

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.001

引用格式:朱江,巴少为,杜清敏. 认知无线网络中一种非合作博弈功率控制算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(12): 1301-1309. [ZHU Jiang, BA Shaowei, DU Qingmin. A power control algorithm based on non-cooperative game theory for cognitive radio networks[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12): 1301-1309.]

认知无线网络中一种非合作博弈功率控制算法*

朱 江,巴少为**,杜清敏

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室,重庆 400065)

摘 要:针对现有的功率控制算法中存在的干扰问题和功率消耗过大问题,设计出一种新的效用函数,并根据此效用函数提出了一个基于非合作博弈的新的功率控制算法。首先,在效用函数中分别为信干噪比和功率设定了不同的代价因子,并将信道状态概念引入到代价因子里面,使其能够更加合理地控制用户,避免用户过度增加发射功率,同时减小了用户间的干扰;其次,证明了该算法纳什均衡的存在性和唯一性;最后,给出了所提算法的流程图。仿真结果表明,与 Nash 算法相比,在保证非授权用户服务质量(QoS)前提下,该算法功率消耗明显降低,并且具有较好的抗背景噪声性能;与 K-G(Koskie-Gajic)算法相比,该算法保证了所有的用户的信干噪比满足上下限阈值要求,并且提高了系统容量。

关键词:认知无线电;功率控制;博弈论;信道状态

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)12-1301-09

A Power Control Algorithm Based on Non-cooperative Game Theory for Cognitive Radio Networks

ZHU Jiang, BA Shaowei, DU Qingmin

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To deal with the problems of interference and large power-consumption in the existing power control algorithms, a new utility function is proposed and then a novel power control algorithm based on non-cooperative game theory is deduced. Firstly, the cost factors for signal-to-interference-noise ratio (SINR) and power are set respectively, and channel status is introduced into the cost factors so as to control transmission power reasonably and reduce the interference among users. Then, the existence and uniqueness of the Nash Equilibrium (NE) in the utility function are proved. Finally, the flowchart of the proposed algorithm is presented. Simulation results show that, compared with Nash algorithm, the proposed one can reduce the power consumption effectively and achieve better anti-noise effect; compared with Koskie-Gajic (K-G) algorithm, the proposed one ensures the user's SINR to meet the required threshold value and improves the total throughput.

Key words: cognitive radio; power control; game theory; channel status

* 收稿日期:2016-04-18;修回日期:2016-08-03 Received date:2016-04-18;Revised date:2016-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102062);教育部科学技术研究重点项目(212145);重庆市科委自然科学基金资助项目(cstc2015jcyjA40050);重庆市教委科学技术研究项目(KJ120530)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61102062); The Key Science and Technology Research Project of The Education Ministry (No. 212145); The National Nature Science Foundation of Chongqing (cstc2015jcyjA40050); The Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission of China (KJ120530)

** 通信作者: Kammybaba@163.com **Corresponding author:** Kammybaba@163.com

1 引言

认知无线电^[1] (Cognitive Radio, CR) 技术能动态检测和有效利用空闲频谱^[2], 而功率控制技术是解决授权用户 (Primary User, PU) 和非授权用户 (Secondary User, SU) 共存网络中干扰问题的关键技术。近年来, 博弈论^[3-5] (Game Theory) 被广泛应用于解决无线通信中的功率控制问题。文献[6]提出了一种非合作博弈功率控制算法 (Non-cooperative Power Control Game, NPG), 但是该算法的纳什均衡点并不唯一, 针对这一问题文献[7]提出了一种基于线性代价函数的非合作功率控制博弈算法。文献[8]提出了一种新的基于代价函数的功率博弈算法, 该算法的特点是实现比较简单, 但系统存在功率浪费问题。针对文献[8]的算法, 文献[9]提出 K-G (Koskie-Gajic) 算法, 降低了功率的消耗, 但由于过于强调降低能量的消耗, 该算法只考虑了信干噪比 (Signal-to-Interference-Noise Ratio, SINR) 上限值, 使得部分非授权用户的 SINR 收敛值低于下限阈值, 不能满足用户的通信需求, 且 K-G 算法的系统存在“远近效应”。针对 K-G 算法的缺陷, 文献[10]在效用函数中引入信道增益因子, 该效用函数使系统对距离基站距离不同的用户实施不同的惩罚力度, 解决了系统的远近不公平性的问题, 但是仍然存在部分用户的信干噪比小于阈值的情况。文献[11]提出了一种多小区的功率控制算法。文献[12]在码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) 系统下, 在效用函数中引入基于 SINR 和功率的综合代价因子, 系统可以设置不同的代价因子, 对距离不同的用户采取不同的惩罚力度, 使算法具有一定的灵活性和公平性。

本文在文献[12]的基础上, 设计了新的效用函数, 提出了一种基于 SINR 和功率的非合作博弈功率控制算法, 并将信道状态引入到代价因子中, 优化后的效用函数对功率和 SINR 的控制更为合理, 并且证明了在该博弈下存在唯一的纳什均衡。仿真结果表明, 相比文献[12], 在保证所有用户通信质量的前提下, 非授权用户的发射功率有所下降, SINR 收敛值适中, 系统吞吐量接近文献[12], 且随着背景噪声的增大, 用户的平均信干噪比不会出现明显下降, 具有较好的抗背景噪声干扰性能。

