论 文

认知无线电中具有双重代价因子的联合功率控制与速率分配博弈算法

谢显中, 何露*, 杨和林, 马彬

重庆邮电大学宽带接入网络研究所, 重庆 400065

* 通信作者. E-mail: helcqupt@163.com

收稿日期: 2014–12–18; 接受日期: 2015–02–22; 网络出版日期: 2015–06–03

国家自然科学基金 (批准号: 61271259, 61301123)、重庆市自然科学基金 (批准号: CSTC2010BB2415, CTSC2011jjA40006) 和重庆市教委科学技术研究项目 (批准号: KJ120501, KJ110530) 资助项目

摘要 针对主次用户共享带宽的认知无线电网络上行链路中次用户资源分配问题, 本文提出了一种具有双重代价因子的联合功率控制与速率分配博弈算法. 首先, 在效用函数中分别为功率和速率设定代价因子, 更加合理地控制自私用户过大的功率、速率以减小次用户彼此间的干扰; 其次, 从理论上证明了该博弈算法纳什均衡 (Nash equilibrium) 的存在性与唯一性; 最后, 给出了联合功率控制和速率分配的迭代更新算法以及流程图. 仿真结果表明, 相比已有的工作, 本文提出的算法可以使次用户在较小的发射功率下获得较大的传输速率以及较高的收益, 在保证主用户的服务质量下提高了次用户系统容量.

关键词 认知无线电 博弈论 双重代价因子 发射功率 传输速率

1 引言

在认知无线网络中 (cognitive radios networks, CRNs), 为了降低次用户对主用户的干扰, 功率控制是在主用户干扰门限下, 次用户选择合适的发射功率伺机使用主用户频谱资源以提高频谱利用率的一种有效方式. 博弈论作为一种有效的数学工具, 近年来, 基于博弈论的功率控制引起了广泛的研究, 如文献 [1~6] 等. 文献 [1] 综述了博弈论在认知无线网络中应用价值. Saraydar 等首先在文献 [2] 中提出了基于线性代价函数的非合作功率控制博弈算法 (non-cooperative power control game with pricing, NPGP), 所有用户通过调整发射功率使自己的收益最大化. 文献 [3,4] 在文献 [2] 的基础上将线性的代价函数改为非线性并分别应用在 Femtocell 双层网络和认知无线网络中, 实现了次用户效用的最大化. 文献 [3] 提出基于 Stackelberg 博弈的 Femtocell 功率控制算法, 将宏基站和 Femtocell 用户定义为 Stackelberg 博弈的两个参与者, 虽然考虑宏基站的效益, 但博弈均衡点并不唯一. 文献 [4] 调查了频谱共享认知网络中基于最优价格的功率控制 Stackelberg 博弈算法, 为主用户设置关于次用户功率的效用函数, 并为每个次用户制定差异定价. 文献 [5] 给出了一种基于价格非合作博弈模型的认知无线网络功率控制方案, 同时兼顾 QoS 和公平性要求, 应用迭代方法分析了该模型的 Nash equilibrium 解存在性和唯一性. 文献 [6] 基于合作博弈提出基于网络辅助的中心式速率分配方法, 获得近 60% 的效能和一定的公平性改善.

引用格式: 谢显中, 何露, 杨和林, 等. 认知无线电中具有双重代价因子的联合功率控制与速率分配博弈算法. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 1157–1168, doi: 10.1360/N112014-00403

但是, 以上文献都是在传输速率固定的情况下优化次用户的发射功率, 且只考虑了单个资源情况. 这种只考虑了单个资源的方式在某些情形下可能是无效的, 相反, 联合的资源分配效率更高. 为了提供更多业务的服务, 在蜂窝网络中不仅要终端用户进行功率控制, 还要对用户的传输速率进行控制, 即实行功率与速率的联合控制, 文献 [7~13] 等已做了一些相关研究.

