

# 基于认知无线电的新型非合作功率控制博弈算法

赵军辉, 杨涛, 张雪雪

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 从认知无线电技术特性出发, 在干扰温度门限的限制条件下, 提出了基于新的代价函数功率控制博弈论算法, 以有效地提高认知用户的信干噪比。根据信道状况、吞吐量最大化和功率限制的需求, 将功率控制问题转化为一个干扰受限的多约束非线性规划问题。结合博弈论和最优化理论, 证明了其纳什均衡的存在性和唯一性, 给出了该模型的分布式求解算法。仿真实验表明, 该算法可以有效提高认知用户的 QoS 和系统性能, 充分利用无线资源。

**关键词:** 认知无线电; 功率控制; 价格函数; 纳什均衡

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0097-07

## Novel non-cooperative power control game algorithm for cognitive radio

ZHAO Jun-hui, YANG Tao, ZHANG Xue-xue

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A novel non-cooperative power control algorithm based on new pricing function and the characteristics of cognitive radio technology was proposed with the interference temperature constrain, in order to improve signal to interference plus noise ratio of CR. The problem of power control was changed into the problem of multi-restraints non-linear optimization with interference limits based on channel conditions, maximal network and power limits. The existence and unique of nash equilibrium (NE) in utility function by the principle of game theory and optimization were proved and a distributed algorithm for this game was proposed. Simulation results show that the proposed algorithm can improve users QoS (quality of serves), system performance effectively and improve radio resource efficiency.

**Key words:** cognitive radio; power control; pricing function; Nash equilibrium

### 1 引言

随着无线网业务的飞速发展, 无线业务如 WLAN、WPAN、WMAN 等无线网工作时占用的非授权频段已趋近饱和, 而另一方面, 一大部分的频谱资源利用率却保持在一个较低的水

平上<sup>[1,2]</sup>。在这种情况下, 认知无线电 (CR, cognitive radio) 技术及其包含的一系列资源分配技术被提出并推广。

认知无线网络中, 功率控制是实现频谱共享的关键技术之一。笔者要考虑设计一种功率控制算法, 使得认知用户的发射功率既不对授权用

收稿日期: 2012-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61172073); 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室自主研究课题基金资助项目 (RCS2011ZT003); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (2012YJS129)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61172073); The State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety of Beijing Jiaotong University (RCS2011ZT003); The Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (2012YJS129)

户的正常通信造成干扰，又不能阻碍小区内其他认知用户的正常工作。文献[3]提出了基于信干噪比 SINR (signal to interference plus noise ratio) 平衡的分布式功率控制算法，即通过控制发射功率，使认知用户达到恒定的信干噪比，但恒定的信干噪比自适应性比较差，并不能根据环境的变化自适应地调节信干噪比以求达到更高的系统性能；文献[4]提出基于价格函数的功率控制算法，通过基于价格函数的效用函数，实现非合作博弈，在发射功率和信干噪比之间找到一个最优点，达到纳什均衡，但其在价格函数的选择方面，考虑到的影响发射功率的因子不够全面，导致其最优化模型不能很好地适应实际的信道环境。文献[5]提出了一种简单可行的归一化效用函数，但是代价因子和平稳参数取值范围有限，难以满足不同用户对不同信干噪比的要求，而且代价因子的引入造成公平性降低。文献[6]给了一种不仅满足 SINR 的要求，同时注重功率门限的影响，抗噪声性能和信道容量相对 koskie-gajic (KG) 算法有所提高的算法，但是收敛速度较慢。

综上所述，本文提出一种新的非合作式功率控制算法。算法模型考虑到次级用户对主用户的影响，提出了一个新的价格系数模型。本文利用严格的博弈论证明了算法纳什均衡解的存在性和唯一性，并将本文算法与 SINR 平衡算法和 KG 算法进行了对比。

## 2 基于非合作功率控制博弈 (NPCG, non-cooperative power control game) 的信号模型和新的价格函数

考虑一个频谱共享的多跳中继认知无线网系统中每个小区有一个基站、 $M$  个授权用户和  $N$  个认知用户。基站和授权用户的位置固定，而认知用户则在小区中随机均匀地分布。网络采用时分复用半双工的传输方式来避免彼此间的干扰，并且假设基站预先了解自己信道状况的变化情况且有一个时间调度器 (TS) 来对次级用户的传输时间和中继时间进行统筹调度。为了简化计算，假设信道环境为最基本的 AWGN 信道。

