

# 一种改进型防止策略性操纵的信道分配协议

王诗, 刘一凡, 张敏

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁葫芦岛, 125105)

**摘要** 针对认知无线电信道分配过程中作弊次用户(SU)对未作弊SU性能存在影响的问题, 利用最适交易循环(TTC)匹配理论, 提出一种名为改进TTC的信道分配协议(ITTC)。ITTC按照SU对于信道的喜好排序进行分配, 将改变真实喜好列表排序的行为视为作弊。SU作弊只能获得更差的分配性能, 未作弊者获得不低于原来性能的分配结果, 从而有效解决因作弊造成的不公平性。为定量分析ITTC的分配性能, 设计并使用了一种量化SU分配结果的评估方法(PEM-SU)。PEM-SU对PU网络以及SU数据包到达、分配、传输过程进行设置, 将分配结果转化为统一形式进行性能量化。利用PEM-SU与二次申请延时接收协议(SPDA)和TTC协议的对比, 结果表明, ITTC在平均吞吐量、时延、队长和拒绝率上均优于SPDA和TTC, 且能够有效防止策略性操纵, 保护未作弊SU的利益。

**关键词** 认知无线电; 信道分配; 系统性能评估; 改进最适交易循环; 防止策略性操纵

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.06.012

**中图分类号** TP393 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)06-0086-09

## An Improved Channel Allocation Protocol in Prevention of Strategic Manipulation

WANG Shi, LIU Yifan, ZHANG Min

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning, China)

**Abstract** In view of cheating behavior of the secondary user (SU) affecting the performance of non-cheating SU in the process of cognitive radio channel allocation, a channel allocation protocol named the improved top trading cycles (ITTC) is proposed according to the top trading cycle (TTC) matching theory. The ITTC allocates channels according to the preference ranking of SUs, and the behavior of changing the ranking of the true preference list is in consideration of cheating. The cheating SUs can only obtain worse allocation performance, while non-cheating SUs can obtain the same or even better allocation results than before, effectively solving the unfairness caused by cheating. For quantitatively analyzing the allocate performance indicators, a performance evaluation method of SU (PEM-SU) is designed. PEM-SU configures the PU network, as well as the arrival, distribution, and transmission of SU, and unifies the results into a form that can be quantified for performance. The experimental results compared with the secondary proposed deferred acceptance (SPDA) protocol and TTC protocol show that the ITTC is prior to SPDA and TTC in the average throughput, average latency, average queue length and average rejection rate. And also can effectively prevent strategic manipulation and protect the interests of non-cheating SUs.

**收稿日期:** 2023-07-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(61971210); 辽宁省自然科学基金项目(2019-BS-114); 辽宁省教育厅基础科研(LJKMZ20220677)

**作者简介:** 王诗(1983-), 男, 辽宁阜新人, 副教授, 博士, 研究方向为认知无线电信道分配和排队论。E-mail: 15378567@qq.com

**通信作者:** 刘一凡(1998-), 女, 陕西商洛人, 硕士生, 研究方向为认知无线电信道分配。E-mail: 1037172622@qq.com

**引用格式:** 王诗, 刘一凡, 张敏. 一种改进型防止策略性操纵的信道分配协议[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 86-94. WANG Shi, LIU Yifan, ZHANG Min. An Improved Channel Allocation Protocol in Prevention of Strategic Manipulation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 86-94.

**Key words** cognitive radio; channel allocation; performance evaluation; improved top trading cycles; prevent strategic manipulation

信道分配是认知无线电(cognitive radio, CR)的重要组成部分,对于解决有限频谱资源下频谱空洞问题起着关键作用<sup>[1-2]</sup>。CR包含两类用户,一类是获得授权频谱的主用户(primary user, PU),另一类是未获得授权频谱的次用户(secondary user, SU)<sup>[3]</sup>。针对不同SU接入方式,CR网络分为overlay和underlay两种类型<sup>[4]</sup>。前者只有当频谱未被PU占用时,SU才能够使用该频谱;后者SU对于PU的干扰小于某个固定阈值时,SU能够与PU同时进行数据传输<sup>[5]</sup>。由于underlay在某些时间段难以满足SU成功传输所需的最小信噪比,因此本文主要采用overlay<sup>[6]</sup>接入方式,并在PU未占用信道时使用信道协议进行分配。在无线通信中,信道分配的主要目标为提高频谱利用率、减少主用户的影响以及维护系统性能。文献[7]提出了一种基于深度学习提高吞吐量的动态卫星信道分配算法。文献[8]提出一种最大吞吐量协议。文献[9]应用纳什均衡概念来提高频谱利用率。文献[10]使用模糊逻辑来降低丢包率。文献[11]提出了一种平衡PU和SU传输需求的功率控制方案。总的来说,文献[7~11]不同程度上实现了信道分配协议所想要实现的目标,但存在一些限制,设定所有SU的行为都符合实际情况,并且没有作弊行为。当存在作弊行为时,如何提高系统性能并保护PU和非作弊SU的传输需要进行研究。

