

基于干扰管理的功率速率联合控制博弈方法

马 良^{1,2} 朱 琦^{1,2}

(1. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 南京 210003; 2. 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, 南京 210003)

摘 要: 针对已有的干扰温度模型在降低主用户受到的干扰方面的不足, 本文加强了主用户在干扰控制中的主观能动性。在次用户相互博弈, 调整发射功率和传输速率, 降低次用户之间干扰的同时, 主用户对受到次用户的干扰进行监测, 在保证不超过干扰门限的同时, 设计了干扰惩罚因子, 对其干扰越大的次用户受到的惩罚越大, 进一步合理地分配次用户的发射功率, 减少对主用户的干扰。仿真结果表明, 提出的干扰博弈方法能够降低次用户的发射功率, 减小对主用户产生的干扰, 提高了主用户的系统容量。同时, 在次用户网络内, 因为发射功率的降低, 次用户彼此的干扰减小, 接收信干比有了一定的改善。

关键词: 认知无线电; 博弈论; 发射功率; 传输速率; 干扰

中图分类号: TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)01-0026-07

A Game-Theoretic Joint Rate and Power Control Based On Interference Management

MA Liang^{1,2} ZHU Qi^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. Key Lab on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Based on the shortage of the current interference temperature model that reduces the interferences taken to primary users, this paper strengthens those users' subjectivities in power control. Besides the game among secondary users to reduce their interferences due to the others by the adjustments in transmission powers and rates, the primary users detect the inferences taken by secondary users and use an interference punishment factor we designed under the premise that the interferences do not exceed the threshold. The more interference that the secondary user affects primary users, the more seriously that the secondary user will be punished. In this way, the transmission powers of secondary users and interferences that primary users affected will be reduced. The simulation results show that the proposed game-theoretic interference method could reduce interference and improve utility of primary users by decreasing secondary transmission powers. At the same time, the interferences among secondary users could also be reduced, and the received signal to interference will achieve some improvements.

Key words: cognitive radio; game theory; power; transmission rate; interference

1 引言

认知无线电作为一种新的智能无线通信技术,能够随外界环境的变化自适应地调整系统工作参数,广泛应用于缓解频谱资源不能有效利用的紧张局面[1][2]。

功率控制是无线资源管理的一个重要的方面[3][4]。在无线通信系统中,每个终端需要寻找合适的发射功率,在满足自身接收信干比要求的同时,减小对其他终端的干扰。博弈论的出现为解决功率控制问题提供了全新的思路[5]。博弈论是帮助分

析决策选择问题的有效工具[6],也是解决功率控制的一个有效方法。文献[7]采用非合作博弈方法讨论了认知无线网络中基于价格的功率控制问题。

现代的无线通信系统正向多业务模型发展,要能承载不同类型的业务,这就需要在传统的功率控制基础上,联合控制传输速率,满足多种业务不同传输速率的要求。文献[8]讨论了集中式的 CDMA 上行链路的功率速率联合控制。在 CDMA 系统中,距离基站近的用户能以较低的发射功率传输较高的数据,距离基站远的用户发射功率较大,但传输速率仍较低[9]。文献[9]的讨论没有考虑单个次用户对其他次用户产生的干扰,[10]引入了功率价格因素,在[9]的基础上进一步降低了次用户的发射功率。[11]根据功率的收敛域对应出价格的取值范围,给出了价格更新算法,比较了功率控制算法和基于价格的联合功率速率控制算法的性能。[10]和[11]中涉及到的价格都是在次用户网络范围内,提出的一个限制次用户的发射功率的因子,来减少单个发射功率对网络中的其他次用户产生的干扰。关于对主用户的干扰,[11]是采用干扰门限机制,限制次用户的发射功率,在一定程度上缓解了对主用户干扰的不利局面。

基于博弈论的联合功率速率控制不仅要降低次用户彼此的干扰,又要控制针对主用户的干扰。但是干扰门限是主用户能够承受的最大干扰,在次用户调整功率的过程中始终是一个常数,为了在不影响次用户的通信要求(用目标信干比表示)下,更加有效地降低次用户对主用户的干扰,本文在[11]的基础上提出了一种新的基于干扰的功率速率联合控制博弈算法,加强了主用户在干扰控制中的主观能动性。在次用户相互博弈,调整发射功率和传输速率,降低次用户之间干扰的同时,主用户对受到次用户的干扰进行监测,在保证不超过干扰门限的同时,设计了干扰惩罚因子,对其干扰越大的次用户受到的惩罚越大,进一步合理地分配次用户的发射功率,减少对主用户的干扰。

