

doi: 10.7690/bgzdh.2016.03.018

基于频谱异质的多单元双向频谱拍卖算法

吴晓芳¹, 周辉²

(1. 装备学院研究生院, 北京 101416; 2. 装备学院信息装备系, 北京 101416)

摘要: 针对频谱资源的异质性, 提出一种基于频谱异质的多单元双向频谱拍卖算法。利用双边频谱拍卖模型, 从多单元拍卖和异质频谱拍卖 2 个方面对算法进行改进, 允许买家竞买、卖家提供多个不同中心频率的异质信道, 实现互不干扰买家间频谱复用。分析证明了该算法满足拍卖机制设计的 3 个经济学性能: 个体理性、收益均衡和真实性。仿真实验结果表明, 该算法在频谱拍卖效率和系统收益方面皆有良好表现。

关键词: 频谱拍卖; 频谱异构; 多单元拍卖; 双向拍卖

中图分类号: TP301.06 **文献标志码:** A

A Multi-channel Double Auction Algorithm Based on Spectrum Heterogeneity

Wu Xiaofang¹, Zhou Hui²

(1. College of Graduate, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In view of the heterogeneity of spectrum, propose a multi-channel double auction algorithm based on spectrums heterogeneous. Using double auction model, improved the algorithm from two aspects: multi-channel auction and heterogeneous spectrum auction. It allows buyers/sellers to request/provide multiple channels with different center frequencies, consider non-identical conflict relationship to explore spectrum reusability. We prove that the algorithm satisfied the economics properties: truthfulness, individual rationality and budget balance. And the simulation results confirm that our algorithm achieves high auction efficiency and system revenue.

Keywords: spectrum auction; spectrums heterogeneous; multi-channel auction; double auction

0 引言

影响次级市场频谱资源分配的 2 个因素分别是技术因素和经济因素^[1]。事实上, 经济因素因其对用户的激励作用, 促进授权用户和非授权用户加入频谱交易, 有利于提高频谱利用率, 而受到更多关注。拍卖模型作为经典的经济学模型, 被认为是最有前景的频谱分配方法之一, 已经产生了一系列的研究成果。

在频谱拍卖算法设计中需要考虑 3 个关键问题: 拍卖机制设计的经济学特性、频谱复用和频谱异构。首先, 在拍卖机制设计中, 存在 3 个基本条件: 个人理性条件、激励兼容条件和真实性条件^[2]。这 3 个基本条件中, 个体理性及预算均衡是比较容易满足的; 因此, 考虑最多的是激励兼容条件, 该条件也叫“说真话”“真实竞标”^[3]。对买家和卖家来说他们的占优策略都是诚实报价; 其次, 频谱资源在空间和时间上具有可复用性, 允许互不干扰的用户使用同一频谱资源。通常解决频谱复用问题的方法是利用干扰图对买家进行分组^[2], 将互不干扰买家分到 1 个买家小组中来共同竞标频谱; 最后, 在解决频谱复用问题的基础上, 文献^[4]首次提出了

频谱异质的问题。文章指出低频段频谱的干扰距离要大于高频段干扰距离, 不同买家在不同频率下的干扰关系不同, 将影响频谱复用中的买家分组。而当前研究频谱复用问题多假设所有频谱资源在买家间产生的干扰关系是相同的。笔者在假设卖家只提供 1 个信道, 买家只请求 1 个信道的基础上提出了一种针对频谱异质的双边频谱拍卖的算法。然而, 事实上多数情况下买家可能需要多个信道来完成任务需求, 而卖家拥有多个空闲信道可以出售。

TRUST^[2]是 Xia Zhou 等提出的一种双边频谱拍卖机制, 是第一篇考虑频谱复用的文献。同时, 通过采用 McAfee 拍卖的赢家决定机制和统一定价机制实现了拍卖机制设计的经济学特性。基于此, 笔者以 TRUST 机制为基础, 从多单元拍卖和异质频谱拍卖 2 个方面对算法进行改进, 提出一种基于频谱异质的多单元双向频谱拍卖算法, 该算法满足频谱拍卖的经济学特性, 允许互不干扰用户共用同一频谱, 并在拍卖效率和系统收益方面有良好表现。

