

# Research on Dynamic Spectrum Management Based on Potential Game Theory

Ren Gao

Hubei University of Economics, Wuhan  
Email: gaoren@whu.edu.cn

Received: Nov. 1<sup>st</sup>, 2013; revised: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2013; accepted: Nov. 28<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Ren Gao. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** Dynamic spectrum management is one of the important components in cognitive radio, which can build effective system structures for cognitive radio network in order to realize the dynamic perception and access of spectrum. This paper explores dynamic spectrum management technologies based on potential game theory. It firstly analyzes the mapping relationship between game theory and dynamic spectrum management. Then, the model of dynamic spectrum management is established in cognitive radio network by potential game and the main process is given. The simulation is carried out and the results show that the presented model can not only describe user's behaviors in cognitive radio network, but also assist the design for dynamic spectrum allocation.

**Keywords:** Dynamic Spectrum Management; Cognitive Radio Network; Potential Game; Game Theory

## 基于势博弈的认知无线网络动态频谱管理研究

高 刃

湖北经济学院, 武汉  
Email: gaoren@whu.edu.cn

收稿日期: 2013年11月1日; 修回日期: 2013年11月22日; 录用日期: 2013年11月28日

**摘 要:** 动态频谱管理技术是认知无线网络技术的重要组成部分, 是设计高效的认知无线网络系统架构、实现动态频谱感知、动态频谱接入等的关键技术。对基于势博弈的认知无线网络动态频谱管理研究, 分析了博弈论与动态频谱管理之间的映射关系。基于势博弈, 对认知无线网络动态频谱管理进行了建模, 给出了主要管理过程。对提出的模型进行了仿真实验, 结果显示通过基于博弈论的方式来描述认知无线网络各个用户间的行为, 不仅能够研究各个节点的个体行为, 同时还能够指导认知无线网络动态频谱分配、节点认知方式设计等。

**关键词:** 动态频谱管理; 认知无线网络; 势博弈; 博弈论

### 1. 引言

近年来, 随着信息化建设的不断加强, 无线通信技术得到了迅猛的发展, 无线网络业务需求量激增, 无线网络的业务量正在逐步超越传统的有线网络业务量。但是, 目前大多数无线网络仍然采用静态频谱分配的方式, 造成了频谱资源利用率低、分配不灵活

等问题, 极大的制约了无线网络业务的发展。为了提高无线频谱资源的利用率, 认知无线网络应运而生。通过重复利用有限频谱资源、发掘频谱资源复用潜力, 认知无线网络能够有效的改善频谱资源静态分配的不合理现象。基于认知无线电技术, 认知无线网络能够检测出网络当中的空闲频谱资源; 同时, 通过使

用合适的动态频谱管理策略,它允许认知网络用户在不干扰主网络用户的前提下,访问网络当中这部分空闲的频谱资源,动态的实现认知网络用户的频谱接入。

博弈论是一门以数学作为基础,研究多个参与者在竞争过程中策略之间的相互作用、相互影响的学科。博弈论与认知无线网络拥有相似的应用场景。在认知无线网络,网络用户需要以检测到的的频谱动态和其他用户通过的行动为基础,对其频谱的使用和运行参数做智能决定。基于博弈论的认知无线网络应用近年来取得了一定的发展。D. Niyato 等人认为频谱之间的主要问题是主体用户和多个二级用户之间的频谱共享<sup>[1-3]</sup>。他们将这个问题形式化为一个寡头垄断的市场竞争和使用一个 Cournot 博弈获得二级用户的频谱分配。纳什均衡被认为是这个博弈模型的解决方案。在文献[1]至文献[3]中,涉及到多个主要服务供应商相互竞争的二级用户提供频谱接入机会在认知无线网络频谱的定价问题。通过使用一个平衡的定价计划,每个的主要服务提供商的目标质量服务约束下最大化其利润的主要用户。在文献[4]中,作者进行一种新的尝试,开发了一个基于博弈论的频谱共享策略来计算以下约束下的最大信道容量:1) 尊重其邻局的信道及;2) 发射功率限制可用的通道,使授权用户质量不受干扰。虽然基于博弈论的频谱管理应用得到了很大的发展,但是仍然在很多方面上没有得到很好的研究。

本文以认知无线网络当中各用户对频谱的共享选择竞争为分析场景,研究基于博弈论的动态频谱管理问题。研究博弈论与动态频谱管理之间的映射关系,构建描述认知无线网络各个用户间行为的方法,以指导认知无线网络动态频谱分配、节点认知方式设计。