本文其他内容安排如下:第 2 部分给出了系统模型以及功率速率联合控制的博弈模型;第 3 部分提出了基于干扰的联合控制功率速率的博弈新算法,给出了算法的流程图,定义了主用户的效用函数,改进了次用户的效用,并证明了纳什均衡解的存在性与唯一性;第 4 部分对算法进行了仿真分析;第 5 部分对全文进行了总结。

本文涉及到的符号及说明在下表中给出。

表 1 本文涉及的符号及说明

Tab. 1 related symbol description

p_i	次用户的发射功率	$[p_{\min}, p_{\max}]$	发射功率的取值范围
R_i	次用户的传输速率	$[R_{\min}, R_{\max}]$	传输速率的取值范围
I_{th}	干扰门限	λ	主用户对次用户的干扰惩罚因子
I^{tar}	干扰的目标值	γ_i	次用户的接收信干比
I_i	次用户 i 对主用户产生的干扰	g_i	次用户到主用户基站 BS_p 的路径损耗
d_i	次用户 i 至次用户基站 BS_s 的距离	D_i	次用户至主用户基站 BS_p 的距离
W	频谱总带宽	σ^2	次用户网络功率分配的背景噪声
N	次用户数	U_p	主用户效用函数
		u_i^s	次用户 i 的效用函数

2 基于干扰的功率速率联合控制博弈模型

2.1 系统模型

本文对以 underlay 方式共享频谱的认知无线网络进行分析[11],主用户 PU_s 和次用户 SU_s 共存并共享同一段频谱(带宽为 $W(MHz)$),被授权的主用户与主用户基站 BS_p 通信,非授权的次用户采用码分多址(CDMA)方式与次用户基站 BS_s 通信(图 1)。次用户发射功率会对主用户产生一定的干扰,影响主用户的通信质量。为防止通信性能因干扰而恶化,主用户定义了干扰门限[11],以限制次用户对主用户的最大干扰。此外,主用户会对次用户采取一定的惩罚,在干扰门限的基础上进一步限制次用户的干扰。

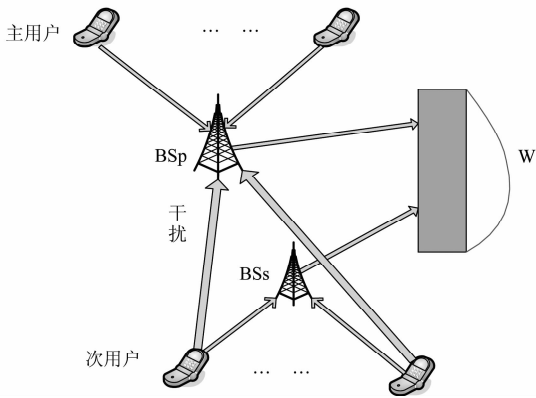


图 1 认知无线电系统的干扰模型

Fig. 1 The interference model in Cognitive Radio System

2.2 次用户功率速率联合控制博弈模型

根据图 1 的系统模型,可以用非合作博弈 $G\{N; \{p_1, R_1\}, \{p_2, R_2\}, \dots, \{p_N, R_N\}; u_1^s(p_1, R_1), u_2^s(p_2, R_2), \dots, u_N^s(p_N, R_N)\}$ 描述这种自私的博弈行为,其中 N

是参与博弈的次用户数, $\{p_i, R_i\}$ 是次用户博弈的元素 (发射功率和传输速率), 博弈的目标是寻求合适的发射功率与传输速率 $\{p_i^*, R_i^*\}$ 以实现次用户效用 $\{u_i^s(p_i, R_i)\}$ 的最优。这种非合作的功率速率联合控制博弈模型可以描述为:

$$\begin{aligned} & \max u_i^s(p_i, R_i) \\ & s. t. p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max} \quad \forall i=1, 2, \dots, N \\ & R_{\min} \leq R_i \leq R_{\max} \quad (1) \\ & [p_{\min}, p_{\max}] \text{ 和 } [R_{\min}, R_{\max}] \text{ 是次用户 } i (\forall i=1, 2, \dots, N) \text{ 发射功率和传输速率的范围。} \end{aligned}$$