2 系统模型

本文选择 CDMA 制式的认知网络进行研究, 假

设该网络小区中有 1 个认知基站 (Base Station of SU, SBS) 及 N 个非授权用户、1 个授权用户、1 个主基站 (Base Station, BS), 本文只考虑 1 个授权用户是为了突出系统的认知环境, 避免网络环境过于复杂, 便于进行分析。本文所提出的算法可以扩展到多个授权用户与非授权用户共存的网络环境。认知基站的覆盖半径是 R , 认知用户随机分布在小区内, 且非授权用户之间存在相互干扰, 认知用户对距离基站较近的授权用户也会造成干扰。

非授权用户 i 在基站处的 SINR 为

$$r_i = \frac{W h_i p_i}{R_i \sum_{j \neq i} h_j p_j c_{ij} + v_i} \quad (1)$$

式中: c_{ij} 表示各用户扩频码之间的相关系数; W 为认知用户的扩频带宽; 传输速率为 R_i ; 用户 i 的发射功率为 p_i ; 认知用户 i 到基站的链路增益为 h_i ; 基站处的背景噪声为 v_i 。

定义

$$g_{ij} = \begin{cases} h_i, & i=j \\ h_i c_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2), 信干噪比重新表示为

$$\gamma_i = \frac{W g_{ii} p_i}{R_i \sum_{j \neq i} g_{ij} p_j + v_i} \quad (3)$$

对于认知用户 i , 其输出 SINR 的期望值应满足

$$\gamma_i \geq \gamma_i^{\text{tar}} \quad (4)$$

式中: γ_i^{tar} 是认知用户 i 的信干噪比阈值, 如果用户的信干噪比值小于阈值时, 用户就不能正常工作。在非授权用户与主用户共存的系统模型中, 认知用户为实现传输速率的最大化将会不断提高自己的发射功率, 这势必会给主用户带来干扰。为满足系统的正常通信需求, 非授权用户 i 对主用户的干扰应限制在一定的阈值下:

$$\sum_{i=1, i \neq j}^N p_i g_{ij} \leq T \quad (5)$$

式中: T 表示授权用户可以忍受的最大干扰; g_{ij} 表示非授权用户与授权用户间的链路增益。

3 非合作博弈功率控制算法

3.1 本文算法

本文提出一种新的博弈算法, 使得网络在合适的发射功率下, 在保证用户的服务质量 (Quality of Service, QoS) 的前提下, 使其付出的代价最小。

受到文献[13]的启发, 本文将信道状态概念引入到效用函数中。信道状态指的是用户受到的干扰

和其链路增益的比值,认知用户的信道状态为

$$\varphi_i(p_{-i}) = \frac{I_i(p_{-i})}{g_{ii}}. \quad (6)$$

从信道状态的定义我们可以知道,用户受到的干扰越高,链路增益越小, φ 的值就越大,即质量好的信道 φ 值小,反之 φ 值大。不同用户的 QoS 需求存在差异主要表现在 SINR 阈值和目标功率值的不同,因此,在选取效用函数时要考虑用户的 SINR 阈值要求和功率限制的关系。本文借鉴 Nash 算法、K-G 算法以及信道状态的概念,设计出了如下效用函数:

$$u_i(p_i, p_{-i}) = a_i \left(\frac{1}{\varphi_i(p_{-i})} \right)^2 e^{p_i^{\text{tar}} - p_i} + b_i (\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})^2. \quad (7)$$

式中: a_i 和 b_i 分别表示认知用户 i 的功率和 SINR 影响因子,其值为非负; γ_i^{tar} 为用户的 SINR 阈值; $b_i (\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})^2$ 是代价函数,当 $\gamma_i > \gamma_i^{\text{tar}}$ 时,随着 γ_i 的不断增大,用户对发射功率的需求也越来越大,就越来越耗电,那么对它的惩罚也变大。该代价函数引入了信道状态的概念,考虑了各用户间的干扰,能保证系统的公平性。

3.2 算法的迭代求解

定理 1: 若 $u_i(p_i^*, p_{-i}) \geq u_i(p_i, p_{-i}), \forall p_i, \forall i \in \mathbb{N}$, 那么 (p_i^*, p_{-i}) 是纳什均衡 (Nash Equilibrium, NE) 点。根据博弈论知识我们可以知道,当博弈达到纳什均衡时,此时系统的收益最高,用户不是追求最大化的信干噪比,用户所要寻求的是发射功率与信干噪比之间的平衡,即在获得接近 γ_i^{tar} 的信干噪比的前提下,降低认知用户的发射功率。由于非授权用户都是自私的,在选择策略时要最小化自身的代价,因此,在纳什均衡点应满足

$$\begin{cases} \min \{ u_i(p_i, p_{-i}), i \in \{1, 2, \dots, N\} \} \\ \text{s. t. } p_i \leq p_i^{\max} \end{cases}. \quad (8)$$

式(8)中的纳什均衡解即为非授权用户 i 选择的最佳策略。求解纳什均衡解,利用拉格朗日算法,对 $u_i(p_i, p_{-i})$ 求 p_i 的一阶微分:

$$\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = 2b_i (\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}}) \times \frac{\partial \gamma_i}{\partial p_i} - a_i \left(\frac{1}{\varphi_i(p_{-i})} \right)^2 e^{p_i^{\text{tar}} - p_i}. \quad (9)$$