## 2. 博弈论与动态频谱管理的映射

J. Neel 等人对博弈论应用到通信网络分析与建模等方面进行了深入的研究,并提出了二者应用结合的可能性<sup>[5]</sup>。他们认为,要将博弈论应用到通信网络技术当中的前提条件是所要研究的对象能够满足博弈过程的理性条件和基本要素。其中,理性条件包括:

1) 博弈的过程需要对规范进行定义,即通信方根

据环境因素进行策略选择和行动时要遵守一组确定的判定规则。

2) 参与者在进行决策选择时,能够对获得更好的收益有一个合理的预期。要满足这一条件,每一个参与者需要有一个收益最大化的严格定义的目标函数。该条件与可定义的目标函数与行动组合,都是对博弈过程进行良好的分析的必要条件。

同时,要利用博弈论进行问题分析,其基本要素也必须满足,主要包括:

1) 在认知无线网络当中能够进行决策的参与者或者决策实体数量必须大于 1。

2) 参与者的决策集合拥有一个或者一个以上的策略或行动。

基于以上两个条件,我们可以看出认知无线网络能够完全满足博弈论对问题分析的要求。实际上,认知无线网络的频谱资源共享包含了多个主网络用户与认知用户的博弈过程。为了获得自身利益最大化,主网络用户之间、主网络用户与认知网络用户之间、认知网络用户之间都会存在相互竞争和相互影响。因此,基于博弈论的认知无线网络动态频谱管理分析就是要找出能够使得各参与方收益最大化的收敛结果。

在认知无线网络当中,存在着两种不同类型的认知对象性,即主网络用户和认知网络用户,它们共同使用有限的无线频谱资源。认知无线网络是一种具有自适应能力,能够感知频谱资源的使用情况、频谱资源当前的环境和潜在用户的使用情况,同时具有对新分配模型、新频道、新场景学习的能力。实际上,在认知无线网络当中,主网络用户与认知网络用户之间是存在竞争关系的,它们共同分享频谱资源,但前提是无线频谱资源必须以保证主网络用户正常通信为前提。图 1 显示了认知无线网络的循环认知过程<sup>[6]</sup>,从中,我们可以很清晰的看出认知无线网络当中各个认知的环节。

在整个认知链当中,无线接收器的操作环境相关信息通过直接观察或信号发送的形式获得。环境信息获取后,通过评估过程决定信息的重要程度,然后,认知无线网络决定其采用的策略并选择一个最优的评估策略进行资源分配。假定某一个波形(waveform)的变化是必须的,认知无线网络就会通过调整其资源并通过执行相应的信号实现这一波形的变化。这些变

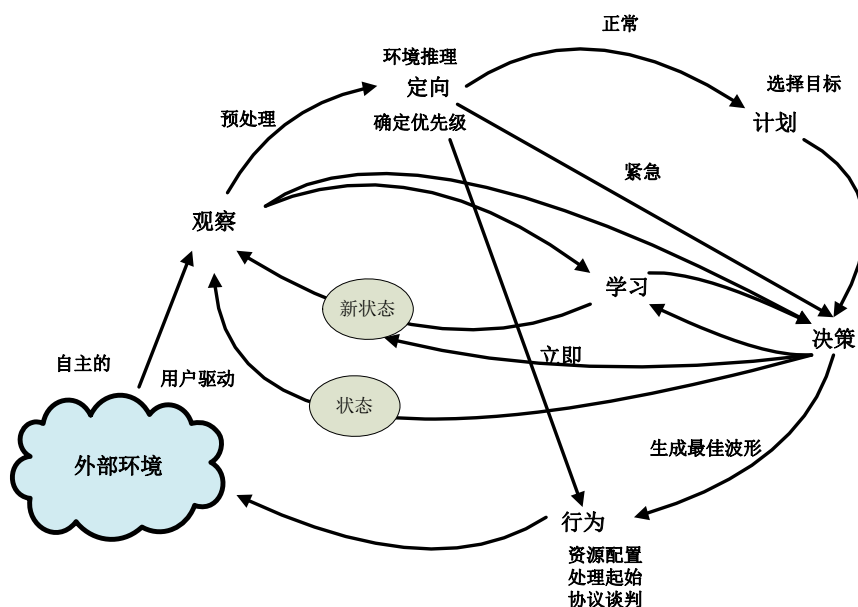


Figure 1. Cognitive processes of cognitive networks circulation  
图 1. 认知无线网络的循环认知过程

