

8-20-2020

Game Theory Based Self-adaptive Power Control Algorithm for Cognitive Radio Networks

Zhonggui Ma

Department of Communication Engineering, School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

Ban Sha

Department of Communication Engineering, School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

Guimei Chen

Department of Communication Engineering, School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

Linqi Chen

Department of Communication Engineering, School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Game Theory Based Self-adaptive Power Control Algorithm for Cognitive Radio Networks

Abstract

Abstract: In order to meet all cognitive users' demands in the Cognitive Radio Networks(CRNs), non-cooperative game theory was used to model power control in the CRNs, and an adaptive power control algorithm for the CRNs was put forward using payoff unction and comprehensive cost function as utility function. Meanwhile, distances from the base station, stability of the algorithm and the interference between different cognitive users were considered. The existence and uniqueness of the Nash equilibrium were analyzed. By using the comprehensive cost function, each cognitive user in a non-cooperative game becomes cooperative and the Nash equilibrium can be convergent to Pareto-optimal solution. Comparing with other distributed algorithms, simulation results show that the proposed power control algorithm can overcome the near-far effect, greatly decrease the transmitting power of the cognitive users, and achieve fair spectrum share among users in the premise of meeting the SIR demand of different cognitive users.

Keywords

cognitive wireless networks, power control, non-cooperative game theory, self-adaptive

Recommended Citation

Ma Zhonggui, Ban Sha, Chen Guimei, Chen Linqi. Game Theory Based Self-adaptive Power Control Algorithm for Cognitive Radio Networks[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 584-590.

认知无线网络自适应功率控制博弈算法

马忠贵, 班莎, 陈桂梅, 陈林旗

(北京科技大学计算机与通信工程学院通信工程系, 北京 100083)

摘要: 为满足认知无线网络环境下各认知用户的需求, 综合考虑认知用户距离基站的远近、算法稳定性及用户间的干扰问题, 使用非合作博弈论对认知无线网络中的功率控制问题进行建模, 提出一种使用收益函数和综合代价函数共同表示效用的自适应功率控制算法, 理论证明了该算法存在唯一的纳什均衡解。通过引入综合代价函数, 使各认知用户在非合作博弈下包含了协作的行为, 从而获得帕累托最优解。Matlab 仿真表明, 该自适应功率控制算法在满足不同用户对 SIR 需求不同的前提下, 克服了远近效应, 降低了认知用户的发射功率, 实现了高频效和频谱共享的公平性。

关键词: 认知无线网络; 功率控制; 非合作博弈论; 自适应

中图分类号: TN915.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 03-0584-07

Game Theory Based Self-adaptive Power Control Algorithm for Cognitive Radio Networks

Ma Zhonggui, Ban Sha, Chen Guimei, Chen Linqi

(Department of Communication Engineering, School of Computer and Communication Engineering,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to meet all cognitive users' demands in the Cognitive Radio Networks(CRNs), *non-cooperative game theory* was used to model power control in the CRNs, and an adaptive power control algorithm for the CRNs was put forward using payoff unction and comprehensive cost function as utility function. Meanwhile, distances from the base station, stability of the algorithm and the interference between different cognitive users were considered. The existence and uniqueness of the Nash equilibrium were analyzed. By using the comprehensive cost function, each cognitive user in a non-cooperative game becomes cooperative and the Nash equilibrium can be convergent to Pareto-optimal solution. Comparing with other distributed algorithms, simulation results show that the proposed power control algorithm can overcome the near-far effect, greatly decrease the transmitting power of the cognitive users, and achieve fair spectrum share among users in the premise of meeting the SIR demand of different cognitive users.

Keywords: cognitive wireless networks; power control; non-cooperative game theory; self-adaptive

引言

认知无线网络 (CRNs, Cognitive Radio Networks) 是为解决无线频谱资源匮乏的问题而提

出的新型无线网络, 它是一种智能的无线通信系统。它能根据环境干扰的变化, 自适应地实时改变某些操作参数(如传输功率、载波频率和调制技术等), 使系统达到最佳的性能, 它的实现可以高效地利用频谱资源^[1]。在 CRNs 中, 引起对授权用户 (PU, Primary User) 干扰的主要原因是认知用户 (SU, Secondary User) 自私地增加其发送功率, 同时, 发射功率也会直接影响到无线传输系统的系统性能。因此, 在 CRNs 中, 功率控制技术是一项关