假设认知用户  $i$  的扩频带宽为  $B$  (Hz)，传输速率为  $R_i$  (bit/s)，发射功率为  $p_i$ ；认知用户  $i$  到基站的链路增益为  $g_i$ ，到授权用户  $M$  的链路增益为  $h_{mi}$ ；信道环境的背景噪声为  $\sigma^2$ 。则认知用户  $i$  的信干噪比为<sup>[7]</sup>

$$\gamma_i = \frac{B}{R_i} \cdot \frac{p_i g_i}{\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j} \quad (1)$$

为方便下文分析计算，令  $Z_i = \frac{B}{R_i}$ ， $I_i = \sum_{j \neq i} p_j g_j + \sigma^2$ ，则式(1)可简化为

$$\gamma_i(p) = Z_i \frac{p_i g_i}{I_i} \quad (2)$$

其中， $p = (p_1, p_2, \dots, p_N)^T$ 。根据香农公式可知，AWGN 信道容量为

$$C_i(p_i, p_{-i}) = \sum_{i=1}^N \text{lb}(1 + \gamma_i) \quad (3)$$

其中， $p_{-i} = (p_1, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_M)$ ，表示用户  $p_i$  博弈对手的功率向量。香农公式所表示的信道容量是指每频谱单位的平均上行容量，反映了频谱的有效性，进而可以体现系统的有效性。

在非合作式认知无线网中，需要通过一个价格函数来约束系统中的认知用户，使其不会自私地最大化自己的传输功率而影响其他认知用户甚至授权用户的正常工作<sup>[5]</sup>。因此，本文定义一种基于香农信息论的新效用函数，对认知用户  $i$  有如下所示

$$u_i(p_i; p_{-i}) = \text{lb}(a_i (\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})) - c \quad (4)$$

其中， $\gamma_i$  为认知用户  $i$  在基站处的信干噪比， $\gamma_i^{\text{tar}}$  为认知用户的目标信干噪比，为了选择适当的效用函数，对认知用户的 SINR 进行限制，要求  $\gamma_i \geq \gamma_i^{\text{tar}}$ ； $c$  为价格函数； $a_i$  是式(4)的比例调节参数。本文提出了一种新的价格函数，该价格函数分为 2 部分，第一部分函数如式(5)所示，表示认知用户  $i$  对其他认知用户的干扰。

$$c_{1i}(p_i, p_{-i}) = \lambda_1 \frac{p_i g_i}{\sum_{j=1}^N p_j g_j} \quad (5)$$

价格函数的另一部分如式(6)所示，表示认知用户  $i$  对授权用户的干扰<sup>[8]</sup>。

$$c_{2i}(p_i, p_{-i}) = \lambda_2 \sum_{m=1}^M \frac{p_i h_{mi}}{\sum_{j=1}^N p_j h_{mj}} e^{w_m} \quad (6)$$

其中，

$$w_m = \delta \left( \frac{\sum_{j=1}^N p_j h_{mj} - Q_m^{\max}}{Q_m^{\max}} \right) \quad (7)$$

这里,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为比例调节参数;  $\delta$  为常量, 表示认知用户功率对授权用户的干扰程度;  $Q_m^{\max}$  表示授权用户接收端所能承受认知用户  $m$  的最大干扰; 指数函数  $e^{w_m}$  表示认知用户对授权用户造成的干扰。采用指数方程  $w_m$  是考虑到如果授权用户接收到的总功率超过了干扰温度限制时, 会使得价格函数部分快速增加。