化的过程就是认知无线网络对外界环境改变时做出的推测和反应。通过这个过程，认知无线网络利用这些观测者和决策来提高频谱资源的利用率。同时，认知无线网络还可能会创建新的建模状态，生成新的策略或者产生新的评估模型。认知无线网络要求能够对环境进行感知，同时能够很好的分配频谱资源。

博弈论是一个用于分析交互性决策过程的数学工具，其基础构件就是进行博弈过程的各种概念和见解。我们可以将博弈论的主要组成描述为三大部分：

- 1) 有限的参与者，即参与博弈的个体；
- 2) 参与者的策略集合，即所有参与者在博弈过程中使用的策略；
- 3) 效用函数，它代表了参与到该博弈过程当中的参与者可能获得的收益情况，该收益情况会受到参与者选择不同策略进行博弈的影响，即某一个参与者的结果收益不仅决定于自己采用的博弈策略，还要受到其他参与者选择博弈策略的影响。

在博弈过程中，假定参与者都是自私的个体，他们会尽可能的采用最适合自己的收益的策略来获得博弈的胜利。在认知无线网络当中，我们可以将主网络用户和认知网络用户看成是参加博弈的参与者，他们博弈的目的就是为了获得更多的无线频谱资源以实现自己的通讯目的。

认知无线网络当中的每一个节点都可以看做博

弈当中的决策过程，节点的各种可选解决方案构成了节点的博弈策略，最终参与者可以使用的无线频谱资源就是博弈当中的效用函数。在观察的这一环节提供了参与者可以对效用函数参数进行评估，方向(orient)环节提供了对效用函数价值的决策。因此，认知无线网络的循环认知过程与博弈论思想有十分相似的地方，通过博弈论对认知无线网络进行研究，能够使用不同的博弈论算法，分析认知无线网络的应用状况。

### 3. 基于势博弈的认知无线网络建模

在认知无线网络环境里，由于主网络用户可能在任何的时间段出现在网络当中，要求获取已授权的频谱资源，因此，认知无线网络具有很强的时变特性，使得频谱资源的利用难以进行预测。在认知无线网络当中，当主网络用户突然出现导致通信中断时，通常采用随机接入的方式维持原有通信，但是随机模式具有不稳定性，可能会导致在一段较长的时间内通信质量得不到保证。我们希望通过利用博弈论的方法进行认知无线网络动态频谱管理，当出现上述情况时，通过博弈算法的策略组合，进行自我修复，顺利维持原有通信。

采用势博弈的动态频谱管理将具有以下优点：

- 1) 较强的自适应能力，能够应对各种突然出现主网络用户及频谱资源突发分配状况；

2) 较快的收敛速度, 在一个规模相对较小的认知网络中, 能够快速的收敛, 达到稳定状态;

3) 信息交互次数少, 因为该模式与集中式的信息交互不同, 所以其交互的信息量较少, 而且具有自适应能力, 不需要精确的同步机制。

按照博弈论的定义, 我们将认知无线网络的各个相关实体用博弈论的概念进行描述, 以分析不同对象之间的相互作用和相互影响。我们将博弈过程中的博弈行为描述为:

$$G = \{M, A, \{u_i\}\} \quad (1)$$

其中,  $G$  表示这是一个博弈的行为,  $M$  表示有限个参与者的集合, 通常表示为  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $A_i$  表示第  $i$  个参与者可选择的策略行动集, 整个行动域空间可以表示为  $A = A_1 * A_2 * \dots * A_m$ , 参与者最大化的效用函数表示为  $\{u_i\} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。对于参与者  $i$  来说, 效用函数  $u_i$  是当参与者  $a_i$  选择了某一个策略, 同时其他参与者  $a_{-i}$  也选择了他们相应的某一个策略后所获得的收益。

本模型要求达到的纳什均衡状态是指当没有任何一个参与者采用自身策略能够增加它自身收益时, 即  $u_i(a) \geq u_i(b, a_{-i})$ ,  $i, j \in M$ 。

势博弈具有以下性质<sup>[7]</sup>:

1) 如果每一个势博弈是序列的并且有限的, 那么它会拥有一个纯策略的均衡状态。

2) 如果每一个势博弈是序列的并且有限的, 那么它具有有限改进的特性。

3) 如果一个博弈的全部参与者的策略选择可以用一个全局函数来表达的话, 那么该博弈就是一个势博弈。

本文提出的认知无线网络动态频谱管理建模基于以上三个性质。

势博弈的定义如下<sup>[7]</sup>:

假设  $\Gamma(u^1, u^2, \dots, u^m)$  为参与者数量为  $m$  的博弈策略描述, 参与者集合为  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ , 参与者  $i$  的策略集合表示为  $Y^i$ , 参与者  $i$  的效用函数表示为  $u^i: Y \rightarrow R$ , 其中  $Y = Y_1 * Y_2 * \dots * Y_m$  为整个策略域空间,  $R$  表示实数集。在表达明确的地方, 可以使用  $\Gamma$  代替  $\Gamma(u^1, u^2, \dots, u^m)$ 。对于任意一个个体  $S \subseteq M$ ,  $S$  则表示  $M$  集合当中去掉  $S$  集合,  $Y^S$  表示笛卡尔积  $\times_{i \in S} Y^i$ 。如果为单元素集合  $\{i\}$ , 可以用  $Y^{-i}$  表示  $Y^{-\{i\}}$ 。

如果函数  $P: Y \rightarrow R$  满足以下条件:

对于参与者  $i (i \in M \text{ 且 } y^{-i} \in Y^{-i})$  而言, 任意的  $x, z \in Y^i$ , 如果  $P(y^{-i}, x) - P(y^{-i}, z) > 0$  都能够有  $u^i(y^{-i}, x) - u^i(y^{-i}, z) > 0$ , 则称  $\Gamma$  为序列势。当  $\Gamma$  满足序列势的条件时, 它被称作是序列势博弈。

当  $w = (w^i)_{i \in M}$  是一个正数向量时, 它被称为权值。如果函数  $P: Y \rightarrow R$  满足以下条件:

对于参与者  $i (i \in M \text{ 且 } y^{-i} \in Y^{-i})$  而言, 如果任意的  $x, z \in Y^i$  都能够满足

$$u^i(y^{-i}, x) - u^i(y^{-i}, z) = w^i (P(y^{-i}, x) - P(y^{-i}, z)),$$

则称  $\Gamma$  为  $w$  势。当  $\Gamma$  满足  $w$  势的条件时, 它被称作是  $w$  势博弈。当权值  $w$  的具体值不影响博弈过程时,  $P$  简称为权势,  $\Gamma$  被称为权势博弈。

如果函数  $P: Y \rightarrow R$  满足以下条件: 如它为  $\Gamma$  的一个权势, 同时全部的  $i \in M$  都满足  $w^i = 1$ , 则称之为确切的势。当  $\Gamma$  能够满足势时, 其被称为势博弈或确切的势博弈。

#### 4. 基于势博弈的动态频谱管理过程

在认知无线网络当中, 针对频谱资源的利用存在诸多情况, 本文着重讨论当主网络用户需要使用已授权频谱进行通信而突然出现在网络当中, 认知网络用户受到影响的场景。通常, 主网络用户在突然出现时会造成某些频谱带宽不能够使用, 而与该主网络用户相邻的多个认知网络用户必须竞争新的频谱资源, 或者改变当前的频段, 或者中断当前连接, 最终造成通信过程中断。在这一过程里, 我们可以将认知网络用户视为博弈论当中的参与者, 认知网络用户选择频谱资源的方式视为博弈论中参与者根据某种策略进行选择行动的方式, 而将认知网络用户想要获得频谱进行通信的目标作为博弈的结果。根据这一设计思想, 将不同节点对其他节点产生的干扰当作是进行相互博弈的偏好, 构建相应的效用函数来对该过程进行模拟。

在进行博弈的初始阶段, 每一个节点随机的生成一些可用信道的频谱资源, 通过该过程模拟不同信道的使用情况, 并以此描述主网络用户的突然出现对认知网络用户所产生的影响。具体的场景如图 2 所示, 除了中间用户为认知网络用户外, 其他的均为主网络用户。