文献 [7] 提出了一个含有代价函数的联合功率和速率控制非合作博弈算法, 该代价函数被假设为发射功率的线性函数. 文献 [8] 提出了一种新的基于干扰的功率速率联合控制博弈算法, 分别为主次用户设定了效用函数, 加强了主用户在干扰控制中的主观能动性. 但是次用户的效用设计不够完美, 只考虑了对自私用户功率过高的惩罚, 没有考虑到速率过高的惩罚. 文献 [9] 提出了一种基于博弈的联合功率与速率控制算法, 在速率与功率控制中同时引入动态博弈, 解决传输速率与功率的最优化问题. 但是这种分别为功率和速率设计效用函数的分层博弈模型过程复杂且不尽合理. 文献 [10] 采用一种对数函数作为效用函数, 提出联合功率和速率控制博弈算法, 但是在该模型中没有分析是否存在 Nash equilibrium. 文献 [11] 采用经典效用函数, 提出了联合功率和速率控制博弈算法, 但是该模型中存在多个 Nash equilibrium 点, 对于功率和速率的惩罚因子设置过于简单. 文献 [12] 在 CDMA 网络中, 基于博弈论及代价函数, 提出了一种高效分布式的联合速率和功率的分配算法, 并证明了该算法可以收敛到唯一的 Nash equilibrium 点, 并扩展到多蜂窝模型实现最优基站分配.

基于以上研究, 文献 [13] 在主次用户共享带宽的认知无线网络上行链路中, 使用博弈论模型对其资源进行分配; 每个主用户使用固定的传输速率并通过功率控制达到其目标的信干噪比 (signal-to-interference-noise ratio, SINR), 与此同时次用户通过联合控制其传输速率和发射功率最大化自身效用. 但是, 该作者为功率和速率设置同一个代价因子, 并没有考虑功率和速率资源的差异, 以及传输速率和发射功率是动态变化的, 这样影响了系统的信噪比和容量.

本文在文献 [13] 的基础上, 分别为功率和速率设置代价函数 (双重代价因子), 优化后的效用函数对自私用户的功率速率惩罚更为合理, 并且我们证明了在该博弈下存在唯一的 Nash equilibrium, 进一步, 本文给出了求解最优功率速率的迭代算法. 仿真表明, 相比文献 [13], 在不干扰主用户通信的情况下, 次用户的发送功率有所下降, 传输速率有所提高, SINR 得到了改进, 并获得了较高的效用, 在保证次用户的服务质量下提高了系统容量.

本文其他内容安排如下: 第 2 节介绍了系统模型; 在第 3 节中提出了功率控制和速率分配的博弈模型; 第 4 节证明了该博弈算法 Nash equilibrium 的存在性和唯一性; 在第 5 节中给出了功率速率更新算法以及流程图; 第 6 节对算法进行了仿真分析以及与文献 [13] 的性能作了比较; 最后是全文总结.

2 系统模型

考虑如图 1 所示的主次用户共享网络模型. 主用户网络为一个单基站 (BSP) 的蜂窝小区, 具有 k ($k = 1, 2, \dots, N$) 个主用户 (PU), 其覆盖半径为 R . 主用户网络的覆盖范围内, 在有一个未授权的认知网络 (次用户网络), 其覆盖半径为 r , 具有 j ($j = 1, 2, \dots, M$) 个次用户 (SU), 他们都与次用户基站 (BSS) 通信. 假设主用户和次用户随机分布在他们各自网络的覆盖范围. 设次用户与主用户共享带宽为 W , 次用户 j 到次用户基站的信道增益为 h_j , 次用户 j 到主用户基站的信道增益为 g_j , 则次用户 j 的信干噪比 (SINR) 表示为

$$\gamma_j = \frac{W}{r_j} \frac{h_j p_j}{\sum_{i \neq j, i \in M} h_i p_i + N_0}, \quad (1)$$

其中, p_j, r_j 分别表示其功率和速率, N_0 表示次用户基站的噪声功率.

图 1 网络模型图

Figure 1 Networks model

为方便后面与文献 [13] 的比较, 我们定义次用户 j 在其基站的归一化干扰加噪声与其直接信道增益 h_j 的比值 I_j 为

$$I_j = \sum_{i \neq j, i \in M} \frac{h_i p_i}{h_j} + \frac{N_0}{h_j}, \quad (2)$$

注意到 I_j 是关于次用户发射功率的函数, 受其直接信道增益和来自其他用户干扰的影响. 为了简便, 此时次用户 j 的 SINR 可以改写为

$$\gamma_j = \frac{W p_j}{r_j I_j}. \quad (3)$$

本文针对次用户网络中的资源分配问题, 关于主用户网络的相关处理与文献 [13] 相同, 不再赘述, 本文中的资源主要是指发射功率和传输速率, 无线通信系统中, 为了承载不同类型的业务, 需要在传统的功率控制基础上, 联合分配传输速率, 而且研究表明联合的资源分配效率更高. 下面重点讨论次用户网络中的联合功率控制与速率分配方案, 包括博弈模型、Nash equilibrium 的存在性与唯一性及更新算法.

