

基于干扰约束的两阶段频谱拍卖方法

陈科, 邵翔, 王梦莹, 王威

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对频谱共享系统中不同竞拍用户面临的互相干扰以及固定的干扰保护范围导致频谱利用率低下的问题, 提出了一种干扰约束下的两阶段拍卖方案。在第一阶段拍卖中, 构建了以最大化频谱拍卖效用为目标的赢家和价格确定的优化问题, 并提出基于贪心策略的频谱拍卖算法; 在第二阶段拍卖中, 构建了信道分配和干扰保护范围灵活可调的联合优化问题, 并提出了基于遗传算法的拍卖方案。仿真结果表明, 所提算法具有良好的收敛性。与传统的频谱共享方案相比, 在相同的信道数下, 所提方案能服务更多的频谱需求者。在频谱资源稀缺的情景下, 所提方案能够提高约 50% 的频谱拍卖效用和信道复用率。

关键词: 动态频谱共享; 两阶段拍卖; 干扰约束; 图论; 干扰保护范围

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00439

A two-stage spectrum auction scheme based-on interference constraints

CHEN Ke, SHAO Xiang, WANG Mengying, WANG Wei

College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: To tackle the issues of mutual interference among bidders in spectrum sharing systems and the low spectrum utilization resulting from a fixed interference protection range, a two-stage auction scheme that operates under interference constraints was proposed. In the first-stage auction, a winner and price determination optimization problem was formulated to maximize the spectrum utility, which is solved by the proposed greedy-policy spectrum auction algorithm. Followed by the second-stage auction, a joint optimization problem for channel allocation and interference protection range flexible adjustment was formulated, which is solved by the proposed genetic-based auction algorithm. The convergence of the proposed algorithms was verified by extensive experiments. Furthermore, simulation results demonstrate that the proposed scheme can serve more spectrum users compared to traditional spectrum reuse schemes on the same channels, and potentially improve spectrum auction utility and channel reuse rates by approximately 50% in scenarios of scarce spectrum resources.

Key words: dynamic spectrum sharing, two-stage auction, interference constraints, graph theory, interference protection zone

0 引言

随着物联网技术和移动通信技术的快速发展, 无线通信设备和服务呈爆发式增长的态势。无线网络的快速建设需要大量的频谱资源支撑, 然而, 目前采用的静态频谱分配机制导致频谱利用率较低,

严重制约了无线通信技术的发展^[1-4]。为了缓解用频紧张的困境, 已有大量的研究致力于提高频谱利用效率, 其中动态频谱共享被认为是一个重要的方法^[5-7]。然而, 由于缺乏有效的激励机制, 频谱供需双方参与频谱共享的意愿低, 动态频谱共享至今没有大规模落地应用。为此, 一些学者提出了动

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-11-04

通信作者: 王威, wei_wang@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62371231); 江苏省重点研发计划项目 (No. BE2023027)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62371231), The Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (No. BE2023027)

态频谱拍卖的方法，以激励供需双方参与频谱共享^[8-9]。

在频谱共享系统中，多用户干扰问题成为制约频谱共享效用的关键。干扰图具有刻画用户间干扰关系的优越性，被广泛应用于干扰建模和频谱分配^[10-11]。文献[10]利用干扰图刻画了一个端到端(D2D, device-to-device)设备与蜂窝网络频谱共享场景中干扰关系，并提出基于图着色的资源共享方案来解决系统内联合资源块分配和传输功率控制的问题。文献[11]考虑了一个车辆与长期演进(LTE, long-term evolution)系统的频谱共享场景，采用图着色方法将频谱资源分配的过程等效为对车辆着色，避免了车辆间的干扰。

文献[12-15]将干扰图应用在频谱拍卖中，实现对互相干扰用户的频谱拍卖。文献[12]提出了基于用户干扰图的在线频谱双向拍卖机制，该机制保证了仅当次用户真实地为主用户的频谱资源竞价时才能最大化其利润，通过为时间或者空间上互不干扰的次用户分配相同信道，其提出的分组竞价算法能将信道利用率提高40%以上。类似地，针对先前的双向拍卖机制未考虑认知无线电约束的问题，文献[13]提出了一种基于密封竞价的双向拍卖模型，通过在模型中引入多赢家分配策略，允许将相同信道分配给多个互不干扰的设备来鼓励频谱重用。针对传统频谱拍卖系统易受单节点攻击和频谱共享缺乏数据库记录等问题，文献[14]提出了一种基于区块链的频谱拍卖接入模型，当主用户拍卖自身的频谱资源时，次用户可以根据自身的需求和不同的干扰模型进行干扰估测来选择不同状态的主用户频谱，保证双方的通信质量。针对频谱资源利用率不足的问题，文献[15]提出了基于拍卖和群智能理论的频谱分配策略，通过为预算不足的次用户进行随机采样分组，保证了预算不足的次用户也可以获得频谱。

上述频谱拍卖方案虽然解决了频谱买家之间的干扰问题，但由于频谱买家是以固定的干扰保护范围参与竞拍，且干扰保护范围在拍卖过程中不可调整，频谱拍卖缺乏一定的灵活性。文献[16]提出了协商拍卖的思想，即可以在拍卖中通过频谱买家间对干扰禁区^[17-18]范围的协商，在所有买家协商后的干扰禁区调节范围内，通过拍卖机制获得最大的拍卖效益和频谱利用率。