当上式等于 0 时, $u_i(p_i, p_{-i})$ 取得最小值,得

$$\gamma_i = \frac{a_i}{2b_i} \times \frac{I}{h_i} \times \left(\frac{1}{\varphi_i(p_{-i})} \right)^2 \times e^{p_i^{\text{tar}} - p_i} + \gamma_i^{\text{tar}}. \quad (10)$$

式中:

$$I = \sum_{j \neq i} h_j p_j + v_i. \quad (11)$$

由式(10)可见,在纳什均衡点处,对于每个非

授权用户都有 $\gamma_i > \gamma_i^{\text{tar}}$, 即每个非授权用户的基本 QoS 得到保障。将式(11)代入式(1),得到

$$p_i = \gamma_i^{\text{tar}} \times \frac{p_i}{\gamma_i} + \frac{a_i}{2b_i} \times e^{p_i^{\text{tar}} - p_i}. \quad (12)$$

采用迭代公式,得到迭代 n 次后的发射功率

$$p_i^{(n+1)} = \begin{cases} \gamma_i^{\text{tar}} \times \frac{p_i^{(n)}}{\gamma_i^{(n)}} + \frac{a_i}{2b_i} \times e^{p_i^{\text{tar}} - p_i^{(n)}}, & p_i^{(n+1)} < p_i^{\text{tar}} \\ p_i^{\text{tar}}, & p_i^{(n)} > p_i^{\text{tar}} \end{cases}. \quad (13)$$

3.3 纳什均衡的存在性和唯一性

定理 2 本文算法存在唯一的纳什均衡点。

设由 $u_i(p_i, p_{-i})$ 在 p_i 上求得的最优功率 $P = f(p)$ 为对应的反应函数,当 $f(p)$ 同时满足 3 个性质:正性,即 $f(p) > 0$;单调性,即若 $p' > p$, 则 $f(p') > f(p)$;可测量性,即 $\forall \tau > 1, \tau f(p) > f(\tau p)$, 则算法 $p_i^{(n+1)} = f(p^{(n)})$ 收敛到唯一点。

证明:令 $f(p) = \gamma_i^{\text{tar}} \times \frac{p_i}{\gamma_i} + \frac{a_i}{2b_i} \times e^{p_i^{\text{tar}} - p_i}$, 则 $f(p)$ 同时满足 3 个性质。

$$(1) \quad f(p) = \gamma_i^{\text{tar}} \times \frac{p_i}{\gamma_i} + \frac{a_i}{2b_i} \times e^{p_i^{\text{tar}} - p_i} > 0. \quad (14)$$

(2) 设 $p' > p$, 则对于 $\forall i$ 有 $p'_i > p_i$ 那么

$$f(p') - f(p) = \frac{\gamma_i^{\text{tar}}(p'_i - p_i)}{r_i} + \frac{a_i}{2b_i} e^{p_i^{\text{tar}}} (e^{-p'_i} - e^{-p_i}), \quad (15)$$

易得 $f(p') - f(p) \geq 0$ 。

(3) 设 $\forall \alpha > 1$, 则有

$$\alpha f(p_i) - f(\alpha p_i) = \frac{a_i}{2b_i} \times e^{p_i^{\text{tar}}} (\alpha e^{-p_i} - e^{-\alpha p_i}),$$

显然 $\alpha f(p_i) - f(\alpha p_i) > 0$ 。

证毕。

综上所述, $f(p)$ 满足标准函数的 3 个条件,所以该算法存在唯一的纳什均衡点。

下面将对纳什均衡的存在性进行证明。根据隐函数定理知,

$$F(p_i, p_{-i}, g_{ii}, g_{ij}, a_i, b_i, v_i) = 0 =$$

$$\begin{aligned} & -p_i + \frac{a_i}{2b_i} e^{p_i^{\text{tar}} - p_i} + \frac{I_i(p_{-i})}{g_{ii}} \gamma_i^{\text{tar}} = \\ & -p_i + \frac{a_i}{2b_i} e^{p_i^{\text{tar}} - p_i} + \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^M g_{ij} p_i + v_i}{g_{ii}} \gamma_i^{\text{tar}}. \end{aligned} \quad (16)$$

根据隐函数定理,雅克比行列式在纳什均衡点必须是非奇异的,因为

$$\frac{\partial F(p_i, p_{-i}, g_{ii}, g_{ij}, a_i, b_i, v_i)}{\partial p_i} =$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial p_1} & \frac{\partial F_1}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial p_M} \\ \frac{\partial F_2}{\partial p_1} & \frac{\partial F_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial p_M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_M}{\partial p_1} & \frac{\partial F_M}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial F_M}{\partial p_M} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} -1-\frac{a_i}{2b_i}e^{p_i^{\text{tar}}-p_i} & \frac{g_{12}}{g_{11}}\gamma_i^{\text{tar}} & \dots & \frac{g_{1M}}{g_{11}}\gamma_i^{\text{tar}} \\ \frac{g_{21}}{g_{22}}\gamma_i^{\text{tar}} & -1-\frac{a_i}{2b_i}e^{p_i^{\text{tar}}-p_i} & \dots & \frac{g_{2M}}{g_{22}}\gamma_i^{\text{tar}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{g_{M1}}{g_{MM}} & \frac{g_{M2}}{g_{MM}} & \dots & -1-\frac{a_i}{2b_i}e^{p_i^{\text{tar}}-p_i} \end{pmatrix} \circ$$

(17)