3 联合功率控制与速率分配博弈模型

对于次用户联合功率控制与速率分配博弈模型 (non-cooperative power control and rate allocation game with pricing, NPRGP) 定义为 $G = \langle M, \{(P_j(\mathbf{p}_{-j}), R_j)\}, \{u_j\}\rangle$, 其中, $M = \{1, \dots, M\}$ 表示次用户的个数, 即参与博弈的用户数, R_j 表示数据速率的策略空间, $P_j(\mathbf{p}_{-j}) = \{p_j : p_j \in P_j, \sum_{j \in M} g_j p_j \leq Q\}$ 表示功率的策略空间, u_j 表示次用户 j 的联合效用函数, 可记为 $u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j}, r_j, \mathbf{r}_{-j})$. 因此, 为了使联合效用最大, 每个次用户需要解决如下的优化问题:

$$\max_{(P_j, R_j)} u_j(p_j, \mathbf{p}_{-j}, r_j, \mathbf{r}_{-j}), \forall j \in M. \quad (4)$$

在次用户网络中, 不仅次用户的传输速率和发射功率都是可变的, 而且功率和速率资源存在明显的差异. 每个次用户都应有一个关于速率和功率的效用函数, 每个用户都在其功率和速率的策略空间内最大化其效用. 为此, 我们在文献 [13] 的效用函数上作了改进, 改进后的次用户 j 的效用函数为

$$u_j = \log \left(I_j r_j + \frac{\alpha}{\beta} p_j \right) - \frac{\alpha \lambda_{1,j}}{2} \frac{p_j}{I_j} - \frac{\beta \lambda_{2,j}}{2} I_j r_j, \quad (5)$$

在这个效用函数中 $\lambda_{1,j}, \lambda_{2,j}$ 表示代价因子 (双重代价因子), 其中, $\lambda_{1,j} = \frac{p_j g_j}{Q}$ 表示功率的代价因子; Q 为主用户能承受的干扰门限, $\lambda_{2,j} = \frac{r_j}{r_j^{\text{tar}}}$ 表示速率的代价因子, r_j^{tar} 为最大传输速率. 为了匹配功率和速率的数量级我们引入常数 α, β (其中 $20 \leq \alpha \leq 40, \beta = 10^{-5}$), 所以上式可以改写为

$$u_j = \log \left(I_j r_j + \frac{\alpha}{\beta} p_j \right) - \frac{\alpha p_j^2 g_j}{2 I_j Q} - \frac{\beta I_j r_j^2}{2 r_j^{\text{tar}}}, \quad (6)$$

其中, 第 1 项为次用户的净收益 (即信道容量), 后两项通过代价系数来控制次用户的自私行为, 第 2 项主要惩罚功率过大的自私用户, 第 3 项主要惩罚速率过大的自私用户. 我们假设次用户的发射功率和传输速率都受到约束, 即都是有界的, $P_j = \{p_j : p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}\}$, $R_j = \{r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}\}$.

为保证不干扰主用户通信, 我们考虑干扰温度约束. 将主用户 (PU) 接收来自次用户 (SU) 的干扰功率表示为 $\sum_{j \in M} g_j p_j$ 由次用户产生的干扰功率必须小于门限 Q , 所以次用户的功率限制可以表示为

$$\sum_{j \in M} g_j p_j \leq Q. \quad (7)$$

4 Nash equilibrium 的存在性与唯一性证明

我们根据文献 [14] 中的定义和文献 [15] 中的定理来证明本文提出的博弈模型 NPRGP Nash equilibrium 的存在性和唯一性.

定义 1 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, 没有一个参与者可以单方面提高它自身的效用, 即

$$u_j(S_j^*, S_{-j}^*) \geq u_j(S_j, S_{-j}^*), \forall j \in N, \quad (8)$$

对于所有的 $S_j \in S$ 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 Nash equilibrium, 其中, $S_{-j}^* = (S_1^*, S_2^*, \dots, S_{j-1}^*, S_{j+1}^*, \dots, S_N^*)$ 表示 N 个博弈参与者除了 j 以外其他参与者选择的策略组合. Nash equilibrium 是一个博弈的“稳定”解, 即没有一个决策者可以仅通过自己的决策来改善其效用.