收稿日期: 2014-02-24 修回日期: 2014-07-22;
基金项目: 国家自然科学基金(61072039); 北京市优秀人才培养资助项目(2013D009006000002);
作者简介: 马忠贵(1974-), 男, 内蒙古, 博士, 副教授, 研究方向为智能通信、认知无线网络; 班莎(1990-), 女, 内蒙古, 硕士生, 研究方向为认知无线网络、协作通信; 陈桂梅(1989-), 女, 江西, 硕士生, 研究方向为网络编码、协作通信。

<http://www.china-simulation.com>

• 584 •

键技术, 且通常使用博弈论来解决该问题。

近几年, 博弈论被广泛应用于信息与通信领域^[2]。文献[3-6]是目前功率控制和功率分配方面基于博弈论的一些研究成果, 这些研究的目标大多是在 CRNs 中实现功率的最优分配和最优控制, 大多数文献中, 只考虑了收益函数或只简单考虑代价函数的形式, 这都与实际情况不符。在文献[7]引入了基于 SIR 的代价函数, SIR 与用户的 QoS 密切相关, QoS 好的用户受到的惩罚更多, 体现了公平性, 但该模型没有考虑对 PU 及各 SU 之间的干扰限制。文献[8]考虑远近效应, 提出了一种考虑链路增益的功率控制博弈模型, 对于增益不同的用户给出不同的代价函数, 但没有考虑不同 SU 具有不同的 SIR 的需求。文献[9]在考虑 PU 干扰情况下, 建立了认知无线电干扰温度模型, 所提出的收益函数不仅考虑到 SIR 需求, 而且考虑到功率阈值的影响, 但该迭代功率控制算法没有考虑远近效应。在文献[10]中, Koskie-Gajic 等提出的 K-G 功率控制算法存在 PU 容量冗余, 却不能满足部分 SU 对 SIR 需求的问题, 难以适应 CRNs 环境的需要。NPCG 算法^[11]虽满足了不同 SU 具有不同 SIR 的需求, 但却无法实现对代价函数中惩罚因子的自适应调整。

综合考虑以上存在的问题, 并在 K-G 算法和 NPCG 算法的基础上, 设计了一种基于综合代价函数的自适应非合作功率控制博弈算法, 该算法综合考虑远近效应、干扰问题、功率阈值的影响及不同 SU 具有不同的 SIR 的需求, 通过设计一种反馈的代价函数, 以实现惩罚因子的自适应调整, 使得 SIR 较好的 SU 受到的惩罚多一些, SIR 较差的 SU 受到的惩罚少一些。其次, 对本文所提出算法的纳什均衡解的存在性及唯一性进行了分析。最后, 利用 Matlab 仿真, 验证了算法的性能。

1 系统模型

考虑基于 CDMA 接入技术的单小区中心式 CRNs, 该 CRNs 由 1 个基站和 n 个 SU 组成。基站位于小区的中心位置, 统一负责频谱机会的检测与分配、用户调度以及功率控制等功能, 而 n 个

SU 随机地分布在小区中, 假设 PU 此时未占用频段, n 个 SU 同时进行通信^[12]。

这 n 个 SU 位于单蜂窝 CDMA 系统中, 其中, 第 i 个 SU 的发射功率为 p_i , 在基站接收端的 SIR 为 γ_i , SU_i 与基站间的链路增益为 h_i 。对于该网络中上行链路, 基站接收到的来自 SU 的功率为 $h_i p_i$ 。采用 c_{ij} 表示各 SU 之间的扩频码相关系数, 则其他 SU 对认知用户 i 的干扰功率为 $\sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} h_j p_j$, 用 σ^2 表示 SU 所处 CRNs 环境的背景噪声功率。对于任意的 SU_i , 它在基站接收端的 SIR 可表示为:

$$\gamma_i(p) = \frac{h_i p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} h_j p_j + \sigma^2}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

作为所有 SU 的发射功率集合 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$, 每个 SU 的发射功率 p_i 需满足:

$$0 \leq p_i \leq p_i^{\max}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

p_i^{\max} 表示认知用户 i 的最大发射功率, 同时, 对每个认知用户 i , 它在基站接收端的 SIR 应满足:

$$\gamma_i \geq \gamma_i^{\text{th}}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

