



基于归一化效用函数的功率控制算法研究

余翔, 张小银, 刘磊

(重庆邮电大学 3G 动员中心通信技术创新团队 重庆 400065)

摘要: 功率控制技术是认知无线电的关键技术之一, 分布式功率控制问题可以转化为非合作博弈问题来解决, 结合认知无线电特点, 提出一个新的 S 型效用函数, 应用归一化的形式表示, 并证明了其纳什均衡解的存在和唯一性。仿真结果表明, 该算法不受系统调制方式的限制, 且具有较快的收敛速度, 在一定程度上兼顾了用户之间的公平性, 使用户能公平地共享信道资源。

关键词: 认知无线电; 功率控制; 非合作博弈; 效用函数

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.12.010

Power Control Algorithm Based on Normalized Utility Function Research

Yu Xiang, Zhang Xiaoyin, Liu Lei

(3G Communication Technology Innovation Team Mobilization Center,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Power control is one of the key technologies of cognitive radio technology. Distributed power control problem can be converted into non-cooperative game to solve the problem. Combining with the characteristics of cognitive radio, a new type S utility function was put forwarded, the normalized form was applied, and the existence and uniqueness of the Nash equilibrium were proved. Simulation results show that the algorithm is not restricted by system modulation mode, and reduces the computational complexity, and has faster convergence speed. The fairness between the users was taken into account, to a certain extent, and the users can share channel resources fairly.

Key words: cognitive radio, power control, non-cooperative game, utility function

1 引言

在频谱需求日益紧缺的状况下, 静态的频谱授权方式导致了频谱空洞的存在, 造成了大量的频谱资源浪费。为了提高频谱利用率, 有效地利用空闲频谱, 提出了认知无线电 (cognitive radio, CR)^[1,2] 技术。认知无线电是一种智能无线通信系统, 它可以使终端检测 (学习) 周边环境的信息并依据传输参数和可能的接入策略来做出决策, 达到提高频谱利用率, 实现随时随地高度可靠通信的目的。这种网

络的性能根本上受限于干扰, 而功率控制是避免干扰的有效手段, 因此高效自适应的功率控制技术成为网络设计中的关键因素。

博弈论^[3]作为一种数学工具, 主要研究竞争环境中多个竞争参与者如何根据所处环境制定相应策略以获得自身最大收益的问题, 被广泛地应用在认知无线电的功率控制问题中, 且分布式功率控制过程可以看作博弈论的非合作过程, 其目的是寻求一个最佳策略组合, 即所谓的纳什均衡来使每个参与者的策略都是其他参与者策略的最优



反应。博弈论通常包含以下几个要素。

- 参与者 (player): 指参与博弈的认知用户的集合 $N=\{1,2,3,\dots,N\}$ 。
- 策略 (strategy) 空间: 指参与者做出决策时执行行动的组, 在这里指认知用户的发射功率组合 $P=\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_N\}$ 。
- 收益 (payoff): 指参与者通过执行决策获得的收益, 这里用净效用函数 ($U_i(P_i, P_{-i}), \forall i \in N$, 其中 P_{-i} 表示除用户以外的其他用户 i 的发射功率的集合) 表示。

通过纳什均衡理论, 存在纳什均衡解使得任何用户都不能通过从单方面改变功率来获得额外收益, 即存在第 i 个认知用户的发射功率和输出信干比满足:

$$\begin{aligned} U_i(p_i^*, r_i(p_i^*)) &\geq \\ U_i(p_i^*, r_i(p_1^*, \dots, p_{i-1}^*, p_{i+1}^*, \dots, p_N^*)) & \\ \forall p_i, \forall i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

其中, p_i^* 为认知用户 i 纳什均衡点的发射功率。

David Goodman 等首先提出了一种非合作功率控制博弈 (non-cooperative power control game, NPG)^[4], 以每单位电池能量传输的有用比特数表示总的效用函数, 并证明了其纳什均衡解的存在且唯一, 效用函数表示为:

$$U = \frac{LRf(r_i)}{MP_i} \quad (2)$$

其中, M 为用户需要传输的比特数, L 为每帧的信息比特数 ($L < M$), R 为比特传输速率, $f(r_i)$ 为有效函数, 若采用 BPSK (binary phase shift keying) 的调制方式, 则:

$$f(r_i) = (1 - \exp(-r_i/2))^M \quad (3)$$

有效函数的定义受到调制方式的限制, 由于 NPG 的均衡解并不是最优的, 参考文献[5]提出基于代价的非合作功率控制博弈 (non-cooperative power control game via pricing, NPGP), 以发射功率为代价使性能得到帕累托改善, 但是代价函数只与发射功率有关, 而没有考虑噪声、干扰、链路增益等因素对接收信号质量的影响, 显然有失公平性。参考文献[6]和参考文献[7]的公平性有所改进, 但因为采用了如式(3)所示的有效函数, 计算过程复杂, 不适合在认知无线电环境中使用。参考文献[8]采用了归一化函数, 但在代价函数中只考虑了发射功率一个因素, 用户的公平性没有得到保障, 以上研究均没有彻底地改善系统的性能, 本文将结合认知无线电系统的特点, 提出适合此系统的效用函数, 使用户间能更公平、有效地共享频谱资源。

2 系统模型

考虑在一个单基站的小区内, 基站负责频谱的检测和资源分配, 有 N 个认知用户通过 underlay 共享方式接入授权用户未使用的空闲频谱, 所有认知用户随机分布在基站周围, 与基站进行上行链路的通信, 第 i 个认知用户的信干比可以用式(4)表示:

$$r_i(p) = G \frac{h_i p_i}{c_{ij} \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2 + Q} \quad (4)$$

其中, p_i 表示认知用户的发射功率, G 为有效增益矩阵, h_i 为认知用户 i 的链路增益, 其值取决于认知用户 i 到基站的距离以及路径损耗, c_{ij} 为认知用户间扩频码的互相关系数, σ^2 为背景噪声功率, $I = c_{ij} \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2$ 为认知用户受到的干扰, Q 表示授权用户对认知用户的干扰。

如果用 r^{th} 表示认知用户正常通信的最小 SIR 值, 则认知用户的接收信干比应满足:

$$\gamma > \gamma^{\text{th}} \quad (5)$$

如果用 $p_{\max}$ 表示认知用户的最大发射功率, 则认知用户的发射功率必须满足:

$$p \leq p_{\max} \quad (6)$$

式(5)是认知用户满足正常通信所需的最低要求, 当用户的信干比低于 r^{th} 时, 认为该用户无法进行通信。式(6)是对认知用户功耗的限制, 如果用户的功耗过大, 可能会使用户的电快速耗尽。所有认知用户在考虑 $p_{\max}$ 的限制下, 提高自己的发射功率及满足 SIR 需求。

3 效用函数的设计

在无线网络资源管理的博弈模型中, 效用函数表示用户对系统服务质量的满意程度。效用函数的组成为两部分, 其形式如下:

$$U = U(\text{总}) - U(\text{惩罚}) \quad (7)$$

其中总效用为认知用户使用信道传输数据获得的收益, 惩罚函数(代价函数)为认知用户共享信道对其他用户造成干扰的一个惩罚, 两者的差为认知用户的净效用, 即最后的收益。

参考文献[9]提出的信干比均衡算法(以下简称 SIR 平衡算法)中采用的效用函数计算式为:

$$U_i(P_i, P_{-i}) = \alpha(r^{\text{tar}} - r_i)^2 \quad (8)$$

其中, r^{tar} 为认知用户的目标信干比, 表示用户通信所需的最佳信干比, 与信干比阈值不同的是, 目标信干比是用户传输数据的最佳信干比, 每个用户的信干比收敛于目标值, 但却存在严重的功率浪费, 参考文献[10](以下简称 K-G 算法)在参考文献[9]的基础上, 引入了发射功率这一项, K-G 算法将发射功率作为效用函数的一项去考虑, 对发射功率大的用户进行惩罚, 其效用函数计算式如下:

$$U_i(P_i, P_{-i}) = \alpha(r^{\text{tar}} - r_i)^2 + \beta p_i \quad (9)$$

算法大大降低了用户的发射功率, 但是 K-G 算法的效用函数对距离基站不同距离的用户采用同样的惩罚力度, 存在公平性问题, 为了解决远近效应, 参考文献[11]在效用函数中引入信道增益因子, 提出了一种新的自适应功率控制算法(以下简称 PG-K-G 算法), 其效用函数为:

$$U_i(P_i, P_{-i}) = \alpha(r^{\text{tar}} - r_i)^2 + \beta h_i p_i \quad (10)$$

针对链路质量的不同采用不同的惩罚力度, 解决了远近效应, 且提高了单位功率网络吞吐量, 但是存在部分用户 SIR 低于信干比阈值的情况。针对这种情况, 参考文献[12]提出了一种基于信干比和发射功率的综合代价函数(以下简称 KG-CP 算法), 其效用函数如下:

$$U_i(P_i, P_{-i}) = \alpha(r^{\text{tar}} - r_i)^2 + \beta p_i - t \ln(1 + r_i) \quad (11)$$