定理 1 (存在性) 在本文的博弈 $G = \langle M, \{(P_j, R_j)\}, \{u_j\} \rangle$ 中, 如对所有的参与者 $j = 1, 2, \dots, M$ 均有以下条件成立.

- (1) 所有的参与者的策略空间是非空的、凸的和紧致集合.
- (2) u_j 是连续的拟凹函数.

则博弈 $G = \langle M, \{(P_j, R_j)\}, \{u_j\} \rangle$ 存在 Nash equilibrium.

证明 对于本文的博弈 $G = \langle M, \{(P_j, R_j)\}, \{u_j\} \rangle$, 有发射功率 $P_j = \{p_j : p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}\}$, 传输速率 $R_j = \{r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}\}$, 因此满足第 (1) 个条件. 下面对上述第 (2) 个条件作出相应证明.

对于式 (6) 中的模型, 对 p_j 求一阶偏导得到

$$\frac{\partial u_j}{\partial p_j} = \frac{\alpha}{\beta I_j r_j + \alpha p_j} - \frac{\alpha p_j g_j}{I_j Q}, \quad (9)$$

对式 (9) 再求 p_j 的偏导

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial^2 p_j} = \frac{-\alpha^2}{(\beta I_j r_j + \alpha p_j)^2} - \frac{\alpha g_j}{I_j Q}, \quad (10)$$

由式 (10) 可以得到 $\frac{\partial^2 u_j}{\partial^2 p_j} \leq 0$, 因此 u_j 是关于 p_j 的连续拟凹函数.

同理可得

$$\frac{\partial u_j}{\partial r_j} = \frac{I_j}{I_j r_j + \frac{\alpha}{\beta} p_j} - \frac{\beta I_j r_j}{r_j^{\text{tar}}}, \quad (11)$$

对式 (11) 再求 r_j 的偏导

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial^2 r_j} = \frac{-I_j^2}{\left(I_j r_j + \frac{\alpha}{\beta} p_j\right)^2} - \frac{\beta I_j}{r_j^{\text{tar}}}, \quad (12)$$

易知 $\frac{\partial^2 u_j}{\partial^2 r_j} \leq 0$, 因此 u_j 是关于 r_j 的连续拟凹函数.

综上所述, 本文 NPRGP 模型 $G = \langle M, \{(P_j, R_j)\}, \{u_j\} \rangle$ 存在 Nash equilibrium 解 $(S_1^*, S_2^*, \dots, S_N^*) = (\{p_1^*, r_1^*\}, \{p_2^*, r_2^*\}, \dots, \{p_N^*, r_N^*\})$.

定理2 (唯一性) 对于本文中博弈模型 $G = \langle M, \{(P_j, R_j)\}, \{u_j\} \rangle$, 若其最佳响应函数 $v(S) = \{v_1(S), v_2(S), \dots, v_N(S)\}$ 是一个标准函数^[15], 根据定理 1 得出存在唯一的 Nash equilibrium 解 $(S_1^*, S_2^*, \dots, S_N^*)$.

证明 对于本文的博弈模型 $G = \langle M, \{(P_j, R_j)\}, \{u_j\} \rangle$, 因为 $P_j = \{p_j : p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}\}$, $R_j = \{r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}\}$, 我们发现式 (9) 是关于 p_j 的严格单调递减函数, 即

$$\frac{\partial u_j}{\partial p_j} \begin{cases} > 0, & p_j^{\min} < p_j < p_j^*, \\ = 0, & p_j = p_j^*, \\ < 0, & p_j^* < p_j < p_j^{\max}, \end{cases} \quad (13)$$

由式 (13) 可以看出, 显然有且只有唯一的 $p_j^* \in [p_j^{\min}, p_j^{\max}]$, 使得 $\frac{\partial u_j}{\partial p_j} \Big|_{p_j=p_j^*} = 0$, 此时 p_j^* 的取值是唯一的, 即 Nash equilibrium 满足唯一性. 按上述方法可证明 r_j^* 的取值也是唯一的.