γ_i^{th} 为第 i 个 SU 的 SIR 阈值, 以保证认知用户 i 的 QoS 要求。

2 基于综合代价函数的自适应非合作功率控制博弈算法

2.1 非合作博弈模型的建立

博弈论是研究竞争与协作的有力工具。按照参与者之间有没有达成一个具有约束力的合作协议, 博弈可分为两大类, 即非合作博弈和合作博弈。若存在有约束力的合作协议, 则是合作博弈; 否则为非合作博弈。非合作博弈研究的关键问题是, 当参与者的利益或收益相互影响时, 参与者如何对策略进行选择, 作出能使自己收益最大化的选择。在 CRNs 中, 功率控制的非合作博弈模型可定义为:

$$G = [N, \{\mathbf{P}_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N}] \quad (4)$$

其中, 博弈模型的三要素为:

(1) 参与者: $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 表示 CRNs 中所有 SU 的集合;

(2) 策略空间: $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$, 表示包括所有 SU 发射功率的向量。其中, 对于任意的 $i \in N$, p_i 表示第 i 个 SU 的策略, 而 $\mathbf{P}_i = [p_i^{\min}, p_i^{\max}]$ 为第 i 个 SU 的策略空间, p_i^{\min} 是认知用户 i 的最小发射功率限制, p_i^{\max} 是认知用户 i 的最大发射功率限制;

(3) 效用函数: $u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}), \forall i \in N$, 表示每个 SU_i 的效用函数。其中, $\mathbf{p}_{-i} = [p_1, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_n]^T$ 表示不包括 p_i 在内的策略集合。

在这个功率控制博弈中, 每个 SU 都设法使自己的效用函数最大化, 即:

$$\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}), \forall i \in N \quad (5)$$

2.2 效用函数的设计

在 CRNs 的功率控制博弈模型中, 效用函数常常使用收益函数和代价函数共同表示, 其中, 收益函数表示博弈参与者对网络及系统服务质量 QoS 的满意水平, 而代价函数则表示博弈参与者在获得利益的同时, 必须支付相应的代价。为了避免简单的非合作博弈算法中 SU 自私地增大各自的发射功率, 引入了综合代价函数, 使各 SU 在非合作博弈下带有合作的表现, 使得该博弈的纳什均衡解趋于帕累托最优解。K-G 功率控制算法中, 代价函数的功率惩罚因子为常数, 造成距离基站相对较远的 SU 为了达到目标 SIR 而不断增大自身的发射功率, 从而使 SU 之间的相互干扰不断增大, 造成系统功率的浪费。同时, 代价函数的形式为线性关系, 不能充分地惩罚各个 SU。综合考虑 SU 距离基站的远近、算法稳定性以及 SU 间的干扰问题, 本文设计的效用函数如式(6)所示:

$$u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) = a_i \ln(\gamma_i - \gamma_i^{\text{th}}) - \frac{b_i h_i}{n+1} \left[p_i^t + \sum_{i=1}^n p_i^d - (n+1)p_{\text{th}} \right] \quad (6)$$

其中: $a_i \ln(\gamma_i - \gamma_i^{\text{th}})$ 为收益函数; a_i 为 SIR 调节因子。 $c_i = \frac{b_i h_i}{n+1} \left[p_i^t + \sum_{i=1}^n p_i^d - (n+1)p_{\text{th}} \right]$ 为综合代价函数, h_i 为认知用户 i 与基站间的链路增益, p_i^t 为当前时刻发射功率, $\sum_{i=1}^n p_i^d$ 为当前时刻之前最近