为简化文献[16]复杂的拍卖流程，本文引入分

阶段拍卖的思想^[19-20]，提出了一种两阶段的频谱拍卖方案，通过将拍卖部分和干扰保护区协商调节部分解耦，既简化了流程，又获得了比无调节机制更高的拍卖效益和频谱利用率。具体地，第一阶段拍卖时，所有买家以固定的干扰保护区范围提交投标，拍卖师以最大化频谱拍卖效用为目标确定获胜者和成交价格；第一阶段未能满足需求的买家，提交干扰保护区允许调节区间的投标，参与第二阶段拍卖，以最大化频谱拍卖效用为目标，确定第二阶段的信道分配和最优干扰保护区调节量。本文的主要贡献如下。

(1) 建立了基于干扰约束的两阶段频谱拍卖模型，该模型允许频谱需求者上传其可接受的干扰保护范围区间，在保障频谱提供者收益的条件下实现频谱复用和干扰协调。

(2) 提出了基于干扰图的频谱拍卖算法，在第一阶段中，构建了共享网络频谱拍卖效用最大的赢家选择和价格确定优化问题，根据干扰图为频谱使用者划分无冲突小组，给出了基于贪心策略的频谱拍卖算法；在第二阶段中，构建了信道分配和干扰保护范围灵活可调的联合优化问题，并提出了基于遗传算法的拍卖方案。

(3) 仿真结果证明所提拍卖算法具有良好的收敛性，且与传统的频谱共享方案相比，能满足更多频谱需求者的请求，显著提高频谱复用率和拍卖效益。

1 系统模型与问题描述

1.1 系统模型

考虑在一定区域内多用户频谱共享的场景，假定覆盖区域中存在 K 个频谱提供者记为 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ ， M 个频谱需求者记为 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 。频谱提供者可根据自身业务状况提供可用于共享的频谱资源，且所有资源均以最小可用带宽 ΔB 划分。在拍卖过程中，频谱提供者向交易代理提交当前时隙内空闲频段信息，频谱需求者则提交竞价信息，包括用频位置、保护范围、需求带宽以及相关竞价。

假设在第 j 轮拍卖中，频谱提供者 k 提交的信息为 $\langle B_k, p_{k,ask} \rangle$ ，其中 B_k 为可用信道数，则该轮次参与拍卖的总资源块数为 $N_b = \sum_{k=1}^K B_k$ ，待拍卖的空闲频谱资源集合记为 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N_b\}$ 。同时，频谱需求者根据自身的业务需要，向交易代理提供

者提交竞标信息 $\langle d_m, S_m, p_{m, \text{bid}} \rangle$, 其中 d_m 为请求信道数、 S_m 为用频区域, $p_{m, \text{bid}}$ 为用户 m 对单个频谱资源块的竞价。

假设频谱需求者 m 对资源块的估价为 P_m , 拍卖中频谱需求者根据初始估价进行竞价, 其所提交的竞价为 $p_{m, \text{bid}} = \alpha_m P_m$, 其中, $\alpha_m \in (0, 1)$ 为竞价系数。类似地, 频谱提供者 k 根据平均市场成本价格来计算资源的成本, 其实际报价为 $p_{k, \text{ask}} = \beta_k p_{k, c}$, 其中 $p_{k, c}$ 是频谱提供者 k 的单位频谱资源成本价, β_k 为报价系数。

频谱需求者 m 的用频保护区域 S_m 可表示成以 r_m 为半径, (x_m, y_m) 为中心的圆形区域, 即

$$S_m = \{(x, y) | (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 \leq r_m^2\} \quad (1)$$

拍卖中依据频谱需求者的相对位置关系和用频保护范围来判断他们是否能复用相同的频谱资源, 判断条件为

$$\begin{cases} r_m + r_v \leq l_{m, v}, m \neq v, m, v \in \mathcal{M}, \\ l_{m, v} = l_{v, m} = \sqrt{(x_m - x_v)^2 + (y_m - y_v)^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $l_{m, v}$ 表示两个频谱需求者之间的距离。干扰关系示意图如图1所示, 频谱需求者1和频谱需求者2之间存在干扰关系, 则不能同时使用相同信道。

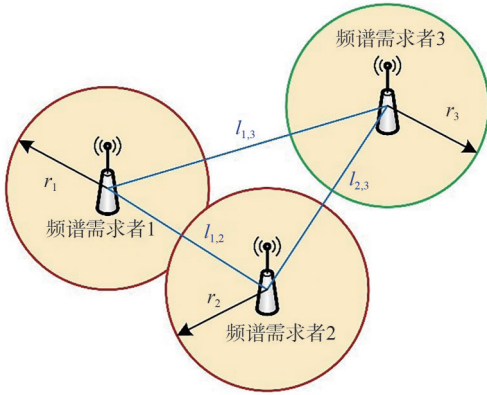


图1 干扰关系示意图

定义二元决策变量 $a_{m, n} \in \{0, 1\}$, 指示信道资源块与频谱需求者的分配关系, 其中, $a_{m, n} = 1$ 表示频谱需求者 m 在分配周期内分配信道 n , 否则表示未分配。因此, 在频谱拍卖中, 频谱需求者竞拍得到的信道数不应超过其通信需求的资源块数, 即

$$\sum_{n=1}^{N_B} a_{m, n} \leq d_m, m \in \mathcal{M} \quad (3)$$

为了提高频谱需求者接入概率, 让有限的频谱空间容纳更多通信用户, 拍卖机制允许参与拍卖的

频谱需求者申请灵活的用频保护范围。频谱需求者可以提供两个用频半径数据, 分别是期望半径 (即最大半径) $r_{m, \text{max}}$ 和最小可接受半径 $r_{m, \text{min}}$, 即 $r_m \in [r_{m, \text{min}}, r_{m, \text{max}}]$ 。

