

OFDMA 认知无线网络中面向需求的频谱共享

张翅¹, 曾碧卿², 杨劲松¹, 谢晓虹¹

(1. 华南师范大学 计算机学院, 广东 广州 510631; 2. 华南师范大学 软件学院, 广东 佛山 528225)

摘要: 从满足次网络通信需求的角度, 设计一个两阶段模型, 求解 OFDMA 认知无线网络中频谱租赁与分配问题。模型第 1 阶段, 次基站收集次网络通信需求, 向多个主基站租用频谱资源。运用 Bertrand 博弈对主、次基站的交易行为进行建模, 并将纳什均衡作为最终定价方案。第 2 阶段, 基于纳什议价方案, 将次基站子载波和功率分配问题定义成非线性规划问题, 并通过拉格朗日乘数法进行求解。仿真实验表明, 相对于其他频谱共享方案, 所提方案高效地满足每个次用户的通信需求。

关键词: 认知无线电; 频谱租赁; Bertrand 博弈; 信道容量需求; 频谱分配; 频谱定价

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Requirements-oriented spectrum sharing for OFDMA cognitive radio networks

ZHANG Chi¹, ZENG Bi-qing², YANG Jin-song¹, XIE Xiao-hong¹

(1. School of Computer, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. School of Software, South China Normal University, Foshan 528225, China)

Abstract: Considering the satisfaction of the secondary network communication requirements, a two-stage model was proposed to address the spectrum leasing and allocation problem in OFDMA cognitive radio networks (CRN). At the first stage of the model, the secondary base station (SBS) collected channel capacity requirements of the secondary network, and rent the spectrum resource from multiple primary base stations (PBS). The trade behaviors between the PBS and the SBS were modeled with a Bertrand game, and adopted the Nash equilibrium as the pricing scheme. At the second stage, with the Nash bargaining solution (NBS), the subcarriers and power allocation problem were defined as a nonlinear programming problem, and obtained the solution by Lagrange multiplier method. Comparing with the other spectrum allocation schemes, simulation results show the proposed spectrum sharing scheme can satisfy each secondary user's communication requirements more fairly and efficiently.

Key words: cognitive radio; spectrum leasing; Bertrand game; channel capacity requirements; spectrum allocation; spectrum pricing

1 引言

动态频谱共享 (dynamic spectrum sharing) 使具备认知无线电 (CR, cognitive radio)^[1,2] 技术的认知用户/次用户 (SU, secondary user) 通过自适应调节传输参数, 共享原本只能被授权用户/主用户 (PU, primary user) 使用的频谱资源, 从而弥补了

传统静态管理模式频谱资源利用率不高的问题, 缓解了频谱资源紧缺的现状。认知无线网络 (CRN, cognitive radio networks) 作为促成这一频谱管理模式变革的通信范例, 已成为国内外学者的研究热点。

按照无线网络接入方式的不同, 可将动态频谱共享分为 Underlay 方式和 Overlay 方式^[3]。Underlay

收稿日期: 2014-04-25; 修回日期: 2015-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71272144); 广州市科技计划基金资助项目 (2013KP084)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(71272144); Science and Technology Program of Guangzhou (2013KP084)

方式的频谱共享在使用 CDMA 和 UWB 技术的 CRN 中较为常见^[4], 次用户能够通过评估主网络的干扰温度门限, 采用扩频技术, 将传输功率控制在干扰温度门限以下, 使用一段非常宽的频段以获得较高的传输速率; Overlay 方式频谱共享常出现在使用 FDMA、TDMA 和 OFDM 技术的 CRN 中^[5,6], 次用户侦测并使用当前未被 PU 占用的空闲频段, 即频谱空洞^[7], 接入无线网络, 并在主用户回到该段频谱时, 实施频谱迁移以切换至其他频段。这 2 种共享方式分别引出动态频谱共享研究中 2 个主要问题: 功率控制和频谱分配。除此之外, 由于在数据传输的过程中, 频谱资源是否可用的不确定性是动态频谱共享中的一大难题, 这促使另一种频谱共享方式的诞生: 频谱管理者允许次用户以一定的价格来获取授权许可, 从而保证频谱可用的确定性, 这种方式称作频谱交易/频谱租赁。其中的频谱定价成为动态频谱共享研究中另一重要问题。

文献[8,9]研究 CDMA CRN 中上行传输功率分配和功率控制问题, 其中, 基站设定每单位传输功率的价格, 每个次用户在保证自身传输功率低于干扰温度门限的前提下, 通过支付基站相应的成本完成上行数据传输。文献[10~12]针对 TDMA 等系统中频谱定价和分配问题, 基于寡头市场模型, 研究不同市场结构/拓扑结构的频谱分配问题, 主用户作为市场中的卖家对单位带宽的频谱予以定价, 并租用给次用户以获得最大收益, 次用户根据定价和能够获得 QoS 性能, 决定最大化自身效用的购买量, 主、次用户的博弈最终能够稳定在一个市场供需平衡的状态, 即市场均衡; 文献[13]针对多跳的认知无线网络, 提出基于时分复用的功率控制策略以获得最大端到端吞吐量。然而, 当前研究工作对于 OFDMA CRN 中的频谱定价和分配问题却鲜有涉及, 相关问题的研究需保证次用户传输功率低于主网络干扰温度门限, 同时考虑频率、功率维度的频谱分配。文献[14]提出一种分层模型, 研究功率和频谱分配问题, 然而频谱管理者(主用户)定价所依据的带宽需求并不来自于终端用户(次用户), 对带宽和功率采用了相同的定价, 功率控制问题同样被忽略。

此外, 基于定价的功率控制模型^[8,9], 主要基于信干噪比定义用户效用函数; 在基于定价的频谱分配研究中^[10~12,15], 通常认为次用户的效用函数和信道容量或频谱效率具有正相关关系, 和租用成本负

相关。只有部分文献^[14,16]从次网络需求的角度考虑次用户效用, 文献[14]在服务提供商对终端用户的功率分配中, 基于 Sigmoid 函数, 定义能够反映 QoS 满足程度的效用函数; 文献[16]针对包含延迟敏感型次用户的 3 种网络场景, 基于定价策略研究频谱接入控制。这部分工作并未考虑次用户/终端用户的信道容量需求。定义基于信道容量或信干噪比的效用函数, 能够使次基站在获得越多的频谱、功率资源时, 效用值越大。然而, 一方面, 满足该用户通信服务需求以外的过剩频谱可认为是资源浪费; 另一方面, 过剩的传输功率不仅增加系统干扰, 而且减短移动用户本身的电池使用寿命。文献[17]基于次网络用户的通信需求, 研究次用户合作频谱共享; 文献[18]同时考虑 QoS 需求和功率约束, 基于混合整数非线性规划研究功率控制和频谱分配以最大化系统总吞吐量, 然而, 这些工作并没有进一步研究频谱定价问题。

对此, 本文考虑次网络通信需求, 提出一种 OFDMA CRN 频谱定价和分配的两阶段模型。主要工作包括如下 3 个方面。

1) 模型第 1 阶段设计反映面向次网络频谱需求的次用户效用函数。

2) 基于 Bertrand 博弈理论设计面向需求的频谱租赁模型, 并设计次基站的频谱需求调整算法, 使次基站在多主基站采取纳什均衡定价时, 最优频谱租用数量恰好等于次网络需求。

3) 模型第 2 阶段面向次用户通信需求, 基于纳什议价方案, 从频率、功率和时间维度, 公平、高效地分配次基站频谱资源。

2 系统模型

2.1 主、次网络模型

在基于 OFDMA 技术的 CRN 中, M 个主网络拥有空闲频谱, 有意租售给次网络使用; 次网络基站(次基站)通过向多个主网络基站(主基站)租用频谱资源, 在控制次用户传输功率的基础上, 满足次用户的通信需求, 如图 1 所示。

具体而言, 次网络中包含 N 个次用户(SU), 其中每一个次用户 i ($i=1,2,\dots,N$) 都会向次基站发送信道容量需求 R_i , 以请求频谱资源用于自身通信服务。次基站收集所有次用户需求 $\sum_i^N R_i$, 并基于该需求和每个主基站 k ($k=1,2,\dots,M$) 所制定的频谱价

格 λ_k , 分别向不同主基站租用数量为 q_k 的 OFDMA 子载波, 这里假设所有子载波具有相等的带宽 w 。在此过程中, 这 M 个主网络中的每一个主基站 k , 作为卖家不断调整自身定价 λ_k , 直到自身收益不再增加, 此时频谱市场处于均衡状态。均衡状态下的频谱价格为 $(\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_M^*)$, 次基站的频谱需求为 $(q_1^*, q_2^*, \dots, q_M^*)$ 。次基站付费获得频谱资源后, 根据次用户需求 (R_1, R_2, \dots, R_N) 和传输功率阈值 p^{TOTAL} 分配每个次用户相应的子载波集合以及每个子载波上的传输功率, 以满足次用户的通信需求, 同时保证主网络通信不受干扰。

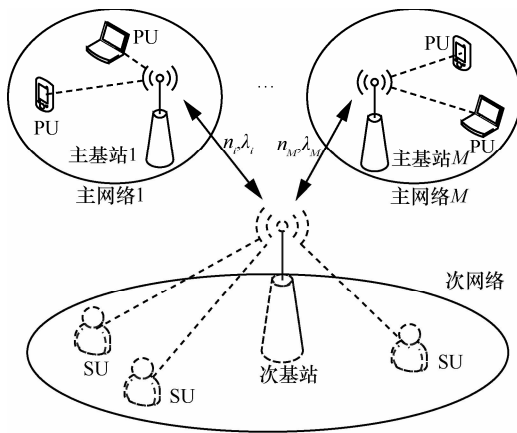


图 1 多主网络、单次网络的 CRN 模型

2.2 寡头市场和 Bertrand 博弈

针对包含多个主基站和单个次网络基站的主、次网络模型, 可以通过寡头市场理论, 理解频谱租赁过程中买家和卖家之间的交互行为。Bertrand 博弈作为寡头市场中的一种博弈, 用于对市场价格竞争行为进行建模, 以分析和获得各卖家的均衡定价策略。在基于 Bertrand 博弈的频谱交易市场中, 主基站作为寡头, 相互独立地做出决策: 调整商品的价格。在这类寡头市场中, 为避免由于价格较低的卖家能够占有全部市场, 引起卖家竞相降低商品价格直到最终利润为 0, 通常假设: 不同卖家的商品各具特色, 商品间并不能完全替代。当卖家 i 的需求函数为 $q_k = D_k(\lambda_k, \lambda_{-k})$, ($\lambda_{-k} = \lambda_1, \dots, \lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}, \dots, \lambda_N$, 下文使用相同表示法), 那么, i 在相应成本为 $\phi_k(D_k(\lambda_k, \lambda_{-k}))$ 时的收益可用式(1)表示, 相应的最优定价可通过对式(1)求极值获得。

$$u_k(\lambda_k, \lambda_{-k}) = \lambda_k D_k(\lambda_k, \lambda_{-k}) - \phi_k(D_k(\lambda_k, \lambda_{-k})) \quad (1)$$