n 个发射功率之和, n 越大, 参考的历史数据就越多。 p_{th} 表示功率阈值, b_i 为代价因子, 当 $\gamma_i^{\text{th}} \leq \gamma_i \leq \gamma_i^{\text{tar}}$ 时, b_i 保持不变; 当 $\gamma_i > \gamma_i^{\text{tar}}$ 时, $b_i = b_i \gamma_i / \gamma_i^{\text{th}}$, 增大对该 SU 的惩罚, 降低对其他 SU 的干扰。综合代价函数 c_i 不只考虑当前发射功率, 还参考历史发射功率的经验信息, 使发射功率在博弈过程中的波动减小, 提高 CRNs 功率控制的稳定性, 降低了功率控制开销。同时, 既考虑 SU 距离基站的远近, 还增加了自适应调整因子 b_i , 这样就可以使 SIR 较好的 SU 受到的惩罚多一些, SIR 较差的 SU 受到的惩罚少一些。由于与基站距离不同的 SU, h_i 的取值不同, 因而实现了考虑不同的 SU 与基站距离的不同, 而采用不同的代价机制, 体现了公平性, 防止了与基站距离相对较远的 SU 为了达到目标 SIR 而自私地增大自身的发射功率, 从而有效地控制了各 SU 之间的相互干扰, 大大降低网络的功率消耗, 使系统可以获得更好的收益。

2.3 算法迭代求解

纳什均衡是一种所有参与者的策略组合状态, 每个参与者的策略都是根据所有其他参与者的策略构成来选定的最优策略。在这种状态下(即纳什均衡点), CRNs 中没有任何 SU 愿意打破这种均衡, 即任何参与者不能单方面偏离这种状态(均衡点)以增加自身收益。即:

$$u_i(p_i^*, \mathbf{p}_{-i}) \geq u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}), \forall p_i \quad (7)$$

为求得式(7)中的 p_i^* , 对式(6)求梯度并令其等于 0, 可得:

$$\gamma_i = \frac{a_i(n+1)}{b_i(\sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} h_j p_j + \sigma^2)} + \gamma_i^{\text{th}} \quad (8)$$

将式(1)与式(8)联立求解得:

$$p_i = \frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} + \gamma_i^{\text{th}} \frac{p_i}{\gamma_i} \quad (9)$$

因此, 可得发射功率的迭代公式为:

$$p_i^{(m+1)} = \begin{cases} \gamma_i^{\text{th}} \frac{p_i^{(m)}}{\gamma_i^{(m)}} + \frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} = R(p_i^{(m)}), \\ p_i^{\min} \leq p_i^{(m+1)} \leq p_i^{\max} \\ p_i^{\max}, p_i^{(m+1)} \geq p_i^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

2.4 纳什均衡解的存在性和唯一性

2.4.1 存在性证明

定理 1: 若该非合作博弈 $G = [N, \{P_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N}]$ 存在纳什均衡, 则只需证明该博弈模型满足下面 2 个条件^[13]:

(1) 它的策略空间 P_i 是欧几里德空间上非空、闭合、有界的凸集;

(2) 效用函数 $u_i(p_i, p_{-i})$ 在 p_i 上是连续的拟凹函数。

证明: 因为每个认知用户 i 的策略空间都定义在区间 $[p_i^{\min}, p_i^{\max}]$ 上, 所以满足第一个条件。对效用函数 $u_i(p_i, p_{-i})$ 进行二阶求导得:

$$\frac{\partial u_i^2}{\partial p_i^2} = -\frac{a_i h_i^2}{[\sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} h_j p_j + \sigma^2](\gamma_i - \gamma_i^{\text{th}})^2} < 0 \quad (11)$$

由此可知 $u_i(p_i, p_{-i})$ 在 p_i 上是连续的拟凹函数, 因此该算法存在纳什均衡解。

2.4.2 唯一性证明

定理 2: Yates 提出了一个功率控制的标准架构^[14]。在这个标准架构下, 任何一种功率控制都能达到收敛性等许多优良的性质。一个功率控制 $p(k+1) = R(p(k))$, 如果满足下面 3 个条件, 则认为该算法收敛于唯一点:

- (1) 非负性: $R(p) > 0$;
- (2) 单调性: 若 $p' > p$, 则 $R(p') > R(p)$;
- (3) 可伸缩性: 对任意 $\alpha > 1$, $\alpha R(p) > R(\alpha p)$ 。

证明:

- (1) 由系统模型知, 式(8)中各项均 > 0 , 因此:

$$R(p) = \frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} + \gamma_i^{\text{th}} \frac{p}{\gamma_i} > 0$$

$$(2) R(p') - R(p) = \left[\frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} + \gamma_i^{\text{th}} \frac{p'}{\gamma_i} \right] -$$

$$\left[\frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} + \gamma_i^{\text{th}} \frac{p}{\gamma_i} \right] = \frac{\gamma_i^{\text{th}}}{h_i \gamma_i} [p' - p] > 0$$