考虑到不同约束条件下功率干扰也不同, 将  $\sum_{j=1}^N p_j h_{mj} - Q_m^{\max}$  对  $Q_m^{\max}$  进行归一化计算, 即前面的分数部分表示认知用户  $i$  所造成的干扰占总干扰的百分比, 则认知用户  $i$  的效用函数可表示为

$$u_i(p_i, p_{-i}) = \ln(a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})) - \lambda_1 \frac{p_i g_i}{\sum_{j=1}^N p_j g_j} - \lambda_2 \sum_{m=1}^M \frac{p_i h_{mi}}{\sum_{j=1}^N p_j h_{mj}} e^{w_m} \quad (8)$$

考虑到授权用户段的干扰温度约束, 本文需要达到的最优化目标为

$$\max u(p) \quad (9)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq p \leq p^{\max}, Hp \leq Q^{\max} \quad (10)$$

其中,  $Q^{\max} = (Q_1^{\max}, \dots, Q_M^{\max})^T$ , 表示授权用户接收端所能承受的最大干扰集合;  $p^{\max} = (p_1^{\max}, \mathbf{L}, p_N^{\max})^T$ , 表示认知用户的最大允许发射功率集合;  $H = (h_{m_1}, h_{m_2}, \mathbf{L}, h_{m_N})^T$ , 表示到授权用户  $M$  的链路增益集合。式 (10) 是对效用函数的非线性约束条件, 接下来将讨论效用函数在此约束条件下的纳什均衡存在性。纳什均衡定义为: 假如当  $b_k \in P_k$  时, 对每一个  $\forall i \in N, u_i(p_k, p_{-k}) \geq u_i(b_k, p_{-k})$  都成立, 那么策略组合  $P$  就是纳什均衡点。纳什均衡分析的主要工作是找出博弈中的纳什均衡, 但纳什均衡的定义本身并没有明确地给出如何求解博弈中的纳什均衡问题。根据纳什均衡的定义, 最多只能检验某个策略组合是否是纳什均衡。

### 3 本文算法的纳什均衡求解

文献[7,9~11]中指出, 满足如下 2 个条件, 则纳什均衡解存在:

- 1)  $p_i$  是欧式空间  $R^N$  中非空的、闭的、有界的凸集;
- 2)  $u_i(p_i, p_{-i})$  在  $p$  上连续, 在  $p_i$  上拟凹。

本文博弈算法的策略空间是  $[0, p_i^{\max}]$ 。从式(7)~式(9)可知,  $u_i(p_i, p_{-i})$  的子函数都是连续函数, 且用户的策略空间为连续的, 因此效用函数  $u_i(p_i, p_{-i})$  为连续的。

为了求得纳什均衡点, 对效用函数  $u_i(p_i)$  求  $p_i$  的一阶微分:

$$\frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} = \frac{Z_i}{a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})} \cdot \frac{g_i}{I_i} - \lambda_1 \frac{g_i \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j}{\left( \sum_{j=1}^N p_j g_j \right)^2} - \lambda_2 \sum_{m=1}^M \left( \frac{h_{mi} \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j h_{mj}}{\left( \sum_{j=1}^N p_j h_{mj} \right)^2} + \frac{\delta p_i h_{mi}^2}{\left( \sum_{j=1}^N p_j h_{mj} \right) Q_m^{\max}} \right) e^{w_m} u_i(p_i, p_{-i}) \quad (11)$$

若可微函数  $u_i(p_i, p_{-i})$  是拟凹的, 则对于其一阶微分来讲, 当式(11)等于 0 的时候, 存在最优解  $p_i^{\text{opt}}$ , 使其取最大值, 即令

$$\left. \frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} \right|_{p_i = p_i^{\text{opt}}} = 0 \quad (12)$$

为使计算过程清晰明了, 令

$$u_{1i} = \frac{Z_i}{a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})} \cdot \frac{g_i}{I_i} - \lambda_1 \frac{g_i \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j}{\left( \sum_{j=1}^N p_j g_j \right)^2} \quad (13)$$

$$u_{2i} = - \lambda_2 \sum_{m=1}^M \left( \frac{h_{mi} \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j h_{mj}}{\left( \sum_{j=1}^N p_j h_{mj} \right)^2} + \frac{\delta p_i h_{mi}^2}{\left( \sum_{j=1}^N p_j h_{mj} \right) Q_m^{\max}} \right) e^{w_m} \quad (14)$$