基于 Bertrand 博弈模型, 对图 1 所示的主、次用户网络进行建模。在该频谱市场中, 每个主基站

作为一个与其他主基站存在博弈关系的寡头, 理性地调整频谱定价, 以追求自身收益最大化; 次基站作为买家, 根据自身需求和每个主基站的频谱定价, 确定租用不同卖家的频谱数量。频谱市场中, 主基站和次基站分别在市场竞争中, 不断地调整定价和频谱需求, 最终稳定于市场均衡; 主基站与主基站之间也在不断调整定价的价格竞争中, 稳定于纳什均衡。

由于主基站占有频谱, 拥有更高的频谱访问优先级。因此主基站作为“领导者”决定频谱价格 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$, 次用户作为“跟随者”基于频谱价格和需求函数决定租用量 $q = (q_1, q_2, \dots, q_M)$ 。领导者知道跟随者会对其策略做出反应, 因而在确定定价时, 会把跟随者的反应也考虑进去。对于这样的主基站决定频谱价格、次用户决定租用数量的交易过程, 可以通过逆向归纳法, 求解均衡点时的频谱定价和频谱需求。

3 第 1 阶段: 频谱需求与定价

在频谱定价与分配模型的第 1 阶段, 通过构建基于博弈论的价格竞争模型, 研究均衡状态下主基站的频谱定价和次基站的租用数量。首先, 设计次基站的效用函数, 以量化租用频谱对次网络的满足程度。次基站可以依据该效用函数, 确定特定通信需求和频谱价格, 子载波的需求函数 $D(R, \lambda)$ 。随后, 基于 Bertrand 博弈对主基站之间的定价博弈进行建模, 通过证明, 该非合作博弈能够收敛于纳什均衡, 并求解纳什均衡下的定价作为主基站的定价方案。

3.1 次用户效用和需求函数

次基站为满足所有次用户的信道容量需求 (R_1, R_2, \dots, R_N) , 当主网络干扰功率阈值为 p^{TOTAL} 和子载波平均信道增益为 h 时, 需向主基站租用的子载波数量为 C 。假设所有次用户使用相等功率 p^{TOTAL}/C 在不同子载波上传输, 根据香农定理, 次网络子载波需求 C 应满足式(2), 其中, 次用户使用 M -正交幅度调制^[19], 即 $\eta = -1.5/(\delta_z^2 \ln(5BER_{ij}))$ 。

$$R = \sum_{i=1}^N R_i = Cw \text{lb} \left(1 + \frac{p^{\text{TOTAL}}}{C} |h|^2 \eta \right) \quad (\text{bit/s}) \quad (2)$$

$$C = - \frac{\delta}{w \delta W \left(\frac{-2 \exp\left(\frac{-R}{\delta w}\right) R}{\delta w} \right) + 1} \quad (3)$$

通过求解等式(2), 可以获得次基站需要的子

载波总量, 其中, $\delta = p^{\text{TOTAL}} |h|^2 \eta$, $W(\cdot)$ 为 Lambert-W 函数。

在此基础上, 设计次基站的效用函数如下

$$u_{\text{SBS}}(\mathbf{q}) = u_1 + u_2 + u_3 \quad (4)$$

其中, $u_1 = \mu - \alpha(C - \sum_{k=1}^M q_k)^2$, $u_2 = -\frac{1}{2}(\sum_{k=1}^M q_k^2 + 2v \sum_{j \neq k}^M q_k q_j)$, $u_3 = -2v \sum_{k=1}^M q_k \lambda_k$, 这 3 个效用分量的含义如下。

1) u_1 表示租用频谱满足通信需求所能获得的效用, 当所租频谱恰好等于频谱需求时, u_1 能够获得最大收益。若租用的频谱总量少于频谱需求时, 次网络的通信质量不能保证; 若租用的频谱总量多于频谱需求, 则会造成频谱过剩, 资源利用率降低。这 2 种情形都将导致 u_1 减少。偏好系数 α 反映次基站对于满足需求的偏好程度, 即 α 越大, 每少/多租用一个子载波所损失的效用值越大; 此外, 为保证该部分效用值为正, 设定 $\mu (\mu > 0)$ 为其效用值的上限。

2) u_2 描述不同主基站所售频谱的相互可替代性^[10]。Bertrand 博弈中假设不同主基站租售的频谱不能完全替代, 因此, 引入频谱替代率 v , 以考虑不同主基站频谱的可替代性。替代率 $v \in [-1.0, 1.0]$ 的含义为: 当 $v=0$ 时, 次用户不能够在不同主基站的频谱间切换; 当 $v=1.0$ 时, 次用户可以在不同频谱间随意切换; 当 $v < 0$ 时, 次用户使用某段频谱时需要同时使用与之互补的频段。

3) u_3 表示向各主基站租用 $\mathbf{q}(\mathbf{q} = q_1, q_2, \dots, q_M)$ 数目的子载波所需支付的成本。

通过在次网络使用子载波进行传输的过程引入分时机制^[20], 将 $q_k (k=1, 2, \dots, M)$ 的整数作用域扩展到实数范围。具体而言, 对于非整数租用量 $q_k = \lfloor q_k \rfloor + (q_k - \lfloor q_k \rfloor)$, $\lfloor q_k \rfloor$ 为 q_k 的整数部分, $(q_k - \lfloor q_k \rfloor)$ 为小数部分, 其中, 小数部分可认为是所租用的某一子载波 j 上, i 的分时因子, 即对每 L 个 OFDM 符号 (L 是一个非常大的数), i 只使用子载波 j 上的 $L(q_i - \lfloor q_i \rfloor)$ 个符号进行传输。基于此, 在给定频谱定价 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ 时, 有如下结论成立。

定理 1 效用函数为式(4)的次基站, 其对应的分时子载波需求函数为

$$D_k(\lambda) = D_1 \lambda_k + D_2 (\lambda_{-k}), \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$\text{其中, } D_1 = \frac{1}{1-v} \left[\frac{2\alpha + v}{2\alpha M + 1 + v(M-1)} - 1 \right]; D_2(\lambda_{-k}) = \frac{1}{1-v} \left[2\alpha C - (2\alpha + v) \frac{2\alpha M C - \sum_{j \neq k} \lambda_j}{2\alpha M + 1 + v(M-1)} \right]$$

证明 由于效用函数(4)为凹函数, 即 $\frac{\partial^2 u_{\text{SBS}}(\mathbf{q})}{\partial q_i^2} < 0$ 。

因此只需要通过求解该函数的极大值, 便可获得: $q_k = D_1 \lambda_k + D_2 (\lambda_{-k}), k = 1, 2, \dots, M$ 。

得证。

3.2 主基站效用和集中式方案

对于包含多个主网络、单个次网络的网络模型, 在市场均衡状态下, 主基站 k 的供给量等于市场需求 $\mathcal{D}_k(\lambda)$, 此时 k 的效用为

$$u_k^{\text{PBS}}(\lambda_k, \lambda_{-k}) = \lambda_k \mathcal{D}_k(\lambda_k, \lambda_{-k}) - \beta_k \mathcal{D}_k(\lambda_k, \lambda_{-k}) \quad (6)$$

其中, 损失系数 β_k 表示主基站 k 租售每单位子载波主网络带来的损失 (如 QoS 降级)。在该频谱市场中, 主基站 k 的频谱定价 λ_k 会受到其他主基站定价 λ_{-k} 的影响, 同时也会影响其他主基站的定价。对此, 可以建立 Bertrand 博弈模型研究主基站之间的价格竞争。在相应的 Bertrand 博弈 $\Gamma = \langle \mathcal{M}, \mathcal{S}, u \rangle$ 中:

- 1) 博弈玩家集合 \mathcal{M} , 主基站集合 $\{1, 2, \dots, M\}$;
- 2) 玩家策略 $\lambda_k \in S_k$, 主基站 k 设定单位子载波的租售价格 $S_k = \{\lambda_k \mid \lambda_k > \beta_k, \lambda_k \in \mathbf{R}^+\}$, $k \in \mathcal{M}$;
- 3) 收益函数 $u_k(\lambda_k, \lambda_{-k})$, 主基站 k 设定频谱价格 λ_k 所能够获得的效用 $u_k^{\text{PBS}}(\lambda_k, \lambda_{-k})$ 。

主基站 $k (k \in \mathcal{M})$ 作为玩家在 Bertrand 博弈中不断调整自身定价 λ_k , 在满足特定条件时, 能够最终稳定在一个均衡状态, 这一状态被称作纳什均衡 (NE, Nash equilibrium)。

定义 1 (纳什均衡) 战略形式博弈 $\Gamma = \langle \mathcal{M}, \mathcal{S}, u \rangle$ 的纳什均衡是一个策略向量 $\lambda^* = (\lambda_k^*, \lambda_{-k}^*)$, λ^* 满足

$$u_i(\lambda_k^*, \lambda_{-k}^*) \geq u_i(\lambda_k, \lambda_{-k}^*), \quad \forall k \in \mathcal{M}, \forall \lambda_k \in S_k, \lambda_{-k}^* \in S_{-k} \quad (7)$$