1.2 问题建模

系统效用定义为频谱需求者效用和频谱提供者效用之和, 即

$$U = \sum_{m=1}^M U_m + \sum_{k=1}^K U_k \quad (4)$$

其中, 频谱需求者 m 的效用 U_m 定义为拍卖收益的总和

$$U_m = \sum_{n=1}^{N_B} a_{m, n} (P_m - p_{m, n}), m \in \mathcal{M} \quad (5)$$

其中, $p_{m, n}$ 表示频谱需求者 m 为信道 n 实际支付的价格。

频谱提供者 k 的效用 U_k 定义为

$$U_k = -p_{k, c} B_k + \sum_{n=k_n}^{k_n + B_k} a_{m, n} p_{m, n} \quad (6)$$

拍卖中的优化问题为最大化频谱提供者效用, 根据前述条件, 整体的优化问题可被定义成 P0

$$\begin{aligned} \text{P0: } & \max_{a, r} \sum_{k=1}^K U_k \\ \text{s.t. } & \text{C1: } a_{m, n} \in \{0, 1\} \\ & \text{C2: } r_m \leq r_{m, \text{max}} \\ & \text{C3: } r_m \geq r_{m, \text{min}} \\ & \text{C4: } a_{m, n} a_{m', n} (r_m + r_{m'}) \leq l_{m, m'} \\ & \text{C5: } \sum_{n=1}^{N_B} a_{m, n} \leq d_m \end{aligned} \quad (7)$$

本文使用两阶段拍卖来实现最大化频谱提供者效用的拍卖优化问题, 两阶段拍卖示意图如图2所示, 流程如下。

(1) 第一阶段拍卖

在拍卖第一阶段中, 首先通过 McAfee 双向拍卖机制^[21-22]初步筛选出优先匹配的买家和卖家。需要注意的是, 传统 McAfee 双向拍卖中买家和卖家为一对一匹配, 但在频谱拍卖中, 一个频谱提供者可以报价出售多个信道资源块, 一个频谱需求者可以报价购买多个信道资源块, 且一个信道资源块能被多个无干扰的频谱需求者同时拍得。因此, 在为买家和卖家排序时, 需要提前做些处理。对于买家, 为其划分无冲突小组, 有多个资源块请求的频谱需求者可以出现在多个无冲突小组中, 采取组竞价的方式进行买家排序; 对于卖家, 与原先按卖家

报价排序的规则略有不同，分别对频谱提供者的多个信道资源块的报价进行排序，即有多个资源块的卖家在排序序列中会多次出现。为降低算法复杂度，在第一阶段中，按照频谱需求者的期望半径为其分配信道资源块，确定的用频保护范围有助于无冲突小组的划分。

(2) 第二阶段拍卖

执行第二轮拍卖的目的是提高资源利用率和服 务频谱用户数，第二阶段与第一阶段的主要区别在于落选或通信需求未完全满足的频谱需求者以可协商的用频范围参与竞拍。所有频谱提供者都能参与二次拍卖的双边匹配，用频范围可协调的策略使得原来已分配的信道能容纳更多频谱需求者，提高相应频谱提供者的收益，第一阶段被筛掉的频谱提供者获得二次出售资源块的机会，同样也能提升自身收益。但因第二阶段中的用频范围和收益难以保证，任何拍卖参与者都倾向于在第一阶段就能匹配成功，这种特性能够有效鼓励参与者在第一阶段拍卖中诚实地报价。

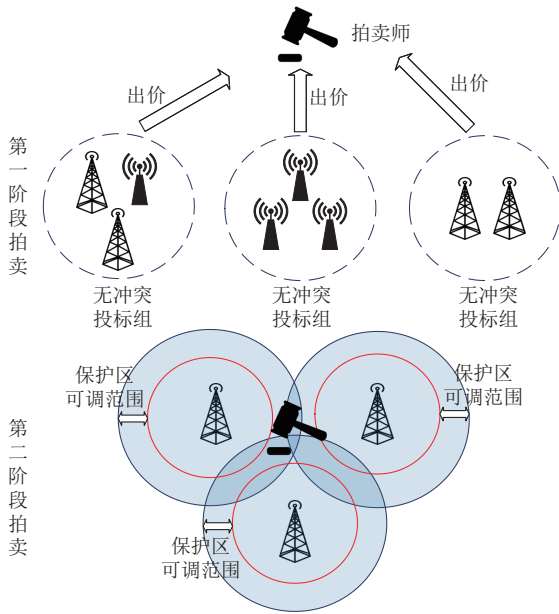


图2 两阶段拍卖示意图

2 基于干扰图的频谱拍卖算法

2.1 第一阶段拍卖

在本阶段，所有频谱需求者以期望的用频保护范围对信道资源块进行竞拍，频谱需求者的半径作为确定量，优化问题P0可转化为P1

$$\begin{aligned}
 \text{P1: } & \max_a \sum_{k=1}^K U_k \\
 \text{s.t. } & \text{C1: } a_{m,n} \in \{0, 1\} \\
 & \text{C2: } a_{m,n} a_{m',n} (r_{m,\max} + r_{m',\max}) \leq l_{m,m'} \\
 & \text{C3: } \sum_{n=1}^{N_n} a_{m,n} \leq d_m
 \end{aligned} \tag{8}$$

考虑频谱提供者的效用和频谱复用，本文根据干扰图设计了一种基于贪心策略的无冲突小组竞价的拍卖算法。由于单个信道资源块可以分配给彼此不干扰的买家，因此采取组竞价的形式为组内买家匹配卖家的信道资源，拍卖算法按预先制定的策略为买家分组。

按照频谱需求者期望的用频保护范围建立干扰图 $G(V, E)$ ，其中 V 表示节点集合， E 表示边集合^[23-24]。如果频谱需求者 i 和 j 的用频保护范围有重叠，则 E 包含两条边 e_{ij} 和 e_{ji} ，即当且仅当

$$S_i(x_i, y_i, r_{i,\max}) \cap S_j(x_j, y_j, r_{j,\max}) \neq \emptyset \tag{9}$$