1 系统模型

频谱拍卖可以通过市场竞争的方式实现资源的

收稿日期: 2015-12-02; 修回日期: 2015-12-29

作者简介: 吴晓芳(1991—), 女, 北京人, 工学学士, 从事军事信息处理研究。

优化配置，激励已有的授权用户将空闲信道有偿地提供给新的频谱需求者使用，缓解频谱资源的供需矛盾^[5]。在这个频谱分配的次级市场中，授权用户作为卖家提供信道资源，非授权用户作为买家竞买信道资源，买家和卖家都不只 1 个，存在“多对多”的结构；因此，笔者采用双边拍卖模型进行建模。

假设在 1 个频谱交易次级市场中，包括 M 个买家（非授权用户）和 N 个卖家（授权用户），以及 1 个第三方拍卖经理人。拍卖经理人执行频谱拍卖，决定拍卖赢家及交易金额。假设经理人可以得到卖家和买家的地理位置信息^[6]。 $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ 为卖家集合， $B = (B_1, B_2, \dots, B_m)$ 为买家集合，买家至少需求 1 个信道，卖家至少提供 1 个信道。买家和卖家的标底是密封的^[4]，即买家和卖家向经理人提交标底时不能获知其他人的竞标。同时，需要注意，买家提出的需求可能只是部分满足；因此，笔者假设所有的用户都接受拍卖的结果，只要分配到信道，就视为竞拍获胜^[3]。

笔者用 (b_m, q_m^b) 定义买家 m 的标底，其中 b_m 指信道单价， q_m^b 是买家所需信道数量；相应的，定义卖家 n 的标底为 (s_n, q_n^s) ， q_n^s 为卖家提供信道数量。同时，卖家还需要提交其提供信道的干扰距离 $R(h_i)$ 。假设买家和卖家的标底报价可不真实，但信道数量真实。用 v_n^s 表示卖家对信道单价的真实估价， v_m^b 表示买家对信道单价的真实估价； p_n^s 表示卖家赢家收益的信道单价， p_m^b 表示买家竞标赢家支付的信道单价。则可定义买家和卖家的效益如下：

卖家 n 的效益：

$$u_n^s = \begin{cases} q_n(p_n^s - v_n^s), & \text{卖家 } n \text{ 竞拍获胜。} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

买家 m 的效益：

$$u_m^b = \begin{cases} q_m(v_m^b - p_m^b), & \text{买家 } m \text{ 竞拍获胜。} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中 p_n 、 p_m 分别代表卖家和买家赢家交易的信道数。

2 拍卖算法设计

笔者从多单元拍卖和异质频谱拍卖 2 个方面对算法进行改进。其中，多单元拍卖解决的是现实情况中，买家需求和卖家供给可能为多个信道资源的问题。异质频谱拍卖解决的是以往拍卖算法将所有

信道资源假设为同质信道的问题。若将所有信道资源假设为同质信道，设定干扰距离为同一数值，可能造成以下频谱分配失效的情况：1) 对于干扰距离大于设定值的信道分配，在对买家分组过程中，一些可以共用该信道的用户可能被分到更多买家小组，并没有最大限度的实现频谱复用；2) 对于干扰距离小于设定值的信道分配，分组中某些买家可能在该信道下造成彼此间干扰，那么分配的结果就是失败的。

拍卖算法设计主要分为 3 个步骤：建立分组、决定赢家和出请价格。笔者的主要工作是分组算法设计与分析。首先，通过虚拟分组，利用虚拟买家和虚拟卖家的概念，构造单元频谱拍卖市场，将多单元双向频谱拍卖简化为多个同时进行的单元频谱拍卖；其次，在 1 个单元频谱拍卖市场内，针对频谱异质性，设计新的买家分组算法。通过该算法，使得买家小组内所有成员可共用同一信道资源，同时，使所有信道对所有买家小组可用。