定义表明, 当其他玩家选择纳什均衡中的策略时, 该玩家所能选择的最优策略便是纳什均衡中的策略, 即

$$\lambda_k^* \in B_k(\lambda_{-k}^*) = \arg \max_{\lambda_k \in S_k} u_k(\lambda_k, \lambda_{-k}^*), \quad \forall k \in \mathcal{M} \quad (8)$$

其中, $B_k(\cdot)$ 称作最优响应函数。然而, 并非任何战

略形式博弈都存在纳什均衡，文献[21]给出了纳什均衡的存在条件。

引理 1 如果对于战略形式博弈 $\Gamma = \langle \mathcal{M}, S, u \rangle$ 中的任意玩家 $k \in \mathcal{M}$ ，其策略集 S_k 是欧氏空间中非空的凸紧子集，效用函数 u_k 在策略集 S_k 上是拟凹连续的，那么该博弈存在纳什均衡。

定理 2 Bertrand 博弈 $\Gamma = \langle \mathcal{M}, S, u \rangle$ 存在纳什均衡。

证明 对于博弈 $\Gamma = \langle \mathcal{M}, S, u \rangle$ ，玩家的策略集 $\lambda_k \in \{\lambda_k \mid \lambda_k > \beta_k, \lambda_k \in \mathbf{R}^+\}$ 是非空的凸子集，并且将式(5)代入式(6)，可以证明 $u_k^{PBS}(\lambda_k)$ 为连续的凹函数，由定理 1 和式(8)可知，该博弈存在纳什均衡 $(\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_M^*)$ ，并且 $\lambda_k^* = \arg \max_{\lambda_k \in S_k} u_k^{PBS}(\lambda_k, \lambda_{-k}^*)$ ， $\forall k \in \mathcal{M}$ 。

得证。

也就是说，当所有网络参数都可知时（如存在中心控制实体），可将式(5)代入线性方程组(9)进行求解，获得每个主基站的纳什均衡定价策略式(10)，每个主基站租赁给次基站的子载波数可根据次基站的需求函数(5)获得。

$$\frac{\partial u_k^{PBS}(\lambda)}{\partial \lambda_k} = 0, k=1,2,\dots,M \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \lambda_k^* &= \arg \max_{\lambda_k \in S_k} u_k^{PBS}(\lambda_k, \lambda_{-k}^*) \\ &= \frac{\beta_k}{2} - \frac{D_2(\lambda_{-k}^*)}{2D_1}, \forall k=1,2,\dots,M \end{aligned} \quad (10)$$

例如，对于 2 个主基站的情形，相应的线性方程组如式(11)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{1-v} [2\alpha C - (2\alpha + v) \frac{2\alpha MC - \lambda_2}{2\alpha M + 1 + v(M-1)}] + \frac{2\lambda_1 - \beta_1}{1-v} \\ &\quad [\frac{2\alpha + v}{2\alpha M + 1 + v(M-1)} - 1] = 0 \\ &\frac{1}{1-v} [2\alpha C - (2\alpha + v) \frac{2\alpha MC - \lambda_1}{2\alpha M + 1 + v(M-1)}] + \frac{2\lambda_2 - \beta_2}{1-v} \\ &\quad [\frac{2\alpha + v}{2\alpha M + 1 + v(M-1)} - 1] = 0 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

3.3 基于动态博弈的分布式方案

在实际的 CRN 中，不同主网络中的主基站之间并不能观察到彼此所获收益，而且对彼此当前的策略也不知情。因此，需要设计相应的分布式方

案，获得最优定价。基于动态 Bertrand 博弈的分布式方案，将 Bertrand 博弈过程进行多次迭代，对于每一次迭代 t ，每一个主基站 k 的频谱定价为 $\lambda_k[t]$ ，其他主基站也同时进行定价： $\lambda_{-k}[t]$ 。主基站 k 在进入下一次迭代 $t+1$ 时，根据获得信息的不同，以不同的更新策略调整本次迭代的频谱定价，迭代式地逼近纳什均衡策略。

1) 当 k 能够获得前一次迭代中其他玩家的历史策略，那么其定价的更新策略可表示为

$$\lambda_k[t+1] = B_k(\lambda_{-k}[t]) = \arg \max_{\lambda_k \in S_k} u_k^{PBS}(\lambda_k, \lambda_{-k}[t]), \forall k \in \mathcal{M} \quad (12)$$

2) 当 k 只能基于本地信息进行学习，以调整频谱定价，相应的学习策略如下

$$\lambda_k[t+1] = \lambda_k[t] + \sigma_k \left(\frac{\partial u_k^{PBS}}{\partial \lambda_k} \right) \quad (13)$$

其中， σ_k 表示更新步长， $\sigma_k \in [0,1]$ 。

边际收益 $\frac{\partial u_{PBS}}{\partial \lambda}$ 可以通过请求次基站返回 D_1 的值，计算式(14)获得。随着迭代次数的增加，主用户的效用值接近稳定，在设定合适的稳定阈值 τ 的基础上，判断当式(15)成立时，可认为动态 Bertrand 博弈达到均衡状态。此外，也可以通过观察微调定价时自身效用值的变化幅度，由式(16)计算边际收益，其中， ε 表示微调幅度（如 $\varepsilon=10^{-4}$ ），在满足式(17)的条件时停止更新。

$$\frac{\partial u_k^{PBS}(\lambda)}{\partial \lambda_k} = \mathcal{D}_k(\lambda) + (\lambda_k - \beta_k) \frac{\partial \mathcal{D}_k(\lambda)}{\partial \lambda_k} \quad (14)$$

$$= \mathcal{D}_k(\lambda) + (\lambda_k - \beta_k) D_1$$

$$\mathcal{D}_k(\lambda) + (\lambda_k - \beta_k) D_1 < \tau \quad (15)$$

$$\frac{\partial u_{PBS}}{\partial \lambda} \approx \frac{u_{PBS}(\lambda[t] + \varepsilon) - u_{PBS}(\lambda[t] - \varepsilon)}{2\varepsilon} \quad (16)$$

$$u_{PBS}(\lambda[t] + \varepsilon) - u_{PBS}(\lambda[t] - \varepsilon) < \tau \quad (17)$$

3.4 动态博弈稳定性分析

通过对动态博弈的稳定性进行分析，可以确定该动态博弈是否能够在收敛至稳定状态时，到达纳什均衡。可将式(12)和式(13)所示的 2 种更新策略，视作 2 种不同的自映射函数。由 Routh-Hurwitz 判据可知，自映射函数稳定当且仅当其所有的特征值

ζ_k 位于复平面的单位圆内, 即 $|\zeta_k| < 1 (k=1, 2, \dots, M)$ 。为求解自映射函数的特征值, 定义如式(18)所示的雅克比矩阵。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_1[t+1]}{\partial \lambda_1[t]} & \frac{\partial \lambda_1[t+1]}{\partial \lambda_2[t]} & \dots & \frac{\partial \lambda_1[t+1]}{\partial \lambda_M[t]} \\ \frac{\partial \lambda_2[t+1]}{\partial \lambda_1[t]} & \frac{\partial \lambda_2[t+1]}{\partial \lambda_2[t]} & \dots & \frac{\partial \lambda_2[t+1]}{\partial \lambda_M[t]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \lambda_M[t+1]}{\partial \lambda_1[t]} & \frac{\partial \lambda_M[t+1]}{\partial \lambda_2[t]} & \dots & \frac{\partial \lambda_M[t+1]}{\partial \lambda_M[t]} \end{bmatrix} \quad (18)$$

对于建立在式(12)之上的动态博弈, 其雅克比矩阵如(19)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & \chi_1 & \dots & \chi_1 \\ \chi_1 & 0 & \dots & \chi_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_1 & \chi_1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $\chi_1 = \frac{2\alpha + v}{2[2\alpha(M-1) + v(M-1) + 1 - v]}$ 。

通过计算获得相应的特征值分别为 $\zeta_1 = \dots = \zeta_{M-1} = -\chi_1$, $\zeta_M = (M+1)\chi_1$ 。因为替代率 $v \in [-1.0, 1.0]$, 可以判断所有特征值的分子都小于分母, 即 $|\zeta_k| < 1 (k=1, 2, \dots, M)$, 所以自映射函数(12)对应的动态博弈稳定。

式(13)对应的动态博弈, 其雅克比矩阵如式(20)所示。

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{2\sigma_1(\chi_2 - 1)}{1 - v} & \frac{\sigma_1\chi_2}{1 - v} & \dots & \frac{\sigma_1\chi_2}{1 - v} \\ \frac{\sigma_2\chi_2}{1 - v} & 1 + \frac{2\sigma_2(\chi_2 - 1)}{1 - v} & \dots & \frac{\sigma_2\chi_2}{1 - v} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\sigma_M\chi_2}{1 - v} & \frac{\sigma_M\chi_2}{1 - v} & \dots & 1 + \frac{2\sigma_M(\chi_2 - 1)}{1 - v} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, $\chi_2 = \frac{2\alpha + v}{2\alpha M + 1 + v(M-1)}$ 。

当设定 $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_M = \sigma$, 可求得其特征值分别为: $\zeta_1 = \dots = \zeta_{M-1} = 1 + [\sigma(\chi_2 - 2)] / (1 - v)$, $\zeta_M = 1 + \frac{\{\sigma[(M+1)\chi_2 - 2]\}}{(1 - v)}$ 。由于 $\frac{-(2M-1)}{M-1} < \chi_2 - 2 < 0$ 且 $-2 < (M+1)\chi_2 - 2 < 0$, 因此, 通过求解不等式 $|\zeta_k| < 1, k=1, 2, \dots, M$, 获知该动态博弈稳定的充分条件为: 动态博弈的更新步长 σ 满足 $\sigma \in (0, \frac{(1-v)(2M-2)}{2M-1})$,