通过在代价函数中增加非线性的信干比调整项, 根据远近用户不同的信干比质量来决定代价, 使认知无线电系统中信干比不同的用户受到的惩罚不同, 降低了距离基站较远用户的发射功率, 减小了系统的能源消耗, 但是以牺牲用户的信干比为代价的。

针对以上情况, 结合认知无线电系统的特点, 本文采用有关信干比的归一化效用函数, 总效用表示如下:

$$U(\text{总}) = \frac{e^{r_i}}{e^{r_i} + a} \quad (12)$$

其中, a 表示归一化的曲线的陡峭程度, $U(\text{惩罚})$ 是采用 PG-K-G 算法的函数式, 则净效用函数的表达如下:

$$U_i(P_i, P_{-i}) = \frac{e^{r_i}}{e^{r_i} + a} - b(r^{\text{tar}} - r_i)^2 - ch_i p_i \quad (13)$$

其中, b 、 c 分别为信干比和发射功率的调整因子。新的效用函数既保留了链路算法的收敛速度快, 又不受调制方式的限制, 采用归一化的 S 型函数, 符合认知无线电的特点, 且收敛速度较快, 适合对时延要求比较高的场景。

4 纳什均衡

根据超模博弈^[13]的定义, 如果满足以下条件, 就称为

超模博弈。

(1) 所有参与者的策略空间是紧集合。

(2) 参与者的策略中, 对于所有的和都有:

$\frac{\partial^2 u}{\partial p_i \partial p_j} \geq 0, i, j \in N, i \neq j$ 。因为每个参与者的策略, 即发射功率的范围均为 $[p_{\min}, p_{\max}]$, 显然满足条件(1)。

条件(2)的证明如下:

$$\frac{\partial u(\text{总})}{\partial p_i} = \frac{a}{(e^{r_i} + a)^2} e^{r_i} \frac{\partial r_i}{\partial p_i}$$

$$\frac{\partial u(\text{总})^2}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{e^{r_i} \frac{\partial r_i}{\partial p_i} \frac{\partial r_i}{\partial p_j} + e^{r_i} \frac{\partial^2 r_i}{\partial p_i \partial p_j}}{(e^{r_i} + a)^2} - \frac{e^{r_i} \frac{\partial r_i}{\partial p_i} \frac{\partial r_i}{\partial p_j}}{(e^{r_i} + a)^3}$$

$$\frac{\partial r_i}{\partial p_i} = \frac{Gh_i}{I}, \frac{\partial r_i}{\partial p_j} = \frac{-Gp_i \sum h}{I^2}$$

$$\frac{\partial^2 r_i}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{-G \sum h}{I^2}$$

代入有:

$$\frac{\partial u(\text{总})^2}{\partial p_i \partial p_j} \geq 0$$

$$\frac{\partial u(\text{惩罚})^2}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{-2br^{\text{tar}} G \sum h}{I^2} \leq 0$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{\partial u(\text{总})^2}{\partial p_i \partial p_j} - \frac{\partial u(\text{惩罚})^2}{\partial p_i \partial p_j} \geq 0$$

本文效用函数满足超模博弈条件, 每个参与者增加其策略所引起的边际效用随着对手策略的递增而增加, Topkis 不动点定理证明所有超模博弈存在唯一的纳什均衡点。

5 仿真分析

本文采用 MATLAB 软件对算法的性能进行分析, 考虑在一个单蜂窝小区, 认知用户已经检测到频谱空穴, 并已经允许接入, 各认知用户都以追求自身利益最大化为目的, 建立非合作超模博弈模型, 在认知无线电系统中, 各认知用户随机分布在一个 $[600 \text{ m}, 1400 \text{ m}]$ 的区域内, 不考虑阴影衰落、快衰落对用户信号的影响, 仿真采用 256 bit 的 Walsh 码作为扩频码, 信干比中系统增益为 $G=100$, 授权用户对认知用户的干扰和背景噪声的总和为: $Q + \delta^2 = 5 \times 10^{-12} \text{ W}$, 假设信道为静态的, 即认知用户的信道增益为确定函数,