则  $u_i(p_i, p_{-i})$  的二阶导数为

$$\frac{\partial^2 u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i^2} = \frac{\partial u_{1i}}{\partial p_i} + \frac{\partial u_{2i}}{\partial p_i} \quad (15)$$

若  $u_i(p_i, p_{-i})$  的二阶导数小于 0, 说明  $u_i(p_i, p_{-i})$  是拟凹的。将该二阶导数分开求解, 有

$$\frac{\partial u_{1i}}{\partial p_i} = -\frac{Z_i}{a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})^2} \cdot \left(\frac{g_i}{I_i}\right)^2 < 0 \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知, 当  $\frac{\partial u_{2i}}{\partial p_i}$  满足如下条件时, 效用函数的二阶导数也小于 0。

$$\frac{\partial u_{2i}}{\partial p_i} = -\lambda_2 \sum_{m=1}^M \left[ \frac{\Gamma_i(p) h_{mi}^2}{\left(\sum_{j=1}^N p_j h_{mj}\right)^3} \right] e^{w_m} < 0 \quad (17)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Gamma_i(p) = & \left( 2 \frac{\delta}{Q_m^{\max}} + p_i h_{mi} \left( \frac{\delta}{Q_m^{\max}} \right)^2 \right) \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j h_{mj} \right)^2 + \\ & (p_i h_{mi})^3 \left( \frac{\delta}{Q_m^{\max}} \right)^2 + \left( 2(p_i h_{mi})^2 \left( \frac{\delta}{Q_m^{\max}} \right)^2 + \right. \\ & \left. 2 p_i h_{mi} \frac{\delta}{Q_m^{\max}} - 2 \right) \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j h_{mj} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

若式(17)成立, 则需满足

$$\Delta = -2(p_i h_{mi})^2 \left( \frac{\delta}{Q_m^{\max}} \right)^2 - 2 p_i h_{mi} \frac{\delta}{Q_m^{\max}} + 1 < 0 \quad (19)$$

求解式(19), 得

$$p_i > \frac{(\sqrt{2}-1)Q_m^{\max}}{\delta h_{mi}} \quad (20)$$

可知, 存在  $p_i^* \in [0, \frac{(\sqrt{2}-1)Q_m^{\max}}{\delta h_{mi}}]$ , 使得  $\Gamma_i(p)$

为严格单调递增。即

$$\frac{\partial^2 u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i^2} \begin{cases} > 0, & 0 \leq p_i < p_i^* \\ = 0, & p_i = p_i^* \\ < 0, & p_i > p_i^* \end{cases} \quad (21)$$

当  $p_i \rightarrow 0$  时, 有

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} \right|_{p_i=0} &= \frac{Z_i}{a_i \gamma_i^{\text{tar}}} \cdot \frac{h_i}{I_i} - \lambda_1 \frac{g_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j} - \\ & \lambda_2 \sum_{m=1}^M \frac{h_{mi}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j h_{mj}} e^{w_m} \end{aligned} \quad (22)$$

因为本文算法考虑到认知用户的干扰温度约束, 因此在该范围内,  $e^{w_m}$  的值远小于 1。令式(22)等于 0, 则下式可以近似成立。

$$\left. \frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} \right|_{p_i=0} = -\frac{Z_i}{a_i \gamma_i^{\text{tar}}} \cdot \frac{g_i}{I_i} - \lambda_1 \frac{g_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j} = 0 \quad (23)$$

则有

$$\lambda_1^* = -\frac{Z_i}{a_i \gamma_i^{\text{tar}}} \quad (24)$$

由以上分析可知, 当  $\lambda_1 < \lambda_1^*$  时, 有

$$\left. \frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} \right|_{p_i=0} > 0 \quad (25)$$

$$\left. \frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} \right|_{p_i \rightarrow \infty} \rightarrow -\infty < 0 \quad (26)$$

可知, 有且仅有一个  $p_i^{\text{opt}} \in [p_i^*, +\infty]$ , 使得

$$\frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} \begin{cases} > 0, & 0 \leq p_i < p_i^{\text{opt}} \\ = 0, & p_i = p_i^{\text{opt}} \\ < 0, & p_i > p_i^{\text{opt}} \end{cases} \quad (27)$$