2.3 主用户与次用户的干扰博弈模型

主用户网络与次用户网络工作在同一频段, 未被授权的次用户发射功率会给已授权的主用户带来一定的干扰, 除了已有的干扰门限机制[11], 本文增加考虑主用户对干扰其通信的次用户会采取相应的惩罚, 在不影响次用户的最低通信要求(用目标信干比 γ^{tar} 表征)的基础上, 进一步降低次用户的发射功率, 减少主用户受到的干扰。干扰是连系主用户网络的一个重要的元素, 也是主用户与次用户博弈的要素, 其博弈模型可以描述为:

$$\begin{aligned} & \max U_p, u_i^s \\ & s. t. \sum_{i=1}^N I_i \leq I_{th} \\ & p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max} \\ & \forall i=1, 2, \dots, N \quad (2) \end{aligned}$$

其中, U_p, u_i^s 分别代表主用户和次用户 i 的效用函数, I_i 是次用户 i 对主用户产生的干扰, I_{th} 是主用户定义的干扰门限, 次用户发射功率的取值范围为 $[p_{\min}, p_{\max}]$ 。

3 基于干扰的功率——速率联合控制新算法

3.1 算法思想

本文的研究基于非重叠的认知无线网络, 主用户和次用户共享同一段授权频谱, 非授权的次用户在接入这段频谱时, 会对授权的主用户产生一定的干扰, 影响主用户的通信质量。而在非重叠无线通信中, 这种干扰是不可避免的。为了减少对主用户的干扰, 防止主用户的服务质量恶化, 已有的算法[11]提出了干扰门限机制, 若次用户对主用户的总干扰不超过主用户可以承受的干扰门限, 则可以近似认为次用户对主用户的干扰不会影响主用户的基本通信。但是[11]中的干扰门限是一个最大并且固定的常数, 采用这种干扰机制只能保证主用户通信的最低要求, 针对上述不足, 本文提出了一种

新的基于干扰的联合功率、速率博弈算法。

假设主用户的干扰门限为 I_{th} (I_{th} 是主用户可承受的最大干扰), 此外, 主用户还存在一个干扰的目标值 I^{tar} (I^{tar} 相对 I_{th} 是一个非常小的值)。当次用户对主用户的干扰不大于 I_{th} 且越接近 I^{tar} , 则主用户在保证了最低通信质量要求的基础上, 通信性能因受到的干扰减小而得到提高。本文运用博弈的方法来实现干扰的动态调整, 当主用户检测到次用户对自己的干扰时, 会采取相应的惩罚机制来降低干扰, 最终的博弈目标是寻找最佳的次用户发射功率与传输速率 $\{p_i^*, R_i^*\}$ 以实现主次效用的最优。

3.2 效用函数

文献[11]通过次用户相互博弈来调整发射功率和传输速率以实现单个次用户效用最优, 本文在它的基础上, 增加对主用户效用的考虑。当主用户检测到次用户对自己有干扰时, 会采取相应的惩罚机制来缓解这种不利的局面。

3.2.1 主用户效用函数

次用户给主用户带来的干扰导致了主用户性能的下降, 要付出相应的代价。主用户会给次用户一定的惩罚, 来削弱不利于自身的干扰, 据此, 建立如下的主用户效用函数:

$$U_p = \lambda \sum_{i=1}^N p_i g_i - \frac{(\sum_{i=1}^N p_i g_i - I^{tar})^2}{I_{th}} \quad (3)$$

第一项 $\lambda \sum_{i=1}^N p_i g_i$ 表示主用户对所有次用户干扰的惩罚之和 (N 是次用户的个数), 这一项是主用户效用部分的收益, 类似于[12]中主用户暂时出售频谱时获得的效益。主用户对次用户的干扰惩罚用因子 λ 表征, g_i 是次用户 i ($\forall i=1, 2, \dots, N$) 到主用户基站 BS_p 的路径损耗因子 ($g_i = a/(D_i)^4$, a 是常数, D_i 是次用户 i ($\forall i=1, 2, \dots, N$) 至主用户基站 BS_p 的距离 (米)), p_i 是相应的次用户 i ($\forall i=1, 2, \dots, N$) 的发射功率。