有 $e_{ij}, e_{ji} \in E$ 。同时，规定 $\forall i \in V, e_{ii} \in E$ 。对于待分配的信道资源块 n ，将其对应的频谱提供者报价记作 $p_{k,\text{ask}}(n)$ ，按其值升序排列所有信道资源块，排序后的资源块序列记作非递减向量 N_{sort} ，其中 $N_{\text{sort}} \in \mathbb{R}^{N_B}$ 。

使用贪心策略为所有参与拍卖的频谱需求者划分无冲突小组，按 $p_{m,\text{bid}}$ 的值降序排列所有频谱使用者，排列后的买家序列记作非递增向量 M_{sort} ，其中 $M_{\text{sort}} \in \mathbb{R}^M$ 。在基于竞价的贪心策略中，根据频谱使用者的出价高低，依次为他们分配所属组别，这意味着出价高的用户会被优先分配所属的无冲突小组。各小组包含的频谱需求者越多，对后面加入的成员要求越严格，因新加入的频谱需求者需要满足不对组内任何其他频谱需求者造成干扰的条件，为频谱需求者选择无冲突小组时，会选择它可加入的有最大组竞价和的无冲突小组。将无冲突小组集合记作 $\mathcal{G} = \{G_1, G_2, \dots, G_{N_g}\}$ ，任意无冲突小组 G_n 内的频谱需求者都应满足下列条件

$$\forall m, m' \in G_n, e_{m,m'}, e_{m',m} \notin E, m, m' \in \mathcal{M} \tag{10}$$

对于没法加入当前任何无冲突小组的频谱需求者，将被划分到新创建的小组 G_{N_g+1} ，且有 $\mathcal{G} = \{G_1, G_2, \dots, G_{N_g+1}\} \cap G_{N_g+1}$ 。

对于请求多个信道资源块的频谱需求者 m ，在他的待分配阶段，拍卖算法会将他划分在多个无冲突小组中，为他分配的无冲突小组总数不超过需求

数 d_m 。无冲突小组 G_n 的竞价 p_{G_n} 定义为组内所有频谱使用者的竞价总和

$$p_{G_n} = \sum_{m \in G_n} p_{m, \text{bid}} \quad (11)$$

然后，按 p_{G_n} 的值排列所有无冲突小组，排列后的小组序列记作非递增向量 \mathbf{G}_{sort} ，其中 $\mathbf{G}_{\text{sort}} \in \mathbf{R}^{N_G}$ 。直至当前，无冲突小组和待拍卖资源都准备完毕，按贪心算法选出第一阶段中成功匹配双方，此阶段执行的赢家确定算法中无冲突小组和信道资源块是一对一匹配。从 $i = 1$ 开始逐个比较 $\mathbf{G}_{\text{sort}}(i)$ 和 $\mathbf{N}_{\text{sort}}(i)$ ，当出现以下情况之一时，就停止为信道和无冲突小组进行匹配，并记录 $N' = i - 1$ 。

- (1) 索引 i 大于资源数量 N_B 。
- (2) 索引 i 大于无冲突小组总数 N_G 。
- (3) 索引 i 对应的组竞价小于或等于信道出价

$G_{\text{sort}}(i) \leq N_{\text{sort}}(i)$ 。

2.2 第二阶段拍卖

在第一阶段的拍卖中，一些频谱需求者可能未能成功匹配或其通信请求未完全满足。为进一步提高频谱资源利用率和服务更多频谱用户，将启动第二阶段的拍卖。第二阶段拍卖的主要目标在于通过调节频谱需求者的用频范围，为之前未能成功匹配或需求未完全满足的买家提供机会。在这一阶段中，所有频谱提供者均有机会重新竞争，为其未能在第一阶段中完全匹配的信道资源块寻找新的买家。这种设计的目的在于确保频谱市场的连续性，进一步激发参与者的积极性。

为解决第二阶段拍卖中的信道分配和保护范围调整的联合优化问题，本文设计了一种改进的遗传算法，该算法旨在保持第一阶段已分配的信道不受干扰的前提下，优化频谱交易效益和资源利用率。

将参与第二阶段拍卖的频谱需求者集合记作

$$\mathcal{M}' = \left\{ m \in \mathcal{M} \mid \sum_{n=1}^{N_B} a_{m,n} < d_m \right\} \quad (12)$$

与此同时，待分配的信道资源集 N 保持不变。第二阶段的决策变量用 $a'_{m,n}$ 表示，频谱需求者将被分配的用频半径记作 r_m 。在第二阶段拍卖中，选择直接使用频谱需求者的竞价作为定价策略，在一定程度上保障频谱提供者的利益，避免制定比竞价更低的价格，从而维护频谱市场的公平性和鼓励频谱

提供者积极共享频谱。

因此可以建立优化问题 P2

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \max_{a', r} \sum_{k=1}^K U_k \\ \text{s.t. } & \text{C1: } a'_{m,n} \in \{0, 1\}, \forall m \in \mathcal{M}', \forall n \in \mathcal{N} \\ & \text{C2: } r_m \leq r_{m, \text{max}}, \forall m \in \mathcal{M}' \\ & \text{C3: } r_m \geq r_{m, \text{min}}, \forall m \in \mathcal{M}' \\ & \text{C4: } a'_{m,n} a'_{m',n} (r_m + r_{m'}) \leq l_{m,m'} \\ & \quad \forall m, m' \in \mathcal{M}', \forall n \in \mathcal{N} \\ & \text{C5: } \sum_{n=1}^{N_B} (a'_{m,n} + a_{m,n}) \leq d_m, \forall m \in \mathcal{M}' \\ & \text{C6: } a_{m,n} a'_{m',n} (r_{m, \text{max}} + r_{m'}) \leq l_{m,m'} \\ & \quad \forall a_{m,n} = 1, \forall m' \in \mathcal{M}' \end{aligned} \quad (13)$$