5 功率速率联合更新算法

首先, 当 $p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}$, $r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}$ 时, 对次用户 j 来说, 发射功率最优问题就是从功率策略空间 $p_j \in [p_j^{\min}, p_j^{\max}]$ 找到一个 p_j^* 使得 u_j 最大.

利用上述的效用函数, 根据功率最优解在 $\frac{\partial u_j}{\partial p_j} = 0$ 得到, 即令

$$\frac{\partial u_j}{\partial p_j} = \frac{\alpha}{\beta I_j r_j + \alpha p_j} - \frac{\alpha p_j g_j}{I_j Q} = 0. \quad (14)$$

对于用户 j 的传输速率 r_j^* 的最优问题, 同样可以令

$$\frac{\partial u_j}{\partial r_j} = \frac{I_j}{I_j r_j + \frac{\alpha}{\beta} p_j} - \frac{\beta I_j r_j}{r_j^{\text{tar}}} = 0. \quad (15)$$

由式 (14) 和 (15) 整理得到

$$\begin{cases} \alpha g_j p_j^2 + \beta I_j r_j g_j p_j - I_j Q = 0, \\ \beta I_j r_j^2 + \alpha p_j r_j - r_j^{\text{tar}} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

由式 (16) 解得 p_j, r_j ,

$$\begin{cases} p_j = \sqrt{\frac{I_j Q^2}{g_j(\alpha Q + \beta g_j r_j^{\text{tar}})}}, \\ r_j = \sqrt{\frac{g_j (r_j^{\text{tar}})^2}{I_j(\alpha Q + \beta g_j r_j^{\text{tar}})}}. \end{cases} \quad (17)$$

由式 (17) 我们给出了功率速率迭代公式表示如下:

$$(\mathbf{p}^{n+1}, \mathbf{r}^{n+1}) = (\mathbf{T}^p(\mathbf{p}^{n+1}, \mathbf{r}^{n+1}), \mathbf{T}^r(\mathbf{p}^{n+1}, \mathbf{r}^{n+1})), \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{T}_j^p(\mathbf{p}, \mathbf{r}) = \sqrt{\frac{I_j Q^2}{g_j(\alpha Q + \beta g_j r_j^{\text{tar}})}}, \\ \mathbf{T}_j^r(\mathbf{p}, \mathbf{r}) = \sqrt{\frac{g_j (r_j^{\text{tar}})^2}{I_j(\alpha Q + \beta g_j r_j^{\text{tar}})}}. \end{cases} \quad (19)$$

其次, 当 $p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}$, $r_j^{\max} < r_j$ 或者 $r_j < r_j^{\min}$ 时, 我们令 $r_j^{\max} = r_j^{\text{bound}}$ 或者 $r_j^{\min} = r_j^{\text{bound}}$. 我们用 r_j^{bound} 替换式 (16) 中的第一个公式的 r_j 得到如下公式:

$$\alpha g_j p_j^2 + \beta I_j r_j^{\text{bound}} g_j p_j - I_j Q = 0, \quad (20)$$

由式 (20) 解得功率为

$$\mathbf{T}_j^p(\mathbf{p}) = \frac{-\beta I_j g_j r_j^{\text{bound}} + \sqrt{I_j g_j (4\alpha Q + \beta^2 I_j g_j (r_j^{\text{bound}})^2)}}{2\alpha g_j}. \quad (21)$$

此时, 更新功率的迭代公式表示为

$$p_j^{n+1} = \max \{p_j^{\min}, \min \{p_j^{\max}, \mathbf{T}_j^p(\mathbf{p}^n)\}\}. \quad (22)$$

最后, 当 $r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}$, $p_j^{\max} < p_j$ 或者 $p_j < p_j^{\min}$ 时, 我们同样可以令 $p_j^{\max} = p_j^{\text{bound}}$ 或者 $p_j^{\min} = p_j^{\text{bound}}$. 同样我们用 p_j^{bound} 替换式 (16) 中的第二个公式的 p_j 得到如下公式:

$$\beta I_j r_j^2 + \alpha p_j^{\text{bound}} r_j - r_j^{\text{tar}} = 0, \quad (23)$$

由式 (23) 解得速率为

$$\mathbf{T}_j^r(\mathbf{p}) = \frac{-\alpha p_j^{\text{bound}} + \sqrt{\alpha^2 (p_j^{\text{bound}})^2 + 4\beta I_j r_j^{\text{tar}}}}{2\beta I_j}. \quad (24)$$

此时, 更新速率的迭代公式表示为

$$r_j^{n+1} = \max \{r_j^{\min}, \min \{r_j^{\max}, \mathbf{T}_j^r(\mathbf{p}^n)\}\}. \quad (25)$$

根据上述功率速率更新表达式, 我们设计了功率和速率联合迭代算法如算法 1 所示, 图 2 为相应算法的流程图.