第二项 $\frac{(\sum_{i=1}^N p_i g_i - I^{tar})^2}{I_{th}}$ 表示次用户的干扰给主用户带来的性能损失。当次用户对主用户的总干扰 $\sum_{i=1}^N p_i g_i$ 越接近干扰的目标值 I^{tar} , 主用户受到的干扰越小, 性能损失也越小。由于 I^{tar} 是一个非常小的值, 当 $\sum_{i=1}^N p_i g_i$ 恒等于 I^{tar} 时, 可以认为主用户的性能未因干扰而下降。 I_{th} 是主用户定义的干扰门限, 也是主用户可

承受的干扰的最大值,当 I_{th} 越小时,主用户承受干扰的能力越低,性能损失也越严重。

根据博弈论的思想[6],在次用户的发射功率收敛时,主用户的效用达到最大值。有

$$\frac{\partial U_p}{\partial p_i} = 0 \quad (4)$$

将式(3)对 p_i 求导,结合式(4):

$$\frac{\partial U_p}{\partial p_i} = \lambda g_i - 2 \frac{g_i (\sum_{i=1}^N p_i g_i - I^{tar})}{I_{th}} = 0 \quad (5)$$

即

$$\lambda = 2 \frac{(\sum_{i=1}^N p_i g_i - I^{tar})}{I_{th}} \quad (6)$$

上式就是主用户对次用户的惩罚因子。从该式可以看出,当次用户的总干扰 $\sum_{i=1}^N p_i g_i$ 越大时,主用户对次用户的惩罚因子也越大,这是合理的。

3.2.2 次用户效用函数

在[11]的基础上,增加考虑次用户因对主用户造成的干扰所要付出的代价,本文改进的次用户效用函数如下:

$$u_i^s = \frac{R_i \ln(k \gamma_i)}{p_i} - c p_i - b \lambda p_i g_i \quad (7)$$

$\frac{R_i \ln(k \gamma_i)}{p_i}$ (bits/J) 是次用户的净收益,定义为吞吐量 $R_i \ln(k \gamma_i)$ 与发射功率 p_i 的比值。 R_i 是次用户 i ($\forall i = 1, 2, \dots, N$) 的传输速率, $\ln(k \gamma_i)$ 是次用户 i ($\forall i = 1, 2, \dots, N$) 的帧成功接收概率[13] (k 是常数, γ_i 是次用户的接收信干比)。则 $R_i \ln(k \gamma_i)$ 是次用户经过一定误码之后的传输速率。 k 的定义参考文献[10]。信干比定义为[13]:

$$\gamma_i(R_i, p_i) = \frac{W}{R_i} \frac{h_i p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

其中 W 是共享的频谱带宽。 h_i 是次用户 i 至次用户基站 BS_s 的路径损耗因子 ($h_i = l/d_i^4$, l 是常数, d_i 是次用户 i 至次用户基站 BS_s 的距离(米))。 σ^2 是次用户网络功率分配的背景噪声。

在次用户网络中,每个次用户都想提高自己的发射功率来增加接收信干比,但会给其他用户带来不可避免的干扰,因此次用户的发射功率受到一定的限制,次用户系统会针对次用户发射功率的增加有相应的惩罚,这种惩罚用因子 c 来表征[11]。此外,次用户的发射功率会干扰主用户的性能,也会有相应的惩罚,

$b \lambda p_i g_i$ 是主用户对次用户 i 的干扰惩罚 (b 是常数, λ 由式(6)给出)。

4 仿真与性能分析

假设讨论的认知无线电环境中有一个主用户基站和一个次用户基站,次用户数 $N = 10$ 个,次用户 1 ~ 10 至次用户基站 BS_s 距离为 $d = [50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500]$ m, 常数 $a = l = 0.097$, 共享的频谱带宽为 $W = 3.84$ MHz (chip rate), 功率 $p_i \in [10^{-6}, 0.2]$ w, 速率 $R_i \in [0, 96]$ kbps, 帧成功接收概率 $p_c = 99\%$, 目标接收信干比 $\gamma_i^{tar} = 12.42$, 干扰门限 $I_{th} = -100$ dBm, 目标干扰值 $I^{tar} = -140$ dBm, 次用户接收机的加性高斯白噪声 (AWGN) $\sigma^2 = 10^{-15}$ w/Hz。

为方便讨论,本文假设主次基站和 N 个次用户分布在同一条直线上,有三种分布,如图3所示。根据图3的三种分布,次用户 i ($\forall i = 1, 2, \dots, N$) 至 BS_p 的距离 D_i 有不同取值。