其中，目标函数 U_k 中 $p_{m,n} = p_{m, \text{bid}}$ ，约束 C1~C3 表示变量的取值空间，C4 和 C6 表示用频相互干扰的频谱需求者不能被分配到同一信道上，C5 表示频谱需求者在两轮拍卖中获得总资源数不应超过请求数。由于本阶段需要同时优化分配变量和范围变量，优化问题 P2 变成混合整数非线性规划 (MINLP, mixed-integer nonlinear programming) 问题，是一类 NP 难题，复杂度较高。为了解决这一问题，选择遗传算法作为智能优化的工具，遗传算法作为一种启发式优化方法，在解决信道分配和保护范围调整的联合优化问题中具有强大优势^[25]，具体执行过程如算法 1 所示。

算法 1 基于遗传算法的信道分配与保护范围调整的联合优化算法（第二阶段拍卖）

输入： 频谱使用者用频保护范围区间 $S_m(x_m, y_m, [r_{m, \text{min}}, r_{m, \text{max}}])$ ，需求资源数量 d_m ，竞价 $p_{m, \text{bid}}$ ；第二阶段拍卖的频谱使用者集合 \mathcal{M}' ，第二阶段拍卖的信道资源块集合 \mathcal{N}' ；第一阶段拍卖信道分配结果 $a_{m,n}$

输出： 第二阶段拍卖信道决策变量 $a'_{m,n}$ ，保护范围变量 r_m

初始化： 最大迭代次数 T_{max} ，种群规模 Size，精英保留规模 S_0 ，交叉概率 ρ_c ，变异概率 ρ_{mu} ，最大效用值 f_{best} ，最优解 X_{best}

随机生成 Size 个初始个体 X_i ，得到 $\text{Pop}(0) = \{X_1, X_2, \dots, X_{\text{Size}}\}$ 初始种群；

根据式(17)为 $\text{Pop}(0)$ 计算 $f(X_i)$ ，按 f 值升序排列 X_i 得到 Pop_{sort} ；

计算 Pop_{sort} 中个体的适应度 Fit 值；

```

 $f_{best} = f(\text{Pop}_{\text{sort}}(\text{Size}));$ 
 $X_{best} = \text{Pop}_{\text{sort}}(\text{Size});$ 
for  $i = 1: T_{\text{max}}$ 
    挑选  $\text{Pop}(i - 1)$  适应度值前  $S_0$  个个体加入子代种群  $\text{Pop}(i)$ ;
    根据锦标赛选择生成指定规模的父代种群;
    for  $k = 1: (\text{Size} - S_0)/2$ 
        在父代中随机选择两个个体, 以概率  $\rho_c$  做两点交叉操作, 形成候选子代个体;
        以概率  $\rho_{mu}$  对子代染色体信道决策部分做基本位变异, 用频段范围部分做均匀变异;
        将产生的子代加入  $\text{Pop}(i)$ ;
    end for
    根据式(17)为  $\text{Pop}(i)$  计算  $f(X_i)$ , 按  $f$  值排序排列得到  $\text{Pop}_{\text{sort}}$ ;
    计算  $\text{Pop}_{\text{sort}}$  中个体的适应度值  $\text{Fit}$ ;
    if  $f_{best} < \text{Fit}(\text{Pop}_{\text{sort}}(\text{Size}))$ 
         $f_{best} = \text{Fit}(\text{Pop}_{\text{sort}}(\text{Size}));$ 
         $X_{best} = \text{Pop}_{\text{sort}}(\text{Size});$ 
    end if
end for
    根据  $X_{best}$  解码出  $a'_{m,n}$  和  $r_m$ ;
    返回  $(a'_{m,n}, r_m)$ 

```

第二阶段拍卖结束后, 交易代理平台将频谱需求者和频谱提供者在两个阶段的匹配结果和定价策略一同发送给双方。在这过程中, 第一阶段的拍卖方案无须等待确认即可直接进行结算。然而, 对于第二阶段, 成功匹配的双方需要确认是否接受该轮次的频谱分配方案。若双方都确认接受, 双方向交易代理发送确认信息, 代理将对已确认的第二阶段拍卖方案进行结算。

3 仿真实验与分析

根据本文描述的频谱共享交易模型和提出的两阶段拍卖算法, 本节通过仿真实验展示拍卖算法的性能, 其中包括算法的收敛性、两阶段拍卖中的频谱分配特性和赢家的竞价分布性质。

3.1 仿真环境与参数设置

频谱拍卖参与者的参数设置见表1, 遗传算法的参数设置见表2。无特殊说明, 本文所有实验参数都按照表1和表2进行设置。

表1 频谱拍卖参与者的参数设置

参数名称	数值
频谱共享区域	10 km×10 km, 方形区域
频谱需求者的分布	随机均匀分布
频谱需求者数量 M /个	[10, 50]
频谱需求者信道需求 d_m /个	[1, 5]内均匀分布
频谱需求者的用频半径	[1 km, 3 km]
频谱提供者数量 K /个	[1, 10]
频谱需求者的信道资源数量/个	1
平均市场价格 P	1
平均成本价格 P^{cost}	0.6
估价波动系数 ρ_m	[0.8, 1.5]
竞价系数 α_m	[0.7, 1.0]
成本价波动系数 σ_k	[0.6, 1.3]
报价系数 β_k	[0.7, 1.0]