算法 1

- 1 设定初始迭代次数 $t = 0$, 在功率的取值范围内随机选取一组初始功率值: $\mathbf{p}^0 = (p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0)$.
- 2 在每次迭代 t_k 时, 根据式 (18) 更新功率速率.
 - (a) 当 $p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}$ 且 $r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}$ 时, 此时令 $p_j^k = p_j, r_j^k = r_j$.
 - (b) 当 $p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}$ 且 $r_j^{\max} < r_j$ 或者 $r_j < r_j^{\min}$ 时, 此时令速率 $r_j^k = r_j^{\max}$ 或 $r_j^k = r_j^{\min}$, 功率根据式 (22) 更新.
 - (c) 当 $r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}$ 且 $p_j^{\max} < p_j$ 或者 $p_j < p_j^{\min}$ 时, 此时令功率 $p_j^k = p_j^{\max}$ 或者 $p_j^k = p_j^{\min}$, 速率根据式 (25) 更新.
 - (d) 当 $p_j^{\max} < p_j$ 或者 $p_j < p_j^{\min}$ 且 $r_j^{\max} < r_j$ 或者 $r_j < r_j^{\min}$ 时, 此时令 $p_j^k = p_j^{\max}$ 或者 $p_j^k = p_j^{\min}$ 且速率 $r_j^k = r_j^{\max}$ 或者 $r_j^k = r_j^{\min}$.
- 3 验证 $\sum_{j \in M} g_j p_j \leq Q$ 是否满足, 如果满足, 则进入下一步, 否则, 则令 $p_k = p_{k-1} - \Delta p$, 然后返回第 2 步.
- 4 将功率速率与上一次迭代结果值比较, 如有 $|p_k - p_{k-1}| + |r_k - r_{k-1}| < \varepsilon$ 成立, 则结束算法, 否则返回第 2 步中, 其中 ε 为精度误差.

图 2 算法流程图

Figure 2 Algorithm flowchart

6 性能仿真与分析

现在我们通过 Matlab 仿真来分析在具有一个主用户网络和一个认知无线网络上行链路中次用户功率控制和速率分配情况. 假设主次用户基站覆盖半径分别为 $R=1000$ m 和 $r=300$ m, 10 个主用户

图 3 发射功率, 传输速率, 信干噪比, 效用的收敛曲线

Figure 3 The convergence curve of transmit power, transmission rate, SINR and utility

和 10 个次用户分别随机分布在主次用户网络各自覆盖的范围内。

仿真中, 为了与文献 [13] 比较性能, 因此我们参数的设置与文献 [13] 类似, 主次用户共享的带宽为 10^6 Hz, 高斯白噪声 $N_0 = 10^{-12}$ W, 主用户能承受的干扰门限是噪声功率的 10 倍, 即取 $Q = 10 \times N_0 = 10^{-11}$ W. 进一步, 次用户 j 到其次用户基站的信道增益 $h_j = \xi/d_j^\eta$, 到主用户基站的信道增益 $g_j = \xi/L_j^\eta$ 其中 d_j, L_j 分别表示次用户 j 到其次用户基站的距离和到主用户基站的距离, $\eta = 4$ 是路径损耗指数, ξ 表示功率基于阴影衰落变化指数 $\xi = 0.097$. 我们设定参数 $\alpha = 30, \beta = 10^{-5}$, 精度误差 $\varepsilon = 10^{-12}$, $\Delta p = 0.01$. 此外, 我们假设次用户功率和速率范围分别为 $p_j \in [10^{-6}, 2]$ W, $r_j \in [0.1, 96000]$ bps, 速率的最大值 $r^{\text{tar}} = 96000$ bps.

