

认知无线电非合作功率控制算法及 QoS 保证机制研究^①

赵军辉^{②*} 刘玉震^{*} 王东明^{**}

(* 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室 北京 100044)

(** 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要 为了实现认知无线网络中的功率控制,以多载波码分多址(MC-CDMA)网络为认知无线电平台,根据香农信息论,基于非合作博弈模型,设计了一种新的效用函数,并对该效用函数的纳什均衡做了证明。在此基础上,提出了一种基于信干噪比(SINR)的非合作博弈功率控制算法。新的效用函数参考信道容量与 SINR 之间的关系使得纳什均衡结果尽可能接近帕累托最优。仿真结果表明该算法与 SINR 平衡算法、Koskie-Gajic 算法相比,在保证认知用户服务质量(QoS)基础上,提高了网络性能。

关键词 认知无线电, 功率控制, 非合作博弈, 信干噪比(SINR), 服务质量(QoS)

0 引言

随着无线通信技术的飞速发展,频谱资源越来越紧张。一方面,非授权频段(unlicensed frequency band, UFB)的使用趋于饱和状态;另一方面,授权频段(licensed frequency band, LFB)的频谱利用率却很低。从美国联邦通信委员会(federal communications commission, FCC)^[1]公布的数据看,授权频段的频谱利用率为 15%~85%,于是能够发现空闲频谱资源并加以合理利用的认知无线电技术应运而生^[2]。

为了提高认知用户对认知无线网络的服务质量(QoS)的满意度,为了调节认知用户的发射功率和最大化认知无线网络的通信性价比,为了提高网络吞吐量,需要实现对认知无线网络的功率控制。近年来,众多学者对功率控制领域做了很多研究。由于信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)是最基本的 QoS 要求,文献[3]提出了 SINR 平衡算法。基于文献[3]的 SINR 平衡算法,文献[4,5]提出了基于价格函数的功率控制算法,通过基于价格的效用函数,实现非合作博弈,达到纳什均衡。非合作网络博弈论算法复杂度低,对全局信息需求少,因此可以较好地应用于非合作认知网络。文献[6-8]则在非合作博弈的基础上,分别提出了基

于智能学习、信道干扰不确定下和自适应的功率分配算法,但算法复杂。

本文以多载波码分多址(multi-carrier code division multiple access, MC-CDMA)网络为认知无线电平台,依据香农信息论中信道容量与 SINR 的关系,设计了新的效用函数,提出了一种基于 SINR 的非合作博弈功率控制算法。该算法能够从信道容量角度提高对认知用户的 QoS,较好地优化了非合作网络中的功率控制问题,且算法简单易于实现。同时证明了该效用函数的纳什均衡存在性、唯一性及收敛性,并通过仿真与 SINR 平衡算法^[3]、Koskie-Gajic 算法^[5]进行了比较,验证了本文算法的有效性。

1 非合作博弈功率控制算法设计

1.1 系统模型

多载波码分多址(MC-CDMA)结合了码分多址(code division multiple access, CDMA)和正交频分多路复用技术(orthogonal frequency division multiple-xing, OFDM)的优点,既增加了系统容量,又提高了抗干扰能力。因此采用 MC-CDMA 制式的认知网络进行研究。假设网络中某小区有一个基站,该基站有 N 个认知用户,并已完成了频谱资源的检测和分配。设认知用户的扩频带宽为 W , 传输速率为 R_i ,

① 国家自然科学基金(61172073),北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室(RCS2011ZT003),中央高校基本科研业务费和东南大学移动通信国家重点实验室开放课题资助项目。

② 男,1973 年生,博士,副教授;研究方向:移动与无线通信;联系人, E-mail: junhuizhao@bjtu.edu.cn
(收稿日期:2011-10-10)

发射功率 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 σ^2 , 则第 i 个认知用户在基站处的信干噪比(SINR)定义为^[9]

$$\gamma_i = \frac{W}{R_i} \cdot \frac{p_i h_i}{\sum_{j \neq i} p_j h_j + \sigma^2} = G_i \frac{p_i h_i}{I_i} \quad (1)$$