记为: $h = \frac{A}{d^m}$, A 取 0.097, m 的取值范围为 2~6, 本文取



3.6, 认知用户的初始发射功率为 1×10^{-9} W, 为了方便分析, 本文不再考虑认知用户 SIR 需求的多样性, 设置认知用户的信干比阈值为 7 dB, 目标信干比为 8 dB。

为了验证本文算法的优越性, 仿真将对比 K-G 算法、PG-K-G 算法、KG-CP 算法, 仿真结果如下。

本文首先对算法的收敛性进行了验证, 图 1 所示为认知用户的信干比随迭代次数的收敛情况, 仿真在区域内随机选取了 20 个用户, 其中每条曲线代表一个认知用户, 从图中可以看出, 本文算法经过 6 次左右收敛到稳定值, 其每个用户的信干比均大于信干比阈值, 说明本文算法能保证每个认知用户均能正常通信, 适用于对时延要求比较高的场景。

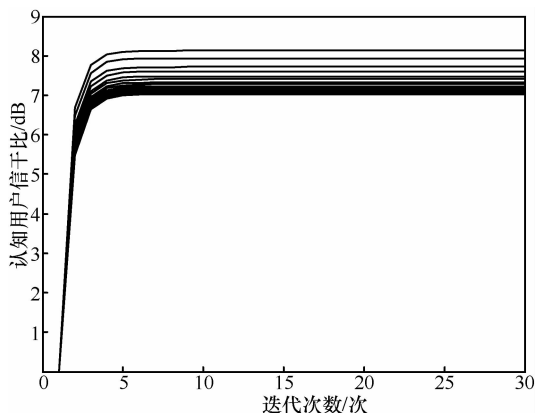


图 1 认知用户的信干比随迭代次数的收敛情况

图 2 和图 3 所示分别为认知用户的平均发射功率和信干比随认知用户距离基站距离的变化情况, K-G 算法中因为采用的是线性的代价函数, 随着距离的增加, 用户的不公平性也越加明显, 所以距离基站较远的用户的信干比下降较快, 且发射功率增加也较快, 但是增加的发射功率也未能克服链路质量的影响导致的 SIR 的减小, 并且 K-G 算法存在部分用户的 SIR 不满足通信需求, 这样既浪费了资源, 也未完成正常通信, PG-K-G 算法较之 K-G 算法, 考虑了链路增益因素, 公平性有所改进, 认知用户的 SIR 下降幅度也有所缓解, 这样认知用户就不会单纯为了保障自身的通信质量而过多增大自身发射功率, KG-CP 算法较之 K-G 算法, 增加了有关 SIR 的对数函数, 使认知用户间的公平性有所保障, 且能明显降低认知用户的发射功率, 但是距离基站较远的用户, SIR 的影响因素变小, 使用户间的不公平性加剧, 本文算法采用 S 型效用函数, 效用函数的变化趋势符合认知无线电系统中效用函数随用户信干比的变化情况, 且采用归一化的形式, 用户的发射功

率较之其他算法均有所降低, 代价函数中除考虑了认知用户的发射功率和链路质量外, 还平衡了认知用户的发射功率和用户受到的干扰值, 仿真结果表明, 本文所提算法的公平性有了很大的改善。

