

## 基于博弈论的认知无线电频谱分配

张北伟<sup>1,2\*</sup>, 胡琨元<sup>1</sup>, 朱云龙<sup>1</sup>

(1 中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

(\* 通信作者电子邮箱 beiweizhang@sia.cn)

**摘要:**为了解决频谱分配中的授权用户定价博弈问题,根据博弈论中的 Bertrand 均衡理论,提出了基于 Bertrand 模型的授权用户信道价格竞争的动态博弈算法。分析了稳定的纳什均衡解与速率调整参数的关系,用控制理论中阶跃函数研究价格无震荡博弈过程,提出了三值法确定阶跃响应参数。仿真结果表明,当速率调整参数在小于 0.04 时,可以获得稳定的信道价格;同时,验证了用阶跃函数分析无震荡博弈过程的可行性,方便授权用户快速实时定价,带来更大的经济效益。

**关键词:**认知无线电;频谱分配;博弈论;参数整定;阶跃响应

**中图分类号:**TP301.6 **文献标志码:**A

### Parameters adjustment in cognition radio spectrum allocation based on game theory

ZHANG Bei-wei<sup>1,2\*</sup>, HU Kun-yuan<sup>1</sup>, ZHU Yun-long<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With regard to the dynamic spectrum allocation on wireless cognitive network, a dynamic Bertrand game algorithm of the channel pricing of licensed users was proposed using Bertrand equilibrium. Then, the relationship between stability of Nash equilibrium and speed parameter adjustment was analyzed. Consequently, step response function was utilized to replace the non-concussive process of game, and three-value method was proposed for getting step response parameters. The simulation results show that the proposed algorithm can obtain stable channel price when the value of speed parameter is less than 0.04. Besides, the feasibility of using a step function to analyze the concussion game process is proved, and this method is convenient for licensed users to make real-time price and bring more economic benefits.

**Key words:** cognitive radio; spectrum allocation; game theory; parameters adjustment; step response

## 0 引言

现今无线网络大多采用的是固定频谱分配政策,频谱利用率低,而随着各种无线通信技术的发展,频谱资源稀缺已成为无线通信技术发展的瓶颈,如何更好地利用现有的频谱资源成为迫在眉睫需要解决的问题<sup>[1-3]</sup>。在这种背景下,认知无线电技术应运而生,它可以感知周围无线环境,并从环境中获取信息,通过实时改变传输参数(如传输功率、载频和调制方式)来适应外部无线环境的变化<sup>[4]</sup>。认知无线电技术可以在不影响授权用户(Primary User, PU)正常工作的情况下,允许认知用户(Second User, SU)使用当前空闲的频谱空穴,从而提高频谱利用率。

近年来,国内外已有许多学者应用经济学中博弈理论来分析和处理认知无线电中的频谱分配问题。文献[5]采用动态博弈方法分析了一个授权用户与多个认知用户的无线电频谱共享问题;文献[6]应用博弈模型分析多个授权用户与多个认知用户的无线电频谱分配问题;文献[7]提出认知用户可以根据频谱需求提出了一个动态博弈模型;文献[8]将博弈论中的拍卖机制应用到频谱共享中,它们都实现了频谱分配,但没有充分考虑授权用户的频谱定价博弈及博弈中速率调整参数的具体整定问题。

认知无线电系统中,授权用户通过出租空闲频谱给认知用户,从而获得额外的收益<sup>[9]</sup>。对于以最大化自身收益为目的的授权用户而言,如何确定频谱的出租价格是关键。本文在总结众多学者的频谱分配方法基础上,针对授权用户间的频谱定价博弈及博弈中的速度调整参数整定问题,给出了基于 Bertrand 模型的授权用户信道价格竞争的动态博弈算法,最终得到稳定的纳什均衡解,即频谱/信道出租价格;分析了稳定的纳什均衡解与速率调整参数的关系,用控制理论中一阶阶跃函数来模拟无震荡博弈过程,并采用控制理论阶跃响应相关知识解决实际商业策略制定过程中速率调整参数 $\beta$ 的选取问题。