$M > 1$ 时, 基于式(13)的动态博弈收敛。

3.5 频谱需求调整和系统调度

值得注意的是, 在基于 Bertrand 博弈的频谱定价和频谱分配模型中, 次网络市场均衡状态下的子载波租用量通常低于次网络的子载波需求, 这将致使所租子载波并不能满足次网络的频谱需求。如图 2 所示, 在给定偏好系数、替代率和损失系数时, 次网络的频谱需求和子载波最优租用总量 $q^* = \sum_{k=1}^M D_k(\lambda^*)$ 成线性递增的关系 (详见 5.1 节实验 6)。对此, 次基站可以通过预先向主基站发送真实频谱需求, 并根据主网络制定的最优定价, 确定真实频谱需求与租用数量的关系, 基于此, 重新调整频谱需求, 以获得能够满足次网络的频谱资源。具体而言, 次基站向各主基站发送微调后的真实需求 $C + \varepsilon'$ 和 $C - \varepsilon'$, 在各主基站返回纳什均衡下的最优定价 $\lambda^*(C + \varepsilon')$ 和 $\lambda^*(C - \varepsilon')$ 后, 根据需求函数(5)计算相应的总租用量 $q^*(C + \varepsilon')$ 和 $q^*(C - \varepsilon')$ 。次基站根据式(21)求解需求与租用量线性关系的斜率, 并根据式(22)确定发送给主基站的虚拟频谱需求 C' 。

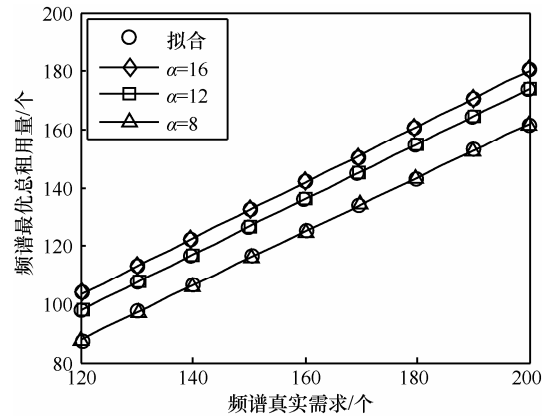


图 2 频谱需求和最优租用量的关系

$$slope \approx \frac{q_{\text{总}}^*(C + \varepsilon') - q_{\text{总}}^*(C - \varepsilon')}{2\varepsilon'} \quad (21)$$

$$C' = \frac{C - q_{\text{总}}^*(C - \varepsilon')}{slope} + C - \varepsilon' \quad (22)$$

基于子载波虚拟需求 C' 的频谱租用量, 经实验验证, 能够满足次网络的频谱需求。

综上, 在主基站基于本地信息进行动态频谱定价的基础之上, 第 1 阶段的调度流程如图 3 所示。

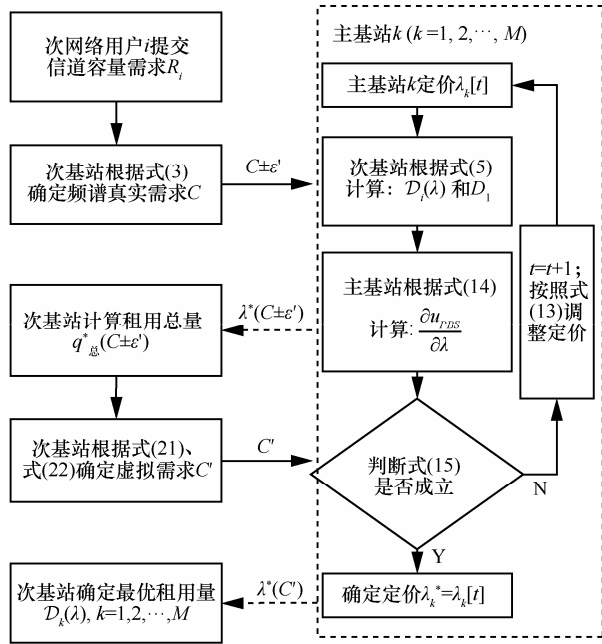


图 3 频谱定价调度

4 第 2 阶段：合作频谱共享

次基站通过向多个主基站付费，获得共 $\sum_{k=1}^M \mathcal{D}_k(\lambda)$ 数量的子载波集合 SC ，用于次网络中次用户的通信服务。在这一阶段，次基站需要解决：如何依据次用户的信道容量需求 (R_1, R_2, \dots, R_N) 为每个次用户 i 分配子载波集合 $SC_i (i=1, 2, \dots, N)$ ，及其在每个子载波 j 上的传输功率 $p_{ij} (j \in SC_i)$ ，同时保证不对主网络通信造成干扰。根据问题特点，利用合作博弈理论中的议价博弈模型，对问题进行建模和求解。

4.1 基于议价博弈的频谱共享

议价博弈作为一种能够为博弈玩家提供共赢、公平解决方案的理论模型，广泛应用于次用户达成合作关系的 CRN 中^[17,19,22]。

定义 2 (议价博弈和议价方案) 博弈 $\Gamma=(N, \mathcal{S}, \mathbf{U}, \mathbf{u}^0)$ 称为议价博弈。如果 \mathbf{U} 是 \mathbf{R}^N 的闭合凸子集，并且至少存在一个可行收益向量 $\mathbf{u}=(u_1, u_2, \dots, u_n)$ ，满足对于任意的 $i, u_i \geq u_i^0$ 成立。议价方案是能够将议价问题 $(\mathbf{U}, \mathbf{u}^0)$ 映射到唯一的可行收益向量上的函数： $f(\mathbf{U}, \mathbf{u}^0): \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{u}^*$ 。

通过将次网络中的次用户看作是达成合作协定的博弈玩家，可将这一阶段的次基站频谱资源分配问题，运用议价博弈进行建模。在相应的议价博弈 $\Gamma=(N, \mathcal{S}, \mathbf{U}, \mathbf{u}^0)$ 中：

1) 博弈玩家集合 \mathcal{M} ，次用户集合 $\{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$ ；

2) 玩家策略 $a_i=(SC_i, \mathbf{p}_i) \in S_i$ ，次用户 i 向次基站索取用于自身通信的子载波集合 SC_i ，以及其中每个子载波之上的传输功率 $\mathbf{p}_i=\{p_{ij}\} (j \in SC_i)$ ；

3) 收益函数 $u_k(a_k, \mathbf{a}_{-k})$ ， i 使用功率 p_{ij} 在集合 SC_i 中相应的子载波上传输数据，所能获得的信道容量 $\sum_{j \in SC_i} \text{wlb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta)$ ，其中， h_{ij} 表示相应的信道增益；

4) 不达成合作协定时的收益向量 \mathbf{u}^0 ，次用户信道容量需求 (R_1, R_2, \dots, R_N) 。

由此，次基站的子载波和功率分配问题，即可转化为基于议价博弈的合作频谱共享中，可行收益向量的选择问题。议价方案可以认为是一种最优可行收益向量的选择标准，其中，纳什议价方案 (NBS, Nash bargaining solution) 是一种常用的基于公平性的议价方案。

定义 3 (纳什议价方案) $\mathbf{u}^*=f(\mathbf{U}, \mathbf{u}^0)$ 称作纳什议价方案，如果 \mathbf{u}^* 满足以下性质^[23]。

- 1) 个体理性： $u_i^* \geq u_i^0$ ；
- 2) 可行性： $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}$ ；
- 3) 帕累托最优：若存在 $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}$ ，并且对于任意的 i 成立 $u_i' \geq u_i^*$ ，则必然对于所有的 i 有 $u_i'=u_i^*$ ；
- 4) 独立于不相关元素：如果 $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}' \subset \mathbf{U}$ 且 $\mathbf{u}^*=f(\mathbf{U}, \mathbf{u}^0)$ ，则 $\mathbf{u}^*=f(\mathbf{U}', \mathbf{u}^0)$ ；
- 5) 独立于线性变换：假设 \mathbf{U}' 和 \mathbf{u}' 分别由 \mathbf{U} 和 \mathbf{u} 经过线性变换 $u_i'=a_i u_i + b_i$ 获得，其中， $a_i > 0, b_i > 0$ ，则 $f(\mathbf{U}, \mathbf{u}^0) = \{a_i u_i^* + b_i\}$ ；

6) 对称性：如果议价博弈是对称的，即对任意的 i 和 $j, (u_1, \dots, u_i, \dots, u_j, \dots, u_n) \in \mathbf{U}$ 等同于 $(u_1, \dots, u_j, \dots, u_i, \dots, u_n) \in \mathbf{U}$ 并且 $u_i^0 = u_j^0$ ，则 $u_i^* = u_j^*$ 。

文献[24]给出了 NBS 的存在性定理。

定理 3 存在一个纳什议价方案 $f(\mathbf{U}, \mathbf{u}^0)$ ，能够同时满足定义 3 中的 6 个性质，这个议价方案能够使纳什乘积 (NP, Nash product) 取得最大值

$$f(\mathbf{U}, \mathbf{u}^0) \in \arg \max_{\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}, u_i^* \geq u_i^0} \prod_{i=1}^n (u_i^* - u_i^0) \quad (23)$$

在基于议价博弈的合作频谱共享研究中，纳什议价方案，作为资源共享的解决方案，在满足次用户通信需求的同时，最大程度地保证资源分配的公平性。因此，为了能在次网络中公平、高效地分配频谱资源，可根据纳什议价方案，将子

载波集合 SC_i 和传输功率 p_{ij} 的分配问题, 定义成非线性规划问题

$$\begin{aligned} & \max_{SC_i, p_{ij}} \prod_{i=1}^N \left(\sum_{j \in SC_i} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta) - R_i \right) \\ \text{s.t. } & 1) \sum_{j \in SC_i} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta) \geq R_i \\ & 2) \sum_{i=1}^N \sum_{j \in SC_i} p_{ij} \leq p^{\text{TOTAL}} \\ & 3) \sum_{i=1}^N SC_i \leq SC \\ & 4) SC_i, p_{ij} \in \mathbf{R}^+, \forall i=1, 2, \dots, N, j \in SC_i \quad (24) \end{aligned}$$

其中, $\sum_{j \in SC_i} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta)$ 表示次用户 i 在分配到 SC_i 集合的子载波, 和相应的传输功率 $p_{ij}(j \in SC_i)$ 时, 能够获得的信道容量。约束条件 1) 要求在该频谱分配方案下, 每个次用户至少应满足频谱需求; 条件 2) 表示次网络通信不能对主网络造成干扰; 条件 3) 约束所有次用户分配的子载波都需在其租用的子载波中。