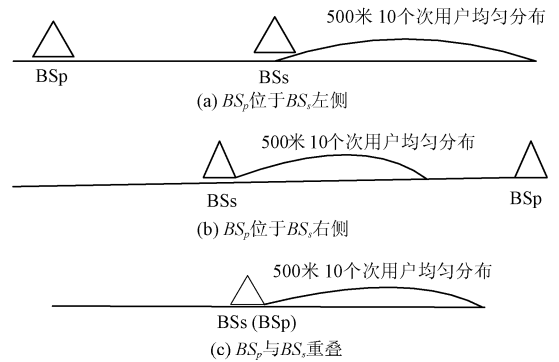


图2 主次基站及次用户的分布

Fig. 2 The distribution of primary and secondary base stations

按照主次基站和次用户的三种不同分布,分别讨论每个次用户的发射功率、传输速率、信干比、效用及对主用户的干扰。

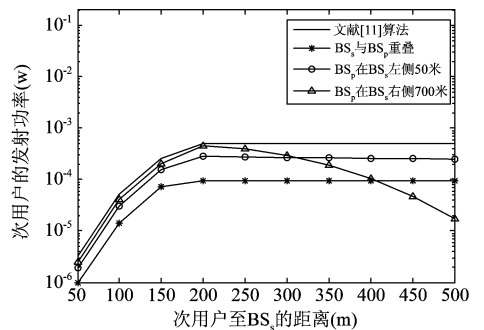


图3 次用户的发射功率

Fig. 3 Transmission power of secondary users

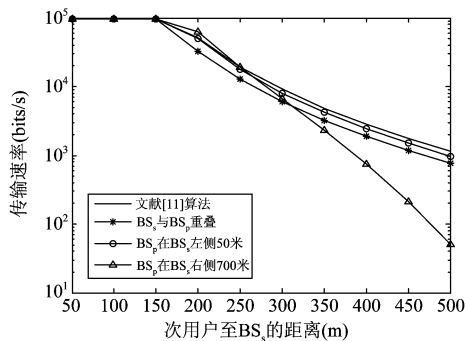


图4 次用户的传输速率

Fig.4 Transmission rate of secondary users

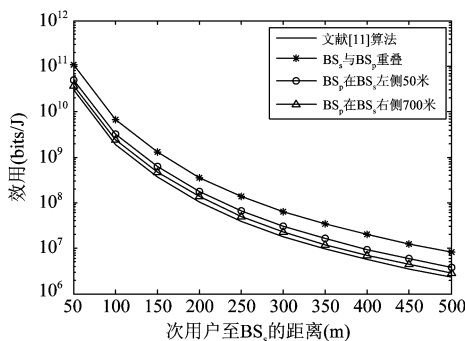


图5 次用户的效用

Fig.5 Utility of secondary users

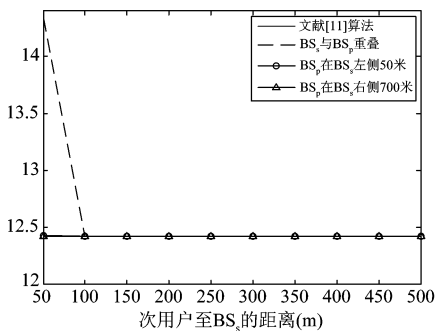


图6 次用户的接收信干比

Fig.6 Received SIR of secondary users

图3~图6在次用户发射功率、传输速率、效用和接收信干比方面对本文改进方法与参考文献[11]进行了比较。由图3可以看出,在三种分布下,本文改进方法次用户的发射功率都较[11]有所降低,这是因为本文算法增加考虑主用户对次用户干扰的惩罚,使得次用户在满足目标接收信干比的前提下,尽量降低功率。当 BS_p 位于 BS_s 右侧(图2(a)),距 BS_s 较远的次用户比较靠近 BS_p ,对主用户的干扰也较大,功率下降得就越快。

图4比较了次用户的传输速率,本文改进算法降

低了次用户的发射功率,传输速率也有所降低,但是次用户的效用(图5)和信噪比(图6)优于参考文献[11]。随着次用户发射功率的降低,传输数据的速率略有下降(图4),给其他次用户带来的干扰随之减少,改善了接收信干比(图6),更好地保证了次用户的服务质量(QoS),提高了次用户的效用(图5)