2.1 建立分组

2.1.1 虚拟分组

虚拟分组的目的是将买家和卖家分成若干个虚拟组织 (VG)，组织内买家只需求 1 个信道，卖家只提供 1 个信道。这一步骤可以将多单元拍卖简化为多个同时进行的单元拍卖，降低算法的复杂度。

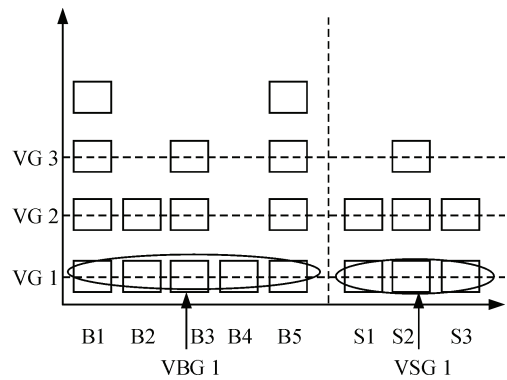


图 1 虚拟分组^[1]

假设买家中需求信道数量最多为 $D = \max(q_i^b)$ ，那么就将买家分为 D 个虚拟买家小组 (VBG)。同理，若 $C = \max(q_i^s)$ 代表卖家中可提供的最多信道数量，就将卖家分为 C 个虚拟卖家小组 (VSG)。然后将各个 VSG 同 VBG 匹配构成 1 个包含买家和卖家的 VG。这里假设卖家提供信道数总是小于买家需求信道数^[1]，即 $C \leq D$ ，那么 $|VG| = C$ ，可以得到 C

个虚拟组织。图1给出了1个虚拟分组的简单例子：假设有5个买家和3个卖家，买家最高需求为4个信道，于是将买家分为4个VBG；卖家最多提供3个信道，将卖家分为3个VSG；最后匹配VSG与VBG构成3个VG。虚拟分组算法流程参照文献[1]。

2.1.2 买家分组

通过上一步骤，将买家和卖家分成了多个VG，每个VG是独立的。笔者可以同时各个VG中对频谱异构进行单信道双边频谱拍卖。买家分组是通过干扰图模型找出相互独立的买家小组，组内成员互不干扰，可共用同一频谱资源。买家分组具体流程如下：

- 1) 输入买家地理位置信息(坐标)、各信道干扰距离 $R(h_i)$;
- 2) 选择1个可用信道 h_1 ，根据买家地理位置信息和干扰距离 $R(h_1)$ 生成买家对 h_1 的干扰图；任意2个买家间距离小于干扰距离，代表用户间存在干扰。干扰图中的点代表用户，点间连线代表买家间存在干扰；
- 3) 根据干扰图找出相互独立的买家小组：算法流程如图2所示，通过该算法每个小组内成员互不干扰，可共用信道 h_1 ;

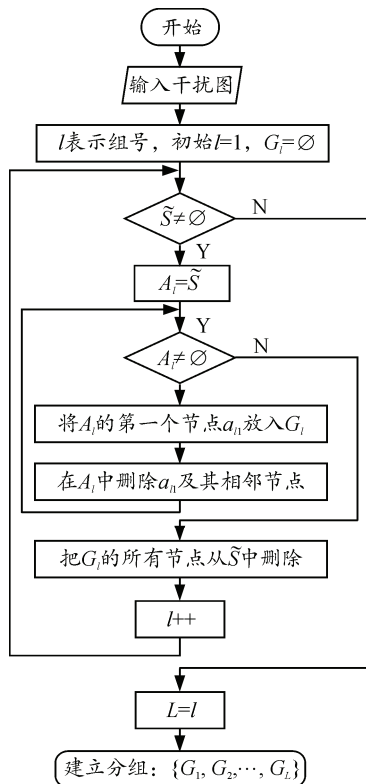


图2 分组流程

- 4) 如果存在其他可用信道，那么就在已分各

个买家小组内重复2)和3)，直到所有可用信道都被考虑。

最后得到的买家小组在任一信道条件下都互不干扰，即所有信道对所有买家小组皆可用。

2.2 决定赢家

通过买家分组，得到买家小组集合 $\{G_1, G_2, \dots, G_L\}$ ，各小组内成员数为 $m_l = |G_l|$ ，对于每个小组，将小组的标定义为：