## 1 系统模型及方案

### 1.1 系统模型及假设

本文考虑两个授权用户和多个( $N=200$ )认知用户的无线电频谱分配模型。这里的两个授权用户拥有两个独立的频谱共享池,对应博弈双方即市场中寡头双方。两信道共享池的信道质量会有一定差别,这种差别类似于寡头双方产品在外形或品质上的差异。多个认知用户具有不同的信道使用偏好,又类似于市场中消费者对寡头双方产品的不同偏好,从而组成一个纵向产品差异市场。这样可以将本文讨论的信道分

收稿日期:2012-01-06;修回日期:2012-05-19。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61003208)。

作者简介:张北伟(1984-),女,湖北黄冈人,博士研究生,主要研究方向:认知无线电、频谱分配; 胡琨元(1977-),男,辽宁沈阳人,研究员,博士,主要研究方向:智能信息处理、移动商务、现代物流运作管理、决策分析、智能优化; 朱云龙(1967-),男,江苏南通人,研究员,博士,主要研究方向:CIMS、分布式智能、协同制造、SCM/ERP/CRM 系统管理软件。

配模型等效于差别双寡头市场模型<sup>[10]</sup>。

本文假设寡头双方是有理性的而且是各自独立的。实际中,某一个寡头策略的改变都会影响另外寡头实施的相应策略,而且策略的改变对寡头双方来说是透明的。本文还假设每个认知用户最多从授权用户购买一条信道。认知用户的信道需求取决于频谱共享池中信道的质量以及相应信道的价格,授权用户的利润主要由信道的价格、成本等因素所决定。

### 1.2 Bertrand 模型博弈方案

Bertrand 模型中参加该博弈的双方都以价格作为决策变量,是双寡头价格竞争的一种模型<sup>[10]</sup>。认知用户的效用函数<sup>[9]</sup>可用式(1)来表示:

$$U = \begin{cases} \theta s - p - r, & \text{购买信道效用} \\ 0, & \text{不购买信道效用} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $p$ 表示认知用户购买信道的价格; $s$ 表示认知用户所购买信道的质量; $\theta$ 表示认知用户的偏好参数,设其服从概率密度为 $g(\theta)$ 的分布,并假定 $\theta$ 在区间 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 内变化, $\theta_{\min}$ 和 $\theta_{\max}$ 分别表示 $\theta$ 取值的下限和上限,设 $P$ 为相应的概率分布函数,表达式是 $P = G(\theta)$ ,即用 $G(\theta)$ 表示偏好参数小于 $\theta$ 的认知用户比例; $r$ 为市场中其他因素对认知用户的效用的影响,如购买信道后同类型信道价格浮动带来的升值和贬值影响等,本文将 $r$ 设为常数。

假定两个频谱共享池中的信道质量一高一低,用 $H$ 和 $L$ 表示两个频谱共享池,用 $s_1, s_2$ 表示不同质量,且有 $0 < s_1 < s_2$ 。 $p_1$ 和 $p_2$ 分别表示系统 $H$ 和 $L$ 的信道价格,设 $\theta_0$ 表示认知用户对高质量信道和低质量信道的需求无差异时的偏好参数,则根据式(1)可得:

$$\theta_0 s_1 - p_1 - r_1 = \theta_0 s_2 - p_2 - r_2 = U_0 \quad (2)$$

根据式(2)可以计算出对于高质量信道效用无差异的偏好参数 $\theta_0$ ,且 $\theta_0 = (p_1 - p_2) / (s_1 - s_2)$ 。偏好参数超过 $\theta_0$ 的用户购买高质量信道,偏好参数低于 $\theta_0$ 的用户购买低质量信道。

