

面向非可信节点的联合频谱感知与资源分配机制设计

黄柳碧¹, 王威², 曹平¹, 刘怡良³

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211106; 2. 西安交通大学信息与通信工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 西安交通大学网络空间安全学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对现有频谱共享系统面临的感知数据伪造、篡改导致的感知结果不可信、基于感知结果的频谱接入分配不公平等问题, 提出了一种基于感知质量的频谱共享模型, 旨在通过联合优化感知质量和接入资源分配来提高频谱共享的效率和公平性。在感知阶段, 通过主从博弈建模感知用户与需求者之间的交互关系, 感知用户优化感知质量以最大化自身收益, 需求者根据感知质量决定数据购买量, 从而实现高效、可靠的感知数据收集。在接入阶段, 基于感知质量动态地分配频谱资源, 同时结合 VCG (Vickrey-Clarke-Groves) 机制确保用户真实上报感知质量, 防止数据虚报与欺诈行为, 最终实现公平、合理的频谱分配与资源优化, 提升系统整体效率。仿真结果表明, 所提机制能够有效地激励用户提供真实感知质量, 并对诚实用户起到保护作用。

关键词: 动态频谱共享; 感知质量; 资源分配; 博弈论; VCG 机制

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2026.00508

Joint spectrum sensing and resource allocation mechanism with untrusted sensing nodes

Huang Liubi¹, Wang Wei², Cao Ping¹, Liu Yiliang³

1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China
2. School of Information and Communication Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
3. School of Cyber Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: To address the issues in spectrum sharing systems, such as unreliable sensing results because of the data falsification and unfair access allocation, a spectrum sharing model based on the sensing quality was proposed. By jointly optimizing sensing quality and access resource allocation, this model improved efficiency and fairness. In the sensing phase, a leader-follower game modeled the interaction between sensing users and demanders: the sensing users optimized sensing quality to maximize their benefits, while the demanders determined data purchases based on sensing quality, ensuring efficient and reliable data collection. In the access phase, spectrum resources were dynamically allocated based on the sensing quality, with the VCG (Vickrey-Clarke-Groves) mechanism ensuring truthful reporting and preventing data falsification and fraud. This led to fair and optimized spectrum allocation, enhancing the overall system efficiency. Simulation results show that the proposed mechanism effectively incentivizes users to report the true sensing quality and protects the honest users.

Key words: dynamic spectrum sharing, sensing quality, resource allocation, game theory, VCG mechanism

收稿日期: 2025-04-08; 修回日期: 2025-06-10

通信作者: 王威, w25wang@xjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62371231, No. 62471382, No. U22A2029); 江苏省前沿引领技术基础研究重大项目 (No. BK20222001); 江苏省重点研发计划 (产业前瞻与关键核心技术) 竞争项目 (No. BE2023027)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62371231, No. 62471382, No. U22A2029), the Natural Science Foundation on Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu (No. BK20222001), the Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (No. BE2023027)

0 引言

6G 移动通信系统旨在支持超高速率、海量连接以及通信、感知与计算的无缝融合^[1-3]，以满足各类新型智能应用。为实现这一愿景，6G 需要在频谱效率、时延性能和网络覆盖等方面实现突破性提升^[4-6]。频谱共享作为 6G 的关键使能技术之一，为实现全频谱应用、提高频谱利用率提供了可能的方案^[7-9]。然而，面向 6G 多元异构网络形成的零信任环境，频谱共享仍存在诸多挑战^[10-14]：首先，在零信任开放网络环境中，部分恶意或自私用户可能篡改或伪造感知数据，导致共享系统误判信道状态，进而造成后续频谱接入冲突，严重影响次级用户的通信质量^[15-19]；其次，如何解决传统频谱共享系统中的激励问题仍是制约频谱共享从理论走向实际的关键。现有激励机制不完善，不仅难以有效激励感知用户提供高质量的感知数据，同时也难以保障次级用户接入的公平性^[20-24]。

在感知数据获取方面，现有研究提出了多种方法来保障获取真实有效的频谱感知数据。其中，基于累计信誉值和数值计算的方法被广泛应用^[25]。累计信誉值方法通过评估用户的历史行为来判定感知数据的可靠性，能够有效地过滤掉不可信的数据。文献[26]建立了多种信任关系与信任模型，并分析了可能存在的安全和隐私问题。文献[18, 27]分别采用了信任评估模型和双信誉值模型来筛选可信数据。然而，这种方法过度依赖历史数据，在面对恶意用户的短期伪装时，难以及时识别虚假数据。数值计算方法通过统计或数学模型提供高精度的感知结果，例如，文献[28]通过计算感知节点当前行为与统计感知行为之间的差异来评估节点的可信度。文献[29]通过在线学习算法来计算可信度，并通过感知功率分配过程来更新。这种方法精度较高，但计算量大，尤其是在频谱快速变化时，难以实时响应，影响系统的适应性。为了解决感知数据验证的困难问题，一些研究提出了激励机制，通过奖励鼓励用户提供准确的感知数据，从而提高数据的可信度。文献[30]提出了一种拍卖机制，信誉较低的用户需要提高出价才能获胜，激励它们提供真实的服务质量。文献[31]将平台与用户之间的竞争关系建模为多阶段 Stackelberg 博弈，激励用户参与感知并贡献高质量感知数据。

尽管上述研究在提高感知质量方面取得了一定的成效，但大多数激励机制将感知过程与频谱接入过程分开考虑，未能实现二者的协同优化，从而影响了频谱资源的高效利用。

基于此，本文提出了一种联合频谱感知和资源分配机制，旨在将感知和接入过程有机结合，通过动态调整激励策略和资源分配实现感知结果和接入策略的协同优化，确保在非可信节点下获取可信的频谱数据并实现频谱资源的高效利用，本文主要创新点如下。

1) 针对动态频谱共享中感知数据不可信、资源分配不公平等问题，提出了一种感知与接入紧密耦合的双层模型，用户在接入阶段获得的频谱资源与感知阶段提交的感知质量直接相关，从而激励用户提交真实且高质量的感知数据，并利用 VCG (Vickrey-Clarke-Groves) 机制确保了数据的真实性。

2) 在感知阶段，将感知用户与融合中心的交互建模为主从博弈问题。为保护用户隐私，通过逆向归纳法求解多领导者单跟随者的博弈问题，得到与其他感知用户策略无关的解析解，用户无须知晓其他用户的隐私即可独立决策。为求解最优感知质量与数据购买量，提出了一种基于梯度下降法的感知数据交易算法。