- (3) 对 $\forall \alpha > 1$

$$\alpha R(p) - R(\alpha p) = \alpha \left[\frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} + \gamma_i^{\text{th}} \frac{p}{\gamma_i} \right] -$$

$$\left[\frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} + \gamma_i^{\text{th}} \frac{\alpha p}{\gamma_i} \right] =$$

$$\left[\alpha \gamma_i^{\text{th}} \frac{p}{\gamma_i} - \gamma_i^{\text{th}} \frac{\alpha p}{\gamma_i} \right] +$$

$$\left[\frac{\alpha a_i(n+1)}{b_i h_i} - \frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} \right] =$$

$$\alpha \gamma_i^{\text{th}} p \left[\frac{1}{\gamma_i} - \frac{1}{\gamma_i} \right] +$$

$$\frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} (\alpha - 1)$$

由于 $\alpha > 1$, 所以 $\frac{a_i(n+1)}{b_i h_i} (\alpha - 1) > 0$ 。

因为 $\alpha > 1$, 根据式(1)得 $p_i < \alpha p_i$, $\gamma_i(p_i) < \gamma_i(\alpha p_i)$, 所以 $1/\gamma_i(p_i) > 1/\gamma_i(\alpha p_i)$ 。

综上所述可得: $\alpha R(p) > R(\alpha p)$ 。

通过上面的 3 个性质的证明, 可知该算法存在唯一的纳什均衡解。

3 仿真结果及分析

为验证本文算法的优越性, 综合考虑不同 SU 的不同需求及系统性能, 从 SU 的 SIR、发射功率、效用函数、迭代次数等方面比较 K-G 算法、NPCG 算法和本文算法。假设 SU 到基站的距离分别为 $d = [500, 555, 610, 666, 723, 779, 834, 888, 944, 1000]$, 忽略快衰落、阴影衰落及 PU 对 SU 的影响, 并在相同的噪声环境下进行仿真。根据文献 [15-16], 假设初始功率为 $p_i^{(m)} = 5 \times 10^{-15} \text{ W}$, $\gamma_i^{\text{tar}} = 8$, $\gamma_i^{\text{th}} = 6$, $\sigma^2 = 1 \times 10^{-15}$, 最大功率限制值为 $p_i^{\text{max}} = 3 \text{ W}$, 参考历史发射功率个数 $n = 10$ 。

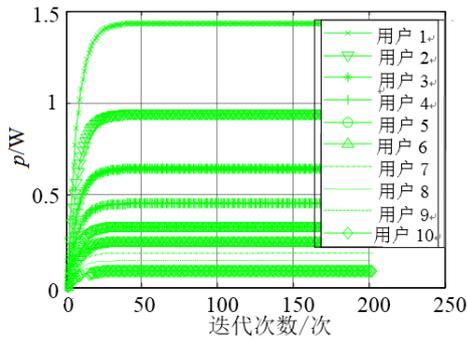
K-G 算法的发射功率迭代式如下:

$$p_i^{(m+1)} = \gamma_i^{\text{tar}} \frac{p_i^{(m)}}{\gamma_i^{(m)}} - \theta_i \left(\frac{p_i^{(m)}}{\gamma_i^{(m)}} \right)^2 \quad (12)$$

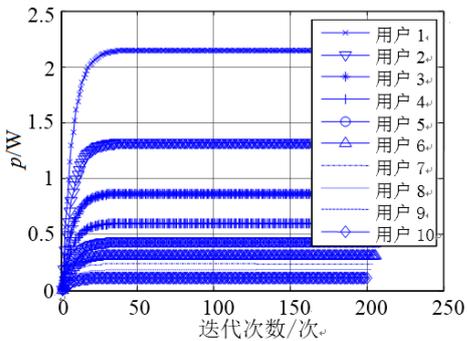
NPCG 算法的发射功率迭代式如下:

$$p_i^{(m+1)} = \gamma_i^{\text{th}} \frac{p_i^{(m)}}{\gamma_i^{(m)}} + \left(\frac{b_k}{2a_k} \right)^2 \frac{\gamma_i^{(m)}}{p_i^{(m)}} \quad (13)$$

