

一种改进的认知无线电功率控制博弈算法

赵之旭,田 峰

(南京邮电大学 教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室,江苏 南京 210003)

摘要: 认知无线网络中,认知用户在满足目标信干比前提下,为降低每个认知用户的发送功率,可采用非合作博弈的方法。通过对功率控制的 K-G 算法进行改进,提出了一种基于综合代价函数的功率控制博弈(KG-CP)算法,实现了认知用户发送功率的非合作博弈控制,并证明了 KG-CP 算法效用函数纳什均衡解的存在性和唯一性。仿真结果表明,与经典的 SINR 平衡算法及 K-G 算法相比,该算法能够明显降低认知用户的发送功率。最后,比较并分析了不同用户数目及不同调整因子下新算法的性能表现。

关键词: 认知无线电;功率控制;综合代价函数;KG-CP 算法

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)02-0101-04

doi:10.3969/j.issn.1673-2013.02.025

An Improved Power Control Game Algorithm in Cognitive Radios

ZHAO Zhi-xu, TIAN Feng

(Key Lab. of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Techn. of the Ministry of Edu.,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In cognitive radio networks, under the premise of cognitive users satisfying the target SINR, in order to reduce each user's transmit power, non-cooperative game can be used. In this paper, by improving the K-G algorithm of power control, an power control game algorithm based on the comprehensive cost function is proposed, and the new algorithm realizes non-cooperative game control of cognitive users' transmit power. Then the existence and uniqueness of the Nash equilibrium solution of the utility function are proved for the proposed KG-CP algorithm. The simulation results have shown that, compared with the classical SINR balancing algorithm and the K-G algorithm, the proposed algorithm can significantly reduce cognitive users' transmit power. And then compare and analyze the performance of the new algorithm under different numbers of users and different adjustment factors.

Key words: cognitive radio; power control; comprehensive utility function; KG-CP algorithm

0 引言

在如今信息高度发达的社会中,随着无线服务的广泛应用,无线频谱资源日益紧缺。美国联邦通讯委员会在一篇报告^[1]中指出,由于频谱分配方式的固定性,导致了有些频段在大部分时间内没被占用而处于空闲状态,有些仅偶尔被占用。因此,为解决频谱资源不足,提高频谱利用率,认知无线电技术逐渐发展起来。

功率控制是认知无线电^[2,3]的关键技术之一,对于认知无线电系统而言,各认知用户在满足目标信干比情况下,发送功率越小越好,而发送功率与信干比紧

密相关。增大发送功率可获得较好的信干比,同时对其它认知用户造成干扰;而发送功率的减小有可能使用户信干比低于目标信干比,因此需要找到最优的发送功率。

为解决发送功率与信干比之间的相互制约性,学者们将经济学中的博弈论方法应用到认知无线电系统中,比如 David Goodman 提出的非合作博弈功率控制模型^[4,5], Sarah Koskie 和 Zoran Gajic 提出的信干比收敛值随干扰的变换而自适应调整的博弈功率控制模型^[6,7]。

文中在文献[6]基础上,对 K-G 算法的效用函数进行了改进,提出了一种基于信干比和发送功率的综合代价函数功率控制博弈算法,简称为 KG-CP(Koskie and Gajic algorithm via comprehensive pricing function)算法,证明了新的效用函数纳什均衡解的存在性和唯一性,并对 KG-CP 算法进行了仿真,对仿真结果进行了分析。

收稿日期:2012-05-23;修回日期:2012-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001077);江苏省青蓝工程资助项目

作者简介:赵之旭(1987-),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为无线通信与信号处理技术;田 峰,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为无线通信与信号处理技术。

1 系统模型

文中采用如图 1 所示的认知无线电模型^[8],假设该小区网络中共有 3 个认知用户和一个基站。

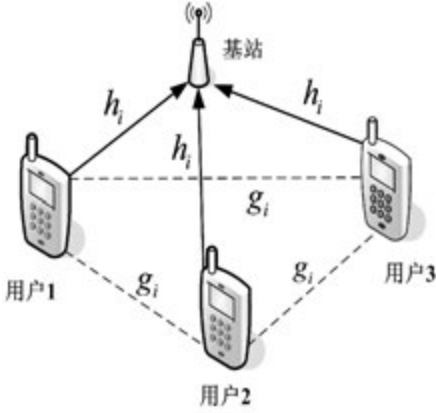


图 1 系统模型

如图 1 所示,第 i 个用户的发送功率和信干比分别为 p_i 及 γ_i ,使用的信道增益模型为 $h_i = A/d_i^m$, g_i 为认知用户之间的相互干扰。设认知用户之间的扩频码相关系数为 c_{ij} ,认知用户到达基站的功率为 $h_i p_i$,则用户 i 所受到的干扰可表示为 $c_{ij} \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j$,设 σ^2 为基站的背景噪声功率,则认知用户 i 的上行链路信干比表达式为:

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

2 基于综合代价的博弈算法

2.1 新的效用函数

令 $G = [A, \{P_i\}, \{u_i(\cdot)\}]$ 表示认知无线电中的非合作功率控制博弈策略,其中 $A = \{1, 2, \dots, N\}$ 为用户数集合, $p_i = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}^T$ 为用户的发送功率, $u_i(\cdot)$ 为用户的效用函数。Sarah Koskie 和 Zoran Gajic 提出的 K-G 算法^[6]的效用函数表达式为:

$$u_i(p_i, \gamma_i(p_i)) = \alpha_i (\gamma_i^{tar} - \gamma_i)^2 + \beta_i p_i \quad \forall p_i, \forall i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

γ_i^{tar} 表示用户 i 的信干比门限值, α_i 和 β_i 均为非负的影响因子。可见, K-G 算法的代价函数是常数影响因子乘以功率值,使得距离基站较远的用户为达到目标信干比而不断提高自身的发送功率,增加了对其它用户的干扰,使系统的能源消耗增大。

文中通过对 K-G 算法效用函数的改进,提出了一种基于综合代价函数的效用函数,新的效用函数表达式为:

$$u_i = \alpha_i (\gamma_i^{tar} - \gamma_i)^2 + \beta_i p_i - t_i \ln(1 + \gamma_i) \quad (3)$$

其中, t_i 为认知用户 i 的信干比调整因子。新的效用函数中增加了信干比调整项,使信干比较大的用

户受到的惩罚多一些,信干比较小的用户受到的惩罚少一些,对系统中远近不同的用户采用不同的代价机制,这样就避免距离基站较远的用户为达到目标信干比而不断增大自身的发送功率,从而降低了系统的能源消耗。

2.2 纳什均衡解

设认知用户发送功率的纳什均衡解为 p_i^* ,由纳什均衡理论可知各认知用户若改变其自身的发送功率都将不能获得较好的效用,即:

$$u_i(p_i^*, \gamma_i(p_i^*)) \geq u_i(p_i, \gamma_i(p_i, p_{-i})) \quad \forall p_i, \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, p_{-i} 表示除用户 i 之外所有其他用户的发射功率。为求式 (4) 中的 p_i^* ,根据式 (3) 求 $u_i(p_i^*, \gamma_i(p_i^*))$ 的梯度^[9,10],得

$$\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = -2\alpha_i \times (\gamma_i^{tar} - \gamma_i) \times \frac{\partial \gamma_i}{\partial p_i} + \beta_i - \frac{t_i}{1 + \gamma_i} \times \frac{\partial \gamma_i}{\partial p_i} \quad (5)$$

令梯度为零,将式 (1) 带入式 (5)

$$\begin{aligned} \text{设 } I_{i(p_{-i})} &= c_{ij} \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2, \text{ 则可得} \\ -2\alpha_i (\gamma_i^{tar} - \gamma_i) \times \frac{h_i}{I_{i(p_{-i})}} + \beta_i - \frac{t_i}{1 + \gamma_i} \times \frac{h_i}{I_{i(p_{-i})}} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

则有

$$\gamma_i = \frac{1}{4\alpha_i I_{i(p_{-i})}} \times [(2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - \beta_i) \times I_{i(p_{-i})} + \sqrt{\Delta}] \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta &= 8\alpha_i h_i t_i I_{i(p_{-i})} + (I_{i(p_{-i})})^2 \times [4\alpha_i^2 + 8\alpha_i^2 \gamma_i^{tar} \\ &\quad + 4\alpha_i^2 (\gamma_i^{tar})^2 - 4\alpha_i \beta_i \gamma_i^{tar} + \beta_i^2 - 4\alpha_i \beta_i] \end{aligned} \quad (8)$$