3) 在接入阶段，将频谱分配问题建模为基于感知质量的资源优化问题，以最大化所有用户的总收益为目标，提出了一种带宽分配算法。此外，为实现对感知用户的激励，改进了 VCG 支付函数以保护正常用户并加大对恶意用户的惩罚，确保用户真实上报感知质量。

1 系统模型

频谱感知与接入场景模型如图 1 所示，考虑一个多用户共存的认知无线网络，该网络包含一个融合中心 (FC, fusion center)，一个主用户 (PU, primary user) 和 M 个次级用户 (SU, second user)，记为集合 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 。每个用户在申请参与任务时，向任务发布者 FC 主动汇报自我评估数据质量指标，记为 q_i ^[32]。感知质量反映了用户对自身数据质量的主观预期（如基于设备精度、位置接近度、采样频率、历史表现等）^[33]。涉及符号含义见表 1。为实现对频谱资源的高效利用、防止次级用户间的频谱接入冲突，FC 首先获取感知数据，并

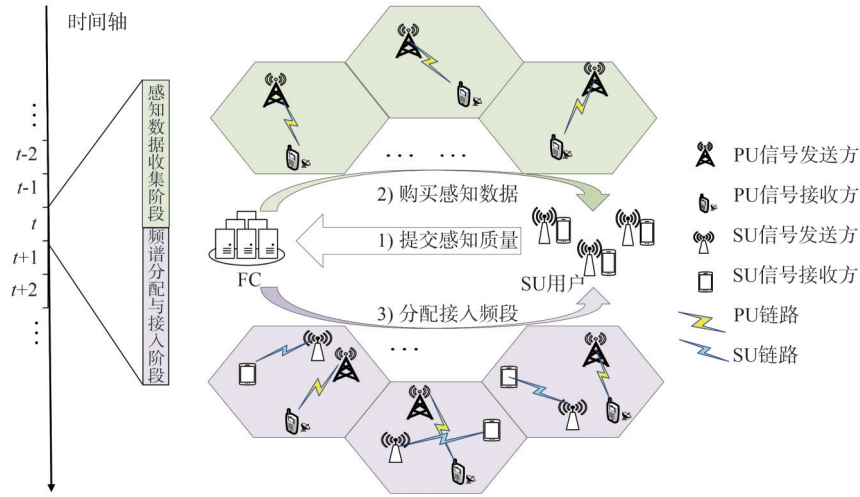


图1 频谱感知与接入场景模型

表1 涉及符号及含义

参数	含义
\mathcal{M}	次级用户集合
$q_i \in \mathcal{Q}$	用户 i 提交的感知质量
\mathcal{Q}	所有用户感知质量集合
$b_i \in \mathcal{B}$	从用户 i 处购买的感知数据量
$d_i \in \mathcal{D}$	用户 i 所分配的可接入带宽
\mathcal{D}	所有用户可接入带宽集合
C	购买感知数据量的总成本
C_i^{\max}	用户 i 的感知成本
B	可分配的总带宽
p_i	单位感知数据量的购买价格
c_i	单位感知数据量的成本
η	用户的收益系数
k	用户的成本系数

基于用户提供的感知数据质量和可用信道为每个用户分配合适的通信带宽。其中，次级用户通过执行感知任务并上报感知数据来获得频谱接入机会。

为简化分析，将系统分为两个阶段：感知数据收集阶段和频谱分配与接入阶段。在每个共享周期内，FC 首先发布感知任务给所有次级用户，集合 \mathcal{M} 中的次级用户根据自身地理位置和感知能力等条件上报所能提供的感知质量 $q_i (i \in \mathcal{M})$ ，基于此，FC 从次级用户处购买感知数据以获取可用信道信息，并根据可用信道和用户提交的感知质量分配可用带宽。恶意用户可能在感知阶段提交与实际感知结果不符的感知质量 $\hat{q}_i \neq q_i$ ，以此申请分配更多的通信带宽，破坏系统公平性。

将所有用户上报的感知质量集合记为 $\mathcal{Q} = \{q_1, q_2, \dots, q_M\}$ ，假设单位感知数据量的出售价格 p_i

与感知质量 q_i 正相关，且用户倾向于提供更高感知质量以获取更多收益。然而，感知质量的提升并非无上限，而是受到用户感知成本 C_i^{\max} 的制约。同时，在感知阶段 FC 购买的感知数据量记为 $\mathcal{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_M\}$ ，其中， b_i 表示 FC 从用户 i 处购买的感知数据量，FC 的总预算为 C 。在资源分配阶段，次级用户分配的带宽记为 $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ ，其中， d_i 表示用户 i 所分配的带宽。

基于感知质量的频谱共享机制如图2所示，所提频谱感知与共享流程如下。

- 1) 发布感知任务：FC 向所有 SU 公布感知任务要求，包括 FC 的感知预算 C 、最低感知质量等。
- 2) 感知数据收集：SU 向 FC 提交数据质量为 q_i 的任务参与申请，FC 根据 SU 提交的感知质量与自身预算来确定每个用户的感知数据购买量 b_i 。
- 3) 感知任务执行与分析：SU 依据提交的感知质量 q_i 进行感知动作，并向 FC 提交 b_i 的数据量，FC 对 SU 提供的感知数据进行分析。
- 4) 接入带宽分配：FC 通过最大化社会效益的原则为每个 SU 分配接入带宽。
- 5) 次级用户频谱接入：次级用户利用分配到的带宽进行通信，获得收益。

需要注意的是，在此过程中，用户可能会向 FC 提供与实际感知结果不符的虚假数据质量 $\hat{q}_i (\hat{q}_i \neq q_i)$ ，导致频谱接入冲突等问题。VCG 机制是一种激励相容的拍卖机制，能够实现社会福利最大化，同时保证个体理性。本文设计了一种联合频谱感知与频谱分配机制，利用 VCG 机制确保用户