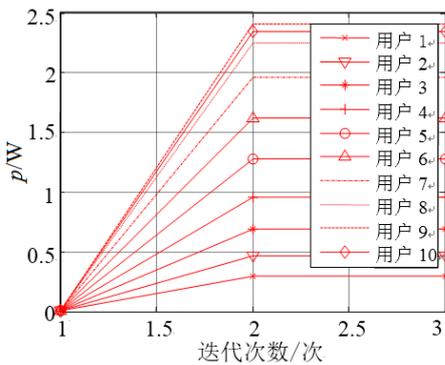
仿真实验中, 根据文献[10-11], 设 K-G 算法中的比例系数 $\theta_i = 5$, 而 NPCG 算法中的比例系数 $(b_k / 2a_k)^2 = 0.25$, $n=10$, 如图 1 所示为 3 种算法的发射功率与迭代次数的关系图。



(a) 本文提出新算法发射功率与迭代次数关系图



(b) NPCG 算法发射功率与迭代次数关系图



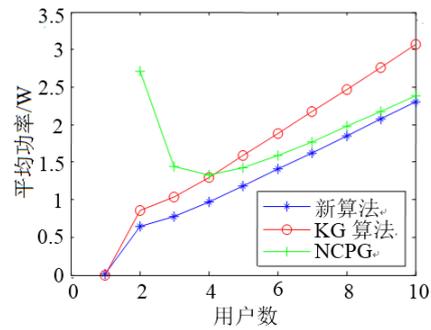
(c) K-G 算法发射功率与迭代次数关系图

图 1 3 种算法的发射功率与迭代次数关系图

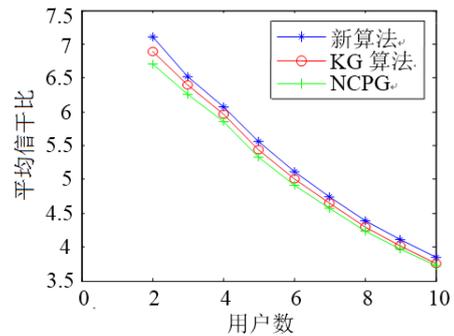
由图 1 可知, 本文新算法大约经过 14 次迭代收敛于 $p=1.4/W$, 从而验证了算法的收敛性, NPCG 算法进过 20 次左右迭代收敛于 $p=2.2/W$, 而 K-G 算法经过 2 次迭代达到收敛, 收敛于 $p=2.4/W$, 表明了本文新算法的收敛性较好, 并且验证了其纳什