假设每个授权用户的出租信道状态相同,其边际成本只与信道质量有关;不失一般性,假设成本 $c_i = \alpha s_i (i = 1, 2)$ ,其中 $\alpha$ 为常数,对于两个系统都是同一个值。在博弈的第1阶段,首先选择拟出租的信道质量 $s_i (i = 1, 2)$ ;第2阶段确定信道价格 $p_i (i = 1, 2)$ 的高低。假设 $g(\theta)$ 满足 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 内的均匀分布,则 Bertrand 模型下系统的利润函数如式(3)所示:

$$\begin{cases} \pi'_H = \frac{N(p_1 - \alpha s_1) \left[ \theta_{\max} - \frac{(p_1 - p_2)}{s_1 - s_2} \right]}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \\ \pi'_L = \frac{N(p_2 - \alpha s_2) \left[ \frac{(p_1 - p_2)}{s_1 - s_2} - \theta_{\min} \right]}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \end{cases} \quad (3)$$

由于授权用户以最大化自身利润为目的,所以根据阶段 $t$ 的边际效用的变化可以得出阶段 $t+1$ 的信道出租价格。出租价格的递推公式如式(4)所示:

$$p_i(t+1) = p_i(t) + \beta \left( \frac{\partial \pi'_i}{\partial p_i} \right) \quad (4)$$

其中:

$$j = \begin{cases} H, & i = 1 \\ L, & i = 2 \end{cases}$$

$\beta$ 是速率调整参数,表明差别寡头市场博弈的动态性。因此,式(4)考虑的是动态 Bertrand 博弈过程。联合式(3)与式(4)求解可得如式(5)所示的信道出租价格。

$$\begin{cases} p_1(t+1) = p_1(t) + \beta \frac{N}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \left( \theta_{\max} - \frac{2p_1(t) - p_2(t) - \alpha s_1}{s_1 - s_2} \right) \\ p_2(t+1) = p_2(t) + \beta \frac{N}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \left( \frac{p_1(t) - 2p_2(t) + \alpha s_2}{s_1 - s_2} - \theta_{\min} \right) \end{cases} \quad (5)$$

### 1.3 纳什均衡解的条件

根据博弈论的知识,稳定的系统才能确保在经过有限次博弈后得到纳什均衡解。这里由信道价格递推公式(式(5))得到的雅克比矩阵公式(式(6))的特征值来分析博弈的稳定条件:稳定的博弈过程,要求雅克比矩阵的特征值都要在复平面的单位圆内。根据矩阵论的知识,利用等式 $Jp = \lambda p$ 求出雅克比矩阵 $J$ 的特征值。 $\lambda_i$ 为雅克比矩阵 $J$ 的特征值, $p$ 是特征值 $\lambda_i$ 对应的特征向量。式(6)是雅克比矩阵 $J$ 。

$$J = \frac{\partial \bar{p}_{t+1}}{\partial \bar{p}_t} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1(t+1)}{\partial p_1(t)} & \frac{\partial p_1(t+1)}{\partial p_2(t)} \\ \frac{\partial p_2(t+1)}{\partial p_1(t)} & \frac{\partial p_2(t+1)}{\partial p_2(t)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{p}_t^T &= \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix} \\ \bar{p}_{t+1}^T &= \begin{bmatrix} p_1(t+1) \\ p_2(t+1) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{2\beta N}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})(s_1 - s_2)} & \frac{\beta N}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})(s_1 - s_2)} \\ \frac{\beta N}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})(s_1 - s_2)} & 1 - \frac{2\beta N}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})(s_1 - s_2)} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

令 $|\lambda_i| < 1$ ,则计算 $\beta$ 的取值范围如式(7):

$$0 < \beta < [2(\theta_{\max} - \theta_{\min})(s_1 - s_2)] / 3N \quad (7)$$

因此,当信道质量与认知用户偏好区间一定时,纳什均衡的稳定性取决于速率调整参数 $\beta$ 。

## 2 速率调整参数分析整定及仿真实现

利用 Matlab 进行仿真实验。从仿真结果分析 Bertrand 博弈的纳什均衡解与速率调整参数 $\beta$ 的关系;分析寡头双方在实际商业策略制定中 $\beta$ 等参数的确定。