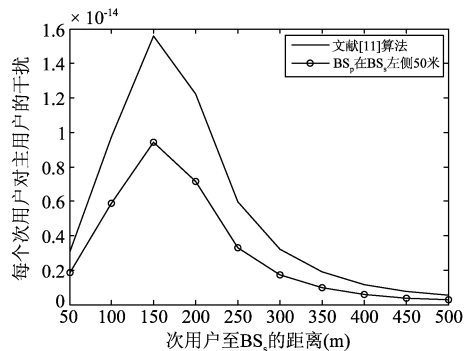
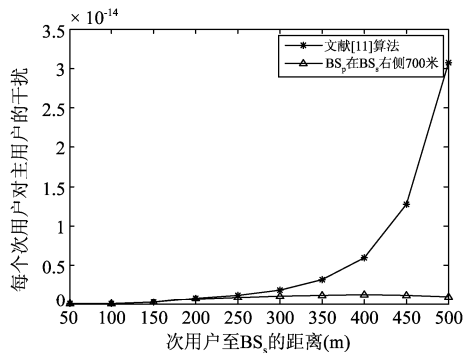
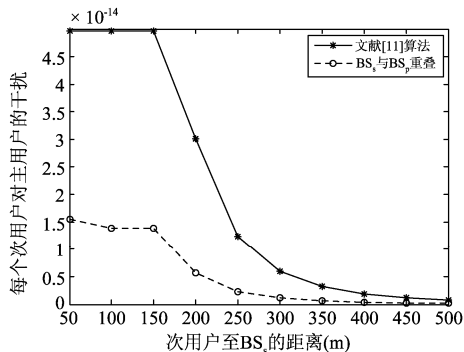
(a) BS_p 位于 BS_s 左侧
(a) BS_p is on the left of BS_s (b) BS_p 位于 BS_s 右侧
(b) BS_p is on the right of BS_s (c) BS_p 与 BS_s 重叠
(c) BS_p and BS_s are in the same location

图7 三种位置分布下主用户受到每个次用户的干扰

Fig.7 The interference of primary users under different three distributions

按照主次基站和次用户的三种不同分布,图7讨论了主用户受次用户干扰的情况。可以看出,与文献[11]相比,本文改进的联合控制发射功率与传输速率方法降低了对主用户的干扰,距 BS_p 越近的次用户干

扰被抑制得越强。

图8为次用户对主用户的总干扰,可以看出,当 BS_p 越靠近 BS_s 时,主用户受到的干扰越大,反之越小。

图9给出了主用户容量随基站相对距离的变化情况,随着 BS_p 越靠近 BS_s ,主用户受到的干扰越大,容量会减小。与文献[11]算法相比,本文的方法进一步降低了主用户受到的干扰,主用户容量也有所增加。

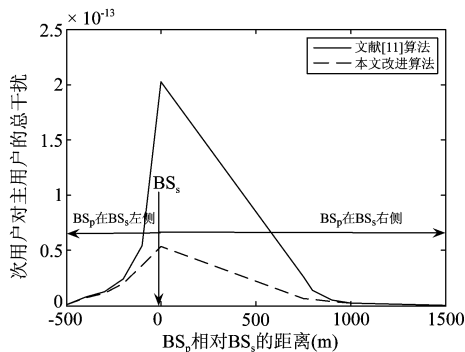


图8 次用户对主用户的总干扰

Fig. 8 The total interference of primary users taken by secondary users

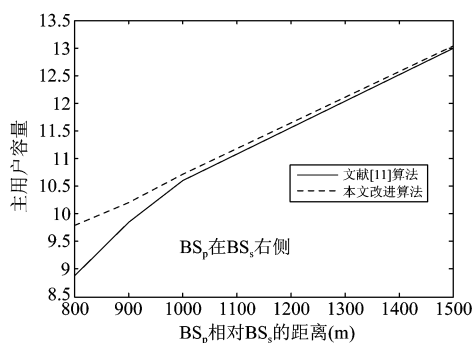


图9 主用户容量(bit/s)

Fig. 9 The utility of primary users

5 总结

本文在主用户和次用户共享同一频段的认知无线电系统中,讨论了次用户功率速率的联合控制问题。次用户发射功率会给主用户带来不可避免的干扰,已有的干扰温度模型虽然限制了次用户的功率,但是不能有效地减小主用户因干扰导致的性能损失。本文加强了主用户在干扰控制中的能动性,设计了干扰惩罚因子。主用户实时监测次用户对自己的干扰,并给予相应的惩罚,在自己可以承受的干扰范围内,进一步降低次用户的发射功率,减小自身受到的干扰。仿真结果表明,本文提出的干扰博弈方法能够有效降低次用户的发射功率,减小主用户受到的干扰,提高主用户的