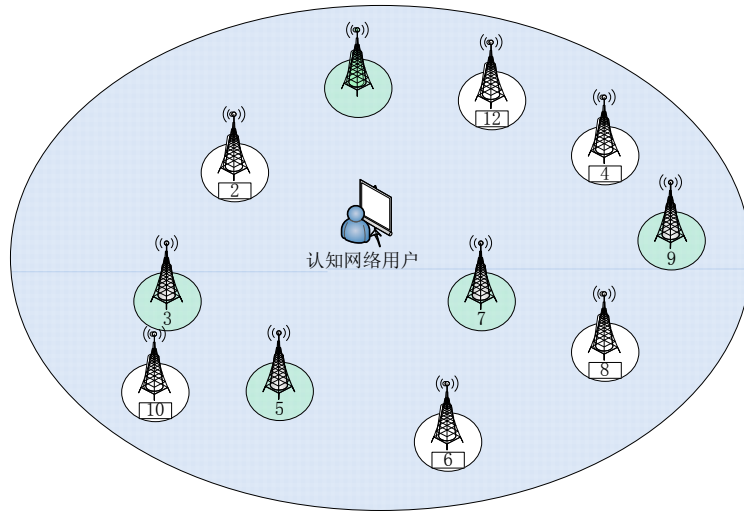


Figure2. Simulation scenarios based on potential game  
图 2. 基于势博弈的仿真场景

图中，认知网络用户的频谱资源状况为双数信道为可用信道(如 2、4、6 等)，单数信道为不可用信道(如 1、3、5 等)。其中，带颜色的节点为主网络用户已使用的节点，没有标注颜色的为空闲频谱资源，可以由认知网络用户使用。由于认知网络用户邻近的主网络用户每次都是不同的，所以使用随机变量的方式来模拟现实场景是可行的。

在博弈过程开始后，每一个认知网络用户都采用随机的方式接入信道当中，这会产生某一频段接入用户过多的问题，从而导致该频段下干扰过大，影响其他主网络用户的正常通信。

在随后的博弈过程中，通过算法对各个阶段的博弈行为进行模拟，根据自身接收到的信噪比选择相应的频谱资源。该设计的主要思想来源于势博弈自身的性质，即如果某一个博弈过程满足势博弈定义，那么肯定会存在一个纯策略的纳什均衡状态，而且具有有限改进的特质。

在此，假设每一个节点在选择信道时都采用信噪比为依据，从而满足势博弈的全局函数策略。一个认知网络用户  $i$  到另一个认知网络用户  $j$  的有向链路表示为  $(i, j)$ 。如果一个认知无线网络的认知网络用户数量为  $N$ ，某个节点  $i$  在新的  $m$  上的干扰可以表示为：

$$r_{im} = \sum_{j=1, j \neq i}^N P_{j,m} H_{i,j} \quad (2)$$

其中， $j \in N$ ， $P_{j,m}$  为在信道  $m$  上节点  $j$  的发射功率， $H_{i,j}$  表示从认知网络用户节点  $i$  到认知网络用户节点

$j$  的信道增益量。为了简单起见，对每一个节点的发生功率限定为一个定值，而信道的增益量与节点之间的距离相关，各个节点及路由具有自我修复的可行性。

## 5. 仿真及结果分析

仿真的场景包括 40 个认知网络用户，它们两两之间进行相互通信，由于主网络用户的出现通信被打断，这些节点被随机的分布在  $200 \times 200$  的矩形场地当中。认知网络用户为博弈过程中的参与者，它们各自对自身的频谱进行检测，并通过相互博弈，获得空闲频谱进行通信。假设每一个认知网络用户可以感知到的信道数量为 15，每一个信道的感知结果满足伯努利概率  $P$  分布，不同参与者之间是相互独立的。仿真过程中假定参与者的通信距离和地理位置都是固定值，因此，参与者之间的影响程度相对较小。信道被主网络用户暂用的概率为 50%，每个参与者节点的功率都为 1 个数量单位，主网络用户的观察点固定。

由于博弈过程中参与者的博弈行为具有独占性，每一次博弈策略改变，只允许一个参与者能够改变自身的策略。但是，认知无线网络的各个参与者信息并不是实时交互并且存在一定的困难性，这使得博弈过程难以进行维护。为了防止参与者同时进行决策而造成算法不收敛之一问题，本仿真假定在一个周期之内，并非所有的参与者同时按照信噪比的判断来进行策略选择，而是采用博弈概率的方式来真正参与博弈。在博弈过程中，每一个参与者先对自身的空闲频



谱资源  $L$  进行计算, 并使用概率值为  $1/L$  的选择方式去改变自身信道。这样, 每一个参与者在进行频谱策略选择和行为变化时可以独立的判断自身条件, 当下一个周期开始后, 参与者才能够获知上次选择的结果。同时, 根据当前的信道信噪比去判断和决策下一次博弈的行为。