该雅克比行列式的主对角线上的值是 $-1-\frac{a_i}{2b_i}e^{p_i^{\text{tar}}-p_i}$ ，其他元素的值由 γ_i^{tar} 决定,可见该雅克比行列式的值和 a_i 、 b_i 、 γ_i^{tar} 、 p_i^{tar} 、 g_{ij} 相关,因为满足收敛性,参数 a_i 、 b_i 的值不会太大,链路增益 g_{ij} 的值也很小,它和距离相关。根据以上分析,如果 a_i 、 b_i 、 γ_i^{tar} 、 p_i^{tar} 的值是合理设置的,那么,该雅克比行列式的值是非零的。综上所述,新的非合作博弈算法存在纳什均衡解。

证毕。

3.4 算法描述及流程

对效用函数进行拉格朗日求导后,得到初始信干比,利用初始信干比与发射功率的关系求出初始发射功率,然后采用迭代公式迭代,对于任何用户,若满足 $|p_i^{(n+1)}-p_i^{(n)}|<\xi$ (ξ 为迭代误差)时,迭代结束,此迭代值就是我们要找的纳什均衡的发射功率。具体流程如图 1 所示。

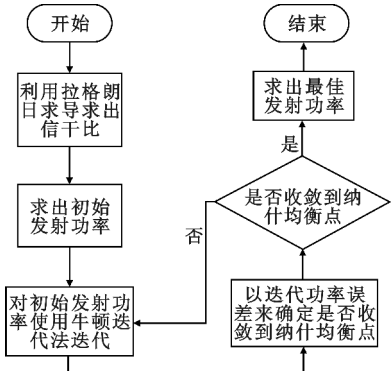


图 1 算法流程图
Fig. 1 Algorithm flowchart

4 仿真结果与性能分析

本文不考虑阴影衰落、快衰落及多径时延对信号的影响。假设认知用户数 $N=20$,且认知用户随机分布在距离中心基站1 000 m的范围内,信道增益 $h_i=A/d_i^m$,其中 $A=0.007\ 5$, $m=3.6$, d_i 代表非授权用户 i 距离基站的距离,背景噪声固定为 $v_i=5\times 10^{-15}\text{ W}$,认知用户的初始发射功率为 $p^{(0)}=10^{-10}\text{ W}$,扩频带宽 $W=5\text{ MHz}$,信息传输速率为 $R_i=10\text{ kb/s}$,迭代误差 $\xi=10^{-15}$ 。

4.1 功率和信干噪比收敛性分析

设目标功率 $p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$,图 2 和图 3 中的参数设置为 $\gamma_i^{\text{tar}}=8$,图 2 和图 3 表示这 3 种算法的 20 个非授权用户在迭代过程中的发射功率以及 SINR 的迭代情况统计。

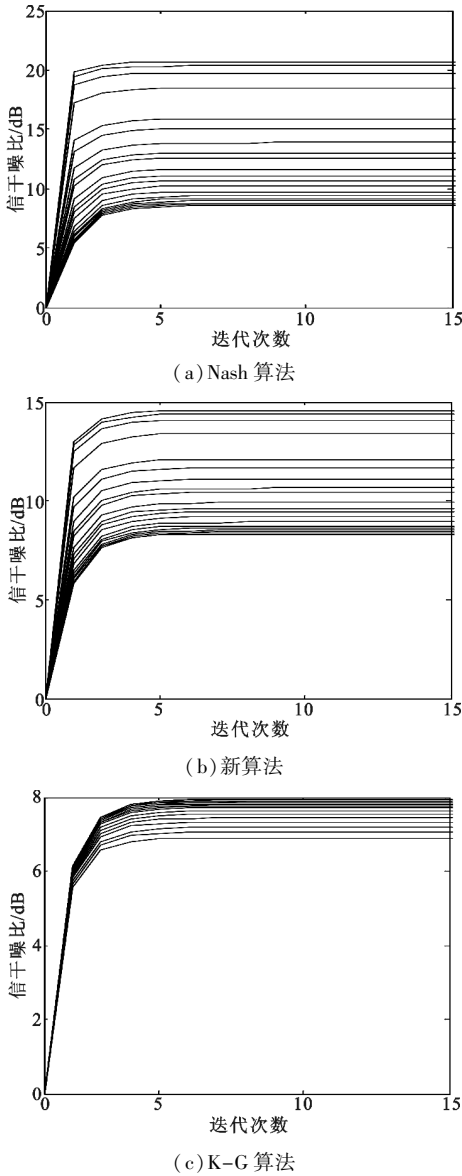


图 2 SINR 迭代图($p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$)
Fig. 2 The SINR iteration of algorithms when $p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$