系统容量。同时在次用户网络内,各次用户因发射功率的降低,彼此之间的干扰也会相应减小,次用户的接收信干比得到了一定程度的改善,更好地保证了次用户的服务质量。

附录

纳什均衡解的存在性与唯一性证明

定义1 [14] 设 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 是 n 个人博弈 $G = \{S_1, S_2, \dots, S_n; U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 的一个策略组合,如果对于每个参与者 i :

$$U_i(s_i, s_{-i}) \geq U_i(s_i^*, s_{-i}) \quad (1)$$

对于所有 $s_i \in S_i$ 都成立,则我们称策略组合 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 是该博弈的一个纳什均衡。其中, s_{-i} 表示 n 中除了 i 以外其他所有参与者所选择的策略组合。

定理1 [10] (存在性)在 n 人博弈 $G = \{S_1, S_2, \dots, S_n; U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 中,若对于所有的 $i = 1, 2, \dots, N$ 均有如下条件成立:

- (1) S_i 在欧式空间是一个非空、凸的紧集合;
- (2) U_i 是连续的拟凹函数。

则 $G = \{S_1, S_2, \dots, S_n; U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 存在纳什均衡。

证明:对于本文的博弈 $G[N; \{p_1, R_1\}, \{p_2, R_2\}, \dots, \{p_N, R_N\}; u_1^s(p_1, R_1), u_2^s(p_2, R_2), \dots, u_N^s(p_N, R_N)\}$,有 $p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max}$ 和 $R_{\min} \leq R_i \leq R_{\max}$,条件(1)满足。

对式(7)求导得:

$$\frac{\partial u_i^s}{\partial p_i} = \frac{R_i [1 - \ln(k\gamma_i)]}{p_i^2} - c - bg_i(\lambda + \frac{\partial \lambda}{\partial p_i} p_i) \quad (2)$$

再次求导:

$$\frac{\partial^2 u_i^s}{\partial p_i^2} = \frac{R_i [2 \ln(k\gamma_i) - 3]}{p_i^3} - bg_i(2 \frac{\partial \lambda}{\partial p_i} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial p_i^2} p_i) \quad (3)$$

根据前面的讨论, $\ln(k\gamma_i) \leq 1$,因此上式 $\frac{\partial^2 u_i^s}{\partial p_i^2} \leq 0$,

$\forall i = 1, 2, \dots, N$,因此 u_i^s 是 p_i 的凹函数。

同理,

$$\frac{\partial^2 u_i^s}{\partial R_i^2} = -\frac{1}{p_i R_i} \leq 0 \quad (4)$$

因此 u_i^s 是 R_i 的凹函数。条件(2)满足。

综上所述, $G[N; \{p_1, R_1\}, \{p_2, R_2\}, \dots, \{p_N, R_N\}; u_1^s(p_1, R_1), u_2^s(p_2, R_2), \dots, u_N^s(p_N, R_N)\}$ 存在纳什均衡解 $\{p_1^*, R_1^*\}, \{p_2^*, R_2^*\}, \dots, \{p_N^*, R_N^*\}$ 。

定理2 [10] (唯一性)对于 n 人博弈 $G = \{S_1, S_2, \dots, S_n; U_1, U_2, \dots, U_n\}$,若最佳响应函数 $v(S) = \{v_1(S), v_2(S), \dots, v_n(S)\}$ 是一个标准函数[10],则根据

定理1 证明得出存在的纳什均衡解 $\{S_1^*, S_2^*, \dots, S_n^*\}$ 是唯一的。 ($v_i(S) = \{S_i \in R^+ : U_i(S_i, S_{-i}) \geq U_i(S'_i, S_{-i}), \forall S'_i \in R^+\}$, R^+ 表示正实数[11])。

符合下列条件[15]的函数是标准函数:

——恒为正: $v(S) \geq 0$;

——单调性: 若 $S \geq S'$, 则 $v(S) \geq v(S')$;

——延展性: 对于任一实数 $\alpha \geq 1$, $\alpha v(S) > v(\alpha S)$ 。

证明: 对于本文的博弈 $G\{N; \{p_1, R_1\}, \{p_2, R_2\}, \dots, \{p_N, R_N\}; u_1^s(p_1, R_1), u_2^s(p_2, R_2), \dots, u_N^s(p_N, R_N)\}$, 定义最佳响应函数[10]如下:

功率最佳响应函数:

$$\phi_i(p_{-i}) = \{u_i^s(p_i, p_{-i}) \geq u_i^s(p'_i, p_{-i})\} \quad (5)$$

速率最佳响应函数:

$$\varphi_i(R_{-i}) = \{u_i^s(R_i, R_{-i}) \geq u_i^s(R'_i, R_{-i})\} \quad (6)$$

由[10]中所述, 根据[15], 最佳响应函数是一个标准函数。因此, 纳什均衡解 $\{\{p_1^*, R_1^*\}, \{p_2^*, R_2^*\}, \dots, \{p_N^*, R_N^*\}\}$ 是唯一的。

综上所述, 本文的博弈 $G\{N; \{p_1, R_1\}, \{p_2, R_2\}, \dots, \{p_N, R_N\}; u_1^s(p_1, R_1), u_2^s(p_2, R_2), \dots, u_N^s(p_N, R_N)\}$ 具有唯一存在的纳什均衡解 $\{\{p_1^*, R_1^*\}, \{p_2^*, R_2^*\}, \dots, \{p_N^*, R_N^*\}\}$ 。

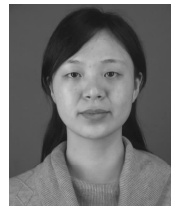
参考文献

- [1] You-En Lin, Kun-Hsing Liu and Hung-Yun Hsieh. Design of Power Control Protocols for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Game-Theoretic Perspective[C]. IEEE International Conference on Communications, 2010, 1-6.
- [2] Jovicic, A., Viswanath, P.. Cognitive Radio: An Information-Theoretic Perspective[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9): 3945-3958.
- [3] Muhammad, B. and Mohammed, A.. Uplink closed loop power control for LTE systems[C]. International Conference on Emerging Technologies, 2010, 88-93.
- [4] Young-Keum Song and Dongwoo Kim. Convergence and Performance of Distributed Power Control Algorithms for Cooperative Relaying in Cellular Uplink Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9): 4645-4651.
- [5] Chi Wan Sung, Shing Wong. A Noncooperative Power Control Game for Multirate CDMA Data Networks[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, Jan. 2003, 2(1): 186-194.
- [6] Attar, A., Nakhai, M. R., Aghvami, A. H.. Cognitive Radio game for secondary spectrum access problem[J].

IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 2121-2131.

- [7] Wang Wei, Cui Yilin, Peng Tao. Non-cooperative power control game with exponential pricing for cognitive radio network[C]. IEEE VTC, 2007, 3125-3129.
- [8] S. Jafar and A. Goldsmith. Adaptive multirate CDMA for uplink throughput maximization[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., Mar. 2003, 2(2): 218-228.
- [9] W. Zhao and M. Lu. Distributed Rate and Power Control for CDMA Uplink[C]. In Proceedings 2004 IEEE Wireless Telecommunications Symposium, Pomona, CA, May 2004, 9-14.
- [10] M. R. Musku, A. T. Chronopoulos, and D. C. Popescu. Joint rate and power control with pricing[C]. GLOBE-COM '05. IEEE, Dec. 2005, 3466-3470.
- [11] P. Zhou, W. Yuan, W. Liu, and W. Cheng. Joint power and rate control in cognitive radio networks: A game-theoretical approach[C]. IEEE ICC '08, Beijing, May 2008, 3296-3301.
- [12] Dusit Niyato, Ekram Hossain. Competitive Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Dynamic Game Approach[J]. IEEE Transactions On Wireless Communications, 2008, 7(7): 2651-2660.
- [13] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman. Efficient Power Control via Pricing in Wireless Data Networks[J]. Transactions on Communications, February 2002, 50(2): 291-303.
- [14] Fudenberg Drew, Tirole Jean. Game theory[M]. Cambridge, Mass. MIT Press, 1991.
- [15] R. D. Yates. A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, September 1995, 13(7): 1341-1347.

作者简介



马 良(1987-), 女, 南京邮电大学在读研究生, 主要研究方向为移动通信与无线技术。

E-mail: nanshun1987@126.com



朱 琦(1965-), 女, 江苏苏州人, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为移动通信与无线技术。

E-mail: zhuqi@njupt.edu.cn