再将式 (7) 带入式 (1) 可得

$$p_i = \frac{1}{4\alpha_i h_i} \times [(2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - \beta_i) \times I_{i(p_{-i})} + \sqrt{\Delta}] \quad (9)$$

采用牛顿迭代算法,可得到以下迭代公式

$$p_i(n+1) = \frac{1}{4\alpha_i} \times [(2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - \beta_i) \times \frac{p_i^n}{\gamma_i^n} + \sqrt{\Delta}] \quad (10)$$

文中采用类似于文献[11]的多用户功率迭代过程,结合功率迭代式 (10),可以得到文中所提的 KG-CP 算法,描述如下:

(1) 设定初始的发射功率 $p_i(0)$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, 同时设定精度 $\varepsilon > 0$ 。

(2) 令 $n = n + 1$,更新此时用户 i 的信干比,即

$$\gamma_i(n+1) = \frac{G h_i p_i(n+1)}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j(n) + \sigma^2}, i = 1, 2, \dots, N$$

(3)对所有的认知用户 i 如果有 $|p_i(n+1) - p_i(n)| > \varepsilon$, 则返回(2)继续迭代, 否则, $p_i(n+1)$ 即为最终功率解。

2.3 纳什均衡解的存在性

应用隐函数理论来证明 KG-CP 算法的纳什均衡解的存在性,可定义函数

$$J_i(p_i, p_{-i}, a_i, b_i, h_i, h_j, \sigma^2) = \frac{(2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - b_i) \times I_{i(p_{-i})} + \sqrt{\Delta}}{4\alpha_i h_i} - p_i =$$
$$\frac{(2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - b_i) \times (\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2) + \sqrt{\Delta}}{4\alpha_i h_i} - p_i = 0$$
(11)

根据隐函数理论当上式的雅可比矩阵非奇异时式(3)有可行解。式(11)的雅可比行列式表示为

$$\frac{\partial J_i(p_i, p_{-i}, a_i, b_i, h_i, h_j, \sigma^2)}{\partial p_i} =$$
$$\begin{vmatrix} \frac{\partial J_1}{\partial p_1} & \frac{\partial J_1}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial J_1}{\partial p_N} \\ \frac{\partial J_2}{\partial p_1} & \frac{\partial J_2}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial J_2}{\partial p_N} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ \frac{\partial J_N}{\partial p_1} & \frac{\partial J_N}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial J_N}{\partial p_N} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & A_{12} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & -1 & \cdots & A_{2N} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ A_{N1} & \cdots & \cdots & -1 \end{vmatrix}$$
(12)

其中 $A_{mn} = \frac{1}{4\alpha_m h_m} [(2\alpha_m \gamma_m^{tar} - 2\alpha_m - \beta_m) h_{mn} + \sqrt{8\alpha_m h_m h_{mn} t_m + 2h_{mn} \Gamma I_m}]$

$m = 1, 2, \cdots, N, n = 1, 2, \cdots, N$

$I_m = \sum_{j=1, j \neq m}^N h_j p_j$

$\Gamma = 4\alpha_m^2 + 8\alpha_m^2 \gamma_m^{tar} + 4\alpha_m^2 (\gamma_m^{tar})^2 - 4\alpha_m \beta_m \gamma_m^{tar} + \beta_m^2 - 4\alpha_m \beta_m$

式(12)中,此行列式的主对角线元素都是-1,其它元素为 h_i, γ_i^{tar} 和 p_j 等多个变量,则当变量的取值恰当时此雅可比行列式的值就不为零,则文中提出的 KG-CP 算法存在唯一的纳什均衡解。

2.4 唯一性

Yates 指出,当算法 $p_i^{n+1} = f(p_i^n)$ 同时满足 3 个条件^[12]: (1)正性, $f(p_i) > 0$; (2)单调性,若 $p' > p$, 有 $f(p') - f(p) > 0$; (3)可扩展性,若 $\forall \alpha > 1$, 有 $\alpha f(p) > f(\alpha p)$, 则算法收敛于唯一一点。

(1) $f(p_i) = \frac{1}{4\alpha_i h_i} \times [(2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - \beta_i) \times I_{i(p_{-i})} + \sqrt{\Delta}]$

其中, Δ 相对于功率 p_i 来说非常小,为计算简便,可忽略不计。则当 $\beta_i < 2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i$ 时,满足 $f(p_i) >$