因此, 当  $\lambda_1 < \lambda_1^*$  时, 存在且仅有一个最优解  $p_i^{\text{opt}}$ , 即纳什均衡解存在。

当  $\lambda_1 > \lambda_1^*$  时, 存在不止一个最优解。此时, 本文算法将不能收敛到一个全局最优点, 这种情况下, 可以考虑采用超模博弈使均衡点集合, 从而收敛于唯一的纳什均衡解, 本文在此不进行详细讨论。

当  $\lambda_1 < \lambda_1^*$  时,  $e^{w_m}$  的值远小于 1, 令  $\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = 0$  得

到

$$\frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} = \frac{Z_i}{a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})} \cdot \frac{g_i}{I_i} - \lambda_1 \frac{g_i \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j}{\left(\sum_{j=1}^N p_j g_j\right)^2} = 0$$

$$\gamma_i = \gamma_i^{\text{tar}} + \frac{Z_i}{I_i a_i \lambda_1} \cdot \frac{\left( \sum_{j=1}^N p_j g_j \right)^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j} \quad (28)$$

由  $\gamma_i = Z_i \cdot \frac{p_i g_i}{I_i}$ , 得

$$p_i = \gamma_i \cdot \frac{I_i}{Z_i g_i} = \gamma_i^{\text{tar}} \cdot \frac{I_i}{Z_i g_i} + \frac{1}{g_i a_i \lambda_1} \cdot \frac{\left( \sum_{j=1}^N p_j g_j \right)^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_j} \quad (29)$$

### 4 迭代功率控制算法

如果将授权用户系统的基站作为测量干扰节点, 这样可以检测到认知用户在传输过程中对授权用户造成的干扰。所以当用户的干扰能够探测到<sup>[12]</sup>时, 由式(29)可得

$$p_i^{(k+1)} = \begin{cases} \gamma_i^{\text{tar}} \cdot \frac{I_i^{(k)}}{Z_i g_i^{(k)}} + \frac{1}{g_i a_i \lambda_1} \cdot \frac{\left( \sum_{j=1}^N p_j^{(k)} g_j \right)^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j^{(k)} g_j}, & p_i^{(k+1)} > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

其中,  $p_i^{(k+1)}$  是第  $i$  个用户第  $(K+1)$  次迭代功率,  $I_i^{(k)}$  是第  $i$  个用户第  $(K+1)$  次迭代干扰。为了很好地描述上式, 用  $p_i^{(k)}$  来代替  $I_i^{(k)}$ 。这样分析其收敛性变得简单。

由  $\frac{I_i^{(k)}}{g_i} = Z_i \cdot \frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}}$ , 定义  $p_i^{(k+1)} = f_i^{(k)}(p_i^{(k)})$  可得

$$f_i^{(k)}(p_i^{(k)}) = \begin{cases} \gamma_i^{\text{tar}} \cdot \frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}} + \frac{1}{g_i a_i \lambda_1} \cdot \frac{\left( \sum_{j=1}^N p_j^{(k)} g_j \right)^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j^{(k)} g_j}, & p_i^{(k+1)} > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

这就是功率迭代等式, 前半部分和 SINR 平衡算法一致, 后半部分不同, 是干扰部分。

### 5 仿真结果及性能分析

本文采用 MATLAB 仿真工具, 分析各个参数对算法性能的影响。同时, 为验证本文算法的性能,

将本文算法与 SINR 平衡算法、KG 算法在信噪比、发射功率等方面进行分析比较。仿真过程不考虑快衰落、阴影衰落等影响。假设算法仿真环境为一个认知无线电中的小区, 认知用户随机、均匀分布在距离基站  $d \leq 1000\text{m}$  的范围内。初始发射功率为  $1 \times 10^{-10} \text{W}$ ; 扩频带宽 5MHz, 发射速率 10kbit/s; 背景噪声  $\sigma^2 = 5 \times 10^{-15} \text{W}$ , 信道增益  $0.0075 \times h^{-3.6}$ ; 目标信干噪比  $\gamma_i^{\text{tar}} = 8$ , 门限信干噪比  $\gamma_i^{\text{th}} = 7$ 。