### 2.1 价格博弈的纳什均衡解

假设高低信道质量分别为 $s_1 = 3$ 和 $s_2 = 1$ ,在系统中认知用户的数量 $N = 200$ ,边际成本参数 $\alpha = 1$ ,认知用户的偏好区间为 $[1, 7]$ 。由以上具体的参数,参考式(7)可以计算出速率调整参数 $\beta$ 的取值范围 $0 < \beta < 0.04$ 。本文仿真将基于上述参数值。图1给出已知价格 $p_2$ 取值时,寡头双方各自的利润及双方利润和随价格 $p_1$ 变化的趋势。

由图1可看出,当 $p_1$ 较小时,两个系统的利润及利润和都随 $p_1$ 的增加而增加,但系统 $H$ 的利润及两系统利润和增加到一定程度后开始降低。两系统利润和的最高点对应着价格 $p_1$ 的最优响应点。而且从图1易看出, $p_2$ 越高,系统 $H$ 的最优响应点利润也越高。

### 2.2 速率调整参数对博弈的影响

从式(6)可看出,速率调整参数需要一定的取值范围,否则博弈是不稳定的。文献[11]已经给出这样的结论:当 $\beta$ 较小时,信道价格和系统利润从零逐渐逼近均衡点; $\beta$ 较大时博弈会先呈现震荡的过程,再逼近均衡点;若 $\beta$ 大到一定程度博弈价格和博弈利润将震荡,无法达到稳定的博弈结果。文献

[12] 分析了认知无线电中各种博弈模型的收敛性。这里研究两信道价格和的博弈规律。

图2是 $\beta$ 取不同值时的价格的博弈情况。图中为了看出价格变化趋势,将离散价格点进行了差值拟合,易看出不论 $\beta$ 取何值,博弈价格能否达到稳定,两信道价格总和总是不震荡的。

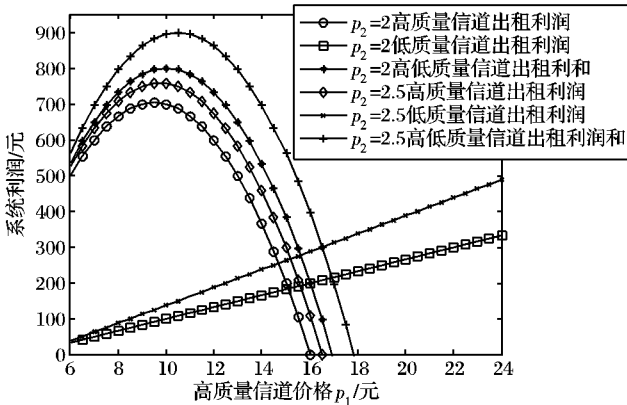


图1 已知 $p_2$ 寡头双方的利润及利润和

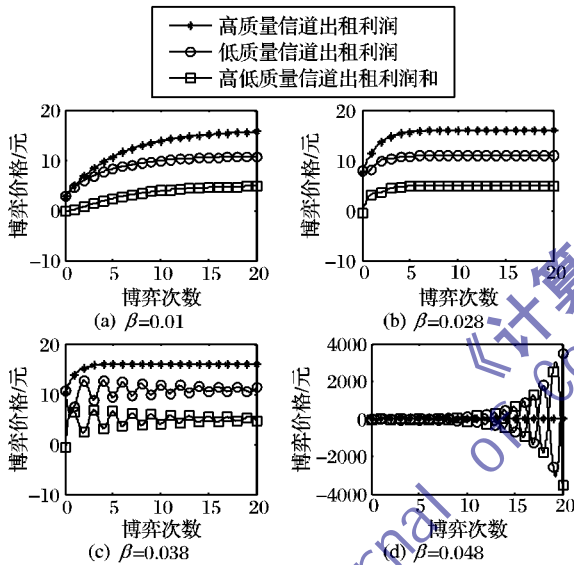


图2 不同速率调整参数下的价格博弈结果

### 2.3 速率调整参数 $\beta$ 的整定

#### 1) 稳定价格差商业策略下 $\beta$ 的确定。

假设寡头双方想要实际市场价格变化按一定规律,如已知寡头双方本次博弈的价格差为 $p_1(t) - p_2(t)$ ,若要求下次博弈的价格差比本次上调10%,即:

$$p_1(t+1) - p_2(t+1) = 1.1(p_1(t) - p_2(t))$$

可以利用式(5)中的两式之差来确定参数 $\beta$ 。式(8)是 $\beta$ 随价格差上涨幅度 $m$ 的关系:

$$\beta = \frac{(\theta_{\max} - \theta_{\min})m(p_1(t) - p_2(t))}{N[\theta_{\max} + \theta_{\min} + \alpha - \frac{3(p_1(t) - p_2(t))}{1 - s_2}]} \quad (8)$$

这样,寡头双方可以根据双方价格差上涨幅度确定速率调整参数 $\beta$ ,利用式(5)寡头可以实现实时对信道定价并快速制定商业策略。

#### 2) 要求博弈价格快速稳定的商业策略下 $\beta$ 的确定。

多数寡头除了期望价格博弈是无震荡的( $\beta$ 较小的情况)之外,更关注经过有限次博弈价格接近或达到稳定价格的过程中各个时期的信道定价。这类类似于关注一阶系统阶跃响应的上升时间及其响应值。因此,本文用一阶阶跃响应函数形式

$y = a - b \exp(-ct)$ 代替无震荡博弈曲线,其中 $a, b, c$ 为待求的未知参数。这样,一个合适的替代将可以更加直观地理解无震荡博弈,并可以将控制理论中的上升时间、稳定时间等概念引入,从而更有效地分析博弈过程,并确定 $\beta$ 值,便于寡头双方快速制定相应策略。

图3是给定参数 $a = 1, b = 1, c = -0.5$ 的一个阶跃响应。

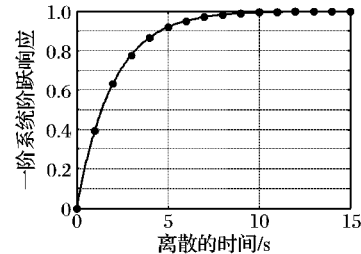


图3  $a = b = 1, c = -0.5$ 下一阶系统阶跃响应的效果

下面详细讨论参数 $a, b, c$ 的确定。这里提出三值法,即根据稳态值、初值、上升时间值确定参数 $a, b, c$ 的取值,其中稳态值由参数计算得到。

首先,根据稳态值确定 $a$ 。如果博弈结果是稳定的,当经过多次博弈,价格不再变动,也就是 $p_i(t+1) = p_i(t) (i = 1, 2)$ 。这样可以根据式(5)得到高低质量信道的价格稳态值 $p'_1$ 和 $p'_2$ ,如式(9)所示(以高质量信道为例, $a = p'_1$ ):

$$\begin{cases} \theta_{\max} = \frac{2p_1(t) - p_2(t) - \alpha s_1}{s_1 - s_2} \\ \theta_{\min} = \frac{p_1(t) - 2p_2(t) + \alpha s_2}{s_1 - s_2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p'_1 = [(2\theta_{\max} - \theta_{\min})(s_1 - s_2) + 2\alpha s_1 + \alpha s_2]/3 \\ p'_2 = [(\theta_{\max} - 2\theta_{\min})(s_1 - s_2) + \alpha s_1 + 2\alpha s_2]/3 \end{cases} \quad (9)$$

其次,设高质量信道价格初值 $p_1^0$ ,这时联系初值确定参数 $b$ ,如式(10)所示:

$$p_1^0 = p'_1 - b \exp(-c \times 0) \Rightarrow b = p'_1 - p_1^0 \quad (10)$$

最后,根据上升时间值确定参数 $c$ 。设价格到达上升幅度的63.2%的值称为上升时间值,上升时间值对应的是第 $k$ 次博弈。 $k$ 值由寡头确定,决定博弈价格上升的速度,是博弈价格快速稳定商业策略的重要参数。参数 $c$ 的计算如式(11)所示:

$$p_1^0 + 0.632(p'_1 - p_1^0) = p'_1 - b \exp(-ck) \Rightarrow c = \ln((p'_1 - p_1^0)/(0.368(p'_1 - p_1^0)))/k \quad (11)$$