其中 $I_i = \sum_{j \neq i} p_j h_j + \sigma^2$, $G_i = \frac{W}{R_i}$ 。

非合作博弈功率控制模型表示为 $NPCG = (I, \{P_i\}, \{u_i\})$ 。其中, $I = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示认知用户集合, P_i 表示认知用户 i 发射功率, u_i 表示用户 i 的效用值。认知用户选择功率控制策略的原则是最大化自己的效用函数值, 让博弈稳定于纳什均衡^[9,10]。

1.2 新的效用函数及均衡求解

在无线网络中, 认知用户的效用和信道容量有关, 根据香农信息论, 信道容量 $C = W \log(S/N + 1)$ 。因此, 用户的效用随着信干噪比的增加而增加, 同时增加的速率逐渐降低, 所消耗的功率代价却逐渐增加, 而且提高了小区的噪声水平。根据分析, 定义一种基于香农公式的新效用函数, 对认知用户 i 有

$$u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) = \log(a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})) - b_i \gamma_i - N c_i p_i \quad (2)$$

γ_i 为认知用户 i 在基站处的信干噪比, γ_i^{tar} 为认知用户的目标信干噪比, a_i, b_i, c_i 为各项的比例调节参数。

新的效用函数由两部分组成, 第一部分是依据香农公式以超过目标信干噪比的差值为自变量的对数函数, 表征认知用户对信干噪比的满意度。满意度与信干噪比之间的关系遵循香农公式。这符合认知用户对信干噪比满意度的特点。第二部分为代价函数, 含有两项, 第一项为信干噪比的代价, 控制认知用户, 不会过度追求过高的信干噪比; 第二项为功率代价, 控制认知用户的发射功率, 不会因为过度追求信干噪比而导致发射功率过大。第一项和第二项并不重复, 因为在实际环境中, 由于环境因素, 功率和信干噪比的关系变化很大。 a_i, b_i, c_i 为调节参数, 调节各项的值在相近范围内, 便于做差比较。效用函数性能的好坏, 直接影响到纳什均衡的结果。一个好的效用函数, 应当保证基本 QoS, 同时控制纳什均衡结果尽可能的接近帕累托最优。

实际无线环境中, 当发射功率很小时, 增加发射功率, 信干噪比增加很快; 但是当功率增大的一定程度时, 增加发射功率, 信干噪比的增加相对变慢。因此, 需要在信干噪比和发射功率之间, 找到一个平衡点。

整个效用函数的目标是: 通过信干噪比和发射功率之间的博弈, 让各认知用户达到信干噪比和发射功率之间的平衡, 找到一个 (γ_i, p_i) 的最佳点, 同时减少发射功率, 降低对相邻认知用户的干扰。

由于随着认知用户的增加, 小区中噪声电平相应增加, 因此每个认知用户的发射功率增加, 会对其他认知用户的干扰显著增加。所以, 通过增加参数 N , 在小区不同用户数量不同时, 对发射功率限制不同。

如下为纳什均衡的求解。

定义 1: 如果对于 $\forall i \in I$ 有

$$u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) \geq u_i(p_i', \mathbf{p}_{-i}), \quad \forall p_i' \in P_i \quad (3)$$

则称 $(p_i, \mathbf{p}_{-i})$ 是纳什均衡点。

当一个博弈达到纳什均衡时, 给定其他认知用户策略不变, 如果某认知用户独自改变自己的策略, 那么该认知用户的效用函数值将减小。因此在纳什均衡点满足 $\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})$ 。

求解纳什均衡点, 对 $u_i(p_i)$ 求 p_i 的一阶微分

$$\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = \frac{1}{a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})} \cdot \frac{h_i}{I_i} - b_i \frac{h_i}{I_i} - N c_i \quad (4)$$

对于可微函数 $u_i(p_i)$, 一阶微分, 当式(4)等于 0 时, $u_i(p_i)$ 取最大值, 可得

$$\gamma_i = \frac{1}{a_i(b_i + N c_i \frac{I_i}{h_i})} + \gamma_i^{\text{tar}} \quad (5)$$