SINR 平衡算法的功率控制迭代式<sup>[13]</sup>

$$p_k^{(i+1)} = \gamma_k^{\text{tar}} \frac{p_k^{(i)}}{\gamma_k^{(i)}} \quad (32)$$

KG 的功率控制算法迭代式为<sup>[6]</sup>

$$p_i^{(k+1)} = \gamma_i^{\text{tar}} \left( \frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}} \right) - \frac{b_i}{2c_i} \left( \frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}} \right)^2 \quad (33)$$

设 CR 无线网小区中有 2 个授权用户, 位置固定; 小区中随机产生 30 个认知用户, 这些用户的位置随机分布, 且同时开机或接入网络。小区用户分布如图 1 所示。

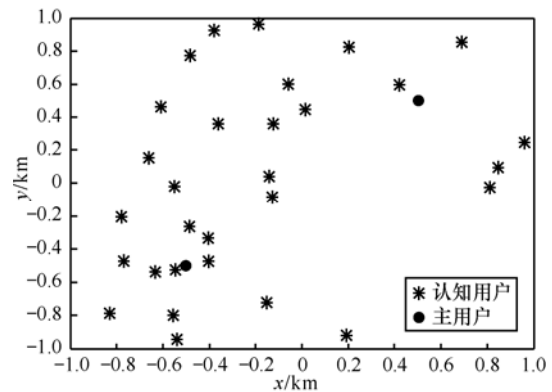


图 1 CR 无线网小区中的用户分布

图 2 是 SINR 平衡算法、KG 算法与本文算法信干噪比的对比。其中, 图 2(a)是本文算法、KG 算法和 SINR 平衡算法迭代信干噪比比较, 图 2(b)是本文算法、KG 和 SINR 平衡算法迭代信干噪比与距离之间的关系。由图形曲线可知, 不论是迭代信干噪比还是平均信干噪比本文算法都优于其他 2 种算法。

图 3 是 SINR 平衡算法、KG 算法与本文算法发射功率对比关系图。其中, 图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)分别是 3 种算法的迭代发射功率, 图 3(d)是 3 种算法发射功率与距离之间的关系。从图 3 中可知, 本文算法的发射功率高于其他 2 种算法, 本文算法功率迭代次数在 12 次收敛, 其他 2 种算法在迭代 8