当选定参数 $a, b, c$ 后,下面确定 $\beta$ 的值。由仿真参数和式(8)计算得高低质量信道稳态值 $p'_1 = 11, p'_2 = 5$ 。这里,假设初始的博弈价格为 $p_1^0 = 10, p_2^0 = 4$ ,令 $k = 3$ ,即寡头希望经过3次博弈后价格到达上升幅度的63.2%。利用式(4)及式(12)计算 $\beta$ 取值。

$$p_i(k) = p_i^0 + 0.632 \times (p'_i - p_i^0) \quad (12)$$

由上述参数计算出 $\beta = 0.01867$ 。

图4是阶跃响应参数确定与 $\beta$ 确定的流程。

下面验证用已确定的一阶阶跃响应函数代替无震荡博弈曲线的有效性。本文将稳定时间值,即价格上升到变化幅度的95%时的时间,作为替代效果好坏的判断标准。

上面计算得到的高质量信道对应的替代阶跃响应函数为 $y = 11 - \exp(-0.3332t)$ ,则可以计算 $t = 8.991$ 时达到稳态;而计算的第9步博弈价格结果为10.96,此时的时间为价格上升到稳态值的96%的时间。这与用阶跃响应函数分析的结果十分接近,因此理论计算认为替代效果满足。

图5为 $y = 11 - \exp(-0.3332t)$ 曲线及 $\beta = 0.01867$ 时博弈结果对比。



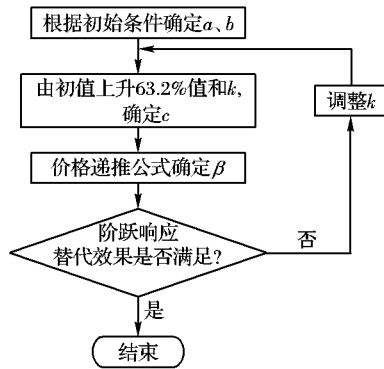


图4 阶跃响应函数替代博弈过程流程

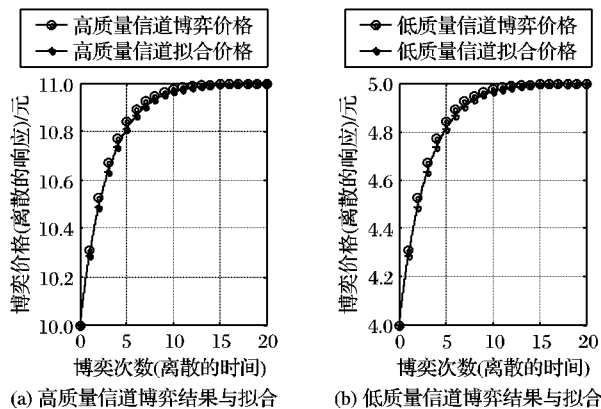


图5 阶跃响应函数与博弈结果比较

从图5中也验证了高低信道价格的博弈结果都可以由阶跃响应函数很好地来替代。图5中的博弈次数等效为离散系统阶跃响应时间, 博弈价格等效为离散系统阶跃响应值。

因此, 寡头不用经过复杂的迭代计算去分析博弈过程, 可以通过合适的阶跃函数来分析, 使得博弈双方能快速实时制定信道价格及其他的商业策略, 给双方带来更大的效益。

### 3 结语

本文针对认知无线网络中的授权用户博弈问题, 将经济学中的差别双寡头市场模型应用到信道价格博弈中。将模型简化成两个授权用户和  $N$  个认知用户的系统, 授权用户系统向认知用户出租空闲的信道, 根据信道出租的实际情况, 采