均衡解的存在性和唯一性。因此, 收敛速度快、发射功率低是本文新算法最突出的优点。

在 $n=10$ 的条件下, 3 种算法的平均功率 (如图 2(a)) 和平均 SIR (如图 2(b)) 与认知用户数的关系如图 2 所示。



(a) 3 种算法平均发射功率与认知用户数的关系图



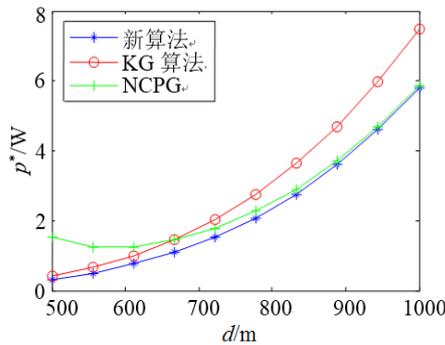
(b) 3 种算法平均 SIR 与认知用户数的关系图

图 2 三种算法的平均功率和平均 SIR 与认知用户数的关系图

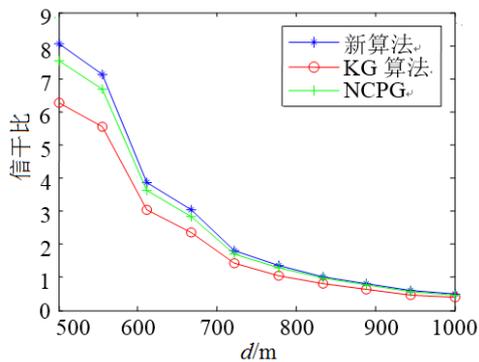
从图 2(a)可以看出 3 种算法的发射功率随着用户数的增加, 整体呈上升趋势, 这与实际情况相符。认知用户数越多, 各认知用户所受干扰越大, 导致各认知用户需要不断增大发射功率以保证有效通信。同时从图 2(b)可以看出 3 种算法的 SIR 随着用户数的增加, 整体呈下降趋势, 这是因为用户数越多, 各认知用户所受干扰越大, SIR 越小。从图 2(a)和图 2(b)可以看出本文提出的算法在保证较高 SIR 条件下极大地降低了 SU 的发射功率。同时, 相对于 K-G 算法和文献[11]提出的 NPCG 算法, 效用函数中增加了自适应调整因子 b_i , 这样就可以使 SIR 较好的 SU 受到的惩罚多一些, 而 SIR 较差的 SU 受到的惩罚少一些。考虑远近效应, 引入 h_i , 使对

系统中距离基站远近不同的 SU 采用不同的代价机制, 因而系统可以获得更好的收益。

在 $n=10$ 的条件下, 3 种算法的发射功率和 SIR 与 SU 距基站距离远近的关系图如图 3 所示。



(a) 3 种算法发射功率与 SU 距基站距离远近的关系图



(b) 3 种算法 SIR 与 SU 距基站距离远近的关系图

图 3 三种算法随 SU 距基站距离远近的性能变化曲线

图 3(a)给出了 3 种算法发射功率的纳什均衡最优解的比较。通过仿真分析可以发现, 本文提出的新算法的发射功率增长程度明显低于前两种算法。同时, 距离基站较远的 SU 的发射功率较大, 符合实际情况, 通过采用适当的功率控制方案, 有效地减小了远近不公平性。在这 10 个 SU 中, 通过距离的不断增加, 3 种算法的发射功率都在不断的提高, 但是可以看出本文提出的新算法比其他两种博弈模型更能够使 SU 的发射功率明显降低。从图 3(a)和图 3(b)中可以看出, 与 K-G 算法和 NCPG 算法相比, 本文所提出的新算法在保证 SU 较高 SIR 的前提下, 更能降低各 SU 的发射功率, 从而体现了本文的发射功率控制算法的优越性。

本文提出的新算法效用函数随发射功率的变化曲线如图 4 所示, 从图 4 中可以看出新算法的效用函数曲线呈现先升高后降低的趋势。当 SU 发射功率增大到 $3/W$ 左右时, 效用函数达到最大值, 之后, 随着发射功率的继续增大, 使 SU 之间的相互干扰不断增大, 此时, 由于代价函数的引入, SU 发射功率越大, 对其他 SU 造成的干扰越大, 该 SU 需要付出代价就越大, 则效用函数呈下降趋势, 避免了 SU 为达到目标 SIR 而不断地增大自身的发射功率, 从而有效地降低了网络的功率消耗。

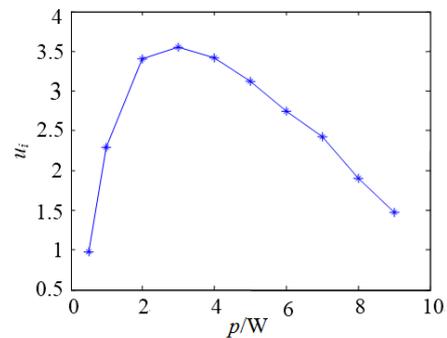


图 4 本文所提出算法的效用函数与 SU 发射功率的关系图

4 结论

功率控制技术是 CRNs 中的一个重要内容。绿色通信和节能减排是未来无线通信发展的必然趋势, 在此背景下, 如何优化功率分配以降低功率消耗并提高网络性能正成为研究的热点问题。本文基于认知无线网络, 将功率控制问题建模为非合作博弈模型, 设计了一种使用收益函数和代价函数共同表示效用函数的自适应功率控制算法, 并分析了该算法存在唯一的纳什均衡解。由于综合代价函数考虑了远近效应、不同 SU 的 QoS 需求, 以及算法的稳定性, 同时考虑到公平性, 引入自适应的调整因子 b_i , 从而使 SIR 较好的 SU 受到的惩罚多一些, SIR 较差的 SU 受到的惩罚少一些。通过功率控制算法可以将 SU 的发射功率限制在适当的范围内, 以免 SU 发射功率过高, 对 PU 造成有害干扰。同时, 使用 Matlab 进行了仿真分析, 并与 K-G 算法和 NPCG 算法进行了对比实验, 仿真结果说明了