4.2 子载波、功率和时间最优分配

对于非线性规划(24), 通常的求解方法是穷举所有的子载波集合和传输功率等级, 然而对于允许分时策略的通信系统来说, 穷举范围从有限集合扩展到无限集合, 这将导致不可估量的计算资源消耗。通过引入时间分配调度^[17], 降低问题求解复杂度, 即假设在同一时刻, 次基站将所有的子载波都用于某一次用户的通信服务。由此, 子载波集合和传输功率的分配问题(24)便可以转化为传输时间 t_i 和传输功率 p_{ij} 分配问题

$$\begin{aligned} & \max_{t_i, p_{ij}} \prod_{i=1}^N \left(t_i \sum_{j \in SC} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta) - R_i \right) \\ \text{s.t. } & 1) t_i \sum_{j \in SC} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta) \geq R_i \\ & 2) \sum_{j \in SC} p_{ij} \leq p^{\text{TOTAL}}, \forall i=1, 2, \dots, N \\ & 3) \sum_{i=1}^N t_i \leq 1 \\ & 4) p_{ij} \in \mathbf{R}^+, \forall i=1, 2, \dots, N, j \in SC \quad (25) \end{aligned}$$

其中, t_i 表示在次基站分配所有的子载波用于次用户 i 通信的时间占整个调度周期的比例, 那么次用户 i 的实际传输时间为 $t_i T$, T 为调度周期总时长。

引理 2 对于给定的可行时间分配策略 t_i^* , $\mathbf{p}^* = \{p_{ij}^*\} (i=1, 2, \dots, N, j \in SC_i)$ 是规划问题(25)的最

优功率分配策略, 当且仅当 p_{ij}^* 也是规划问题(26)的最优解。

$$\begin{aligned} & \max_{p_{ij}} \sum_{j \in SC} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta) \\ \text{s.t. } & \sum_{j \in SC} p_{ij} \leq p^{\text{TOTAL}}, \forall i=1, 2, \dots, N \quad (26) \end{aligned}$$

证明 详细过程参考文献[17], 这里给出大致思路: 能够使约束问题(25)取得最大值的最优定价 p_{ij}^* , 同样能够使约束问题(26)的目标函数在满足相应约束条件下取得最大值, 反之同样成立。

定理 4 非线性规划问题(25)存在可行解, 当且仅当 $\sum_{i=1}^N R_i / r_i^* \leq 1$, 并且最优功率分配策略和时间分配策略分别为

$$p_{ij}^* = \left[\frac{1}{|SC|} \left(p^{\text{TOTAL}} + \sum_{i \in SC} \frac{1}{|h_{ij}|^2 \eta} \right) - \frac{1}{|h_{ij}|^2 \eta} \right]^+ \quad (27)$$

$$t_i^* = \frac{1}{N} \left(1 - \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{r_i^*} \right) + \frac{R_i}{r_i^*}, i=1, 2, \dots, N, j \in SC \quad (28)$$

其中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$, $r_i^* = \sum_{j \in SC} w \text{lb}(1 + p_{ij}^* |h_{ij}|^2 \eta)$ 。

证明 由引理 2 可知, 规划问题(25)的最优功率分配问题, 可以通过拉格朗日乘数法求解规划问题(26)获得, 相应的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(\mathbf{p}, \boldsymbol{\mu}) = & \sum_{j \in SC} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta) - \\ & \sum_{i=1}^N \mu_i \left(\sum_{j \in SC} p_{ij} - p^{\text{TOTAL}} \right) \quad (29) \end{aligned}$$

其中, $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ 为拉格朗日乘子。则有

$$\frac{\partial L(\mathbf{p}, \boldsymbol{\mu})}{\partial p_{ij}} = \frac{w |h_{ij}|^2 \eta}{\ln 2(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta)} - \mu_i \quad (30)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{p}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \mu_i} = \sum_{j \in SC} p_{ij} - p^{\text{TOTAL}} \quad (31)$$

应用 KKT 条件, 令式(30)、式(31)分别等于 0, 通过求解可得式(32)、式(33), 再将式(33)代入式(32), 可以获得最优功率分配策略(27)。

$$p_{ij}^* = \left(\frac{w}{\ln 2 \cdot \mu_i^*} - \frac{1}{|h_{ij}|^2 \eta} \right)^+ \quad (32)$$

$$\text{其中, } \frac{1}{\mu_i^*} = \frac{\ln 2}{w |SC|} \left\{ p^{\text{TOTAL}} + \sum_{i \in SC} \frac{1}{|h_{ij}|^2 \eta} \right\} \quad (33)$$

随后,考虑可行解的存在性。最优功率分配策略存在并不意味着规划问题(25)存在可行解。在最优分配策略(27)的基础上,当且仅当式(25)的约束条件 1)、3)成立,式(25)存在可行解,因此,将最优功率策略带入约束条件 1)、3),可以获得规划问题(25)存在可行解的充要条件为: $\sum_{i=1}^N R_i/r_i^* \leq 1$ 。

$$\begin{aligned} & \max_{t_i} \prod_{i=1}^N (t_i r_i^* - R_i) \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^N t_i \leq 1 \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} & \max_{t_i} \sum_{i=1}^N \ln(t_i r_i^* - R_i) \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^N t_i \leq 1 \end{aligned} \quad (35)$$

最后,在最优功率分配的基础上,考虑最优时间分配。令 $r_i^* = \sum_{j \in SC} w \log(1 + p_{ij}^* |h_{ij}|^2 \eta)$, 将 $\mathbf{p}_i^* = \{p_{ij}^*\}$ 代入规划问题(25),可以获得规划问题(34)。由于 $f(x) = \ln(x)$ 在定义域内是单调递增的凹函数,因此,可对式(34)进行对数变换,获得规划问题(35),并通过拉格朗日乘数法对该问题进行求解,相应的拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{t}, \varphi) = \sum_{i=1}^N \ln(t_i r_i^* - R_i) - \varphi (\sum_{i=1}^N t_i - 1) \quad (36)$$

其中, φ 为拉格朗日乘子,应用 KKT 条件得

$$\frac{\partial L(\mathbf{t}, \varphi)}{\partial t_i} = \frac{r_i^*}{t_i r_i^* - R_i} - \varphi = 0 \quad (37)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{t}, \varphi)}{\partial \varphi} = \sum_{i=1}^N t_i - 1 = 0 \quad (38)$$

求解式(37)和式(38),即可获得最优时间分配式(28)。

相应的子载波和功率最优分配流程如图4所示。

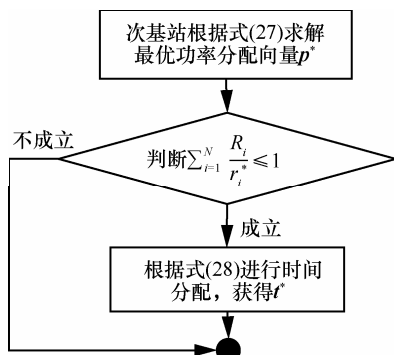


图4 频谱定价和分配调度

5 仿真实验

针对2个主网络的CRN,在Matlab中进行仿真,设定主网络干扰功率阈值 $p^{\text{TOTAL}} = 50 \text{ mW}$,每个子载波带宽 $w = 25 \text{ kHz}$,热噪声等级 $\delta_Z^2 = 10^{-11} \text{ W}$,期望的误码率 $BER = 10^{-2}$ 。仿真信道通过瑞利衰落和损耗因子为3的路径损耗进行建模,假设次网络中2个次用户位于距离基站200 m的范围内,各自的信道容量需求分别为 $R_1 = 2 \text{ Mbit/s}$, $R_2 = 3 \text{ Mbit/s}$ 。那么,考虑信道在边界处(距离基站200 m)传输的路径损耗,通过式(3)或穷举法获得子载波需求量为144时,能够提供期望值为5.0 Mbit/s的信道容量。

5.1 频谱定价和分配

1) 偏好系数和替代率。在设定2个主基站(主基站1和主基站2)的频谱定价分别为 $p_1 = 460$ 、 $p_2 = 440$ 的基础之上,研究不同的偏好系数 α 和替代率 ν 对次网络子载波租用数量的影响。如图5所示,次基站租用价格低廉的频谱多于价格偏贵的子载波,分别向2个主基站租用的子载波数量 q_1 、 q_2 都会随着偏好系数的增加而增加,即当次基站对满足需求的偏好程度越大,会倾向于租用更多的子载波以满足次网络需求,然而,当子载波数量满足需求时,偏好系数增加对子载波租用量的影响逐渐变小。此外,替代率越小,次用户在不同主基站频谱间切换的难度越大,从而不得不租用较贵的子载波;当替代率越大,次用户更倾向于租用相对便宜的子载波。

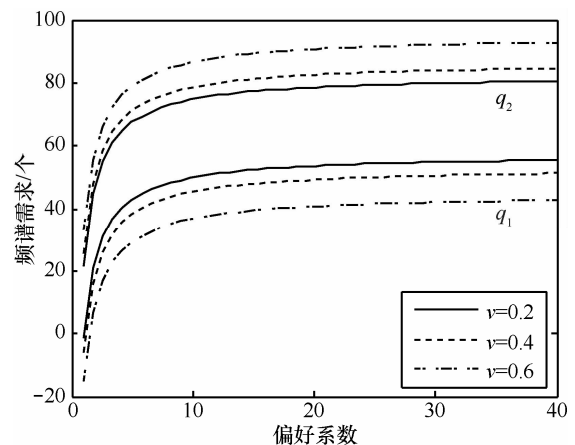


图5 偏好系数对频谱需求的影响

2) 其他主基站对频谱定价的影响。根据1)的结论,分别设定偏好系数 $\alpha = 12$ 、替代率 $\nu = 0.4$ 和主基站2不同的频谱定价 $\lambda_2 = 460$ 、480、520、550 的条