图 3 显示了 3 个次用户的发射功率、传输速率、信干噪比以及效用随迭代次数增加到收敛达到 Nash equilibrium 的变化情况. 3 个次用户距离主用户基站的距离由远及近分别为 $L = [400, 390, 380]$ m, 距离次用户基站由近及远分别为 $d = [100, 110, 120]$ m, 次用户功率的初始值在其策略空间内随机取得. 由图 3 可以看出, 3 个次用户的功率速率达到均衡后均在其策略空间内, 且距离次用户基站较近的用户由于信道条件较好, 功率更低, 速率更高, 相应的 SINR 也更高, 更好地保证了次用户的服务质量. 相反, 距离次用户基站较远的用户, 由于信道条件较差, 所以需要更高的发射功率才能保证服务质量, 由于其发射功率较高导致其效用高于距离基站较近的用户.

图 4~7 为本文方案与参考文献 [13] 的对比仿真结果. 图 4 为次用户发射功率比较, 图 5 为传输速率比较, 图 6 为 SINR 比较, 图 7 为效用方面比较.

由图 4~7 可以看出, 通过本文改进的方法次用户的发射功率较文献 [13] 有所降低, 而传输速率、SINR 以及效用都有所提高. 这是因为本文算法分别为次用户功率和速率设定不同的惩罚因子, 使得在惩罚自私用户功率和速率时更加均衡合理, 使得次用户在满足目标接收信干噪比的前提下, 获得

图 4 次用户发射功率比较

Figure 4 The comparison of transmit power of secondary users

图 5 次用户传输速率比较

Figure 5 The comparison of transmission rate of secondary users

图 6 次用户 SINR 比较

Figure 6 The comparison of SINR of secondary users

图 7 次用户效用比较

Figure 7 The comparison of utility of secondary users

了更低的发射功率, 更高的传输速率, 以及更高的效用, 减小了主用户受到的干扰, 更好地保证了次用户的服务质量。

接下来, 我们比较次用户发射功率和效用与其距离主用户基站的关系. 假设有 3 个次级用户, 他们距离次用户基站的距离依次为 100, 150, 200 m, 距离主用户基站的距离都从 200 m 变化到 650 m. 由图 8 和 9 可以看出, 在距离次用户基站的距离相同条件下, 次用户距离主用户基站距离越大, 其发射功率越高, 效用越大, 这是因为距离主用户基站距离越大, 对主用户的干扰就越小, 相应的次用户的发射功率就可以增大以获得更好的 SINR, 其效用也就越大. 此外, 在距离主用户基站距离相同的情况, 距离次用户基站越近的用户, 其信道条件越好, 相应的发射功率越低, 由于其发射功率较低, 导致其效用略低于距离次用户基站较远的用户。

图 8 发射功率与距离主用户基站关系

Figure 8 The relations between transmit power and the distance from SUs to the BSP

图 9 次用户效用比较

Figure 9 The relations between utility and the distance from SUs to the BSP

7 总结

在主用户共享带宽的认知无线网络上行链路中, 本文讨论了基于博弈论模型的次用户功率和速率的联合控制问题, 提出了一种联合功率控制与速率分配博弈研究算法. 该算法采用双重代价因子, 分别为功率和速率设定非线性代价函数, 使得对自私用户的功率速率惩罚更为合理. 仿真结果表明, 该算法在不干扰主用户通信的情况下, 不仅降低次用户的发射功率, 也减少主用户受到的干扰, 还降低了次用户彼此之间的干扰, 而且使得次用户在较小的发射功率下获得较大的传输速率以及较高的 SINR, 同时使次用户获得较高的效用值, 在保证了次用户的服务质量前提下, 提高了次用户系统容量.