表2 遗传算法的参数设置

参数名称	参数值
种群大小 Size	500
交叉概率 ρ_c	0.8
变异概率 ρ_{mu}	0.1
染色体长度 Len	$M \times (N+4)$
最大迭代次数 T_{max}	500

3.2 拍卖算法的收敛性分析

在频谱资源优化问题中, 收敛性的分析对于算法的实际应用和性能评估至关重要。频谱共享交易的第一阶段拍卖算法采用贪心策略, 不涉及迭代过程。因此本文仅针对第二阶段拍卖算法的收敛性展开讨论。

3.2.1 目标函数的收敛性分析

为评估信道分配与保护范围调整的联合优化算法的普适性, 实验验证了算法在不同参数设置下的目标函数收敛性, 分别将信道资源数量和频谱需求者数量作为单一变量, 对比分析了这两种变量对算法性能的影响, 初步验证了第二阶段拍卖算法的合理性。

图3展示了相同买家数量情况下, 第二阶段拍卖效用和迭代次数的关系, 其中 M 为频谱需求者数量, N 为信道资源数量。从图3可以看出3种情景下算法都很好地收敛到稳定值。随着信道资源数量的增加, 收敛的速度变慢, 这是因为信道资源数量和搜索空间大小成正相关, 资源数越多搜索空间就越大, 寻找最优解的过程越长。同时, 可以注意到当迭代次数较少时, 目标函数值都有一段保持在零值的状态。这是因为在进化初期, 种群中个体都不满足约束条件, 不存在可行解, 但随着进化中的交叉变异操作, 个体逐渐朝着满足约束的方向靠近, 直至出现可行解, 脱离零值状态。

此外, 当信道资源数量 N 为8和13时, 目标函数值收敛到相同的稳定值。信道资源数量 N 为3

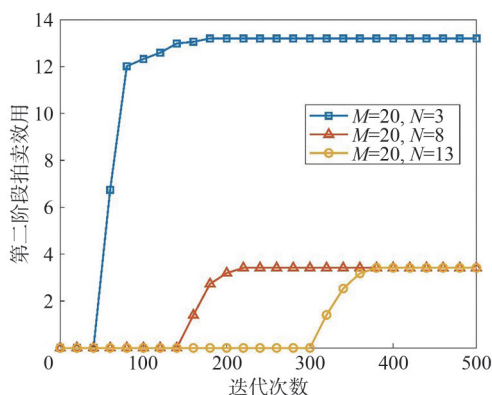


图3 相同买家数量情况下,第二阶段拍卖效用和迭代次数的关系

时,目标函数值更高,这是因为频谱需求者竞拍情况不变时,随着信道资源数的增加,第一阶段匹配成功的频谱需求者越来越多,第二阶段拍卖剩余待分配的频谱使用者减少,买家减少导致第二阶段的拍卖效用降低。当资源数量增加到一定值时,第二阶段剩余的频谱需求者不再变化。如果资源数增长至能满足所有剩余买家的用频需求,往后的增长将不再对目标函数有增益。

与图3类似,不同买家数量情况下,图4展示了第二阶段拍卖效用和迭代次数的关系,3种情景下算法都很好地收敛到稳定值,随着频谱需求者数量的增加,收敛的速度降低。这是因为频谱需求者数量增加也会导致搜索空间变大。图4中3条曲线的变化规律各异,原因在于遗传算法的随机性,搜索过程有很多条寻优路径,尽管不同实验中寻优路径有区别,但这些寻优路径都能找到最优解。与图3不同的是,随着频谱需求者数量的增加,目标函数值一直在增大,并没有出现图3里收敛到相同稳定值的情况,原因是频谱需求者的增加并不会致使第二阶段拍卖中剩余频谱使用者减少,甚至在大多数状况下,频谱需求者越多,参与第二阶段拍卖的频谱需求者就越多,不断增加的买家导致了拍卖效用的增加。

3.2.2 频谱使用者的保护半径收敛性分析

为了进一步分析算法的收敛性,本文对比了第二阶段拍卖中的成功匹配的卖家,通过观察频谱需求者保护范围的变化规律,以评估算法的性能。图5展示了第二阶段保护半径变化和迭代次数的关系,3个频谱需求者保护半径都能收敛至稳定值,但变化规律却十分不同。参数设置采用了图3和图4部分相同的参数设置,信道资源数量 $N=3$,频谱需求者数量 $M=20$ 。

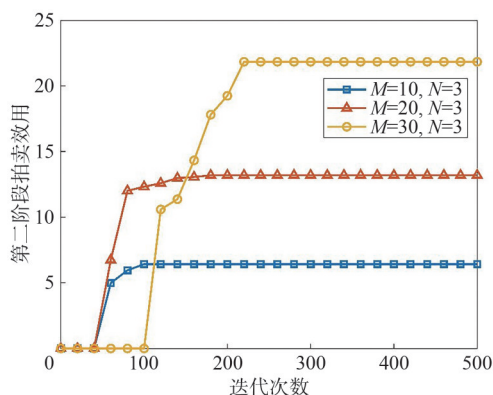


图4 不同买家数量情况下,第二阶段拍卖效用和迭代次数的关系

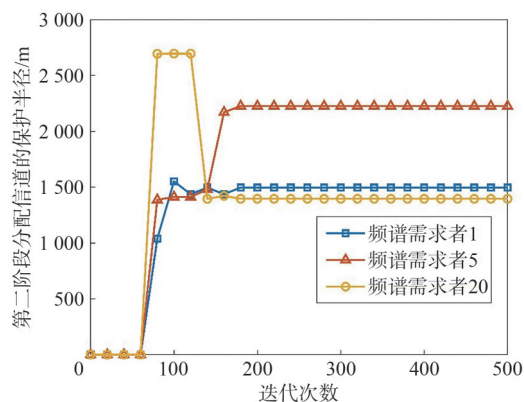


图5 第二阶段保护半径变化和迭代次数的关系

分析图5中黄色曲线可知,频谱使用者20的保护半径在迭代中,其被指定的保护半径有个骤降的趋势,出现该现象的原因是新的最优解与上一代的最优解没有联系,交叉和变异算子使得新的最优解出现。本质上是在种群进化初期,子代最优个体不总是由父代的最优个体生成,最优解会在差异性较大的早期种群内波动,从而造成频谱使用者的用频半径有一段快速变化的时期,但当目标问题逐渐收敛至最优解时,频谱需求者的用频半径变化规律趋于平滑和稳定。

