用户的 QoS 要求.本文研究的价格策略,不仅仅局限于伺机频谱共享方式,适用于任何有约束条件的频谱共享方式.

2.3 传输模型

自适应调制技术可以使用户依据信道质量动态调整传输速率.为了提高传输性能,次用户采用自适应调制,传输模型参照文献[8],次用户的频谱效率表示如下:

$$k = \log_2(1 + K\gamma) \quad (1)$$

其中 $K = \frac{1.5}{\ln(0.2/p_b)}$, γ 为接收端信噪比(SNR), p_b 为目标误码率.

3 数学模型与求解

3.1 SSP 的频谱需求

本文采用对数效用函数来表征次用户对频谱资源和传输速率的满意度,这种效用函数对于提供“尽力而为”服务质量保证的数据业务网络非常适用^[11].设每个次用户的利润函数为:

$$U(b_i) = r_i \ln(1 + k_i b_i) - c b_i \quad (2)$$

其中 r_i 为第 i 个次用户获得的利润因子,不同的业务类型, r_i 的取值也不相同. $r_i \ln(1 + k_i b_i)$ 表示次用户 i 获得的收益, c 为 PSP 设定的频谱价格, $c b_i$ 表示频谱成本.次用户为了追求最大利润,其频谱需求可以通过对 $U(b_i)$ 求导得出.

由 $\frac{\partial U(b_i)}{\partial b_i} = \frac{r_i k_i}{1 + k_i b_i} - c = 0$ 可得: $b_i = \frac{r_i}{c} - \frac{1}{k_i}$, 由于

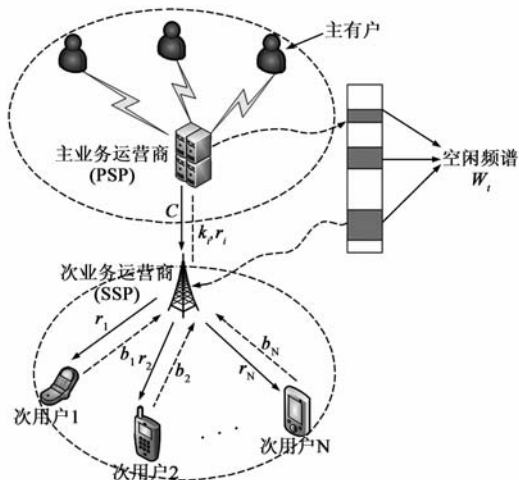


图1 系统模型

$b_i \geq 0$, 次用户 i 的频谱需求为

$$b_i = \begin{cases} \frac{r_i}{c} - \frac{1}{k_i}, & c < r_i k_i \\ 0, & c \geq r_i k_i \end{cases} \quad (3)$$

SSP 总的频谱需求为:

$$W_d = \sum_{i=1}^N b_i = \sum_{i=1}^{N_i} \left(\frac{r_i}{c} - \frac{1}{k_i} \right) \quad (4)$$

N_i 为分配到非零带宽的次用户的个数, 即 SSP 实际支持的次用户数. 由式(3)可以看出, 次用户的频谱需求与频谱价格 c 成反比, 价格越高, 频谱需求越低. 此外, 频谱需求还与次用户的信道环境和利润因子有关, 信道质量越好, 频谱效率 k_i 越大, 频谱需求越高; 利润因子 r_i 越大, 频谱需求越大.

3.2 PSP 最优价格函数

在认知无线电中, 次用户与主用户共享频谱必须遵循的原则是: 不能影响主用户的 QoS 性能. 因此, PSP 在与次用户共享频谱时, 追求两个目标: (1) 保证主用户的 QoS 要求; (2) 在满足目标(1)的前提下, 尽可能获得较大的利润.