可见纳什均衡点处, 每个认知用户都有 $\gamma_i > \gamma_i^{\text{tar}}$, 基本 QoS 得到保障。

为了求得功率表达式, 将式(1)代入式(5)得

$$p_i = \frac{1}{a_i} \frac{1}{(b_i \frac{h_i}{I_i} + N c_i)} + \gamma_i^{\text{tar}} \frac{I_i}{h_i} \quad (6)$$

采用迭代公式, 并考虑发射功率策略空间的有界性, 得到新算法的功率表达式为

$$p_i^{(k+1)} = \begin{cases} \frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}} \cdot \gamma_i^{\text{tar}} + \frac{1}{a_i} \frac{1}{(b_i \frac{\gamma_i}{p_i} + N c_i)}, & p_i^{(k+1)} < p_i^{\max} \\ p_i^{\max}, & p_i^{(k+1)} \geq p_i^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

下面给出新的非合作功率控制算法的纳什均衡解存在性的证明。

定理 1: 新的非合作博弈算法存在纳什均衡解。

文献[9]指出, 如果满足以下条件, 则非合作博弈存在纳什均衡解:

(1) p_i 是欧式空间 R^N 中非空的、闭的、有界的

凸集;

(2) $u_i(p_i) = u_i(p_i, p_{-i})$ 在 p 上连续, 在 p_i 上拟凹。

证明: 每一个认知用户的策略空间定义在 $[0, p_i^{\max}]$, 这是一个实数的、有界的闭区间, 条件(1)满足。显然 $u_i(p_i)$ 在 p_i 上是连续的, 下面证明在 p_i 上是拟凹的。

效用函数 $u_i(p_i)$ 对 p_i 的二阶微分为

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial p_i^2} = -\frac{1}{a_i(\gamma_i - \gamma_i^{\text{tar}})^2} \cdot \left(\frac{h_i}{I_i}\right)^2 < 0 \quad (8)$$

可知, $u_i(p_i)$ 在 p_i 上是凹函数, 满足条件(2)。因此新的非合作博弈算法存在纳什均衡解。

定理 2: 新的非合作博弈算法的纳什均衡解唯一。

根据定义, 纳什均衡点出满足 $p = R(p)$ 。证明纳什均衡点唯一, 只需证明对应反应 $p = R(p)$ 是一个标准函数^[9]。一个函数如果满足下列三个性质, 那么它就是标准函数:

(1) 正性: $R(p) > 0$;

(2) 单调性: 如果 $p \geq p'$, 则 $R(p') \geq R(p)$;

(3) 可量测性: 如果 $\forall \beta > 1$, 则 $\beta R(p) \geq R(\beta p)$ 。

证明: 利用式(6)证明:

(1) 由于式(6)中 p_i 始终大于 0, 因此性质 1 满足;

(2) 设 $p' \geq p$, 表示对 $\forall i$ 有 $p' \geq p$, 于是有 $I' - I > 0$, 则由于 $\frac{\partial p}{\partial I} > 0$, 所以 $R(p') - R(p) > 0$ 满足单调性。

(3) 设 $\forall \beta > 1$, 则

$$\begin{aligned} \beta R(p) - R(\beta p) &= \\ \frac{1}{a_i} \left(\beta \frac{1}{(b_i \frac{\gamma_i}{p_i} + Nc_i)} - \frac{1}{(b_i \beta \frac{\gamma_i}{p_i} + Nc_i)} \right) &> 0 \end{aligned} \quad (9)$$

因此, 新的非合作功率控制博弈算法的纳什均衡解唯一, 新算法收敛于一点。

2 仿真结果及性能分析

考虑在前面介绍的一个采用 MC-CDMA 制式的中心辐射式认知无线网络。各个认知用户随机分布在距离中心基站 1000m 的范围内, 初始发射功率为 $5 \times 10^{-15} \text{ W}$ 。当前后两次迭代的功率差小于 10^{-5} W

时, 迭代结束。主要仿真参数: 扩频带宽 5MHz, 发射速率 10kb/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 $\gamma_i^{\text{tar}} = 9$ 。