当认知网络用户接入到空闲信道中后, 网络某一

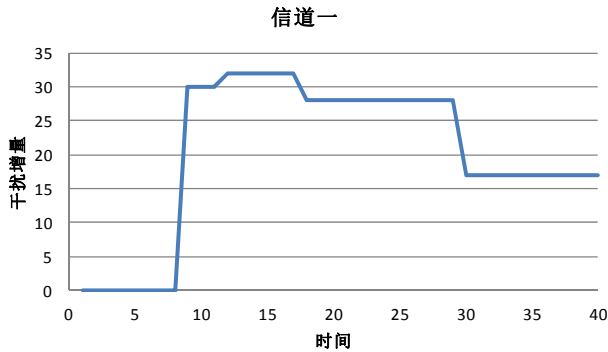


Figure 3. Once the first game channel interference incremental changes  
图 3. 一次博弈信道一的干扰增量变化情况

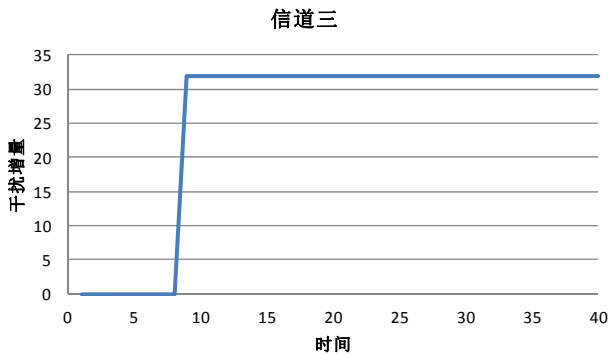


Figure 4. Once the third game channel interference incremental changes  
图 4. 一次博弈信道三的干扰增量变化情况

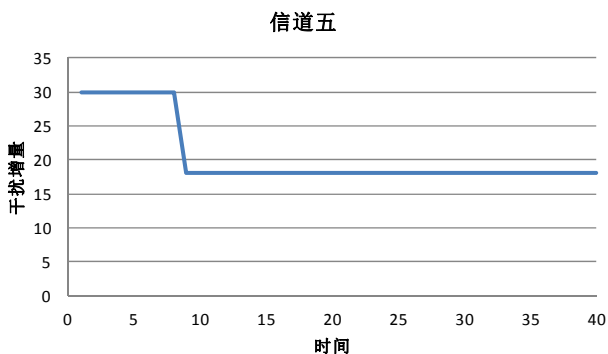


Figure 5. Once the fifth game channel interference incremental changes  
图 5. 一次博弈信道五的干扰增量变化情况

个观测点的干扰功率会随之增加, 图 3~6 显示了一次完整的博弈过程不同信道的干扰增量变化情况。

从图中结果我们可以看到, 由于该次博弈的主要目的是降低最大干扰增量, 所以在进行博弈后, 各个参与方的最大干扰增量都呈下降趋势。但是, 仿真仅仅是对频谱资源的分配策略进行了改变, 这相当于将干扰分散到不同的参与者信道之上, 这样原本干扰程度较低的信道受到的干扰增量就会呈现出一定的提升。图 7 显示了所有信道博弈初始与博弈后的干扰增量对比情况。

从图中可以看出, 由于主网络用户的突然出现, 导致认知网络用户的路由暂时中断。为了维持路由, 一开始采用的是随机选取信道策略。但是, 因为缺乏相关信息, 每个参与者都随机选取, 会造成博弈初期某部分信道干扰增量较大。在博弈行为完成后, 干扰增量就被分散到各个参与者信道上, 从而很好的降低了对各个参与者信道的影响。

为了更好的对博弈过程进行分析, 本仿真开展了多局博弈, 图 8~11 显示了多局博弈信道的干扰增量情况。

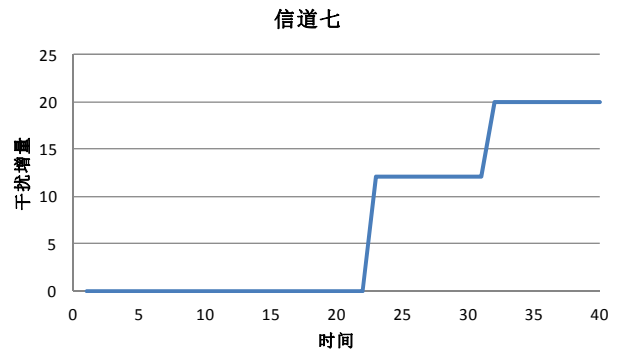


Figure 6. Once the sixth game channel interference incremental changes  
图 6. 一次博弈信道七的干扰增量变化情况