在本文中, 为了保护主用户的 QoS, 次用户只能伺机利用主用户空闲的(即多余的)频谱, 与文献[7~9]无约束的频谱共享方式不同. 设在时刻 t , PSP 支持有 M_t 个主用户通信链路, 每个主用户链路的额定带宽需求为 B^{req} , 此时空闲的频谱为:

$$W_t = W - M_t \cdot B^{\text{req}} \quad (5)$$

为了使主用户的 QoS 不受影响, SSP 总的频谱需求需满足约束条件: $W_d \leq W_t$.

从式(3)、(4)可以看出, PSP 设定的频谱价格越高, SSP 的频谱需求越小. 从保护主用户 QoS 的角度出发, 频谱价格越高越好, 使 $W_d \leq W_t$ 总是成立, 但此时因为频谱需求太低, PSP 不一定能获得较大的利润. 频谱价格由低到高调整的过程中, 频谱需求由大变小.

定义 $W_d = W_t$ 时的频谱价格为 C_{QoS} , 此时主用户的 QoS 刚好能得到保证. 由式(4)可得:

$$W_d = \sum_{i=1}^N b_i = \sum_{i=1}^{N_i} \left(\frac{r_i}{C_{\text{QoS}}} - \frac{1}{k_i} \right) = W_t$$

求得

$$C_{\text{QoS}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} r_i}{W_t + \sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{k_i}} \quad (6)$$

因此, 当 PSP 设定的频谱价格 $c \geq C_{\text{QoS}}$ 时, 次用户的频谱需求满足约束条件 $W_d \leq W_t$, 主用户的 QoS 可以得到保证, 达到了 PSP 的第一个目标.

当频谱价格 $c < C_{\text{QoS}}$ 时, $W_d > W_t$, 但由于频谱约束

条件, SSP 可用的频谱限制在 W_t , 因此, SSP 实际可使用的频谱可表示成如下分段函数的形式:

$$W_d = \begin{cases} W_t, & c \leq C_{\text{QoS}} \\ \sum_{i=1}^{N_i} \left(\frac{r_i}{c} - \frac{1}{k_i} \right), & c > C_{\text{QoS}} \end{cases} \quad (7)$$

PSP 的利润主要来自两方面: 一是 PSP 所支持的主用户通信, 设每个主用户通信带来的收益为 c_1 , 则总收益为 $c_1 \cdot M_t$; 另一个是来自次用户, 当频谱价格为 c 时, PSP 的额外收益为 $c \cdot W_d$. 在本文中, 由于次用户使用的频谱为空闲频谱, 不会影响主用户的 QoS, 与基于市场均衡的价格相比^[7~9], 不存在因 QoS 下降而付出的代价. PSP 的利润函数表述如下:

$$U_p = c \cdot W_d + c_1 \cdot M_t \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)可得:

$$U_p = \begin{cases} c \cdot W_t + c_1 \cdot M_t, & c \leq C_{\text{QoS}} \\ c \cdot \sum_{i=1}^{N_i} \left(\frac{r_i}{c} - \frac{1}{k_i} \right) + c_1 \cdot M_t, & c > C_{\text{QoS}} \end{cases} \quad (9)$$

在时刻 t , 给定 M_t 的情况下, W_t 为一定值, U_p 仅与 c 有关. 由式(9)可以看出, 当 $c \leq C_{\text{QoS}}$ 时, U_p 是 c 的单调增函数; 当 $c > C_{\text{QoS}}$ 时, U_p 是 c 的单调减函数. 所以, U_p 在 $c = C_{\text{QoS}}$ 时取得最大值, 能达到 PSP 的第二个目标.

由以上分析可得, 对 PSP 而言, 当以 $c = C_{\text{QoS}}$ 设定频谱价格时, 既能满足主用户的 QoS 要求, 同时又能获得最大利润, C_{QoS} 为 PSP 的最优价格, 即

$$C_{\text{opt}} = C_{\text{QoS}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} r_i}{W_t + \sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{k_i}} \quad (10)$$

需要注意的是, 当 PSP 不追求最大利润, 而只是关注主用户的 QoS 时, PSP 可以设定任意高于 C_{opt} 的频谱价格使 $W_d < W_t$.