通过将新的非合作功率控制算法与经典的 SINR 算法以及 Koskie-Gajic 算法进行比较, 分析新算法的性能和优缺点。

SINR 平衡算法的表达式为

$$p_i^{(k+1)} = \frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}} \cdot \gamma_i^{\text{tar}} \quad (10)$$

Koskie-Gajic 算法为

$$p_i^{(k+1)} = \begin{cases} \frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}} \cdot \gamma_i^{\text{tar}} - \lambda_i \left(\frac{p_i^{(k)}}{\gamma_i^{(k)}} \right)^2, & p_i^{(k+1)} > 0 \\ 0, & p_i^{(k+1)} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\lambda_i = 5000$ 。

为模拟实际的认知用户在小区的分布情况, 认知用户的分布由计算机随机产生。随机分布图如图 1 所示。

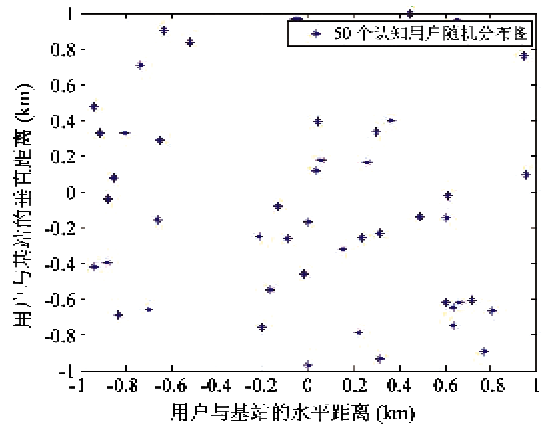


图1 用户随机分布图

2.1 算法的收敛性能比较分析

功率控制算法的收敛性能是衡量算法性能的重要标志。随机产生 50 个认知用户, 假设这些认知用户同时开机或接入网络。图 2、图 3、图 4 分别给出了本文新算法、经典 SINR 平衡算法、Koskie-Gajic 算法的 50 个认知用户的在初始迭代过程中的信干噪比和发射功率的统计。

从图中我们可以看到各算法的收敛性能、SINR 值比较及发射功率比较。

(1) 各算法的收敛性能: 通过分析比较, 各算法进行 5 次迭代之后, 近似达到了算法计算出来的 SINR 期望值 (不是 γ_i^{tar}), 各算法的 SINR 收敛情况