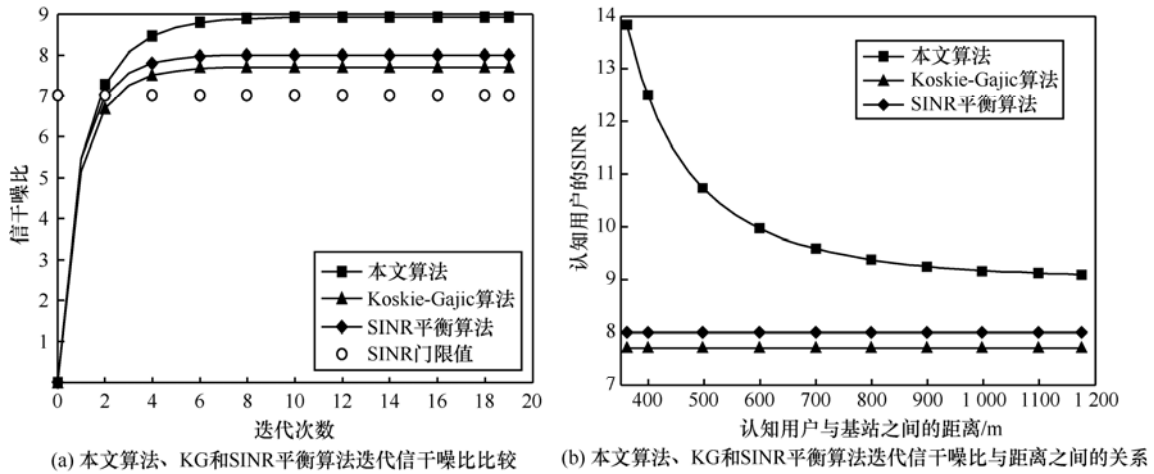


图2 本文算法、KG和SINR平衡算法信干噪比比较

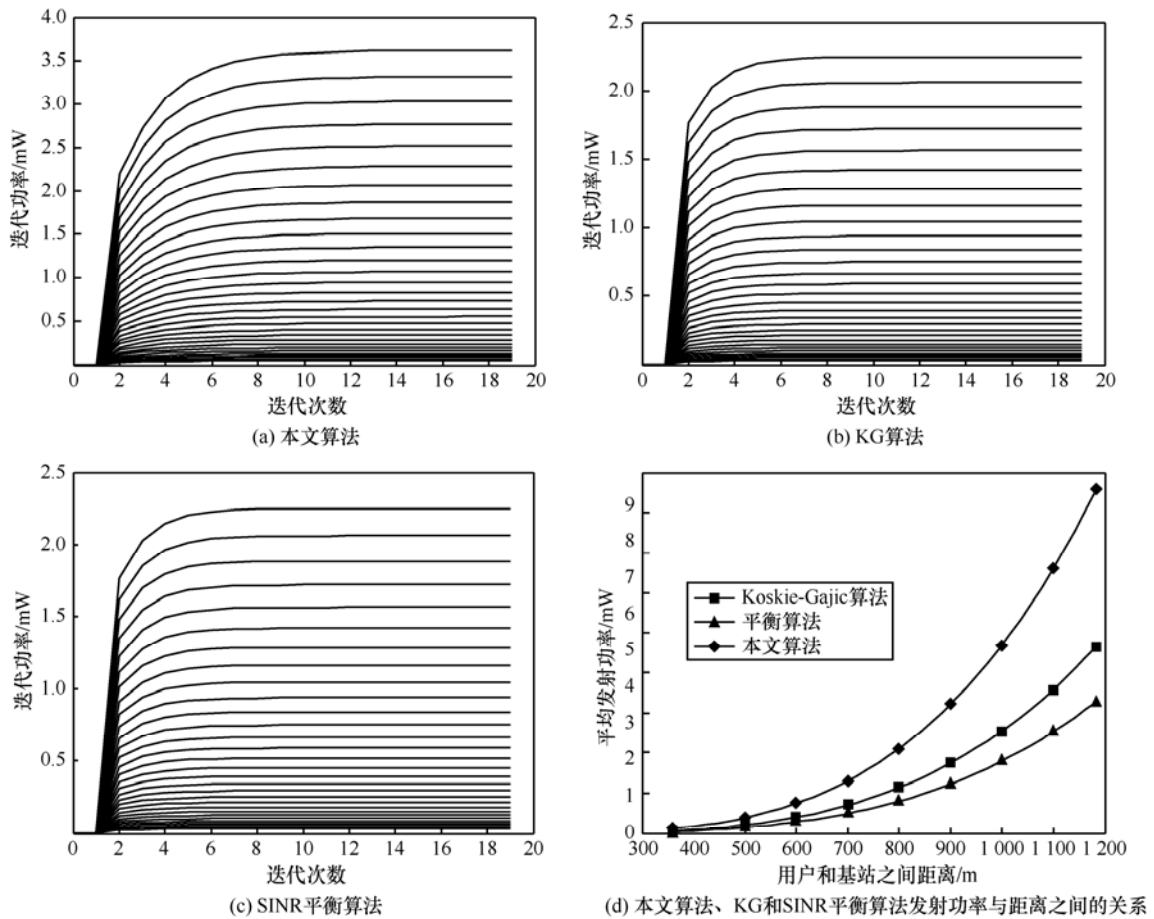


图3 本文算法、KG和SINR平衡算法发射功率的比较

次就收敛了，这是该算法的劣势，也是今后需要研究的工作。

在无线 CR 环境中，基站接收到的认知用户的功率随距离的增加迅速衰减。综合图 2、图 3 可知，经典的 SINR 平衡算法通过调节发射功率，使 SINR

的值不随距离的增加而改变，始终保持在  $\gamma_i^{\text{tar}}$ ；KG 算法降低了认知用户的发射功率，使得认知用户 SINR 降低，达不到目标信干噪比，用户的服务质量有所下降；本文算法虽然发射功率较高，但在不影响授权用户与其他认知用户正常通信的前提下，