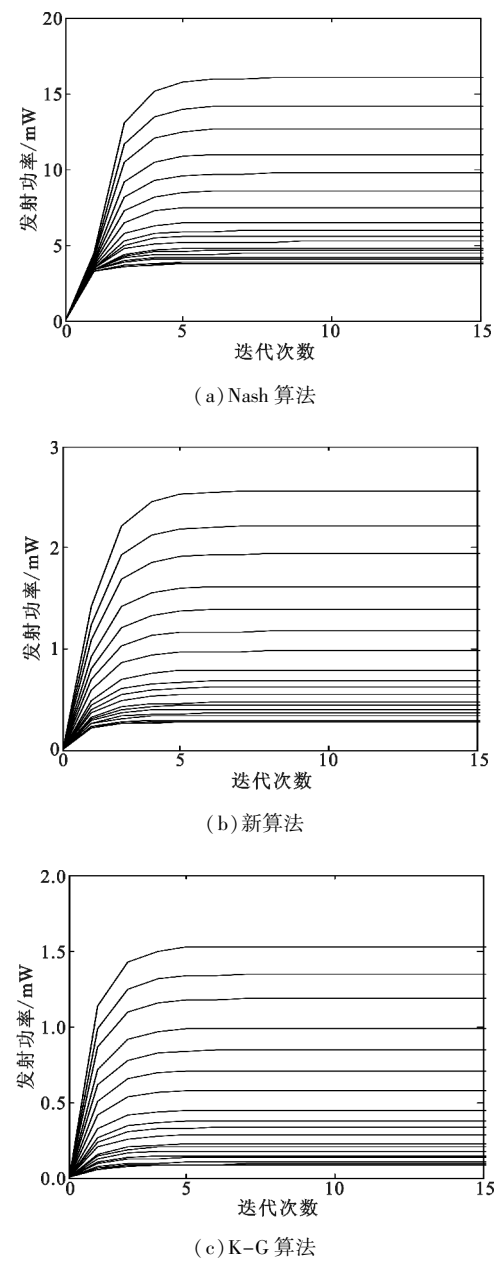


图 3 发射功率迭代图($p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$)

Fig. 3 The power iteration of algorithms when $p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$

从图中我们可以明显看出本文算法和 Nash 算法的收敛速度相当,大概收敛 7 次后达到均衡,符合实时通信的需求,K-G 算法在迭代大概 9 次后达到收敛,三者的收敛速度大致相当。从发射功率统计图可以看出本文算法迭代功率与 K-G 算法较为接近,Nash 算法的迭代功率要比本文提出算法的发射功率大许多。从信干噪比的迭代统计图可以看出 K-G 算法下有相当大一部分认知用户的输出信干噪比的值在阈值以下,不能满足通信的基本要求。

图 4 和图 5 是当目标功率值 $p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$ 时,信干噪比和发射功率值随着用户距离基站

而变化的统计图。从图中可以看出随着非授权用户与基站距离的增加,用户的信道条件也在慢慢变差,因此各算法的发射功率也在不断增加,信干噪比值在减小。其中,距离基站近的用户由于信道条件相对较好,发射功率更低,相应的信干噪比值也越高。从发射功率迭代图还可以看出,Nash 算法的功率增加幅度要远大于本文算法和 K-G 算法,本文算法在保证信干噪比始终在阈值的

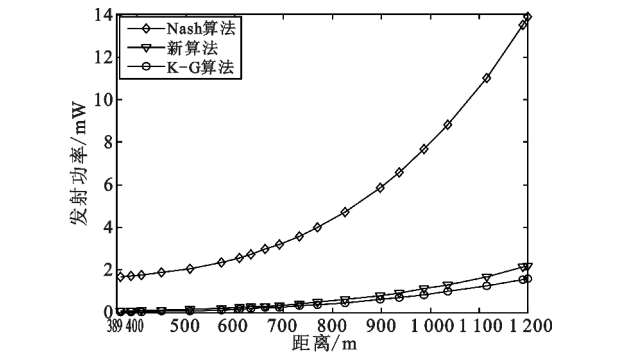


图 4 距离和发射功率关系($p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$)

Fig. 4 Relationship between distance and power when $p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$

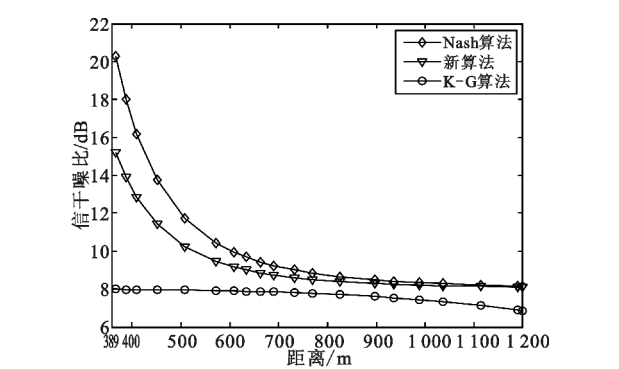
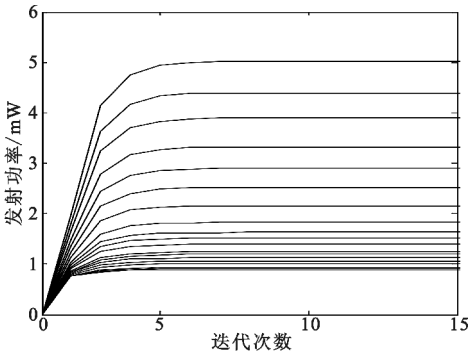


图 5 距离和 SINR 关系($p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$)

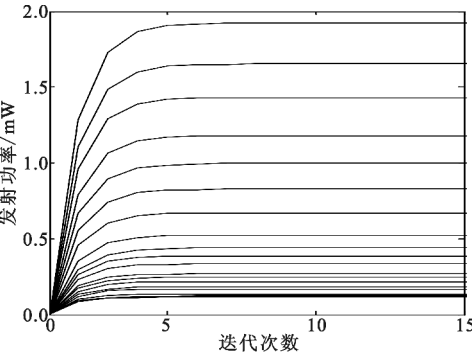
Fig. 5 Relationship between distance and SINR when $p_i^{\text{tar}}=14\text{ mW}$