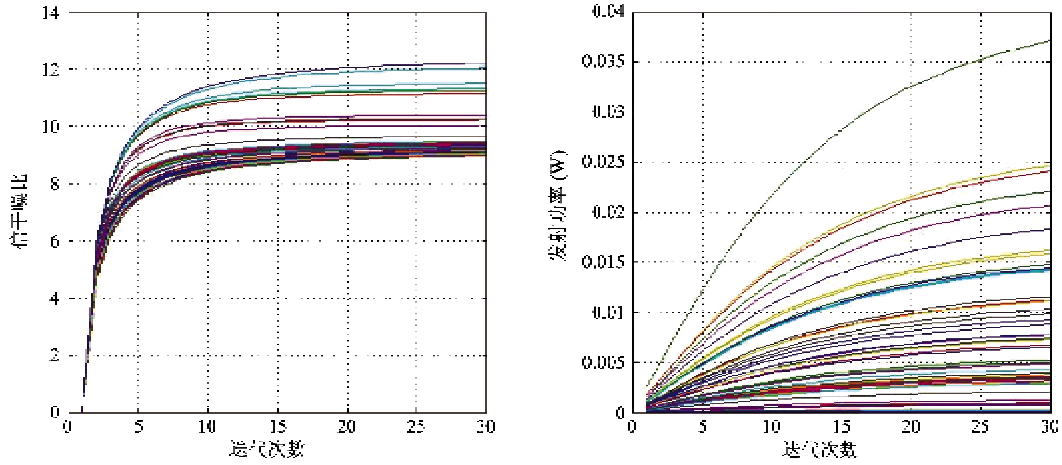


图2 本文算法迭代图

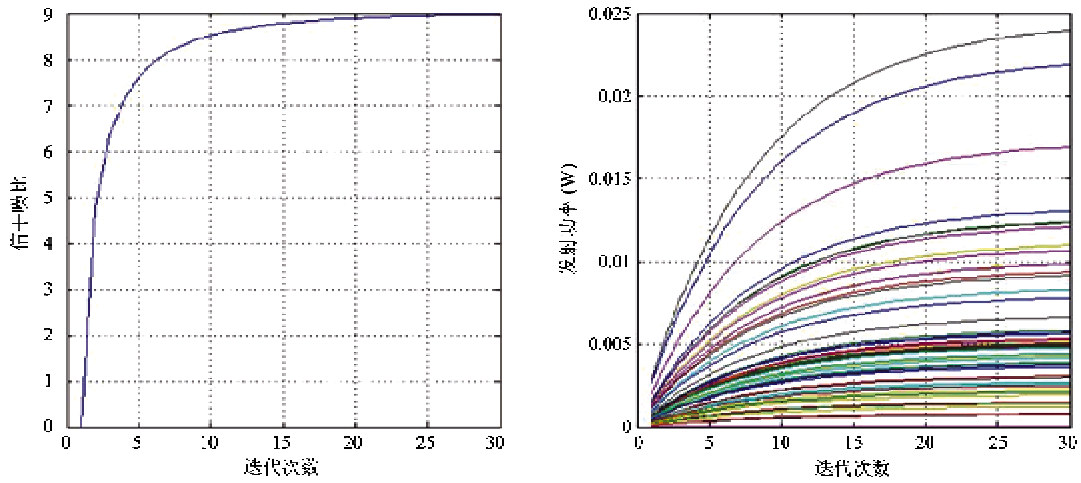


图3 SINR 平衡算法迭代图

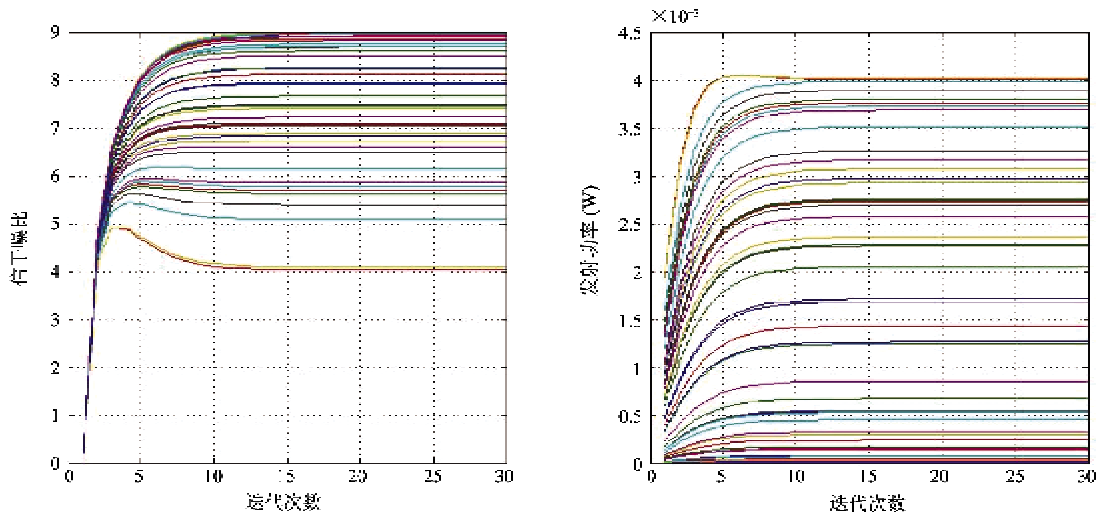


图4 Koskie-Gajic 算法迭代图

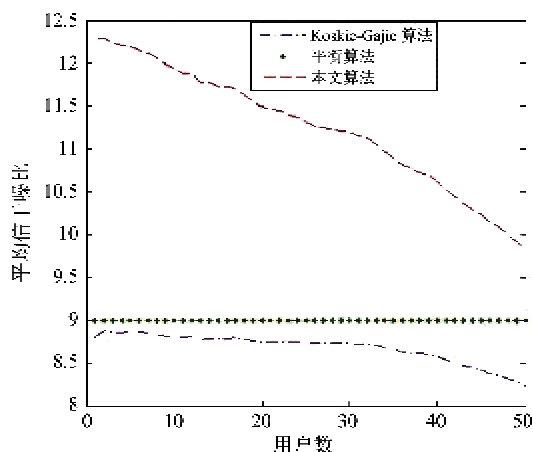
基本相同。

(2)实际 SINR 值比较:通过分析我们可以看到,经典的 SINR 平衡算法的实际 SINR 值收敛于

γ_i^{tar} ; Koskie-Gajic 算法由于通过功率价格系数,限制 SINR 的上限,所以实际 SINR 目标值都小于 γ_i^{tar} 。本文算法在保证实际 SINR 值大于 γ_i^{tar} 的基础上,适当

的增加发射功率,提高了 SINR 值。

(3)发射功率比较:由于用户距离基站的距离不同,各算法的共同点是认知用户的发射功率由于距离基站的不同产生很大差异。同时由于各算法对发射功率和 SINR 之间的不同协调方案,导致功率收敛图有所区别。



2.2 发射功率、SINR 与用户数关系

由于小区存在容量上限,随着用户数量和总的发射功率的增加,导致小区噪声水平的增加,增加了认知用户之间的相互干扰。图 5 为认知用户的平均信干噪比和平均发射功率随着用户数增加的变化情况。