$$g_l = \min\{b_m / B_m \in G_l\} \times m_l \quad (3)$$

将1个VG中的所有买方小组按照其竞标价格按照非升顺序排序，所有的卖方按其竞标非降顺序排序：

$$g_1 \geq g_2 \geq g_3 \geq \dots \geq g_L; \quad s_1 \geq s_2 \geq s_3 \geq \dots \geq s_n。$$

按照 McAfee 机制^[7]，定义1个 k 值，

$$k = \arg \max_{l \leq \min\{L, N\}} g_l \geq s_n, \quad (4)$$

则前 $k-1$ 个买方和卖方为拍卖赢家。

2.3 出清价格

文献[2]指出，统一定价可确保拍卖的个体理性和真实性；因此，令卖方赢家获得的收益均为第 K 个买家的竞价 s_k ，买家赢家小组付款为 g_k ，由组内买家成员均摊。小组 G_l 中单个买家支付的费用为：

$$P_m^b = g_k / m_l \quad (5)$$

在1个VG中，拍卖经理人的收益为

$$E_c = (K - 1)(g_k - s_k) \quad (6)$$

拍卖经理人总收益为

$$\Phi = \sum_{c=1}^C E_c \quad (7)$$

3 算法经济性能分析

3.1 个体理性 (individual rationality)

个体理性指买家和卖家的效用都是非负的，即任何一个卖家得到的支付都高于他的报价，任一买家的支付都小于他的报价。

对于买家来说，由式(3)可知，小组的标是由组内买家最小的成员决定的，赢家小组内的任何买家都不会支付高于自身的报价。对于卖家来说，卖方报价按由低到高排序，卖家赢家的支付大于本身的报价： $s_k \geq s_n$ ，所以所有卖方的收入高于其本身报价。综上所述，无论对于买方还是卖方，该算法均满足个体理性条件。

3.2 收益均衡 (budget balance)

收益均衡是指系统拍卖经理人的收益大于 0。

赢家决断采用 McAfee 机制, 保证 $g_k \geq s_k$, 由式 (6) 得 $E \geq 0$, 再根据式 (7), 明显 $\Phi \geq 0$, 即拍卖经理人收益大于 0; 因此, 该算法满足收益均衡条件。

3.3 真实性 (truthfulness)

真实性是指买方和卖方都不可能通过谎报竞价提高自身的效益。在证明算法真实性前, 需要证明赢家决断是关于报价或竞价单调的以及出清价格独立于标底^[2]。因赢家决断及出清价格算法参照文献 [2], 证明过程详见 TRUST 算法。由此, 总结出 3 个引理和 1 个定理:

引理 1 赢家决断关于买家报价是单调的, 如果 1 个买家通过报价 b_m 赢得拍卖, 那么它也能以更高报价 $b_m'(b_m' > b_m)$ 赢得拍卖。

引理 2 赢家决断关于卖家报价是单调的, 如果 1 个卖家通过报价 s_n 赢得拍卖, 那么它也能以较低报价 $s_n'(s_n' < s_n)$ 赢得拍卖。

引理 3 出清价格独立于竞标, 如果买家 (卖家) 赢得拍卖, 那么无论它投标价格为多少, 它所支付 (收益) 均不变。

定理 1 对于买家, 该算法满足真实性条件。

证明: 在拍卖中, 证明买家的竞标价是其真实估价等同于证明通过谎报竞标价, 买家不能获得比真实竞标更高的利润^[3]。根据拍卖结果和买家是否诚实报价, 可分以下 4 种情况讨论:

1) 无论买家是否诚实报价, 都竞拍失败, 那么它交易信道数为 0, 效益均为 0。

2) 无论买家是否诚实报价, 买家均竞拍成功, 获得相同数量的信道, 由引理 3 可知, 它需要支付的信道单价相同, 则买家效益相等。

3) 当买家以高于真实估价的竞标价 $b_m > v_m^b$ 竞标, 由引理 1, 买家仍能竞拍成功。令 g_1 和 g'_1 分别表示当买家真实报价或谎报竞标价时买家小组的竞价。当且仅当买家标底 b_m 为某小组中最低竞标价时, 才可能影响小组在赢家决断时的排名。若买家诚实报价, 则 $g_1 = v_m^b m_1$, 买家赢家小组的出清价格为 g_k ; 若买家谎报竞价, 那么有 $g'_1 \geq g_k \geq g_1$, 出清价格为 g_k / m_1 , 则 $v_m^b - g_k / m_1 \leq 0$, 买家不能获得更高效益。

4) 当买家以低于真实估价的竞标价竞标, 买家小组在赢家决断时的排序会小于买家诚实报价。

在这种情况下, 谎报价格买家的效益为 0。又由个体理性条件, 买家效益非负, 故该情景下, 买家不能通过谎报价格提高自身效益。

综上所述, 任何买家都不可能通过谎报竞标价获得更高效益, 即该算法对买家来说满足真实性条件。对于卖家来说情况相对简单, 可以从证明买家真实性的过程中推出, 笔者不再做详细叙述。

4 算法仿真

仿真参数设置: 买家和卖家在 1 个 100×100 的矩形区域内随机分布。卖家最多提供 3 个信道, 买家最多需求 5 个信道。卖家的竞标价格是 [2,12) 间的随机数, 买家的竞标价格是 [0,6] 间的随机数。卖家数为 10~100, 买家数为 50~200。为消除随机性, 运行结果是 1 000 次运行后的平均值。

笔者从 2 个拍卖机制性能分析设计的好坏。

1) 拍卖效率: 成功交易信道数占总信道数的百分比。

$$\theta = N_t / \sum_n^N q_n^s \quad (8)$$

2) 拍卖收益: 所有买家赢家的标底净额减去所有卖家赢家的标底净额。

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^M b_m^W \cdot q_m^b - \sum_{n=1}^N s_n^W \cdot q_n^b \quad (9)$$

首先, 分析该算法的拍卖效率。由图 3 可知, 当买家数一定时, 随着卖家数增加, 拍卖效率是降低的, 这是因为卖家数增加意味着供应变多, 而买家数一定意味着市场需求是不变的, 这种情况下供过于求, 拍卖效率自然下降。而当卖家数一定时, 买家数的增加会使拍卖效率增加。因为买家数增加一定程度上增加了买家赢家, 交易成功信道数自然增加, 拍卖效率就增加。

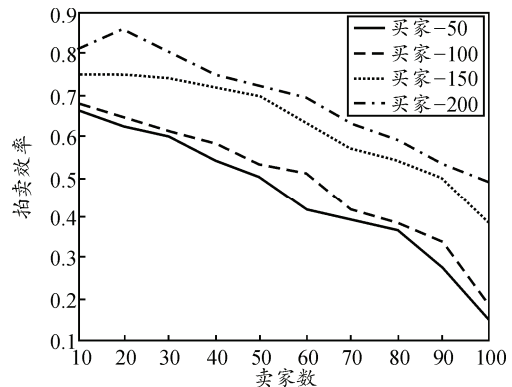


图 3 拍卖效率

其次, 分析该算法的拍卖收益。当买家数一定时, 拍卖收益随卖家数增加而增加, 但是当增加到一定程度时收益将趋于平稳。