参考文献

- 1 Wang B, Wu Y, Liu K J. Game theory for cognitive radio networks: an overview. *Comput Networks*, 2010, 54: 2537–2561
- 2 Saraydar C U, Mandayam N B, Goodman D. Efficient power control via pricing in wireless data networks. *IEEE Trans Commun*, 2002, 50: 291–303
- 3 Kang X, Zhang R, Motani M. Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: a stackelberg game approach. *IEEE J Sel Area Commun*, 2012, 30: 538–549
- 4 Jiang L, He C. Optimal price-based power control algorithm in cognitive radio networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2014, 13: 5909–5920
- 5 Xie X, Yang H, Vasilakos A V, et al. Fair power control using game theory with pricing scheme in cognitive radio networks. *J Commun Netw*, 2014, 16: 183–192
- 6 Yang C G, Sheng M, Dong Y J, et al. Network-assisted optimal rate control methods in cognitive networks (in Chinese). *J Commun*, 2013, 34: 126–135 [杨春刚, 盛敏, 董延杰, 等. 认知网络中基于网络辅助的速率控制方法. 通信学报, 2013, 34: 126–135]
- 7 Zhou P, Yuan W, Liu W, et al. Joint power and rate control in cognitive radio networks: a game-theoretical approach. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Beijing, 2008. 3296–3301
- 8 Ma L, Zhu Q. A Game-theoretic joint rate and power control based on interference management (in Chinese). *Signal Process*, 2012, 28: 26–32 [马良, 朱琦. 基于干扰管理的功率速率联合控制博弈方法. 信号处理, 2012, 28: 26–32]
- 9 He G, Bai P, Peng W D, et al. Joint rate and power control based on dynamic game theory in data link system (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univ*, 2013, 48: 473–480 [贺刚, 柏鹏, 彭卫东, 等. 数据链中基于动态博弈的联合功

- 率与速率控制. 西南交通大学学报, 2013, 48: 473–480]
- 10 Shashika Manosha K B, Rajatheva N. Joint power and rate control for spectrum underlay in cognitive radio networks with a novel pricing scheme. In: Proceedings of IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), Ottawa, 2010. 1–5
 - 11 Musku M R, Chronopoulos A T, Popescu D C, et al. A game-theoretic approach to joint rate and power control for uplink CDMA communications. IEEE Trans Commun, 2010, 58: 923–932
 - 12 Javan M R, Sharafat A R. Efficient and distributed SINR-based joint resource allocation and base station assignment in wireless CDMA networks. IEEE Trans Commun, 2011, 59: 3388–3399
 - 13 Javan M R, Sharafat A R. Distributed joint resource allocation in primary and cognitive wireless networks. IEEE Trans Commun, 2013, 61: 1708–1719
 - 14 Fudenberg D, Tirole J. Game Theory. Cambridge: MIT Press Books, 1991
 - 15 Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems. IEEE J Sel Area Commun, 1995, 13: 1341–1347

Joint power control and rate allocation game algorithm with dual pricing factors in cognitive radio networks

XIE XianZhong, HE Lu*, YANG HeLin & MA Bin

Institute of Broadband Access Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

*E-mail: helcqupt@163.com

Abstract This paper addresses the problem of resource allocation for distributed joint secondary users (SUs) in the uplinks of cognitive radio networks (CRNs) where SUs share bandwidth with primary users (PUs). A game algorithm that provides distributed joint power control and rate allocation with dual pricing factors is proposed. First, to reduce interferences among SUs, the pricing factors for power and rate are defined individually, to control each SU's selfish behavior more efficiently. Then, the existence and uniqueness of the Nash equilibrium (NE) in our utility function are proved theoretically. Lastly, the iterative algorithm for joint power control and rate allocation is provided, along with a flowchart. Simulation results show that, compared to previous approaches, the proposed algorithm can achieve higher utility and SU transmission rate gains under lower transmit power. Moreover, the system sum capacity will be improved while maintaining the quality of service (QoS) for PUs.

Keywords cognitive radio networks, game theory, dual pricing factors, transmit power, transmission rate

XIE XianZhong was born in 1966. He received his Ph.D. degree in communication and information systems from Xidian University, Xi'an, in 2000. He is currently with the School of Computer Science and Technology at Chongqing University of Posts and Telecommunications, China, as a Professor and Director of the Institute of Broadband Access Technologies. His research interests include MIMO precoding and CR networks.

HE Lu received her B.S. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications, China, in 2012. She is a postgraduate student at Chongqing University of Posts and Telecommunications, China, and will receive her M.S. degree in computer science and technology in 2015. Her research interests include cognitive radio networks, cooperative communications, and wireless communications.

YANG HeLin received his B.S. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications, China, in 2013. He is a postgraduate student at Chongqing University of Posts and Telecommunications, China, and will receive his M.S. degree in communication and information systems in 2016. His research interests include cognitive radio networks, cooperative communications, and wireless communications.

MA Bin received his M.S. degree in computer software and theory in 2007. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, China. His recent work focuses on spectrum handover in cognitive radio networks and vertical handoffs in heterogeneous wireless networks.