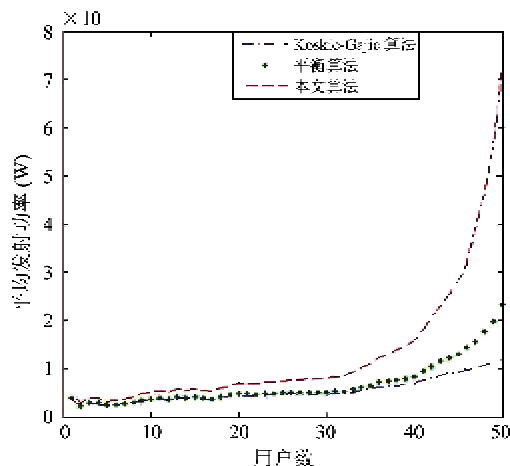


图 5 发射功率和平均信干噪比与用户数之间的关系

通过比较可以看出 SINR 平衡算法始终保持着恒定的 SINR,由于用户数的增加,导致干扰的增加,所以用户的平均发射功率也随之增加。以此为基础,由于 Koskie-Gajic 算法增加了功率代价函数,导致用户数增加时,为了避免发射功率的迅速增加, SINR 值下降。当 SINR 值低于最低 $\gamma_i^{\min}$ 时,已经不能够通信,此时 Koskie-Gajic 算法已无意义。当用户较少时,稍微提高发射功率,本文算法可以达到较高的 SINR 值,随着用户数增加,在 SINR 值和发射功率之间找到平衡,适当增加发射功率,增加用户的

SINR。在用户数达到 50 时,相比于 SINR 平衡算法,本文算法认知用户的发射功率只增加了 1 倍,可以让 SINR 值比 $\gamma_i^{\min}$ 增加 0.5。

2.3 发射功率和平均信干噪比与距离关系

无线环境中,电磁波的信道增益为 $0.0075 \times h^{-3.6}$ 。因此认知用户在基站处的功率随着距离的增加迅速衰减。如图 6,在小区中,随着认知用户到基站距离的增加,经典的 SINR 平衡算法通过调节功率,把 SINR 值始终保持在 $\gamma_i^{\min}$; Koskie-Gajic 算法使用户降低了发射功率,同时也导致 SINR 值的降低,