件下, 研究主基站 1 的频谱定价和收益的关系, 如图 6 所示, 当主基站的频谱定价在一定范围内逐渐增加时, 由于较高的定价能够获得更多收益, 其收益值也随之增加; 然而, 收益值超过某一峰值点后, 由于次网络会选择价格更便宜的主基站租用子载波, 导致对该基站的子载波需求降低, 因此该主基站收益减少。能够使收益到达峰值的定价称作最优响应值, 即最优定价, 随着其他主基站定价的增加, 次网络对本基站的需求量增加, 基站能够通过设定一个更高的价格以获得更大利益, 因此, 最优相应定价和收益值都会随之增加。

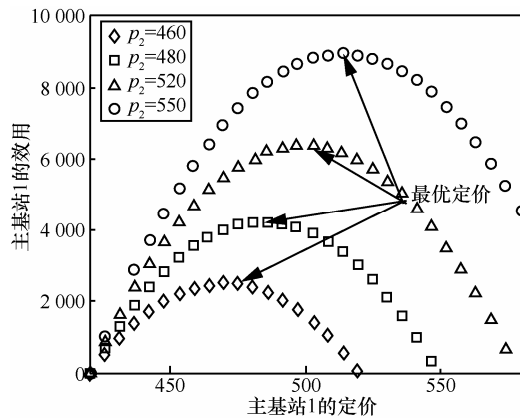


图 6 主基站效用函数

3) 最优响应函数与纳什均衡。图 7 是在设定不同的替代率 $v_1=0.4, v_2=0.6$, 不同的主基站损失系数 $\beta_{1,2}=420, \beta_{1,2}=400$ ($\beta_{1,2}$ 表示 $\beta_1=\beta_2$) 基础之上, 根据最优响应函数: $\lambda_k^* = \arg \max_{\lambda_k \in S_k} u_k^{PBS}(\lambda_k, \lambda_{-k}^*), \forall k \in \mathcal{M}$ 绘制而成。纳什均衡位于不同主基站最优响应函数的交界处, 即满足方程组(11)。主基站的损失系数越小, 租售每单位带宽造成的损失越少, 更愿意以较低的价格租售频谱资源, 因此, 纳什均衡时的定价越低。此外, 替代率也影响主基站的定价和纳什均衡的位置, 替代率越大, 次网络从不同主基站频谱之间切换的难度越小, 次基站更倾向于租用价格较低的频谱资源, 因此, 纳什均衡时的主基站定价越低。

4) 动态博弈。设定次网络频谱替代率 $v=0.4$, 2 个主基站的损失系数分别为 $\beta_1=420, \beta_2=380$, 动态博弈稳定阈值 $\tau=0.01$, 2 个主基站的初始定价为 $\lambda_1[0]=\beta_1, \lambda_2[0]=\beta_2$ 。分别对主基站能观察到其他玩家的信息并基于最优响应策略 (式(12)) 进行定价, 和主基站只能基于本地信息在不同的更新步长下的学习策略 (式(13)) 进行定价, 研究主基站通过动态博弈进行定价的过程。其中, 根据动态博弈稳

定的充分条件: $\sigma \in (0, \frac{(1-v)(2M-2)}{2M-1})$, 选择基于学

习策略动态博弈的更新步长 $\sigma_{1,2}=0.25$ 和 $\sigma_{1,2}=0.35$ ($\sigma_{1,2}$ 表示 $\sigma_1=\sigma_2$), 响应动态博弈的过程如图 8 所示。对于主基站能够观察到其他主基站的历史策略这种情形, 动态博弈能够较快地根据最优响应值收敛至纳什均衡, 而当主基站只能基于次网络反馈回至本地的需求信息更新定价策略, 动态博弈收敛的速度很大程度上依赖于更新步长, 如图 9 所示,

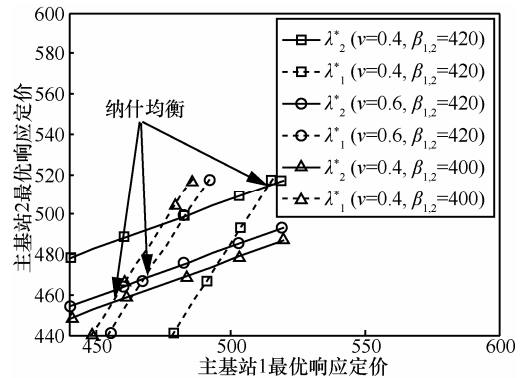


图 7 最优响应函数与纳什均衡

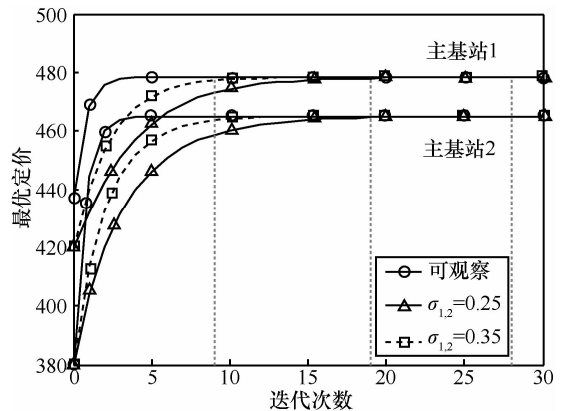


图 8 动态博弈与纳什均衡

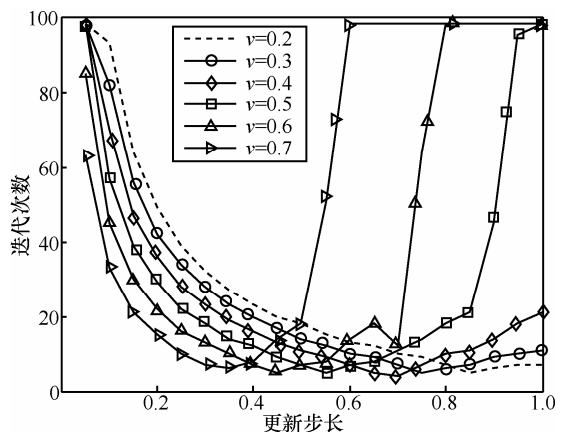


图 9 更新步长与迭代次数的关系

当替代率越低时,较大的更新步长动态博弈收敛速度较快,当替代率较高时,应设置较小的更新步长,以保证收敛速度。此外,由于损失系数决定租售每单位子载波的成本,损失系数较高的主基站其最优定价高于损失系数较低的主基站。

5) 损失系数对主基站收益的影响。图 10 表示在不同替代率下,主基站 2 的损失系数对自身和主基站 1 收益的影响。随着损失系数 β_2 逐渐增加,主基站 2 的定价将以较 β_2 更小的速度增加,由于不同基站之间的频谱可替代性,相应的频谱租用量也随之下降,根据 $u_2^{PBS}(\lambda)=(\lambda_2-\beta_2) \mathcal{D}_2(\lambda)$,该基站的收益逐渐降低;另一方面, β_2 增加使得主基站 1 定价增加,其租用量也有所增大,因此收益值增加。不仅如此,替代率也会影响主基站的收益值,在相同损失系数下,替代率增加会导致系统中所有主基站的最优定价降低,致使收益下降。

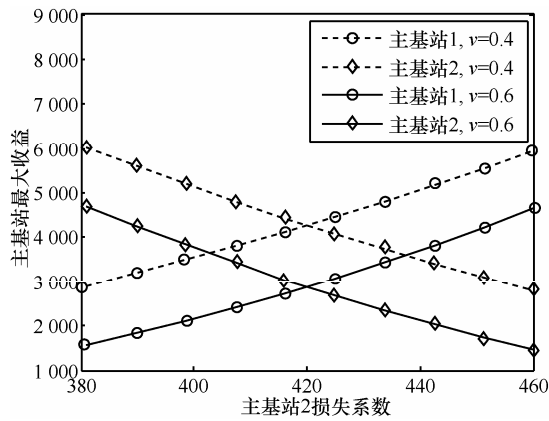


图 10 主基站最大收益

6) 频谱需求调整。在设定 2 个主基站的损失系数分别为 $\beta_1=420$ 、 $\beta_2=380$ 、替代率 $v=0.4$ 的基础上,研究特定偏好系数下,次基站的子载波真实需求和频谱最终租用量的关系,如图 11 所示,同一频谱需求下,随着偏好系数的增加,次基站对于满足需求的偏好程度越大,倾向于租用更多的子载波;次网络频谱需求增加,使子载波的租用量随之增加,并且对不同需求值 C 和其对应的租用总量 $q^*(C)$ 进行线性拟合,发现 C 和 $q^*(C)$ 之间近似线性相关。随后,根据 3.5 节中介绍的需求调整策略,确定子载波的虚拟需求 C' ,并基于 C' 计算相应的租用量 $q^*(C')$ 。图 12 描述了基于 $C=144$ 、 $\epsilon=0.5$ 所确定的虚拟频谱需求 C' 和真实频谱需求 C 、频谱最优总租用量 $q^*(C)$ 之间的关系,可以看出,调整后的虚拟频谱需求 C' 所对