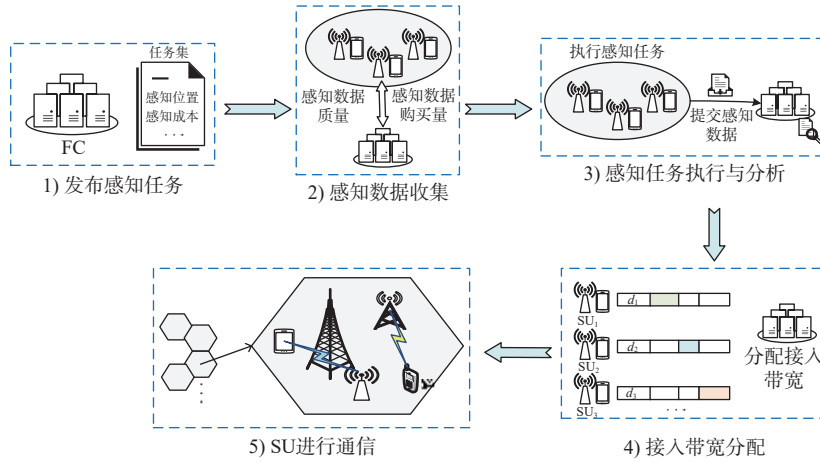


图2 基于感知质量的频谱共享机制

上报真实感知质量，实现可信感知与资源的高效分配。

2 基于 Stackelberg 博弈的感知数据获取

2.1 问题描述

在感知阶段，将问题建模为感知数据的出价与购买问题^[31]。FC发布感知任务后，任一用户*i*根据自身所处位置和感知能力决定一个与感知质量相关的出价 p_i 。设定感知质量与出价关系为 $p_i = \eta q_i$ ，其中， η 为质量与价格的转换系数，且为正常数。另外，考虑到边际成本递增效应，用户*i*的感知成本由式 $c_i = kq_i^2$ 给出， q_i 越大，成本增长速度越快。 k 为用户的成本系数， k 值越大，感知成本越高^[34]。因此，用户*i*在感知阶段的效用函数可写为

$$U_i^S = (p_i - c_i)b_i = (\eta q_i - kq_i^2)b_i \quad (1)$$

对于FC而言，购买的感知数据越多、收益越大，且感知数据质量越高，收益也越大。因此，FC的收益函数可定义为

$$U_{FC}^S = \sum_i^M q_i \ln(1 + b_i) \quad (2)$$

设定FC为博弈中的追随者，定义下层问题为在预算约束下FC的收益最大化问题，其中，策略为感知数据购买量，则可写为

$$\begin{aligned} \max_{\mathcal{B}} \quad & U_{FC}^S(\mathcal{B}, \mathcal{Q}) \\ \text{s.t.} \quad & C_1: b_i \geq 0 \\ & C_2: \sum_i^M p_i b_i \leq C \end{aligned} \quad (3)$$

其中，第一个约束条件表示购买的数据量为非负数，第二个约束条件保证购买数据所耗费资金不能超过预算C。

定义上层问题为在自身感知成本限制下，领导者（用户）的感知收益最大化问题，其中，策略为用户选择的感知质量为

$$\begin{aligned} \max_{q_i} \quad & U_i^S(q_i, b_i) \\ \text{s.t.} \quad & c_i \leq C_i^{\max}, i \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (4)$$

其中，约束条件表示由于用户自身感知能力的限制，其感知成本不能超过最高值 C_i^{\max} 。

博弈中的纳什均衡是指所有参与者的策略组合达到稳定状态，在此状态下任何参与者都无法通过单方面改变策略来获得更高收益^[35-36]。在这种情况下，纳什均衡点用最佳策略表示，即所有参与人的最优策略（用户*i*的均衡感知质量策略 q_i^* ，FC的均衡购买策略 \mathcal{B}^* ），定义如下：

对于每个用户：

$$U_i^S(q_i^*, q_{-i}^*, \mathcal{B}^*) \geq U_i^S(q_i, q_{-i}^*, \mathcal{B}^*) \quad (5)$$

其中， $-i$ 表示除用户*i*以外的其他用户，他们的最优感知质量集合用 q_{-i}^* 表示。

对于FC：

$$U_{FC}^S(\mathcal{B}^*, q^*) \geq U_{FC}^S(\mathcal{B}, q^*) \quad (6)$$

2.2 最优感知策略求解

1) FC最优策略的求解

利用逆向归纳法，先求解下层FC的利益最大化问题，再求解上层用户的最佳感知策略。首先，固定感知数据质量 \mathcal{Q} 和出价 p ，显然，FC的效用函数是策略 \mathcal{B} 的对数函数，且为凹函数。下层问题可转化为凸优化问题。设定 λ 为与约束相关联的拉格朗日乘子，拉格朗日函数表示为

$$L(\mathcal{B}, \mathcal{Q}) = \sum_i^M q_i \ln(1 + b_i) + \lambda(C - \eta q_i b_i) \quad (7)$$

求解卡鲁什-库恩-塔克 (KKT, Karush-Kuhn-Tucker) 条件, 得到FC最优策略, 即最佳频谱数据购买量

$$b_i^* = C / \left(\eta \sum_i^M q_i \right) \quad (8)$$

2) SU最优策略求解

将FC的最优策略表达式(8)代入用户的收益函数中, 可得

$$U_i(p_i, d_i^*) = (p_i - c_i)d_i^* = (\eta q_i - kq_i^2) \frac{C}{\eta \sum_i^M q_i} \quad (9)$$

为验证用户的收益函数 $U_i(q_i, d_i^*)$ 关于 q_i 的凹凸性, 分别求解 $U_i(q_i, d_i^*)$ 关于 q_i 的一阶和二阶导函数。其中, 为方便表示, 令 $A = \sum_j^M q_j$, $A_{\{v\}} = \sum_j^{M \setminus \{i\}} q_j$, 则

$$\frac{\partial U_i(q_i, d_i^*)}{\partial q_i} = \frac{C}{\eta} \cdot \left(-k + \frac{k(A_{\{v\}})^2 + \eta A_{\{v\}}}{(A)^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 U_i(q_i, d_i^*)}{\partial q_i^2} = \frac{C}{\eta} \cdot \frac{-2(k(A_{\{v\}})^2 + \eta A_{\{v\}})}{(A)^3} < 0 \quad (11)$$

显然, 用户的效用函数是关于感知数据质量 q_i 的凹函数, 求解用户效用函数的最优策略为一个凸优化问题。求解一阶导数值为0的点为

$$A_{\{v\}} = \sqrt{(q_i + A_{\{v\}})^2 + \frac{\eta^2}{4k^2}} - \frac{\eta}{2k} \quad (12)$$

为求出 q_i 的表达式, 在式(12)等式两边对 i 进行从1到M的求和, 可得

$$\sum_i^M A_{\{v\}} = (M-1)(q_i + A_{\{v\}}) = M \left(\sqrt{(q_i + A_{\{v\}})^2 + \frac{\eta^2}{4k^2}} - \frac{\eta}{2k} \right) \quad (13)$$