由式(10)可知, PSP 设定的频谱价格与空闲频谱 W_t 有关, W_t 较大时, PSP 为了获得较大的利润, 会以较低的价格将空闲频谱转租给次用户使用. 此外, 式(10)也反映了次用户的信道环境对价格的影响, 信道质量越好, 频谱效率越高, 频谱需求越大, 价格越高.

为了确定最优价格 C_{opt} , SSP 需要已知每一个次用户的信道质量, 求出其频谱效率 k_i , 并将频谱效率信息反馈给 PSP, 然后由 PSP 依据式(10)计算频谱价格, 该式适用于主用户业务稳定和次用户信道质量变化较慢的场景.

3.3 价格动态调整算法

更实际的情况下, 主用户业务具有动态性, PSP 支持的主用户链路数会随时改变, 因此次用户可使用的空闲频谱值 W_t 为一变量, 同时次用户信道环境也会

经常发生变化, PSP 很难及时获取频谱效率信息, 此时, PSP 需要依据频谱约束值 W_t 和频谱需求 W_d 动态调整频谱价格 c , 从而满足 PSP 的 QoS 要求. 采用如下的价格调整公式^[9]:

$$p[t] = p[t-1] + \alpha(W_d - W_t) \quad (11)$$

其中 α 为学习速率. 式(11)反映了当频谱需求 W_d 越大时, 需要提高频谱价格, 相反当空闲频谱 W_t 越大时, 需要降低价格. 算法描述如表 1.

表 1 价格动态调整算法

- ① PSP 按式(5)计算当前空闲频谱值 W_t , 给出初始价格 c_0 ;
- ② 各个次用户按式(3)计算频谱需求, SSP 将总的频谱需求 W_d 给 PSP;
- ③ PSP 比较 W_t 和 W_d ,
如果 $W_d > W_t$, PSP 按照式(11)进行价格调整;
- ④ 重复②、③直至 $|W_d - W_t|$ 小于给定的偏差, 停止.

在动态环境下, 按表 1 过程迭代可得出最优频谱价格 C_{opt} .

3.4 基于市场均衡的价格策略^[7]

为了便于将本文提出的最优价格与文献[7]提出的基于市场均衡的价格作比较, 下面简要给出基于市场均衡的价格函数. PSP 的利润函数为:

$$U_p = c \cdot W_s + c_1 \cdot M_t - c_2 \cdot M_t \left(B^{\text{req}} - \frac{W - W_s}{M_t} \right)^2,$$

其中 W_s 表示 PSP 的频谱供应. 将 U_p 对 W_s 求导, 可得出 PSP 频谱供应为:

$$W_s = W - M_t \left(B^{\text{req}} - \frac{c}{2c_2} \right). \text{注意此处 PSP 的利润函数与本文的不同.}$$

次用户的利润函数为:

$U(b_i) = r_i \ln(1 + k_i b_i) - c b_i$, 将 $U(b_i)$ 对 b_i 求导, 可得出每个次用户的频谱需求 b_i , SSP 频谱需求为

$$W_d = \sum_{i=1}^N b_i^* = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{c} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{k_i}.$$

在该文献中, SSP 的频谱需求没有约束条件.

基于市场均衡原理, 当 $W_s = W_d$ 时, 可求出频谱价格.

4 仿真结果与分析

采用通用的参数设置^[8]: 假设 PSP 的授权频谱为 $W = 20\text{MHz}$, 每个主用户要求的频谱带宽为 $B^{\text{req}} = 2\text{MHz}$, 主用户的个数在 $0 \sim 10$ 之间变化. 设 SSP 支持 4 个次用户, 其目标平均误码率为 $p_b = 10^{-4}$, 信噪比分别为 $\gamma = [8, 10, 12, 14]\text{dB}$.