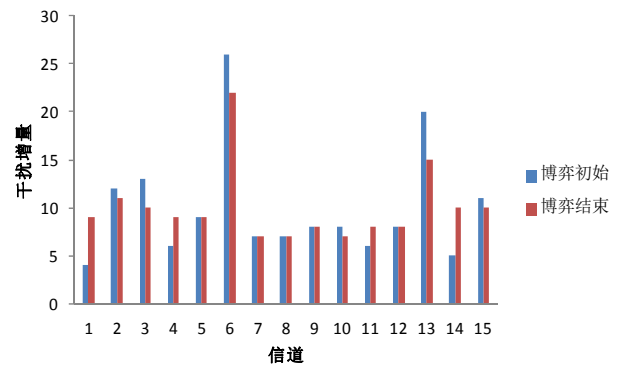


Figure 7. Once all game channel interference incremental changes  
图 7. 一次博弈全部信道的干扰增量变化情况

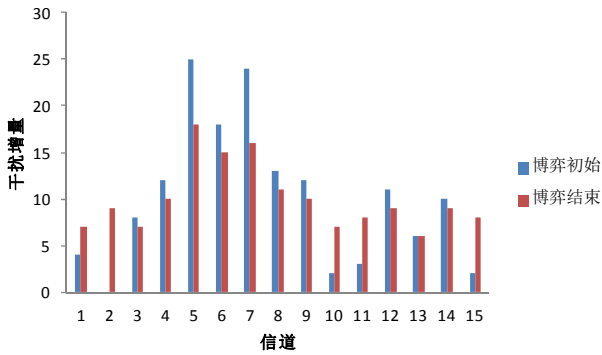


Figure 8. Several parts of the game interfere with incremental changes in the channel (1)  
图 8. 多次博弈部分信道的干扰增量变化情况(一)

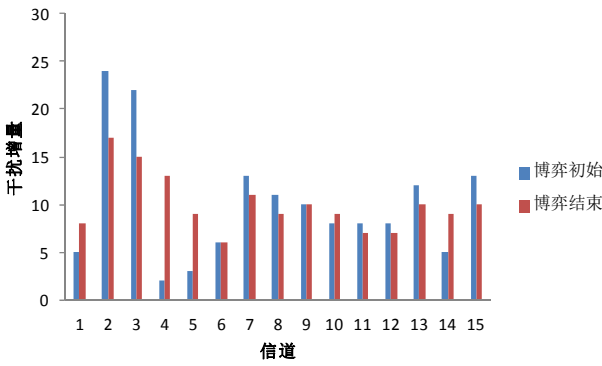


Figure 9. Several parts of the game interfere with incremental changes in the channel (2)  
图 9. 多次博弈部分信道的干扰增量变化情况(二)

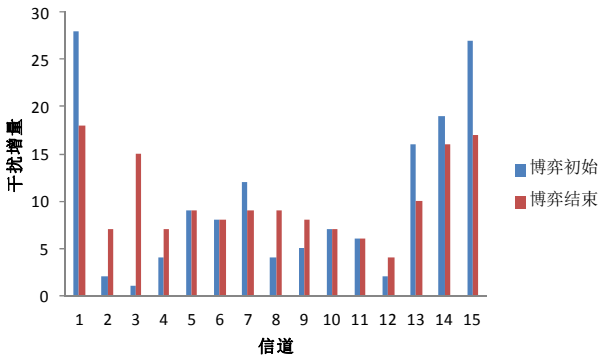


Figure 10. Several parts of the game interfere with incremental changes in the channel (3)  
图 10. 多次博弈部分信道的干扰增量变化情况(三)

从图中我们可以看到，在仿真过程独立的博弈行为中，由于参与者相互竞争，共同争取最佳收益，使得博弈后的干扰增量得到了有效的分散。但是，由于信道接入是随机发生的，在某一时刻可能接入的信道本身干扰量就比较低，那么博弈后的干扰增量分配会给这一信道带来一定的干扰增加，这种情况下不