下面将讨论目标功率 $p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$ 的情况。由图 6 ~ 7 可知,随着目标功率值的下降,3 种算法的非授权用户的输出 SINR 值都在相应减小,逐渐向信干噪比阈值收敛,而 K-G 算法下的认知用户的 SINR 逐渐降到阈值以下,不能满足用户的通信需

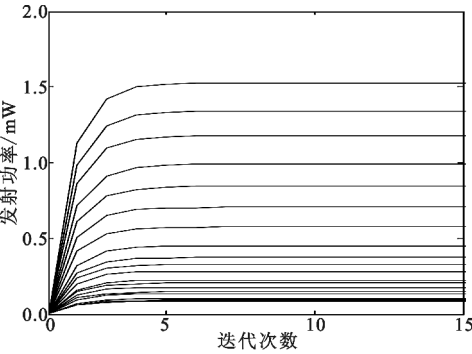
求。从图中可看出本文所提算法及 K-G 算法的发射功率变化范围并不是很大,而 Nash 算法的非授权用户的发射功率变化较大,有的用户的发射功率值甚至超过了阈值 $p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$,这些用户由于发射功率过大,出现功率溢出的现象,虽然它们取得的 SINR 值相对较大,但势必会给授权用户的通信带来很大干扰,而本文提出的算法能保证在较小的发射功率的前提下用户的 SINR 值在阈值以上,满足用户的 QoS,一方面节约了能源,另一方面又减少了对用户的干扰。



(a) Nash 算法



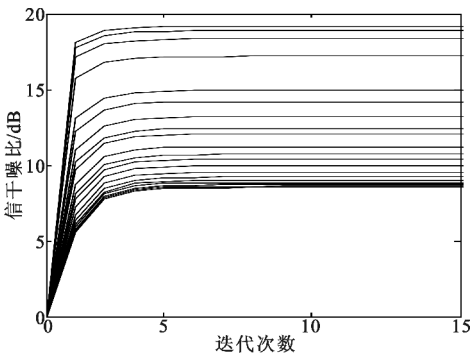
(b) 新算法



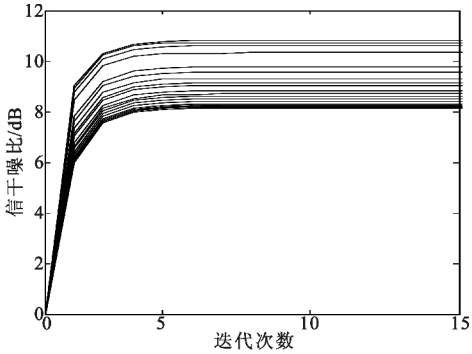
(c) K-G 算法

图 6 发射功率迭代图($p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$)

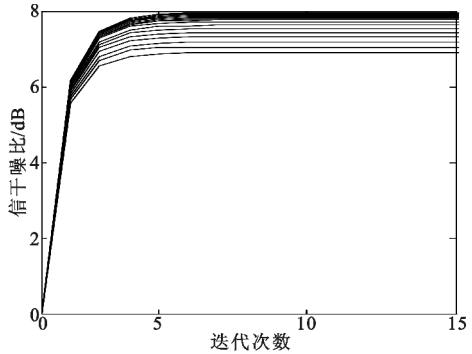
Fig. 6 The power iterate of algorithms when $p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$



(a) Nash 算法



(b) 新算法



(c) K-G 算法

图 7 SINR 迭代图($p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$)

Fig. 7 The SINR iteration of algorithms when $p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$

图 8 和图 9 描述了当 $p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$ 时,非授权用户的信干噪比及发射功率随基站距离变化的情况。由图 8 可知,3 种算法的 SINR 值随距离的增大在相应地减小,除了 K-G 算法的用户,其他两种算法用户的输出 SINR 值都在阈值以上,Nash 算法的 SINR 值相对要高一些。由图 9 知,随着距离的增大,用户的信道条件也在变差,所以这 3 种算法的发射功率随距离的增大也在不断增加,其中本文算法和 K-G 算法的发射功率增幅较小,而 Nash 算法的发射功率增幅相对很大,这说明随着距离的增大,Nash 算法的部分用户以牺牲发射功率为代价获得了较高的

SINR 值,这不仅会造成能量的浪费,而且盲目地增加发射功率会给其他用户带来很大的干扰,这显然是不可取的。

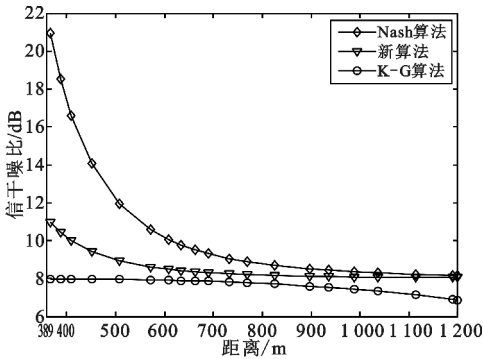


图 8 距离和 SINR 关系图($p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$)
Fig. 8 Relationship between distance and SINR when $p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$

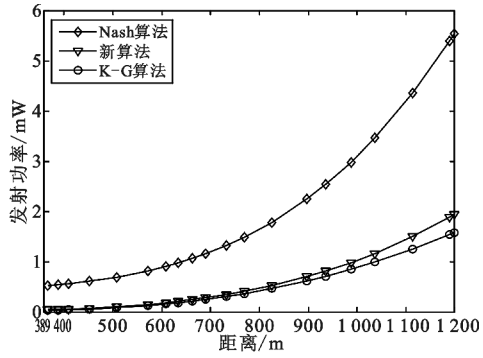


图 9 距离和发射功率关系图($p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$)
Fig. 9 Relationship between distance and power when $p_i^{\text{tar}}=4\text{ mW}$