应的租用量 $q^*(C')$ 恰好能满足次网络的真实频谱需求 C 。

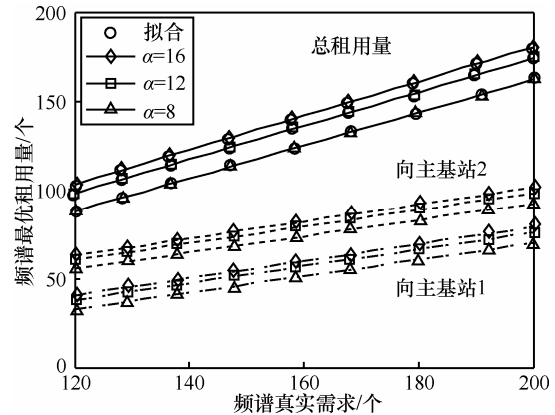


图 11 次基站频谱最优租用量

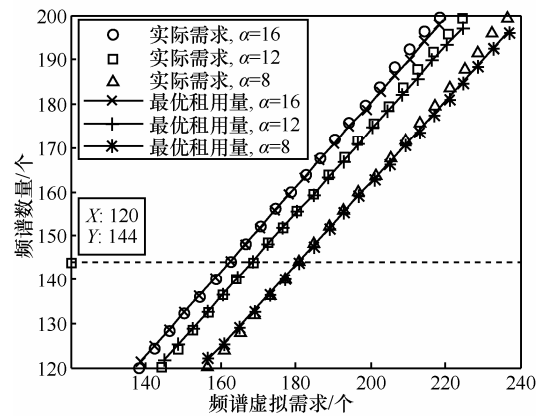


图 12 频谱需求和频谱租用量

5.2 合作频谱共享

1) 次网络通信需求的满足程度。在次网络计算频谱需求时,如果次基站基于次网络边界的路径损耗,计算信道增益(情形 I),对于次网络的信道容量需求 5 Mbit/s,次基站需租用 144 个子载波。假设次用户 SU_1 位于距离次基站 100 m 的位置, SU_2 与次基站的距离在 110 m 和 200 m 之间变动,通过合作频谱共享方案,每个次用户可以获得的信道容量如图 13 所示,当次用户 SU_2 离次基站的距离 D_2 增加,信道增益 $|h_{ij}|^2$ 与 D_2^3 负相关,导致 SU_2 的信道容量下降;为使次用户 SU_2 获得足够的信道容量,该频谱共享方案通过减少 SU_1 使用子载波的时间以增加 SU_2 的占用时长,从而满足 SU_2 的信道容量需求,如图 14 所示。由此可见,基于纳什议价方案的合作频谱共享策略,能够较公平地分配频谱资源。此外,当 SU_2 距离边界距离大于 20 m 时,能够获得高于需求的信道容量,当 $D_2 > 180$ m 时,路径损耗增

加使得仿真信道不能满足条件 $\sum_{i=1}^N R_i/r_i^* \leq 1$ 的数目增加，对次网络边界处的次用户进行最优时间、功率分配的可行性下降。

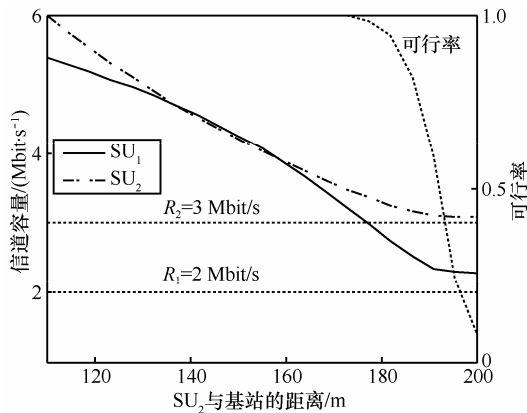


图 13 每个次用户的信道容量 I

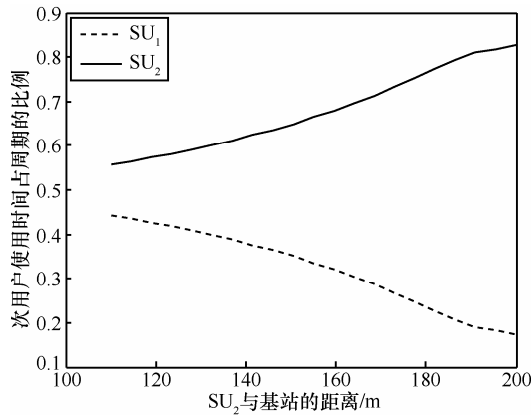


图 14 次用户的最优时间分配 I

当次基站计算次网络的频谱需求时，考虑距离次基站最远次用户的路径损耗（情形 II），那么满足信道容量 5 Mbit/s 的频谱租用量随着 SU₂ 与次基站之间的距离增加而增多，如图 15 所示。通过合作频谱共享算法，2 个次用户分别获得如图 16 所示的信道容量，从图中可以看出，SU₁ 和 SU₂ 分别获得平均高于需求 13% 和 5% 的信道容量，并且和情形 I 一样，随着 SU₂ 远离基站，次基站租用频谱的数量增加，SU₁ 利用全部子载波进行传输的时间减少，SU₂ 的传输时间增加（如图 17 所示），SU₂ 依然能够维持高于需求的信道容量。不仅如此，由图 16 可知，当 SU₂ 距离边界的距离大于 20 m 时，次基站通过合作频谱共享方案进行最优分配的可行概率约为 80%，相比于情形 I，情形 II 的可行概率有所下降，但次基站却能够节省 60% 的成本，如图 18 所示。

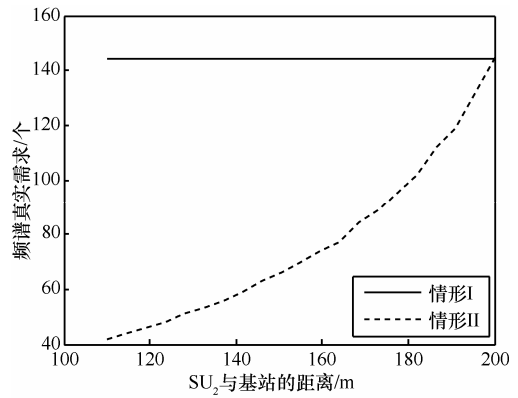


图 15 次网络的频谱需求

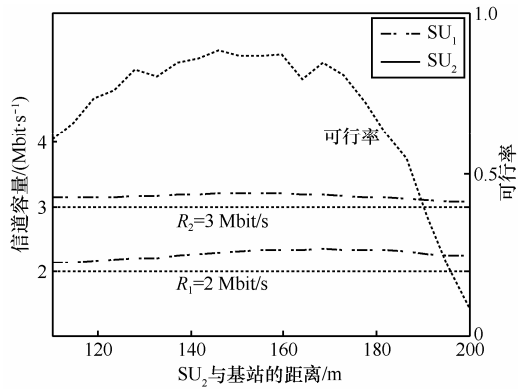


图 16 每个次用户的信道容量 II

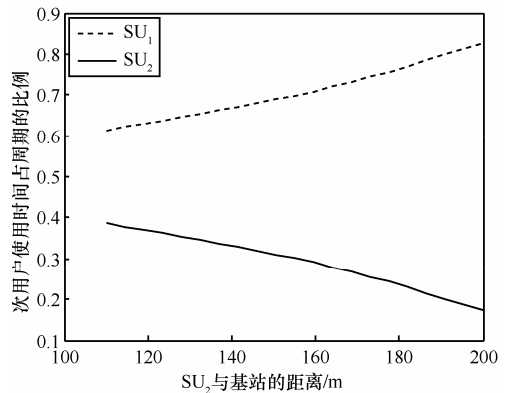


图 17 次用户的最优时间分配 II

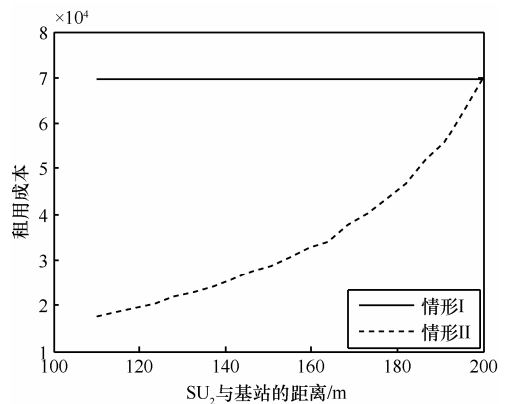


图 18 次网络租用频谱的成本

2) 为进一步考察基于 NBS 的合作频谱共享方案的公平性, 假设 2 个次用户的频谱需求相等, 都为 2.5 Mbit/s, SU_1 距离次基站 100 m, SU_2 与次基站的距离在 110 m 和 200 m 之间变动。在此基础之上, 引入基于最大全局速率 (max rate) 的频谱分配方案^[25]和基于最大公平度 (max fairness) 的频谱分配方案^[26], 在相同约束条件 (式(24)中的 1)~4)) 下进行对比, 2 种频谱分配方案的目标函数分别为

$$\text{max rate: } \max \sum_{i=1}^N r_i \quad (39)$$

$$\text{max fairness: } \max \min r_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (40)$$

其中, $r_i = \sum_{j \in SC_i} w \text{lb}(1 + p_{ij} |h_{ij}|^2 \eta)$ 。

分别针对情形 I 和情形 II, 在这 3 种频谱分配方案下, 次用户 SU_1 、 SU_2 能够获得的信道容量对比如图 19 和图 20 所示; 相应的总吞吐量对比如图 21 和图 22 所示; 并通过定义公平系数为次用户信道容量的比值, 即 r_1/r_2 , 获得 3 种频谱分配方案的公平度对比如图 23 和图 24 所示。