3.3 频谱拍卖效益分析

拍卖机制设计的核心目的是提高系统效用,接下来将从两阶段的优化问题P1和P2来分析信道资源数量和频谱需求者数量对整体优化问题效用,并通过拍卖效用和信道复用数量两个指标来展示频谱拍卖效益。

图6展示了拍卖效用和信道资源数量的关系,信道资源数量 N 的变化区间设置为 $N \in [1, 10]$,对比分析了频谱需求者数量 M 分别为30和50时的拍卖效益和信道复用数量的变化。在两类频谱需求者数量

下，拍卖效用的走势相同，都呈现上升趋势，其中能明显观察到当频谱需求者数量较小时，在信道资源数增长的后期，有逐渐走缓的特性。对比频谱需求者数量较小的分组拍卖的系统效用可以发现，第一阶段分组拍卖效用增势也在减缓，从分组拍卖曲线和本文拍卖曲线的差可以推断出第二阶段的拍卖效用会在某个转折点之后开始下降，然后停滞。结合图3的分析可知，第二阶段的变化主要是由于剩余买家逐渐减少。对于分组拍卖，信道数目越多满足的信道需求就越多，导致剩余的效用增量降低。当所有的信道请求都被第一阶段分组拍卖满足时，第二阶段效用将归零。即使信道数量再增长，第一阶段拍卖效用也将保持不变。这会导致两阶段拍卖效用收敛到一个稳定值，不再随着信道数量变化。此外，还可看出频谱需求者数量较大的拍卖效用和比数量较少的效用高，符合市场需求越大卖家效益越高的特性。

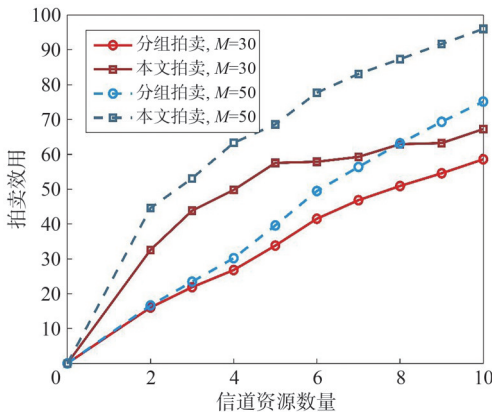


图6 拍卖效用和信道资源数量的关系

图7展示了信道复用数量和可用信道数量的关系，任意阶段的变化都基本与拍卖效用的变化规律相同。另外，第二阶段的拍卖算法能提高系统总的信道复用数量，并有效地改善频谱资源紧张情况下频谱利用率。如图6、图7所示，当信道资源数量 $N=10$ ，频谱需求者数量 $M=50$ 时，本文拍卖方案比分组拍卖能提高约50%的系统效用和信道复用数量。

3.4 用户竞价诚实性分析

本文分析了频谱拍卖机制是否满足拍卖诚实性，期望能通过仿真结果更直接地体现拍卖机制的性质。竞价区间的累积分布概率如图8所示，其参数设置与图5相同，通过统计赢得信道资源的竞价分布区间和所有频谱需求者的竞价分布区间，计算出每个竞价区间内成功匹配的总信道需求占比和所

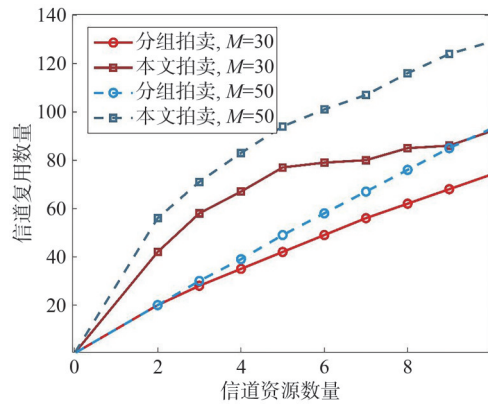


图7 信道复用数量和信道资源数量的关系

有参与竞拍的每个竞价区间内总信道需求占比，再根据计算结果，从高竞价区间往低竞价区间统计竞价的累积分布概率。

图8展示了竞价区间的累积分布概率。首先，分析第一阶段获胜竞价和所有需求者的竞价分布曲线，可以看出第一阶段获胜竞价的累积概率远大于所有需求者的竞价，这意味着第一阶段中往往是竞价高的频谱需求者成功匹配到信道，所以高价占比大。其次，对比第一阶段获胜竞价和第二阶段获胜竞价可知，由于第一阶段优先满足了大量高竞价频谱使用者，这些赢家不需要参加第二阶段拍卖，因此第二阶段高价区间内的累积分布概率占比较低。从总获胜竞价来看，在价格区间 $[0.8,0.9]$ 上，总获胜竞价的累积概率超过了所有需求竞价，这意味着很多低竞价区间的频谱需求者在拍卖中被淘汰了，该特性能避免频谱需求者恶意竞价，促使他们诚实出价。