4.2 噪声影响分析

图 10 ~ 11 分析了噪声对用户的平均信干噪比及平均发射功率的影响,其中噪声功率的值为 $0.5\times 10^{-14}\sim 3\times 10^{-14}\text{ mW}$ 。由图可知,3 种算法的平均发射功率值是呈非线性增加的,其中,Nash 算法的平均发射功率增加的速度最快,本文算法及 K-G 算法相对较慢。随着噪声功率的增加,3 种算法的信干噪比的值在逐渐减小,K-G 算法过于强调降低能量的消耗而致使其用户的 SINR 值越来越低,部分用户甚至低于阈值,不能正常通信,而本文算法和 Nash 算法的用户的平均 SINR 值随着噪声的增大也在逐渐减小,但始终能保证在阈值以上,能够保证用户的 QoS,且本文算法的发射功率较 Nash 算法要小。综合考虑噪声对信干噪比及发射功率的影响,本文算法较其他两种算法有更好的抗背景噪声性能。

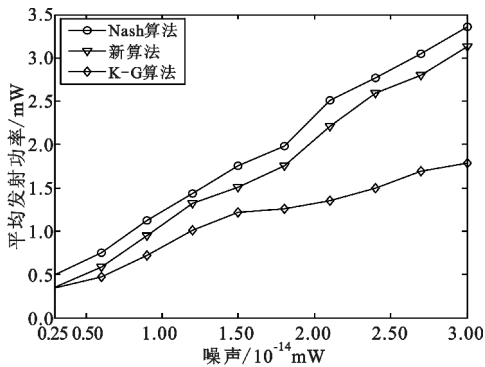


图 10 平均发射功率随噪声功率的变化图
Fig. 10 Average transmission power versus noise power

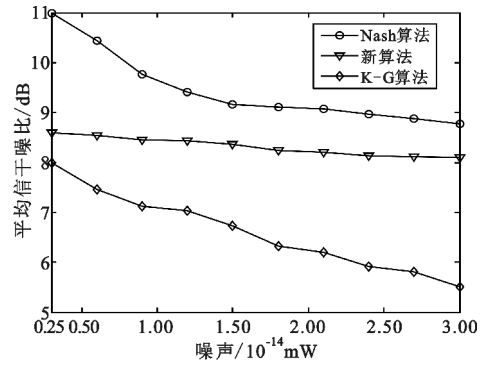


图 11 平均 SINR 随噪声功率的变化图
Fig. 11 Average SINR versus noise power

4.3 对主用户干扰分析

由图 12 可知,Nash 算法对授权用户的干扰^[14]最大,因为该算法下的用户为了取得高的 SINR 值而盲目提高发射功率,使得其对授权用户的干扰也较大,K-G 算法下的用户由于发射功率特别小,所以它对授权用户的干扰也最小,但是 K-G 算法下的大部分用户的信干噪比值低于阈值,不能满足正常的通信需求,没有实际的意义。本文算法引入了信道状态的概念,充分考虑了干扰对系统的影响,使得所有用户在保证通信服务质量的前提下对授权用户造成较小的干扰。

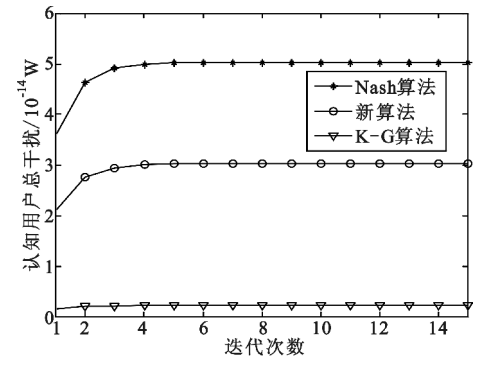


图 12 总干扰与迭代次数关系
Fig. 12 Total interference of cognitive users

4.4 吞吐量分析

由于这 3 种算法的仿真参数和仿真场景是一样的,带宽对三者的影响是一样的,均为一个常数。为了减小计算的复杂度,本文将吞吐量^[15]里面的带宽大小设定为 1,单位带宽吞吐量表示为

$$T = \sum_{i=1}^N \lg(1 + \gamma_i)。$$
(18)

式中: T 为单位带宽吞吐量; γ_i 为非授权用户 i 的信干噪比。从图 13 可以看出本文算法和 Nash 算法的单位带宽的吞吐量大小接近,而 K-G 算法的单位带宽吞吐量明显要比两者小很多,且从图中可以看出单位带宽吞吐量并不是随着用户数量的增加而一直增加,用户数目增加到 25 时,单位带宽吞吐量反而减小了,对于 K-G 算法更是下降得比较明显,这是因为用户在空间上分布的稠密稀疏间接地影响了用户的信干噪比,由于用户在空间上的分布是随机的,当用户数为 25 时,部分非授权用户由于距离基站较远,信道状况较差,所以其信干噪比值较低,由于单位带宽吞吐量和信干噪比值是直接相关的,所以较低的信干噪比值导致了用户数为 25 时单位带宽吞吐量较低,对于强调降低能量消耗而对自私用户惩罚较大的 K-G 算法来说其单位带宽吞吐量下降尤其明显。