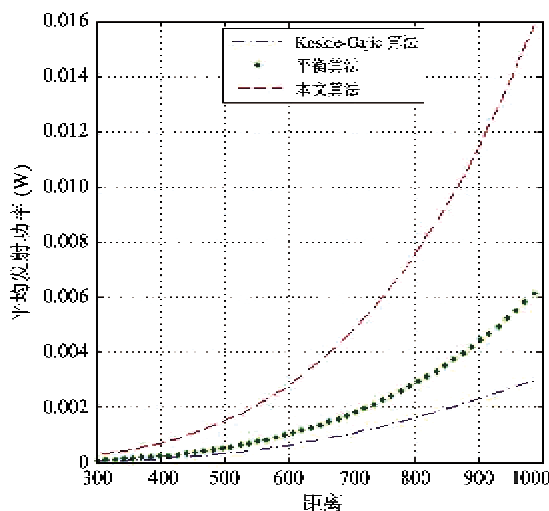
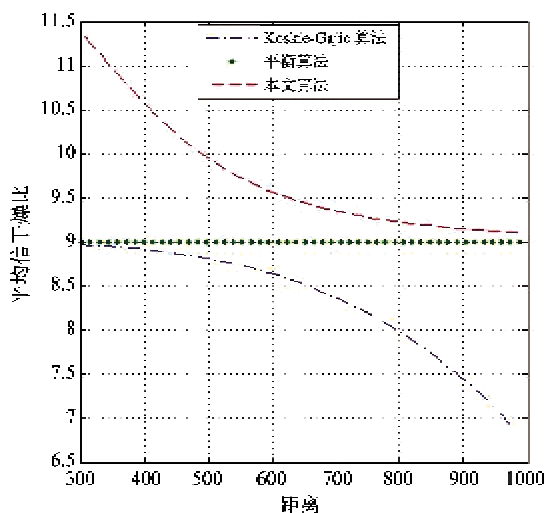


图 6 发射功率、平均信干噪比与用户距基站距离的关系

一旦 SINR 值低于满足基本通信需求的 $\gamma_i^{\min}$, 认知用户已经不能通信。本文算法通过在不同的距离处, 适当的增加功率, 来提高信干噪比。由图可知, 当距离小于 700m 时, 本文算法具有很强的优越性。

2.4 系统吞吐量分析

从系统整体性能分析, 衡量系统性能的一个重要标准是系统的吞吐量。吞吐量采用香农公式表示:

$$T(p_{\text{ave}}) = W \sum_{i=1}^N \lg(1 + \gamma_i(p_{\text{ave}})) \quad (12)$$

其中, T 为系统吞吐量, p_{ave} 为平均发射功率, γ_i 为认知用户 i 的信干噪比。

图 7 和图 8 分别在不同的条件下, 分析比较了三种功率控制算法下的网络吞吐量。图 7 中, 比较了在相同的 SINR 的情况下, 三种算法控制结果的网络吞吐量。通过比较可以看到, 与经典的 SINR 平衡算法相比, 本文算法明显提高了网络吞吐量, 而 Koskie-Gajic 算法由于部分用户 SINR 低于 $\gamma_i^{\min}$, 已不能完成通信, 因此吞吐量很低。