图 2 和图 3 通过数值仿真验证了价格函数理论推导的正确性. 假设此刻空闲频谱为 $W_t = 6\text{MHz}$, 从图 2

可以看出, 当频谱价格 $c > C_{opt}$ 时, SSP 的频谱需求满足 $W_d < W_t$; 当 $c \leq C_{opt}$ 时, SSP 的频谱需求 $W_d \geq W_t$, 但由于受到约束, 其需求限制在 W_t . 图 3 显示了 PSP 的利润在 $c = C_{opt}$ 时取得最大值. 仿真结果证明了当频谱价格为 C_{opt} 时, 既满足了频谱约束条件, 保证了主用户的 QoS, 又能使 PSP 获得最大利润, 与理论分析一致.

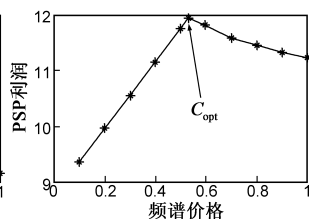
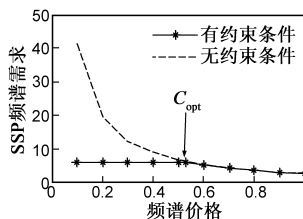


图2 SSP频谱需求与价格关系

图3 PSP利润与价格关系

图 4 显示了在不同频谱约束值下最优频谱价格的取值, 约束值越大, 表示次用户可用的频谱越多, 频谱价格越低. 在动态价格调整算法中, 其收敛特性与初始价格和学习速率有关. 当空闲频谱较少时, 应选取较大的初始价格和学习速率, 这样才能较快地收敛到最优价格.

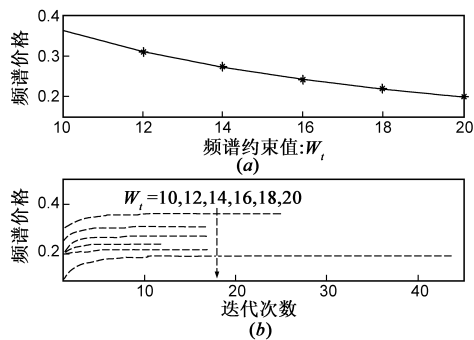


图4 不同频谱约束值下最优频谱价格和收敛特性

图 5 和图 6 比较了两种不同价格策略下 PSP 的利润和 SSP 的频谱需求. 当主用户链路数在 $0 \sim 10$ 之间变化时, 可用空闲频谱值 W_t 对应在 $20 \sim 0\text{MHz}$ 之间变化. 从图 5 可知, 当 PSP 采用本文提出的最优价格时, SSP 的频谱需求刚好等于空闲频谱, 小于基于市场均衡的价格下 SSP 的频谱需求, 这意味着采用本文的价格函数可以保证主用户的 QoS. 图 6 比较了 PSP 的利润, 虽然

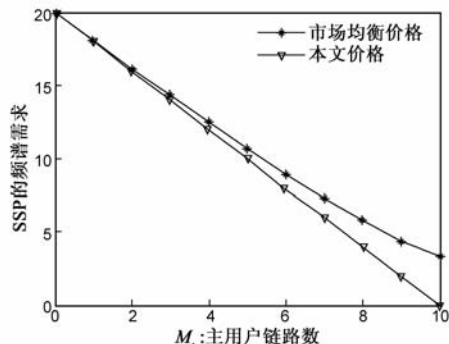


图5 两种不同价格下SSP的频谱需求比较

在本文价格下 SSP 的频谱需求较少,但其利润与基于市场均衡价格下 PSP 的利润差不多.原因在于在本文价格下,主用户的 QoS 得到了保证,不需要因 QoS 下降付出代价.不过当 $M_i = 10$ 时,本文价格下 PSP 获得的利润较低,是因为此时空闲频谱为零,为了保护主用户的 QoS,次用户不能与主用户共享频谱,PSP 的利润只来自主用户.