0。

(2) $f(p') - f(p) = \frac{1}{4\alpha_i h_i} \times (2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - \beta_i) (I'_{i(p_{-i})} - I_i)$

$\beta_i < 2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i$ 时, $f(p') - f(p) > 0$ 。

(3) $\alpha f(p) - f(\alpha p) = \frac{(2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i - \beta_i) (\alpha - 1)}{4\alpha_i h_i}$

由于 $\alpha > 1$, 则当 $\beta_i < 2\alpha_i \gamma_i^{tar} - 2\alpha_i$ 时, $\alpha f(p) > f(\alpha p)$, 所以文中所提出的 KG-CP 算法可收敛于唯一一点。

3 KG-CP 算法仿真及性能分析

文中运用 MATLAB 软件对 SINR、K-G 及 KG-CP 算法下认知用户的发送功率进行仿真,然后在不同调整因子下,对 KG-CP 算法的性能做了仿真讨论。系统模型为单蜂窝 CDMA 小区,假设信道为静态的,即链路增益为确定函数。其中,仿真参数如下:

W 为扩频带宽 (Hz)	10^6
R 为传输比特率 (bps)	10^4
G 为处理增益 (W/R)	100
σ^2 为背景噪声功率 (W)	5×10^{-12}
$p_i(0)$ 为初始发送功率 (W)	1×10^{-19}
c_{ij} 为扩频码	1/256
h_i 为用户链路增益	$0.097/d_i^m$

设定小区内有 6 个认知用户,与基站距离 $d = [450, 580, 690, 819, 920, 1080] \text{ m}$ 。

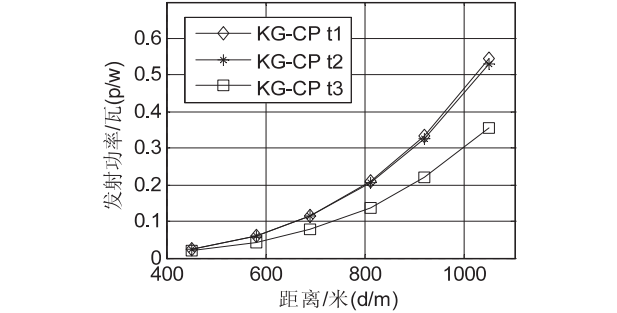


图2 各算法的发送功率比较

从图2可以看出,相对于 SINR 平衡算法及 K-G 算法,文中所提出的 KG-CP 算法能够降低各认知用户的发送功率,当用户距离基站较远时,效果更加明显。这是由于 KG-CP 算法的效用函数引入了综合代价机制,规定了用户需要为发送功率所付出的代价,使用户的发送功率下降;相对于 K-G 算法, KG-CP 算法在效用函数中增加了非线性的信干比调整项,能够根据远近用户不同的信干比质量来决定代价,使系统中信干比不同的用户受到的惩罚不同,因而能够明显降低距离基站较远用户的发送功率,减小了系统的能源消耗。

为比较三种算法在不同用户数目下的性能,在距

离基站 400 米到 1100 米的范围内,分别随机选取 15、20、25、30 及 35 个用户,并仿真了用户的平均发送功率及接收端信干比。

由图 3 可以看出,当用户的数目增多时,三种算法下用户的发送功率均增大,而 KG-CP 算法增长幅度较为平稳,综合图 3、图 4 可以看出,在牺牲一定信干比的情况下,KG-CP 算法仍能保证其发送功率较小,能够满足多用户通信的需要。