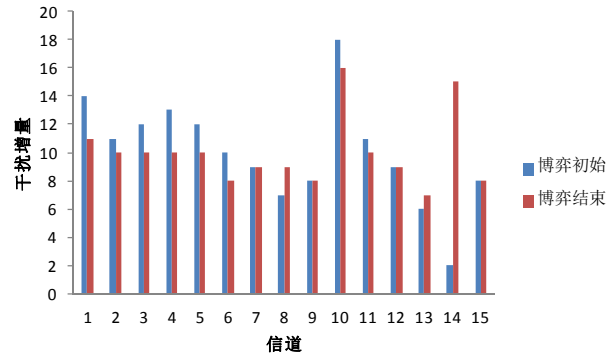


Figure 11. Several parts of the game interfere with incremental changes in the channel (4)  
图 11. 多次博弈部分信道的干扰增量变化情况(四)

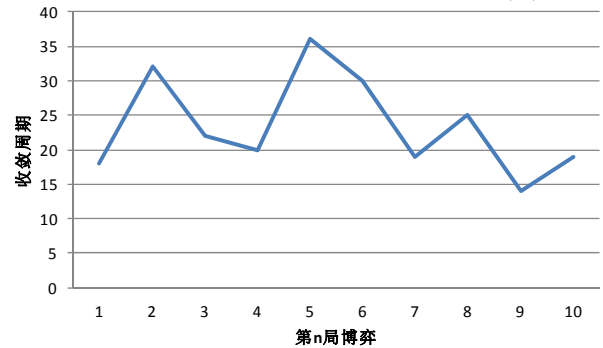


Figure 12. Game times convergence cycle changes  
图 12. 多次博弈收敛周期变化情况

一定能降低这一信道的干扰增量。但是总体来说，通过博弈过程，信道的最大干扰增量都得到了有效的降低。

本仿真对博弈过程参与者行为的收敛性进行了分析，多局博弈从博弈初始到收敛时所经过的周期如图 12 所示。

从图中我们可以看出，尽管认知无线网络当中的用户数量较大，但是在一定范围内并不是每一个周期内所有的参与者都会相互影响而改变策略，这有效了避开了算法不收敛的问题。同时，由于纳什均衡可能存在多个均衡状态，所以可以相对较快的实现收敛过程。

通过本仿真实验可以发现，对认知无线网络动态频谱管理进行合理的博弈建模，能够有效的管理路由中断等问题，这对于不需要进行大信息量交互场景下的路由维持具有很大的意义。

## 6. 结论

本文结合博弈论对认知无线网络的动态频谱管

理应用进行了研究。根据认知无线网络动态频谱管理的特征,以博弈论基本概念为基础进行了博弈论与动态频谱管理对象的映射,给出他们之间的关系。给出了一个基于势博弈的认知无线网络动态频谱管理应用实例,构建了基于势博弈的认知无线网络模型,分析了其主要博弈过程,并进行了仿真实验,对仿真的结果进行了分析。实验结果证明本文提出的基于势博弈的认知无线网络动态频谱管理模型是可行的。

## 7. 致谢

本文湖北省教育厅中青年人才科研项目(B2013032)和(13q100)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] Niyato, D. and Hossain, E. (2008) Competitive spectrum sharing in cognitiveradio networks: A dynamic game approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **7**, 2651-2660.
- [2] Wang, F., Krunz, M. and Cui, S. (2008) Price-based spectrum management incognitive radio networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **2**, 74-87.
- [3] Wysocki, T. and Jamalipour, A. (2010) Pricing of cognitive radio rights tomaintain the risk-reward of primary user spectrum investment. *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum*, Singapore City, 6-9 April 2010, 1-8.
- [4] Jia, J. and Zhang, Q. (2008) Competitions and dynamics of duopoly wireless service providers in dynamic spectrum market. *9th ACM International Symposium on Mobile ad Hoc Networking and Computing*, Hong Kong, 26-30 May 2008, 313-322.
- [5] Da Silva, C., Choi, B. and Kim, K. (2007) Distributed spectrum sensing for cognitive radio systems. *Proceedings of the Information Theory and Applications Workshop (ITA '07)*, La Jolla, 29 January-2 February 2007, pp.120-123.
- [6] Capar, F., Weiss, T., Martoyo, I. and Jondral, F. (2003) Analysis of coexistence strategies for cellular and wireless local area networks. *Vehicular Technology Conference*, **3**, 1812-1816.
- [7] Neel, J.O., Reed, J.H. and Gilles, R.P. (2004) Game modelsfor cognitive radio algorithm analysis. *Software Define Radio Forum Technical Conference*, Scottsdale, 16-18 November 2004, 27-32.