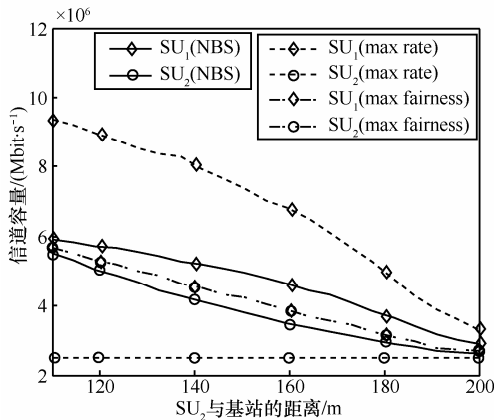


图 19 次用户信道容量对比 I

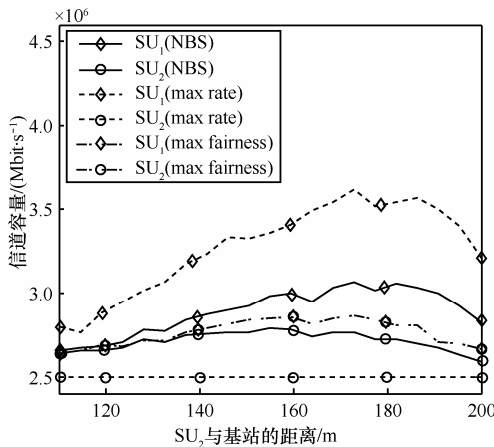


图 20 次用户信道容量对比 II

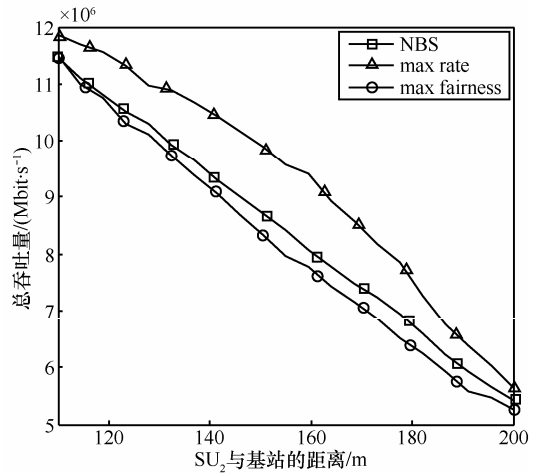


图 21 次网络总吞吐量对比 I

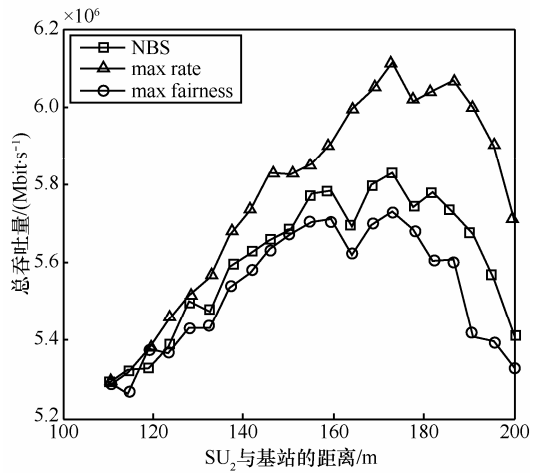


图 22 次网络总吞吐量对比 II

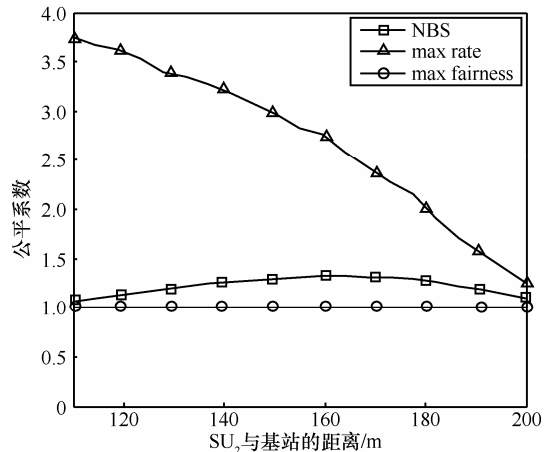


图 23 公平度对比 I

在情形 I 和情形 II 下, 基于最大全局速率的方案, 在保证 SU_2 刚好满足约束条件的同时, 将尽可能多的频谱资源分配给距离次基站较近的 SU_1 , 即信道增益较大的次用户, 以获得尽可能大

的次网络总吞吐量;最大公平度频谱分配方案以降低次网络的总吞吐量为代价,以最大的公平度。保证 SU_1 、 SU_2 所获得的信道容量差异最小。相对而言, NBS 频谱分配方案则能够在公平度和频谱效率之间进行折中,在保证公平分配频谱资源的同时,提升了频谱利用率,以获得较大的次网络总吞吐量。

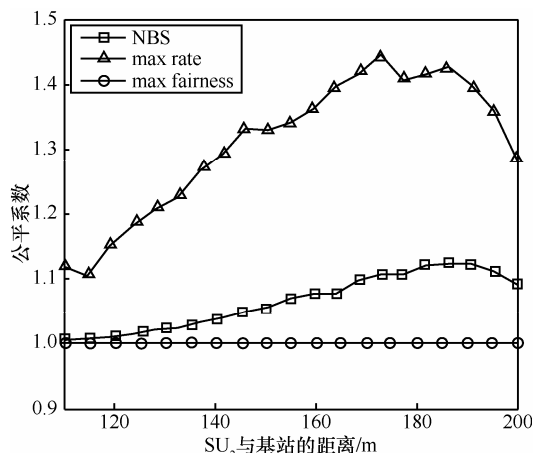


图 24 公平度对比 II

6 结束语

面向通信需求的频谱共享模型,从通信需求的角度研究 CRN 中的频谱租赁、频谱分配和功率控制。模型第 1 阶段,次基站基于次网络中的信道容量需求,向主基站租用一定数量的子载波,通过 Bertrand 博弈对多主基站向次基站租售频谱的市场行为进行建模;同时,在主基站不能获取其他主基站信息的分布式环境下,提出动态博弈的定价模型,并基于 Routh-Hurwitz 判据对该动态博弈进行稳定性分析,证明对于特定的更新步长,动态博弈能够收敛至纳什均衡。在此基础上,通过调整次基站频谱需求,使市场均衡下的频谱租用量恰好等于次网络的子载波真实需求。模型第 2 阶段,利用议价博弈中的纳什议价方案,将子载波集合和传输功率分配问题定义成一个非线性规划问题。为降低问题求解复杂度,引入时间分配调度,将子载波和功率分配问题转化为传输时间和传输功率分配问题并求解,从而获得最优传输功率和时间分配策略。

仿真实验表明,模型能够真实地反映次网络的频谱租用需求;主基站通过特定参数设置的动态博弈进行频谱定价,最终能够收敛于纳什均衡;次基站基于调整后的频谱需求,所获市场均衡下的频谱

租用量,恰好满足次网络的信道容量需求;在次网络中,次基站基于合作频谱共享方案,能够公平、高效地分配频谱资源。

参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE JR G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] MITOLA J. Cognitive Radio: An integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. KTH Royal Institute of Technology, 2000.
- [3] 张勇, 腾颖蕾, 宋梅. 认知无线电与认知网络[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2012.
ZHANG Y, TENG Y L, SONG M. Cognitive Radio and Cognitive Networks[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2012.
- [4] HUANG J, BERRY R A, HONIG M L. Spectrum sharing with distributed interference compensation[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005 First IEEE International Symposium on[C]. 2005. 88-93.
- [5] ZHENG H, CAO L. Device-centric spectrum management[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005 First IEEE International Symposium on[C]. IEEE, 2005. 56-65.
- [6] ZHAO J, ZHENG H, YANG G H. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005 First IEEE International Symposium on[C]. 2005. 259-268.
- [7] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [8] YU H, GAO L, LI Z, *et al.* Pricing for uplink power control in cognitive radio networks[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2010, 59(4): 1769-1778.
- [9] WANG Z, JIANG L, HE C. A novel price-based power control algorithm in cognitive radio networks[J]. Communications Letters, IEEE, 2013, 17(1): 43-46.
- [10] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium, and collusion[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2008, 26(1): 192-202.
- [11] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2008, 7(7): 2651-2660.
- [12] 黄丽亚, 刘臣, 王锁萍. 改进的认知无线电频谱共享博弈模型[J]. 通信学报, 2010, 31(2): 136-140.
HUANG L Y, LIU C, WANG S P. Improved spectrum sharing model in cognitive radios based on game theory[J]. Journal on Communications, 2010, 31(2): 136-140.
- [13] WANG W, KANG G S, WANG W. Joint spectrum allocation and

- power control for multihop cognitive radio networks[J]. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2011, 10(7): 1042-1055.
- [14] MWANGOKA J W, LETAIEF K B, CAO Z. Joint power control and spectrum allocation for cognitive radio networks via pricing[J]. *Physical Communication*, 2009, 2(1): 103-115.
- [15] 罗丽平, 邱焕新, 张广驰等. 具有约束条件的认知无线网络最优频谱价格函数[J]. *电子学报*, 2011, 39(3): 562-566.
LUO L P, QIU H X, ZHANG G C, *et al.* Optimal pricing function with spectrum constraint in cognitive radio networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 562-566.
- [16] TRAN N H, HONG C S, HAN Z, *et al.* Optimal pricing effect on equilibrium behaviors of delay-sensitive users in cognitive radio networks[J]. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2013, 31(11): 2566-2579.
- [17] LEE K D, LEUNG V C M. Fair allocation of subcarrier and power in an OFDMA wireless mesh network[J]. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2006, 24(11): 2051-2060.
- [18] ZHAO Z, PENG Z, ZHAO Z, *et al.* Joint power control and spectrum allocation for cognitive radio with QoS constraint[J]. *Communications and Network*, 2010, 2:38-43.
- [19] NI Q, ZARAKOVITIS C C. Nash bargaining game theoretic scheduling for joint channel and power allocation in cognitive radio systems[J]. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2012, 30(1): 70-81.
- [20] WONG C Y, CHENG R S, LATAIEF K B, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [21] OSBORNE M J, RUBINSTEIN A. *A course in game theory*[M]. MIT Press, 1994.
- [22] SURIS J E, DASILVA L A, HAN Z, *et al.* Cooperative game theory for distributed spectrum sharing[A]. *Communications, 2007 IEEE International Conference on*[C]. 2007. 5282-5287.
- [23] NASH JR J F. The bargaining problem[J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1950.155-162.
- [24] OSBORNE M J, RUBINSTEIN A. *Bargaining and Markets*[M]. San Diego: Academic Press, 1990.
- [25] KIM K, KIM H, HAN Y. Subcarrier and power allocation in OFDMA

systems[A]. *Vehicular Technology Conference* [C]. 2004.1058-1062.

- [26] TASSIULAS L, SARKAR S. Maxmin fair scheduling in wireless networks[A]. *Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings*[C]. 2002. 763-772.

作者简介:



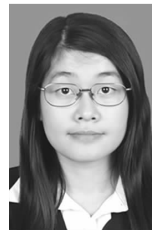
张翘 (1990-), 男, 安徽无为, 华南师范大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络、博弈论。



曾碧卿 (1969-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 华南师范大学软件学院副院长、教授, 主要研究方向为分布式处理、并行 I/O、移动互联网和认知无线网络。



杨劲松 (1991-), 男, 江西新干人, 华南师范大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络、智能算法。



谢晓虹 (1990-), 女, 广东湛江人, 华南师范大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。