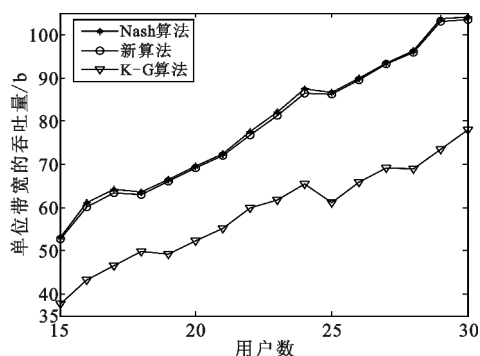


图 13 单位带宽的吞吐量随用户数量变化图

Fig. 13 Throughput per unit of bandwidth versus the amount of users

5 结束语

本文针对认知无线网络里面功率控制的问题,结合信道状态的概念,提出了一种基于非合作博弈的功率控制算法。仿真结果表明,与 Nash 算法及 K-G 算法相比,本文提出的算法既能保证所有用户的接收 SINR 需求,又有效降低了功率消耗;随着背景

噪声的增大,用户的平均信干噪比不会出现明显下降,具有较好的抗噪声干扰性能,且本文算法收敛速度较快,符合实时通信的需求。然而,本文研究的是在传输速率固定的前提下对功率进行优化的,只考虑了单个资源的优化情况,为了满足多业务的服务,下一步将考虑对功率和速率进行联合优化。

参考文献:

- [1] 周良臣. 认知无线电体系结构分析[J]. 电讯技术, 2010,50(3):6-11.
ZHOU Liangchen. Analysis of cognitive radio architecture [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(3):6-11. (in Chinese)
- [2] 任肖丽,高飞飞,王骥,等. 基于 DOA 估计的认知无线网络频谱感知[J]. 电讯技术,2016,56(4):353-359.
REN Xiaoli,GAO Feifei,WANG Ji,et al. Spectrum sensing based on DOA estimation in cognitive radio networks [J]. Telecommunication Engineering,2016,56(4):353-359. (in Chinese)
- [3] KANG X,ZHANG R,MOTANI M. Price-based resource allocation for spectrum - sharing femtocell networks; a stackelberg game approach [C]//Proceedings of 2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBE-COM 2011). Houston,Texas,USA:IEEE,2011:1 - 5.
- [4] XIE X,YANG H,VASILAKOS A V, et al. Fair power control using game theory with pricing scheme in cognitive radio networks [J]. Journal of Communications & Networks,2014,16(2):183-192.
- [5] YANG G,LI B,TAN X, et al. Erratum: adaptive power control algorithm in cognitive radio based on game theory [J]. IET Communications,2015,9(15):1807-1811.
- [6] GOODMAN D,MANDAYAM N. Power control for wireless data[C]//Proceedings of 1999 IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications(MoMuC'99). San Diego,California,USA:IEEE,1999:55-63.
- [7] SARAYDAR C U,MANDAYAM N B,GOODMAN D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks[J]. IEEE Transactions on Communications,2001, 50(2):291-303.
- [8] 孙彬,杨震,田峰. 基于代价函数的认知无线电功率控制博弈算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2010,30(5):62-67.
SUN Bin, YANG Zhen, TIAN Feng. A pricing function based power control game algorithm for cognitive radio [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Nature Science Edition), 2010, 30(5):62-67. (in Chinese)
- [9] KOSKIE S,GAJIC Z. A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks[J].

IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13 (5) : 1017-1026.

[10] 余翔,张小银,刘磊. 基于归一化效用函数的功率控制算法研究[J]. 电信科学,2014(12) :71-75.
YU Xiang,ZHANG Xiaoyin,LIU Lei. Power control algorithm based on normalized utility function research[J]. Telecommunications Science, 2014 (12) : 71 - 75. (in Chinese)

[11] RASTI M,HASAN M,LONG B L,et al. Distributed up-link power control for multi-cell cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63 (3) :628-642.

[12] LI F,TAN X,WANG L. A new game algorithm for power control in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2011,60(9) :4384-4391.

[13] 邓小芳,夏伟伟,赵峰. 认知无线网络中基于 Sigmoid 函数的功率控制算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2015,23(7) :2460-2463.
DENG Xiaofang,XIA Weiwei,ZHAO Feng. Research on power control algorithm based on Sigmoid function in cognitive radio networks[J]. Computer Measurement & Control,2015,23(7) :2460-2463. (in Chinese)

[14] CHEN H,LI Y,JIANG Y,et al. Distributed power splitting for SWIPT in relay interference channels using game theory[J]. Mathematics,2014,14(1) :410-420.

[15] YUN S,MYUNG J,KOH J,et al. Non-cooperative feedback control game for improving throughput fairness in MIMO broadcast channels [C]//Proceedings of 2015 Vehicular Technology Conference. Boston, MA, USA: IEEE,2015:1-6.

作者简介:



朱江(1977-),男,湖北人,2009 年于电子科技大学获博士学位,现为副教授,主要研究方向为认知无线电;

ZHU Jiang was born in Hubei Province, in 1977. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. He is now an associate professor. His research concerns cognitive radio.

巴少为(1991-),女,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电;

BA Shaowei was born in Tianmen, Hubei Province, in 1991. She is now a graduate student. Her research concerns cognitive radio.

Email:Kammybaba@163.com

杜清敏(1990-),女,河北人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电。

DU Qingmin was born in Hebei Province, in 1990. She is now a graduate student. Her research concerns cognitive radio.