本文所提出的自适应功率控制博弈算法的优越性。因此,在 CRNs 中研究功率控制问题是十分必要的,不仅能够有效地节省能量消耗,而且能够提高系统的频谱效率、保证系统服务质量。

然而,本文算法是在假设主用户未占用频段的情况下提出的,下一步的工作将考虑在主用户占用部分频段的情况下,提出新的功率优化分配方案,进一步提高频谱利用率和系统服务质量。

参考文献:

- [1] Haykin S. Cognitive Radio Brain-empowered Wireless Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (S0733-8716), 2005, 23(2): 201-220.
- [2] 张惠娟,周利华,翟鸿鸣. 一种基于非合作博弈的均衡路由方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(3): 389-401.
- [3] 丁裕琦. 几种分布式功率控制算法分析[J]. 电子器件应用, 2010, 12(1): 94-96.
- [4] 桂丽,钟晓峰,邹仕洪. 认知无线网络基于信号博弈的分布式功率控制算法[J]. 电子与信息学报 (S1009-5896), 2012, 34(10): 2528-2531.
- [5] 孙顺乔,汪翔,倪卫明. 感知无线网络中考虑节点数据延时的分布式功率控制算法[J]. 复旦学报, 2011, 50(04): 486-491.
- [6] 冯志勇,张平,郎保真,等. 认知无线网络理论和关键技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [7] 孙彬,杨震,田峰. 基于代价函数的认知无线电功率控制算法[J]. 南京邮电大学学报, 2010, 30(5): 62-68.
- [8] Yang Chungang, Li Jiandong, Tian Zhi. Optimal Power Control for Cognitive Radio Networks under Coupled Interference Constraints: a Cooperative Game-theoretic Perspective [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2010, 59(4): 1696-1706.
- [9] Li Feng, Tan Xuezhi, Wang Li. A New Game Algorithm for Power Control in Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2011, 60(9): 4384-4391.
- [10] Koskie S, Gajic Z. A Nash Game Algorithm for SIR-based Power Control in 3G Wireless CDMA Networks [J]. IEEE Transactions on Communication (S1063-6692), 2005, 13(5): 1017-1026.
- [11] 程世伦,杨震,张晖. 新的认知无线电功率控制博弈算法 [J]. 通信学报, 2007, 28(3): 100-107.
- [12] 彭青,肖海林. 基于博弈论的认知无线电自适应功率控制算法[J]. 电信科学, 2013, 29(1): 46-50.
- [13] Fienberg D, Tirol J. Game Theory [M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1991.
- [14] Yates R D. A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems [J]. Selected Areas Communications (S0733-8716), 1995, 13(7): 1341-1347
- [15] Saraydar C, Mandayam N, Goodman D. Efficient Power Control via Pricing in Wireless Data Network [J]. IEEE Transactions on Communication (S0090-6778), 2002, 50(2): 291-303
- [16] Cheng Shilun, Yang Zhen. Energy-efficient Power Control Game for Cognitive Radio Systems [C]// Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/ Distributed Computing, Qingdao, China, July 30-Aug. 1, 2007: 526-530.

(上接第 583 页)

参考文献:

- [1] 孙伟健,林军,阮宁娟,等. 国外光学遥感成像系统仿真软件发展综述与思考 [J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(3): 70-75.
- [2] 王刚,禹秉熙. 基于图像仿真的对地遥感过程科学可视化研究 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(6): 756-760.
- [3] 易维宁,顾有林,杜丽丽,等. 光学遥感图像仿真软件ORSIS介绍 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 459-463.
- [4] 丁晓东. 基于图像的重光照技术 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [5] 王晨昊,汤晓安,孙即祥,等. 带有位置修正的环境映射 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(3): 435-440.
- [6] James T Kajiya. The rendering equation [J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'86 Proceedings) (S0097-8930), 1986, 20(4): 143-150.
- [7] Z Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] Finlayson G D, Hordley S D, Drew M S. Removing shadows from images [C]// Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part IV. London, UK: Springer-Verlag, 2002: 129-132.
- [9] Brabec S, Annen T, Seidel H P. Practical shadow mapping [J]. Journal of Graphics Tools, 2002, 7(4): 9-18.