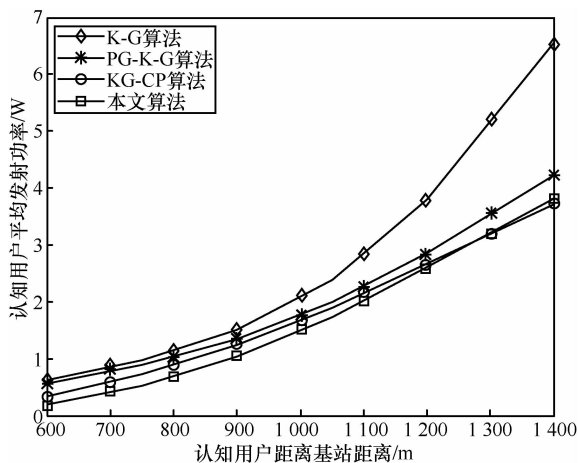


图 2 认知用户的平均发射功率随认知用户距离基站距离的变化情况

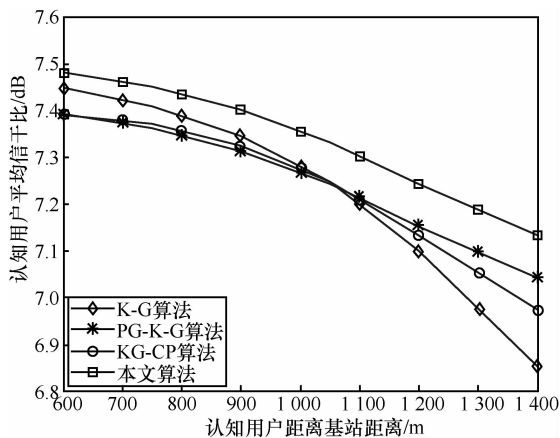


图 3 认知用户的平均信干比随认知用户距离基站距离的变化情况

6 结束语

本文结合认知无线电的特点, 在 David Goodman 等提出的非合作博弈功率控制模型的基础上, 提出了适合认知无线电系统的不受调制方式限制的归一化的效用函数, 且收敛速度较快使用户之间可以灵活切换信道, 并且引入了代价函数, 在代价函数中考虑了信道链路、认知用户的发射功率等因素, 且平衡了认知用户的发射功率和受到的干扰程度, 所提效用函数满足超模博弈条件, 即证明了其纳什均衡解的存在性和唯一性, 仿真结果表明, 本文所提算法能使用户公平地共享频谱, 解决了远近不公平问题且在

一定程度上降低了用户的发射功率,降低了系统能耗,延长了电池的续航时间。

参考文献

- 1 Mitola J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio. The Dissertation for Doctor of Technology, Royal Institute of Technology(KTH), 2000
- 2 Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201~220
- 3 Damme E. Game Theory: the Next Stage. Tilburg: Tilburg University, 1995
- 4 Goodman D, Mandayam N. Power control for wireless data. IEEE Personal Communications, 2000, 7(2): 48~54
- 5 Syraydar C U, Mandayam N B, Goodman D. Efficient power control via pricing in wireless data network. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2): 291~303
- 6 康钰, 朱琦, 鄢广增. 认知无线电系统中一种改进的功率控制博弈算法. 电路与系统学报, 2010(2): 52~58
- 7 韩勇, 陈强, 王建新. Ad Hoc 网络非合作博弈功率控制研究. 通信技术, 2013(9)
- 8 林玉清, 王霞, 朱琦. 认知无线电系统中基于归一化效用函数的功率控制方法. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2011, 31(1)
- 9 Gajic Z, Koskie S. Newton iteration acceleration of the Nash game algorithm for power control in 3G wireless CDMA networks. Proceedings of SPIE, Santa Clara, CA, USA, 2003
- 10 Koskie S, Gajic Z. A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002(3): 1~10
- 11 Luo R H, Yang Z. A novel adaptive power control algorithm in cognitive radio system. Signal Processing, 2010(8)
- 12 赵之旭, 田峰. 一种改进的认知无线电功率控制博弈算法. 计算机技术与发展, 2013(2)
- 13 Fudenberg D, Tirole J. 博弈论. 黄涛等译. 北京: 中国人民大学出版社, 2002

[作者简介]



余翔,男,重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授、硕士生导师,主要研究方向为交换技术、计算机网络及信息安全、下一代网络协议等。

张小银,女,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为宽带无线网络。

刘磊,男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

(收稿日期:2014-06-22)

(上接第 70 页)

- 13 Lischka J, Karl H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection. Proceedings of the 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures, Spain, Barcelona, 2009
- 14 Yuki K, Takashi M, Shinichi A, *et al.* Adaptive virtual network topology control based on attractor selection. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(11): 1720~1731
- 15 Cheng X, Su S, Zhang Z, *et al.* Virtual network embedding through topology-aware node ranking. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 39~47
- 16 Yu M, Yi Y, Rexford J, *et al.* Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration. Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17~29
- 17 Chowdhury N, Rahman M, Boutaba R. ViNEYard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping. IEEE/ACM Transactions on networking, 2012, 20(1): 206~219

[作者简介]



曲桦,男,博士,西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信网和计算机网络体系结构。

王丽霞,女,西安交通大学硕士生,主要研究方向为虚拟网络映射、SDN 控制器部署。

赵季红,女,博士,西安邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信网、新一代网络的管理与控制。

王贺男,男,西安交通大学硕士生,主要研究方向为虚拟网络映射。

(收稿日期:2014-05-16)