求解式(13)得

$$q_i + A_{\{v\}} = \frac{\eta M (M-1)}{k(2M-1)} \quad (14)$$

令 $f_{(\eta, k, M)} = \frac{\eta M (M-1)}{k(2M-1)}$, SU策略为

$$\bar{q}_i = f_{(\eta, k, M)} + \frac{\eta}{2k} - \sqrt{f_{(\eta, k, M)}^2 + \frac{\eta^2}{4k^2}} \quad (15)$$

考虑到该问题的边界约束, 用户还须将策略 \bar{q}_i 与边界值进行比较, 最优策略选择为

$$q_i^* = \min \left\{ \bar{q}_i, \sqrt{\frac{C_i^{\max}}{k}} \right\} \quad (16)$$

综上, 基于博弈论的感知数据交易算法如算法1

所示。

算法1 基于博弈论的感知数据交易算法

输入 FC成本预算 C , 用户数量 M , 收敛容忍度

tol , 收益参数 η , 成本参数 k

输出 感知质量 q 与购买量 b

1) 初始化 $t = 0$, $q_i = 0$, $b_i = 0$;

2) **while** True **do**

3) $t = t + 1$;

4) **for** $i \in M$ //根据当前感知质量计算最佳购买量

5) 根据式(8)计算 b_i ;

6) **end for**

7) 储存当前数据购买量与感知质量;

8) **for** $i \in M$

9) **if** $b_i > 0$

10) 依据式(10)计算 $\text{grad}_i = \partial U_i / \partial q_i$;

11) $q_i = q_i + \text{learning_rate} \cdot \text{grad}_i$, 梯度下降更新感知质量值;

12) $q_i = \max(0, \min(q(i), \sqrt{C_i^{\max}/k}))$, 满足成本约束和非负性;

13) **else**

14) $q_i = 0$;

15) **end if**

16) **end for**

17) **if** $\|q_i^{t+1} - q_i^t\| < \text{tol}$

18) **break**;

19) **end if**

20) **end while**

3 基于感知质量的带宽分配

3.1 问题建模与分析

在接入阶段, FC根据用户在感知阶段提交的感知数据和感知质量, 将可用空闲信道分配给次级用户。

用户的收益函数与其通信带宽 d_i 和感知质量 q_i 相关。带宽增加可提升通信收益, 但须付出资源成本。感知质量越高, 用户能更高效地利用带宽, 从而提升收益并降低成本。因此, 设定收益函数为

$$U_i^A(d_i) = \ln(1 + q_i d_i) - \frac{d_i}{q_i} \quad (17)$$

FC目标为最大化整体社会效益, 定义为

$$\begin{aligned} \max_d U_s &= \sum_i^M U_i^A(q_i, d_i) \\ \text{s.t. } \sum_i^M d_i &\leq B \end{aligned} \quad (18)$$

其中, 约束表示为所有次级用户分配的总带宽不能超过总空闲带宽 B 。

3.2 最优带宽分配算法

由式(18)可知, 总效益函数 U_s 是关于 d_i 的凹函数。引入拉格朗日乘子 λ 来构造拉格朗日函数, 则

$$L(\mathbf{d}, \lambda) = \sum_i^M U_i^A(q_i, d_i) + \lambda(B - \sum_i^M d_i) \quad (19)$$

利用拉格朗日乘子法, 即可求解出 d_i 和 λ 的表达式为

$$d_i = \frac{q_i}{\lambda q_i + 1} - \frac{1}{q_i} \quad (20)$$

$$\sum_i^M \left(1 / \left(\lambda + \frac{1}{q_i} \right) - \frac{1}{q_i} \right) = 0 \quad (21)$$

由式(21)可知, λ 无法求出闭式解, 可通过二分搜索法求解。

FC的最优频谱分配问题可转化为 λ 的一维单调优化问题, 二分搜索法可以有效地应用于此问题, 并快速收敛到最优解。

3.3 基于VCG的支付机制设计

为防止用户上传不诚实的感知质量 $\hat{q}_i (\hat{q}_i \neq q_i)$, 用户 i 在接入时须支付 $v_i(q_1, q_2, \dots, q_M)$ 。假设在用户提交感知质量后, 频谱分配结果表示为

$$\mathbf{d} = f(q_1, q_2, \dots, q_M) = \arg \max \sum_i^M U_i^A \quad (22)$$

支付函数可表示为用户 i 不参与时的最大社会福利减去用户 i 参与时的其他用户的社会福利总和为

$$\begin{aligned} v_i(q_1, q_2, \dots, q_M) &= \sum_j^{M \setminus \{i\}} U_j^A(f(\mathbf{q}_{-i})) - \\ &\sum_j^{M \setminus \{i\}} U_j^A(f(q_i, \mathbf{q}_{-i})) \end{aligned} \quad (23)$$

为进一步加大对用户不诚实行为的惩罚, 重新定义一个与预估最优感知质量相关的支付函数:

$$\begin{aligned} v_i(q_1, q_2, \dots, q_M) &= \alpha_q \cdot \sum_j^{M \setminus \{i\}} U_j^A(f(\mathbf{q}_{-i})) - \\ &\sum_j^{M \setminus \{i\}} U_j^A(f(q_i, \mathbf{q}_{-i})) \end{aligned} \quad (24)$$

其中, $\alpha_q = 1 + \rho |q_i - q^*|^2$, ρ 为一个正常系数, 代表着对非可信节点的惩罚力度。通过调整 ρ 的大

小, 可以加大或减小对用户的惩罚。由 α_q 的表达式可知, 用户上传的感知质量 q_i 与 q^* 差距越大, 接入成本越高。

改进后的支付函数式(24)使用户的作恶成本变高, 且依旧满足激励相容性。利用VCG机制的激励相容性, 用户无法通过上报虚假感知质量来获取更多的收益。假设用户 i 上报了一个与真实不符的感知质量 $\hat{q}_i (\hat{q}_i \neq q_i)$, 此时 $\hat{\mathbf{d}} = f(\hat{q}_i, \mathbf{q}_{-i})$, 收益为

$$\begin{aligned} \hat{U}_i^A &= U_i^A(\hat{q}_i, \mathbf{q}_{-i}) - v_i(\hat{q}_i, \mathbf{q}_{-i}) = \\ &\sum_j^M U_j^A(f(\hat{q}_i, \mathbf{q}_{-i})) - \alpha_q \sum_j^{M \setminus \{i\}} U_j^A(f(\mathbf{q}_{-i})) \end{aligned} \quad (25)$$