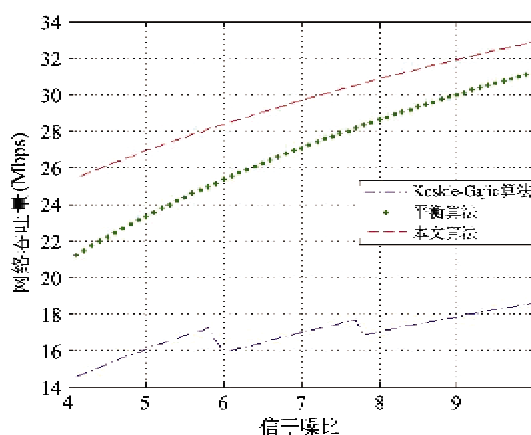


图 7 网络吞吐量和 SINR 之间的关系

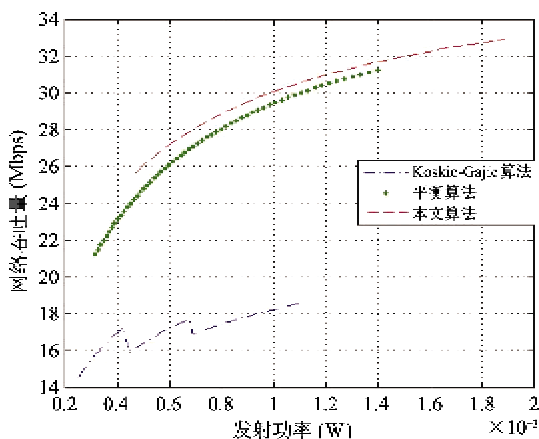


图 8 网络吞吐量和发射功率之间的关系

图 8 中, 当认知用户数 $N = 40$ 时, 比较了在认知用户发射功率相同的情况下, 三种算法控制结果的网络吞吐量。从图中可以看到, 本文算法与经典的 SINR 平衡算法在认知用户的平均发射功率相同时, 网络的吞吐量相差很小。但是当两种算法功率相同的情况下, SINR 平衡算法的有效用户数大于本文算法下的认知用户数, 导致这两者的吞吐量近似。但就单个用户而言, 本文算法下的用户拥有更高的 SINR 值。

3 结论

本文在考虑香农信息论中信道容量与 SINR 的基础上, 提出了一种非合作博弈的功率控制算法。本文中效用函数的设计, 一方面较好地体现认知用户的 QoS 满意度, 另一方面增加了功率和 SINR 代价, 从而调节认知用户的发射功率, 最大化认知网络的通信性价比。仿真表明, 本文算法可实现对认知用户发射功率的有效控制, 同时与 SINR 平衡算法、Koskie-Gajic 算法比较, 不仅保障了认知用户的 QoS 需求, 而且增加了网络吞吐量, 提高了通信容量。

参考文献

- [1] FCC. ET Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order, December, 2003
- [2] Haykin S. Cognitive radio technology: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23: 201-220
- [3] Foschini G J, Miljanic Z. A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence. *IEEE Vehicular Technology Society*, 1993, (4): 641-646
- [4] Li J D, Yang C G. Pricing based power control game for cognitive radio networks. In: *Proceedings of ICT'09 International Conference on Telecommunications*, Marrakech, Morocco, 2009. 270-275
- [5] Koskie S, Gajic Z. A nash game algorithm for SIR based power control in 3G wireless CDMA network. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2005, 13(5): 1017-1026
- [6] Zhou O, Chang Y S, John. Reinforcement Learning for Repeated Power Control Game in Cognitive Radio Networks. *IEEE journal on selected areas in Communications*, 2012, 30: 54-69
- [7] Dall'Anese E, Seung-Jun Kim, Giannakis G B, et al. Power Allocation for Cognitive Radio Networks Under Channel Uncertainty. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011: 1-6

- [8] 李建东,薛富国,杨春刚等. 认知网络中快速自适应功率控制算法. 西安电子科技大学学报,2010,37(2): 186-191
- [9] 冯冀,罗新民. 认知无线电中基于非合作博弈的功率控制算法. 电子技术应用,2008,4:110-114
- [10] 杨春刚,李建东. 认知网络中基于纳什议价解的功率控制算法. 北京邮电大学学报,2009,32(4):77-81

Research on non-cooperative game based power control and QoS guarantee in cognitive radio

Zhao Junhui^{* **}, Liu Yuzhen^{* **}, Wang Dongming^{**}

(^{*} State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

(^{**} National Mobile Communication Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract

In order to realize the power control in cognitive wireless networks, a new utility function based on non-cooperative game was designed on the cognitive radio platform supported by the multi-carrier code division multiple access (MC-CDMA) networks, according to the Shannon information theory, and its Nash equilibrium was proved. Then, a non-cooperative power control algorithm based on the signal to interference plus noise ratio (SINR) was proposed. The relationship between the new utility function's reference channel capacity and the SINR makes the Nash equilibrium point most close to the Pareto optimum. The simulation shows that compared with the SINR balancing algorithm and the Koskie-Gajic algorithm, the proposed algorithm can ensure the basic QoS for cognitive radio users and improve the performance of cognitive wireless networks.

Key words: cognitive radio, power control, non-cooperative game, signal to interference plus noise ratio (SINR), QoS