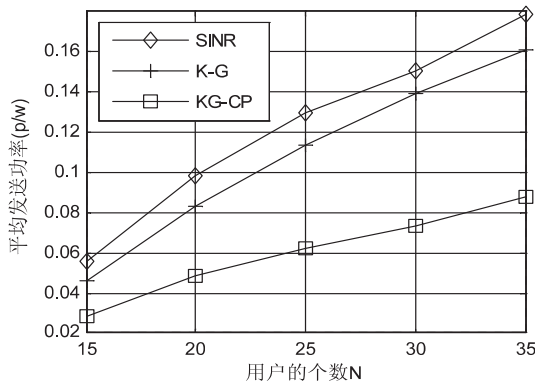


图 3 不同用户数目下各算法的发送功率

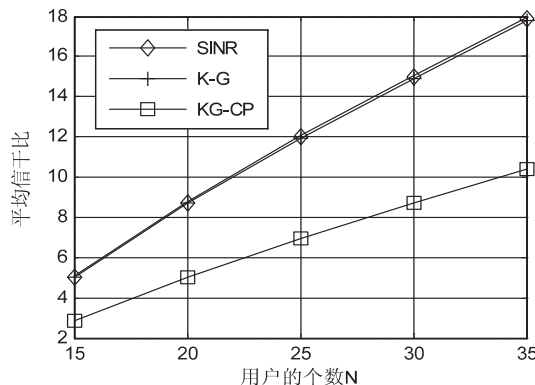


图 4 不同用户数目下各算法的信干比

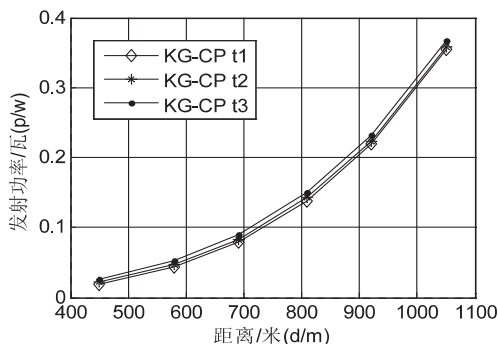


图 5 取不同 t_i 时发射功率比较

另外,对调整因子取不同值时 KG-CP 算法的性能作了仿真讨论。当其他条件不变时,综合代价函数中的调整因子 t_i 分别取 0.05、0.1 和 0.2 时,得到的仿真图如图 5 所示。

由图 5 可知,调整因子取 0.05 时用户的发送功率最小,由于调整因子是综合代价函数中与信干比相乘,当它减小时,用户需要付出的代价反而增加,则当调整

因子取 0.05 时用户的发送功率最小。

4 结束语

文中讨论了认知无线电系统中的博弈功率控制模型,基于 Sarah Koskie 和 Zoran Gajic 提出的 K-G 算法,提出了一种改进的 KG-CP 算法,并证明了 KG-CP 的效用函数存在纳什均衡解且均衡点唯一。最后,仿真结果表明,文中提出的新的博弈算法与经典的 SINR 平衡算法及 K-G 算法相比,明显降低认知用户的发送功率。以后的研究方向是找到更好的效用函数,使当认知用户数目增多时,各用户的信干比都能满足目标信干比。

参考文献:

- [1] FCC Spectrum Policy Task Force Report of the Spectrum Efficiency Working Group [R/OL]. [2009-09-11]. <http://www.fcc.gov/sptf/report.htm>.
- [2] Mitola J. Cognitive radio—An integrated agent architecture for software defined radio [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [3] Haykin S. Cognitive radio Brain—empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201–220.
- [4] Goodman D, Mandayam N. Power Control for Wireless Data [C]//MoMuC'99. [s. l.]: [s. n.], 2000.
- [5] 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.
- [6] Gajic Z, Koskie S. Newton iteration acceleration of the Nash game algorithm for power control in 3G wireless CDMA networks [C]//Proceedings of Conference on Performance and Control of Next Generation of Communication Networks. [s. l.]: [s. n.], 2003.
- [7] Koskie S, Gajic Z. A Nash Game Algorithm for SIR—based Power Control in 3G Wireless CDMA Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002(3): 1–10.
- [8] Zhou Pan, Yuan Wei, Liu Wei, et al. Joint Power and Rate Control in Cognitive Radio Networks: A Game—theoretical Approach [C]// Proc of ICC 2008. [s. l.]: [s. n.], 2008: 3296–3301.
- [9] 王霞, 朱琦. 一种改进的认知无线电博弈功率控制算法 [J]. 信号处理, 2009, 25(5): 825–830.
- [10] 殷志明, 谢剑英. 无线数据网络中基于博弈论方法的功率控制 [J]. 计算机研究与发展, 2004(6): 909–914.
- [11] 钟卫, 徐友云, 蔡跃明. 非合作功率控制博弈优化设计 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(2): 108–113.
- [12] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995(7): 1341–1347.

一种改进的认知无线电功率控制博弈算法

作者: [赵之旭](#), [田峰](#)
作者单位: [南京邮电大学 教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室, 江苏 南京 210003](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013 (2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201302027.aspx