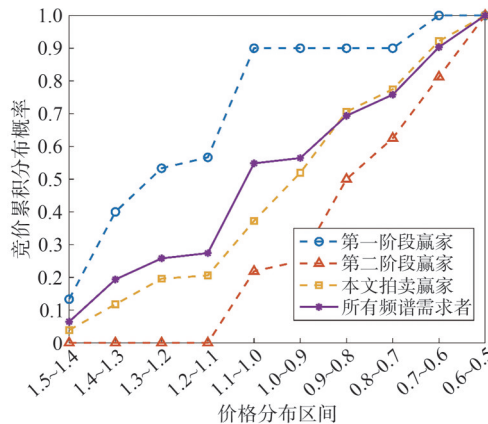


图8 竞价区间的累积分布概率

4 结束语

本文研究了频谱共享系统中多运营商的频谱交

易模型, 通过设计两阶段拍卖机制来提高频谱复用率和频谱效用。该方案通过协调用户干扰保护范围, 为频谱分配提供更灵活和高效的共享策略。第一阶段拍卖中, 构建了频谱拍卖效用最大的赢家选择和价格确定问题, 通过为频谱需求者划分无冲突竞价小组, 并采用贪心策略获得非凸问题的次优解; 第二阶段拍卖中, 构建了信道分配和保护范围调整的联合优化问题, 提出的基于遗传算法的频谱拍卖算法, 可以在避免对第一阶段赢家造成干扰的条件下, 求解最优的频谱需求者保护半径和信道分配方案。研究结果表明, 本文所提出的方案相较于传统频谱复用方案, 能够显著提高频谱利用率和拍卖效益。

参考文献:

- [1] FCC. Spectrum policy task force report[R]. ET Docket No 02-135, 2002.
- [2] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(2): 905-974.
- [3] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 218-228.
- [4] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 64(1): 110301.
- [5] SHAO X, CAO P, WANG S, et al. Non-fungible token enabled spectrum sharing for 6G wireless networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1075-1080.
- [6] LI Z G, WANG W, WU Q H, et al. Multi-operator dynamic spectrum sharing for wireless communications: a consortium blockchain enabled framework[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2023, 9(1): 3-15.
- [7] BHATTARAI S, PARK J J, GAO B, et al. An overview of dynamic spectrum sharing: ongoing initiatives, challenges, and a roadmap for future research[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2016, 2(2): 110-128.
- [8] SU Y, FAN W H, LIU Y A, et al. A truthful combinatorial auction mechanism towards mobile edge computing in industrial Internet of Things[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2023, 11(2): 1678-1691.
- [9] LI Q H, JIA X H, HUANG C H, et al. A dynamic combinatorial double auction model for cloud resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2023, 11(3): 2873-2884.
- [10] YANG T H, ZHANG R Q, CHENG X, et al. Graph coloring based resource sharing (GCRS) scheme for D2D communications underlying full-duplex cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(8): 7506-7517.
- [11] LUO Q Y, LI C L, LUAN T H, et al. Optimal utility of vehicles in LTE-V scenario: an immune clone-based spectrum allocation approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(5): 1942-1953.
- [12] CUI Y L, YANG L, LI R D, et al. Online double auction for wireless spectrum allocation with general conflict graph[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(11): 12222-12234.
- [13] DEVI M, SARMA N, DEKA S K. A double auction framework for multi-channel multi-winner heterogeneous spectrum allocation in cognitive radio networks[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 72239-72258.
- [14] 杜雯. 基于区块链的混合频谱拍卖接入模型设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [15] 张兴才. 认知无线网络中频谱资源管理策略研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [16] ZHANG X C. Research on spectrum resource management strategy of cognitive radio network[D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [17] WANG H Y, NGUYEN D N, DUTKIEWICZ E, et al. Negotiable auction based on mixed graph: a novel spectrum sharing framework[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2017, 3(3): 390-403.
- [18] ECC. ECC report 205: Licensed shared access (LSA)[R]. 2014.
- [19] FCC. Revision of the commission's rules related to equipment authorization of radio frequency devices: order on reconsideration and second report and order[R]. 2016.
- [20] YI C Y, CAI J. Two-stage spectrum sharing with combinatorial auction and Stackelberg game in recall-based cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(11): 3740-3752.
- [21] ZHU R B, LIU H, LIU L, et al. A blockchain-based two-stage secure spectrum intelligent sensing and sharing auction mechanism[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(4): 2773-2783.
- [22] CHEN Y, ZHANG Q, et al. Dynamic spectrum auction in wireless communication[M]. Singapore: Springer Press, 2015.
- [23] MOCHON A, SAEZ Y, et al. Understanding auctions[M]. Switzerland: Springer Press, 2015.
- [24] DIESTEL R. Graph theory[M]. Berlin: Springer Press, 2017.
- [25] LI Z, WANG W, GUO J, et al. Block-chain-assisted dynamic spectrum sharing in the CBRS band[C]//2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2021: 864-869.
- [26] LIN T, HSIEH K, HUANG H, et al. Applying genetic algorithms for multiradio wireless mesh network planing[J]. *IEEE Transactions Vehicular Tech-nology*, 2012, 61(5): 2256-2270.

[作者简介]



陈科(1979-), 男, 南京航空航天大学电子信息工程学院博士生, 国际电联无线电通信研究组专家, 主要研究方向为无线电频谱资源管理。



王梦莹(1999-), 女, 南京航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线网络资源分配、博弈论等。



邵翔(2000-), 男, 南京航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线网络资源分配、博弈资源优化、低空物联网等。



王威(1990-), 男, 博士, 南京航空航天大学电子信息工程学院研究员、博士生导师, 主要研究方向为下一代无线通信技术、低空物联网等。