用动态 Bertrand 博弈来确定信道的最终定价, 以达到最大化系统利润的目的; 详细阐述了两商业策略下, 博弈中速率调整参数  $\beta$  的确定。理论与仿真表明, 系统可以获得纳什均衡的条件与系统的速率调整参数  $\beta$  有关, 合理的阶跃响应函数可以很好替代和分析价格博弈过程, 在实际应用中, 可以指导授权用户快速制定出商业博弈策略。

#### 参考文献:

- [1] 周小飞, 张宏纲. 认知无线电原理及应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2007.
- [2] 李校林, 柳海涛. 基于超模博弈的认知无线电频谱分配算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2010, 22(2): 151-155.
- [3] 徐浩漫, 唐伦, 陈前斌. 基于博弈学习的动态频谱分配算法研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(5): 100-104.
- [4] HAYKIN S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [5] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2651-2660.
- [6] NIYATO D, HOSSAIN E, HAN Z. Dynamics of multiple-seller and multiple-buyer spectrum trading in cognitive radio networks: A game-theoretic modeling approach [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(8): 1009-1022.
- [7] HAN N, SHON S H, CHUNG J H, et al. Spectral correlation based signal detection method for spectrum sensing in IEEE 802.22 WRAN systems [C]// ICAC 2006: Proceedings of the 8th International Conference Advanced Communication Technology, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006, 3: 1765-1770.
- [8] AGIZA H N, ELSADANY A A. Chaotic dynamics in nonlinear duopoly game with heterogeneous players [J]. Applied Mathematics and Computation, 2004, 149(3): 843-860.
- [9] 席志红, 晋野, 李娅. 认知无线电的频谱分配算法[J]. 应用科技, 2010, 37(2): 9-11.
- [10] MATSUMURA T, SHIMIZU D. Economic welfare in delivered pricing duopoly: Bertrand and Cournot [J]. Economies Letters, 2005, 89(1): 112-119.
- [11] 谭学治, 刘玉涛, 魏守明. 基于博弈论的认知无线电频谱分配[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 22-26.
- [12] NCEL J, REED J H, GILLES R P. Convergence of cognitive radio networks [C]// WCNC 2004: Proceedings of 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004, 4: 2250-2255.

(上接第2407页)

- [2] AHLWEDE R, CAI N, LI S-Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [3] ZHANG JUN, DU BING. Physical-layer network coding over wireless fading channel [C]// ICICS 2009: Proceedings of the 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [4] HOPGOOD J R, RAYNER P J W. Single channel non-stationary stochastic signal separation using linear time-varying filters [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(7): 1739-1752.
- [5] RICKARD Y S. Blind separation of speech mixtures via time frequency masking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(7): 1830-1847.
- [6] LIU KAI, LI HUI, DAI XUCHU, et al. Single channel blind signal separation of cofrequency MPSK signals [C]// CIT 2006: Proceedings of International Conference on Communication, Internet and Information Technology. Calgary, Alberta, Canada: ACTA Press, 2006: 42-46.
- [7] KATTI S, GOLLA KOTA S S, KATABI D. Embracing wireless interference: analog network coding [C]// Proceedings of the 2007 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2007: 397-408.
- [8] KOIKE-AKINO T, POPOVSKI P, TAROKH V. Denoising maps and constellations for wireless network coding in two-way relaying systems [C]// Proceedings of IEEE GLOBECOM 2008. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [9] 田上成, 王可人, 焦传海. 数字卫星广播系统中的调制识别研究 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 1095-1110.
- [10] ZHANG SHENGLI, LIEW SOUNG-CHANG, LAM P P. On the synchronization of physical-layer network coding [C]// ITW 2006: IEEE Information Theory Workshop. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 404-408.
- [11] 杨志华, 张钦宇, 刘宁宁, 等. 基于能量检测的 UWB 数据包联合捕获方法 [J]. 通信学报, 2009, 30(12): 50-57.
- [12] 杨帆, 罗振东, 田宝玉. 一种新型的卷积码混合译码算法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1237-1240.