用户 SINR 有所提高,保证了认知用户的服务质量。在要求高通信质量的 CR 无线小区,这种算法具有很大的优势。

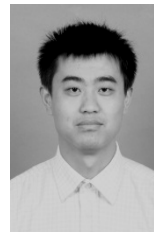
## 6 结束语

本文对新的非合作式功率控制模型进行了数学分析,通过严格的博弈论求解证明了其纳什均衡解的存在性,并对于各种情况下纳什均衡解的唯一性进行了验证和分析。在本文最后将本文算法与 SINR 平衡算法、KG 算法就认知用户的 SINR、平均发射功率和迭代功率等几个方面进行仿真对比,可知,本文算法在提高了少量用户发射功率的基础上,增大了认知用户的 SINR,提高了系统的性能。

### 参考文献:

- [1] MITOLA J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications[A]. 1999 IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications[C]. San Diego, CA, USA,1999. 3-10.
- [2] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [3] LOTKER Z, PARTER M, PELEG D, *et al.* Distributed power control in the SINR model[A]. INFOCOM, Proceedings of IEEE[C]. Shanghai, China, 2011. 2525-2533.
- [4] LI J D, YANG C G, LI W Y, *et al.* Pricing based power control game for cognitive radio networks[A]. International Conference on Telecommunications[C]. Marrakech, Morocco, 2009. 270-275.
- [5] 林玉清, 王霞等. 认知无线电系统中基于归一化效用函数的功率控制方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学), 2011,31(1):39-44.  
LIN Y Q, WANG X, *et al.* Power control based on unitary utility function in cognitive radio system[J]. Journal of Nanjing University of Postsand Telecommunications(Natural Science), 2011,31(1):39-44.
- [6] LI F, TAN X Z, WANG L. A new game algorithm for power control in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011,60(9):4384-4391.
- [7] SARAYDAR C U, MANDAYAM N B, GOODMAN D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002,50(2):291-303.
- [8] WANG W, PENG T, WANG W B. Modeling of uplink power control for cognitive radio networks: cooperative and noncooperative[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011,53(11):2136-2148.
- [9] NADKAR T, THUMAR V, TEJ G P S, *et al.* Distributed power allocation for secondary users in a cognitive radio scenario[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2012, 11(4):1576-1586 .
- [10] 张天魁,曾志民,张颖莹等.基于博弈论的 OFDMA 系统多小区功率协调分配算法[J].通信学报,2008,29(1):22-29.  
ZHANG T K, ZENG Z M, ZHANG Y Y, *et al.* Multicell adaptive power allocation scheme based on game theory in OFDMA systems[J]. Journal on Communications, 2008,29(1):22-29.
- [11] 弗登博格, 梯若尔. 博弈论[M].北京: 中国人民大学出版社, 2010.  
DREW F, JEAN T. Game Theory[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2010.
- [12] WU J M, CHEN C Y. An adjustable fuzzy power control architecture for a multi-rate WCDMA system[A]. Proceedings of the 27th Chinese Control Conference[C].Kunming, China, 2008. 633-636.
- [13] 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.  
CHENG S L, YANG Z, ZHANG H. Novel power control game algorithm for cognitive radios[J].Journal on Communications, 2007, 28(3): 100-107.

### 作者简介:



**赵军辉** (1973-), 男, 安徽郎溪人, 博士, 北京交通大学副教授, 主要研究方向为无线和移动通信 (MIMO、OFDM、CDMA、合作通信、中继和认知无线电)、射频识别 (定位技术、防撞技术和安全协议) 和应用开发 (基于 J2ME 的手机终端软件开发、停车场管理系统、嵌入式车载防盗系统和 GPS 导航系统开发) 等。



**杨涛** (1987-), 男, 四川宜宾人, 北京交通大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电技术、室内定位技术以及认知无线网络等。



**张雪雪** (1987-), 女, 山东潍坊人, 北京交通大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电技术、室内定位技术以及认知无线网络等。