当用户上传真实值 q_i 时, 收益为

$$U_i^A = \sum_j^M U_j^A(f(q_i, \mathbf{q}_{-i})) - \alpha_q \sum_j^{M \setminus \{i\}} U_j^A(f(\mathbf{q}_{-i})) \quad (26)$$

显然, $\sum_j^M U_j^A(f(\hat{q}_i, \mathbf{q}_{-i})) < \sum_j^M U_j^A(f(q_i, \mathbf{q}_{-i}))$, 所以, 在接入过程中, 上报虚假的感知结果会使用户收益降低。用户 i 的整体收益由感知收益和接入收益两部分组成:

$$U_{\text{total}} = \beta_1 U_i^S + \beta_2 U_i^A \quad (27)$$

其中, β_1 和 β_2 分别表示感知收益系数和接入收益系数。为有效验证所提机制“以带宽资源换频谱数据”的基本思想, 本文假设用户主要收益来源为接入收益, 即 $\beta_1 < \beta_2$ 。

3.4 FC计算复杂度

在频谱数据收集阶段, FC作为主从博弈中的跟随者, 须在预算约束下优化感知数据购买量 B 以最大化收益 U_{FC}^S 。通过逆向归纳法求得 M 个用户的闭式解式(8)的计算复杂度为 $O(M)$ 。在带宽分配阶段, FC需要对每个用户 i 进行资源分配量 d_i 和支付函数 $v_i(q_1, q_2, \dots, q_M)$ 的计算。假设在通过二分法求解拉格朗日乘子 λ 时需要 T 次迭代, 每次计算式(21)的复杂度为 $O(M)$, 总复杂度为 $O(T \cdot M)$ 。在计算支付函数时, 需要为每个用户求解 M 次优化问题, 每次复杂度为 $O(T \cdot M)$, 总复杂度为 $O(T \cdot M^2)$ 。因此, FC的总计算复杂度为 $O(T \cdot M^2 + T \cdot M + M)$ 。考虑FC具备强大的计算能力, 即使在大规模用户的场景中, 也能满足实际系统的要求。

4 仿真分析

为验证所提系统和算法的有效性, 本文进行了仿真分析。首先, 分析了感知质量和感知收益与各

参数之间的关系。其次，重点研究了恶意用户行为对系统的影响，分析了在恶意用户作恶的情况下，各阶段收益和总收益的变化。仿真参数设置见表2。

表2 仿真参数设置

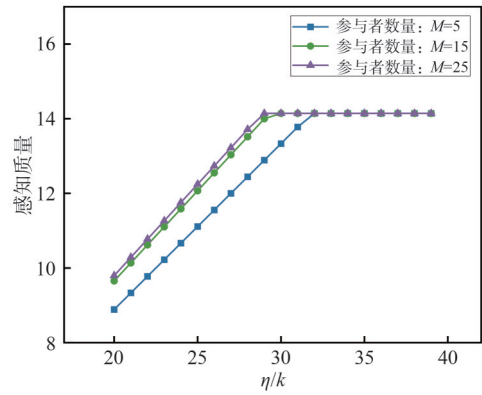
参数名称	参数值
SU数量 M	5
FC感知数据收集成本 C	100
SU感知成本 C_i^{\max}	50
可接入频谱带宽 B	30
感知数据收益系数 η	10
感知数据成本系数 k	0.5
感知收益系数 β_1	1
接入收益系数 β_2	40
支付系数 ρ	0.04

4.1 感知质量、收益与参数变化关系

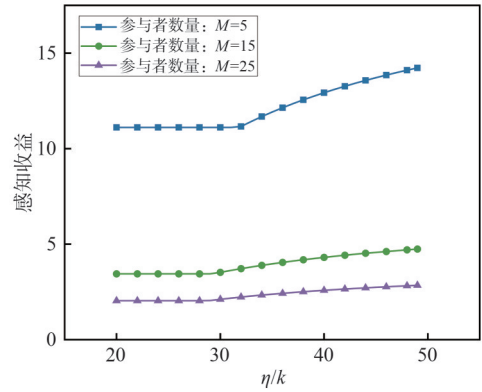
在本文的机制中，感知质量的选择被建模为一个博弈问题。用户感知质量的最优策略受当前参与者数量、收益系数与成本系数之比、用户成本上限与FC购买预算等因素的影响。

感知质量与感知收益变化如图3所示，感知质量关于收益与成本系数比值 η/k 的变化、感知收益关于收益与成本系数比值 η/k 的变化如图3(a)和图3(b)所示，分别展示了在不同参与者数量下，感知质量和感知收益随收益与成本系数比值变化的曲线。当参与者数量增加时，用户之间的竞争变得更激烈，从而促进用户提供更高质量的感知数据。然而，由于FC预算有限，每个用户的感知收益会随之降低。此外，当收益系数增大时，也会激励用户提供高质量感知数据以获取更高收益。但由于用户自身成本的限制，感知质量最终会达到一个最大值。

感知质量与感知收益的变化如图4所示，感知质量关于用户成本上限 C_{\max} 的变化、感知收益关于用户成本上限 C_{\max} 的变化如图4(a)和图4(b)所示，分别展示了在不同FC预算下，感知质量与感知收益随用户成本上限变化的曲线。此时假设各用户成本上限相同，均为 C_{\max} 。当FC预算增加时，FC能够购买更多的感知数据量，进而提高每个用户的感知收益。用户的成本上限与其能够提供的最大感知质量相关，根据最佳感知质量的计算式可以得出，感知质量会随着 C_{\max} 的增大而增大。当 C_{\max} 增大到一定值时，感知质量趋于稳定。随着感知质量的提高，FC购买感知数据量相应减少，从而导致感知收益的下降。