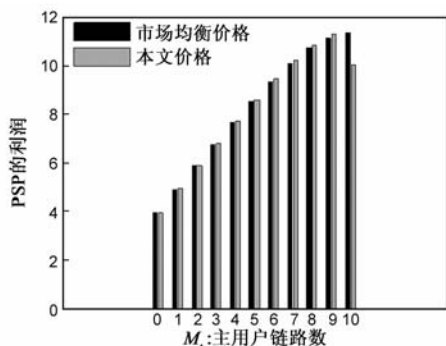


图6 两种不同价格下主用户的利润比较

5 结论

本文研究了具有约束条件的认知无线网络伺机频谱共享方式下的频谱价格函数.为了保证主用户的 QoS 要求,次用户可以使用的频谱具有约束条件,利用该约束条件求出能保证主用户 QoS 的频谱价格,同时证明在该价格下,PSP 能获得最大利润,因而该价格是 PSP 的最优价格.其新意首先体现在次用户机会利用空闲频谱,符合认知无线电的基本原则,保证了主用户的 QoS;其次是考虑了频谱共享的约束条件,即次用户可用的频谱资源是有限的,且随主用户的活动随时变化;同时本文提出的最优价格函数使主业务运营商获得了相对较高的收益,而且本文提出的最优价格函数能反映实际的通信环境(如信道质量、业务动态性)对频谱价格的影响,采用价格动态调整算法能收敛到最优价格.另外本文导出的价格函数为频谱管理者制定频谱分配政策也具有一定的指导意义.对于存在多个 PSP 时频谱价格竞争问题我们将作进一步的研究.

参考文献

- [1] Spectrum Efficiency Working Group. Federal communications commission spectrum policy task force report [R]. USA: FCC, 2002.
- [2] S Haykin. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201 – 220.
- [3] 廖胜斌,杨宗凯,程文青,等.无线传感器网络中联合功率控制和速率调整[J].电子学报,2008,36(10):1931 – 1937. Liao Shengbin, Yang Zongkai, Cheng Wenqing, et al. Joint power control and rate adaptation for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1931 – 1937. (in

Chinese)

- [4] Fan Wang, M Krunz, Shuguang Cui. Price-Based spectrum management in cognitive radio networks [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Signal Processing, 2008, 2(1): 74 – 87.
- [5] S Sengupta, M Chatterjee. An economic framework for dynamic spectrum access and service pricing [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(4): 1200 – 1213.
- [6] Z Ji, K J R Liu. Multi-stage pricing game for collusion-resistant dynamic spectrum allocation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 182 – 191.
- [7] D Niyato, E Hossain. Spectrum trading in cognitive radio networks: a market-equilibrium -based approach [J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(6): 71 – 80.
- [8] D Niyato, E Hossain. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium, and collusion [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 192 – 202.
- [9] D Niyato, E Hossain. Market-equilibrium, competitive, and co-operative pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: analysis and comparison [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4273 – 4283.
- [10] Q Zhao, B M Sadler. A survey of dynamic spectrum access [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79 – 89.
- [11] Z Jiang, Y Ge, Y Li. Max-utility wireless resource management for best-effort traffic [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1): 100 – 111.

作者简介



罗丽平 女,1980 年出生于湖北麻城,广西民族大学教师,中山大学博士生,主要研究方向为无线通信,认知无线电.
E-mail: lping.luo@gmail.com.

邱焕新 男,1985 年出生于广东揭阳,中山大学硕士生.研究方向为无线传感器网络. E-mail: ganlangu@163.com

张广驰 男,1982 年出生于广西南宁,籍贯:广东佛山.广东工业大学信息工程学院教师,博士.主要从事无线宽带通信技术的研究工作. E-mail: guangchi@gmail.com



秦家银 男,1961 年出生于湖北荆门,中山大学信息科学与技术学院教授、博士生导师.主要研究方向为无线通信技术.
E-mail: issqjy@mail.sysu.edu.cn