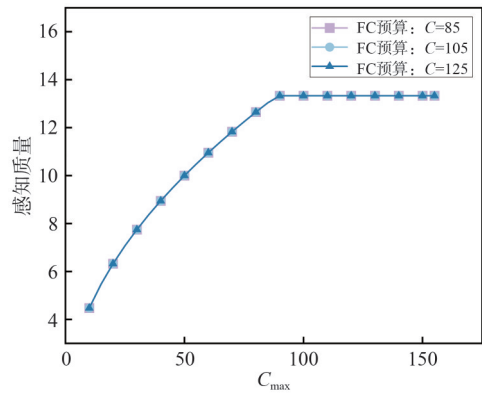


(a) 感知质量关于收益与成本系数比值 η/k 的变化

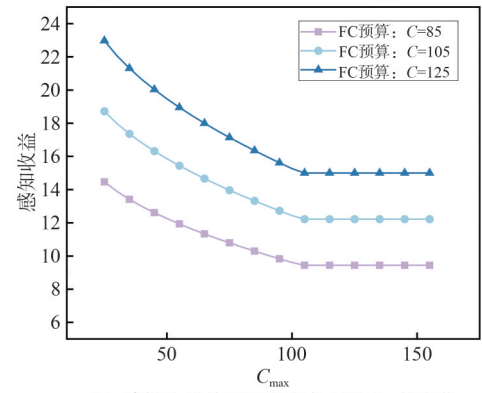


(b) 感知收益关于收益与成本系数比值 η/k 的变化

图3 感知质量与感知收益变化



(a) 感知质量关于用户成本上限 C_{\max} 的变化



(b) 感知收益关于用户成本上限 C_{\max} 的变化

图4 感知质量与感知收益的变化

4.2 恶意用户对各阶段收益与总收益的影响

在感知阶段，自私的恶意用户可能不会及时调整自身感知策略，并试图操纵感知结果来获取不当利益。感知阶段恶意用户与诚实用户感知质量与感知收益变化如图5所示，各用户感知质量变化、各用户感知收益变化如图5(a)和图5(b)所示，分别展示了恶意用户作恶时，各用户感知质量与感知收益的动态变化情况。如图5(a)所示，用户1和用户5分别代表始终上报较低感知质量和始终上报较高感知质量的恶意用户，其他用户为及时调整策略的正常用户。图5(b)显示了各用户的感知收益变化，收敛时恶意用户获得的感知收益低于正常用户。显然，无论感知质量过高或过低，都会引起感知收益的下降，因此，用户需要及时调整策略，以维持较高的感知收益。

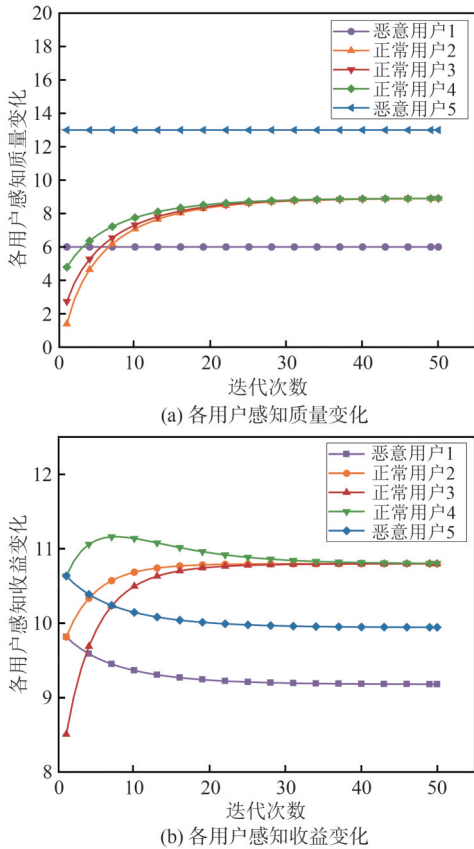


图5 感知阶段恶意用户与诚实用户感知质量与感知收益变化

在接入阶段，恶意用户可能会虚假上报与自身真实感知质量不符的值，以期获得更多的接入收益。在初始参数条件下，用户的最优上报感知质量为8.9。各用户的支付和接入收益随恶意用户上传感知质量的变化如图6所示，支付随恶意用户上传

感知质量的变化、接入收益随恶意用户上传感知质量的变化如图6(a)与图6(b)所示，展示了恶意用户(用户1)上报不同感知质量值时，各用户支付与接入收益的变化。在支付规则的作用下，用户上传过高或过低的感知质量值都会导致支付增加，从而使接入收益减少。图6(b)中可以看出，恶意用户虚假上报感知质量时，会导致自身的接入收益降低，而只有诚实上报时，才能获得与正常用户相近的接入收益。因此，恶意用户没有足够的动机去作恶。

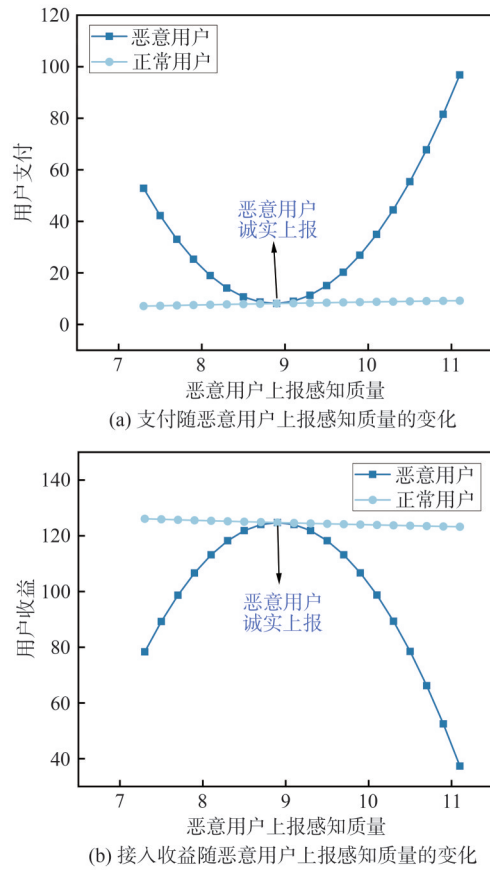
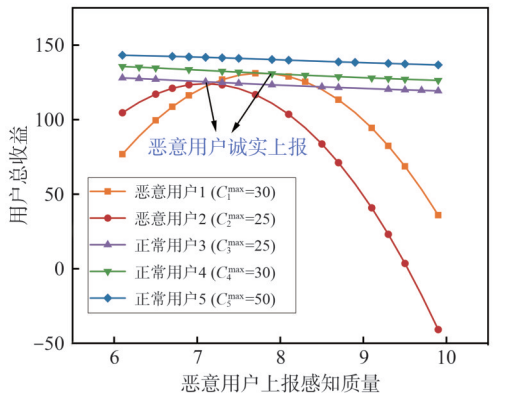


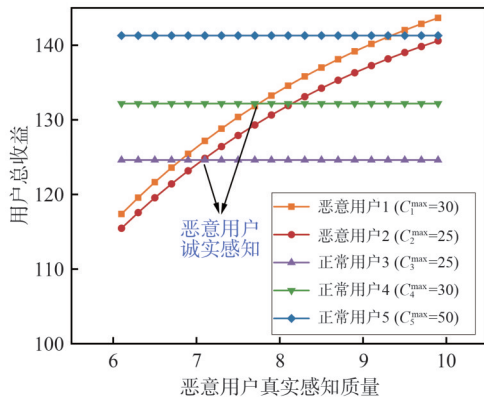
图6 各用户的支付和接入收益随恶意用户上传感知质量的变化

在感知与接入的整体共享阶段，恶意用户可能采取两种作恶策略：一是通过虚报感知质量以谋取不当利益；二是不按照上报的最佳感知质量值进行感知行为。恶意用户在两种作恶方式下，各用户收益变化如图7所示，恶意用户上传感知质量不同时，各用户收益变化、恶意用户真实感知质量不同时，各用户收益变化如图7(a)和图7(b)所示，分别展示了两种作恶方式下各用户的收益变化情况，其中，用户1和用户2为恶意用户，其余用户均为诚实用户。另外，恶意用户1与诚实用户4、恶意用户2与诚实用户3拥有相同的感知成本上限，因此

理论上它们的最优感知质量应保持一致。如图7(a)所示，恶意用户1和恶意用户2只有上报最佳感知质量时，才能获取与诚实用户相当的收益；若上报虚假值，收益将显著降低。图7(b)展示了第二种作恶方式下的收益变化，即恶意用户可能未按照上报的感知质量进行实际感知行为。在这种情况下，恶意用户若希望获得较高收益，必须提供至少高于 q^* 的感知质量数据，这对于FC的数据分析是有利的。此外，通过对比图7(a)和图7(b)中诚实用户的收益情况可以发现，收益几乎不受恶意用户行为的影响，这充分体现了该机制在保护正常用户利益方面的有效性。



(a) 恶意用户上报感知质量不同时，各用户总收益变化



(b) 恶意用户真实感知质量不同时，各用户总收益变化

图7 恶意用户在两种作恶方式下，各用户总收益变化

4.3 与现有方法的对比

本文通过系统性的对比实验验证了所提机制的优势。为与现有单阶段仿真结果进行公平比较，设计了退化实验（令 $\eta = 0$, $\alpha_q = 1$, $\beta_1 = 0$ ），将完整机制分解为独立的感知阶段数据购买优化和接入阶段VCG拍卖模型。不同可用带宽下，公平性对比如图8所示，展示了诚实用户收益与恶意用户收益比值变化的表现。在感知阶段，相比于随机定价方

案^[31]，本机制显著地提高了诚实用户与恶意用户的收益比值，仿真结果表明基于感知质量的动态定价策略能有效地提升系统公平性。在接入阶段。相比普通VCG机制^[33]，本机制作用下的诚实用户始终获得更高收益。不同感知预算下社会总收益对比如图9所示。对比图9中收益曲线可知，本机制在不同感知预算下的社会总效益均高于随机定价方案，并且随着感知预算的增加，社会总效益持续增长。因此，本机制在提高社会效益方面有显著的优势。

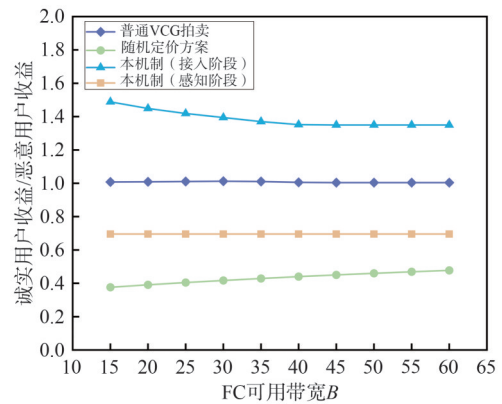


图8 不同可用带宽下公平性对比

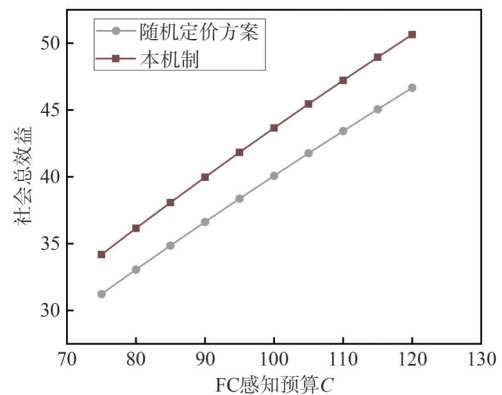


图9 不同感知预算下社会总效益对比

仿真结果表明，本机制构建了更合理的激励结构，使诚实用户始终能获得比恶意用户更高的接入收益，从而提升了系统的公平性。

5 结束语

本文提出了一种感知接入双层机制，旨在解决动态频谱共享中的不可信感知和资源分配不公等核心问题。该机制通过将感知阶段和接入阶段紧密结合，确保感知质量直接影响接入阶段的资源分配。用户在感知阶段的行为和数据质量决定了其在接入

阶段获取的带宽资源，从而实现了公平且高效的频谱资源分配。与现有方法相比，所提机制有效地应对了不可信感知带来的挑战，并通过联合优化感知与接入资源分配提升了系统的整体效能。仿真结果验证了该机制能够有效地应对恶意用户和感知数据不可靠的问题，激励用户提供可信的感知数据，同时提升了系统的资源利用效率和公平性。

参考文献:

- [1] 栾宁, 熊轲, 张煜, 等. 6G: 典型应用、关键技术与面临挑战[J]. 物联网学报, 2022, 6(1): 29-43.
Luan N, Xiong K, Zhang Y, et al. 6G: typical applications, key technologies and challenges[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(1): 29-43.
- [2] Na M, Lee J, Choi G, et al. Operator's perspective on 6G: 6G services, vision, and spectrum[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(8): 178-184.
- [3] 张海君, 陈安琪, 李亚博, 等. 6G 移动网络关键技术[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 189-202.
Zhang H J, Chen A Q, Li Y B, et al. Key technologies of 6G mobile network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 189-202.
- [4] Gür G. Expansive networks: exploiting spectrum sharing for capacity boost and 6G vision[J]. Journal of Communications and Networks, 2020, 22(6): 444-454.
- [5] Matinmikko-Blue M, Yrjöla S, Ahokangas P. Spectrum management in the 6G era: the role of regulation and spectrum sharing[C]// Proceedings of the 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [6] Yang P H, Kong L H, Chen G H. Spectrum sharing for 5G/6G URLLC: research frontiers and standards[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(2): 120-125.
- [7] Wu Q H, Wang W, Li Z G, et al. SpectrumChain: a disruptive dynamic spectrum-sharing framework for 6G[J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(3): 130302.
- [8] Cuellar D, Sallal M, Williams C. BSM-6G: blockchain-based dynamic spectrum management for 6G networks: addressing interoperability and scalability[J]. IEEE Access, 2024, 12: 59643-59664.
- [9] Polese M, Cantos-Roman X, Singh A, et al. Coexistence and spectrum sharing above 100 GHz[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(8): 928-954.
- [10] Hu S S, Liang Y C, Xiong Z H, et al. Blockchain and artificial intelligence for dynamic resource sharing in 6G and beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(4): 145-151.
- [11] Cai P X, Zhang Y. Intelligent cognitive spectrum collaboration: convergence of spectrum sensing, spectrum access, and coding technology[J]. Intelligent and Converged Networks, 2020, 1(1): 79-98.
- [12] Sun Z Q, Liang W, Qi F, et al. Blockchain-based dynamic spectrum sharing for 6G UIoT networks[J]. IEEE Network, 2021, 35(5): 143-149.
- [13] Zheng S, Han T, Jiang Y N, et al. Smart contract-based spectrum sharing transactions for multi-operators wireless communication networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 88547-88557.
- [14] Femenias G, Francisca Hinarejos M, Riera-Palou F, et al. Dynamic spectrum sharing in a blockchain enabled network with multiple cell-free massive MIMO virtual operators[J]. IEEE Access, 2024, 12: 70615-70633.
- [15] Wu J, Gao S X, Teng X Y, et al. Beta distribution function-based cooperative spectrum sensing against Byzantine attack in cognitive wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Letters, 2024, 8(5): 7500404.
- [16] Golvaei M, Fakharzadeh M. A fast soft decision algorithm for cooperative spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(1): 241-245.
- [17] Ye J W, Kang X, Liang Y C, et al. A trust-centric privacy-preserving blockchain for dynamic spectrum management in IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 13263-13278.
- [18] Li X H, Zhang Y L, Ding H C, et al. Intelligent spectrum sensing and access with partial observation based on hierarchical multi-agent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(4): 3131-3145.
- [19] Shao X, Wang W. Truthful double auction for multiple secondary operator spectrum sharing with flexible bidding[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(15): 31813-31823.
- [20] 郭彩丽, 陈九九, 宣一荻, 等. 动态时空数据驱动的认知车联网频谱感知与共享技术研究[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 96-105.
Guo C L, Chen J J, Xuan Y D, et al. Research on the spectrum sensing and sharing technology in the dynamic spatiotemporal data driven cognitive Internet of vehicles[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 96-105.
- [21] Bhowmik M, Malathi P. Load balancing using game theory in cognitive radio network[C]//Proceedings of the 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). Piscataway: IEEE Press, 2017: 582-587.
- [22] Chen J X, Wu Q H, Xu Y H, et al. Joint task assignment and spectrum allocation in heterogeneous UAV communication networks: a coalition formation game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1): 440-452.
- [23] Netalkar P, Zahabee A, Caicedo Bastidas C E, et al. Large-scale dynamic spectrum access with IEEE 1900.5.2 spectrum consumption models[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [24] Revathy J, Senthil M. Resource allocation in next generation networks using game theory[C]//Proceedings of the International Conference on Information Communication and Embedded Sys-

tems (ICICES2014). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.

- [25] 孙志国, 王钊, 陈增茂, 等. 基于双重信誉值与多角度权值的抗SSDF攻击协作频谱感知方法[J]. 通信学报, 2023, 44(12): 134-145.
Sun Z G, Wang Z, Chen Z M, et al. Double reputation and multi-angle weight-based cooperative spectrum sensing method against SSDF attacks[J]. Journal on Communications, 2023, 44(12): 134-145.
- [26] Ting H L J, Kang X, Li T Y, et al. On the trust and trust modeling for the future fully-connected digital world: a comprehensive study[J]. IEEE Access, 2021, 9: 106743-106783.
- [27] Xu Z Y, Sun Z G, Guo L L. Throughput maximization of collaborative spectrum sensing under SSDF attacks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8): 8378-8383.
- [28] Yao D G, Yuan S G, Lv Z B, et al. An enhanced cooperative spectrum sensing scheme against SSDF attack based on Dempster-Shafer evidence theory for cognitive wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 175881-175890.
- [29] Fu Y H, He Z M. Energy-efficient joint spectrum sensing and power allocation in cognitive IoT under SSDF attack[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(1): 186-197.
- [30] Wang Y, Jiang F L, Xu Y H, et al. Blockchain-based spectrum sharing for FANET cooperative communication[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(10): 2707-2711.
- [31] Gu B, Yang X X, Lin Z Q, et al. Multiagent actor-critic network-based incentive mechanism for mobile crowdsensing in industrial systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(9): 6182-6191.
- [32] Zhao C, Yang S S, McCann J A. On the data quality in privacy-preserving mobile crowdsensing systems with untruthful reporting[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(2): 647-661.
- [33] Liu S Z, Zheng Z Z, Wu F, et al. Context-aware data quality estimation in mobile crowdsensing[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [34] Han K, Huang H, Luo J. Quality-aware pricing for mobile crowdsensing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(4): 1728-1741.
- [35] 牛阳阳, 尉志青, 冯志勇. 基于博弈论的空时频谱共享: 动态接入与惩罚策略[J]. 通信学报, 2023, 44(12): 28-38.
Niu Y Y, Yu Z Q, Feng Z Y. Space-time spectrum sharing based on game theory: dynamic access and penalty strategy[J]. Journal on Communications, 2023, 44(12): 28-38.
- [36] 丁晓进, 徐叶辉, 包文, 等. 融合Stackelberg博弈和联邦学习的多星协作频谱认知方法研究[J]. 通信学报, 2024, 45(2): 90-105.
Ding X J, Xu Y H, Bao W, et al. Study on multi-satellite cooperative spectrum cognitive method integrating Stackelberg game and federated learning[J]. Journal on Communications, 2024, 45(2): 90-105.

[作者简介]



黄柳碧(2002-), 女, 南京航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为动态频谱共享机制、可信频谱感知。



王威(1990-), 男, 博士, 西安交通大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为无线通信、空天地一体化网络、网络与电磁安全。



曹平(1990-), 男, 南京航空航天大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为区块链、频谱安全。



刘怡良(1990-), 男, 博士, 西安交通大学网络空间安全学院副教授, 主要研究方向为物理层安全、无线通信。