针对此问题,基于最适交易循环(top trading cycles, TTC)匹配方式<sup>[12-13]</sup>,本文提出了一种实现动态频谱分配的改进最适交易循环(improved top trading cycles, ITTC)协议。在分配过程中,设定用户对于信道的喜好与其在不同信道上传输速率有关,这与文献[14]和文献[15]所提出的用户对于信道接入顺序相对应,保证了系统的有效传输。该协议具有防止策略性操纵的特性,即用户无法通过作弊行为获得更好的分配结果。

为验证ITTC在CR信道分配中的适用性,需要对分配结果的性能进行量化。文献[16]提出一种评估不同数据包到达率下各种算法运行时间的方法。文献[17]将传输过程与自适应编码技术(adaptive modulation and coding, AMC)相结合,衡量吞吐量差距。文献[18]对比了不同用户总数下,各种分配协议的干扰效率。以上方法实现了不同协议的差距评估,但仅从整体上衡量,对于每个协议下SU分配结果的性能不明确。针对此问题,本文设计并使用了一种量化各个SU分配结果性能差距的方法(performance evaluation method of secondary user,

er, PEM-SU)。并利用PEM-SU将ITTC协议与二次申请的延时接收协议(secondary proposed deferred acceptance, SPDA)<sup>[15]</sup>和TTC协议<sup>[19]</sup>的性能进行对比,以验证其有效性。

## 1 系统模型

### 1.1 系统模型概述

本文所提的系统模型是基于CR网络进行设计的,见图1。该系统模型由PU和SU组成,其中,SU网络由一个SU基站和多个SU组成,并在PU网络覆盖下进行数据传输。

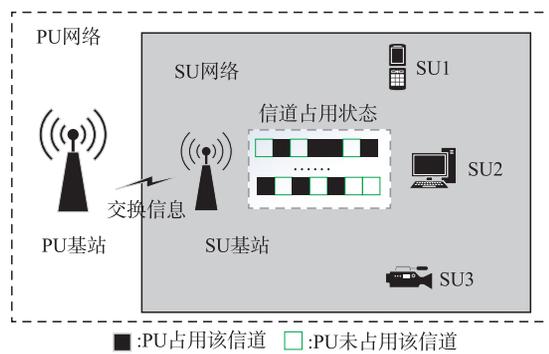


图1 系统模型

PU在任何时候都有信道优先使用权<sup>[20]</sup>,当PU需要占用SU正在进行传输的信道时,SU数据传输会被强制中断,造成额外成本<sup>[5,21]</sup>。为减少PU对SU数据传输的干扰,提高系统效率和可靠性,本系统设置一个时隙 $T$ ,包含频谱感知、信道分配和数据传输3部分<sup>[22]</sup>。在一个时隙内,频谱感知完成后,未被PU占用的可用信道仅提供给待分配的SU使用。时隙结束后,PU才能够对信道进行再次占用。

### 1.2 PU模型

#### 1.2.1 PU行为建模

PU对于信道占用行为是基于马尔可夫数学模型建模的动态变化过程<sup>[23]</sup>,其占用情况决定SU能够使用的信道数量。令 $O_j^T \in \{0, 1\}$ ,  $j \in [1, N]$ ,其中, $O_j^T$ 为在 $T$ 时隙PU占用信道 $j$ 的情况, $N$ 为PU信道数量。 $O_j^T = 0$ 表示信道未被占用,信道状态为“free”; $O_j^T = 1$ 表示占用,信道状态为“busy”<sup>[8]</sup>。PU对于第 $j$ 条信道的占用行为可表示为:

$$\mathbf{P}_j = \begin{bmatrix} p_{b \rightarrow b}^j & 1 - p_{b \rightarrow b}^j \\ 1 - p_{f \rightarrow f}^j & p_{f \rightarrow f}^j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $p_{b \rightarrow b}^j$ 表示在 $T-1$ 和 $T$ 时隙,PU同时占用第 $j$ 条信道的概率,即 $p_{b \rightarrow b}^j = \Pr\{O_j^T = 1 | O_j^{T-1} = 1\}$ , $1 - p_{f \rightarrow f}^j$ 表示第 $j$ 条信道在 $T-1$ 时隙未被PU占用,但

在时隙  $T$  被占用的概率,即  $1 - p_{f \rightarrow f}^j = \Pr\{O_j^T = 1 | O_j^{T-1} = 0\}$ ,同理,  $p_{f \rightarrow f}^j = \Pr\{O_j^T = 0 | O_j^{T-1} = 0\}$ ,  $1 - p_{b \rightarrow b}^j = \Pr\{O_j^T = 0 | O_j^{T-1} = 1\}$ 。

### 1.2.2 PU 信道状态

信道状态包括信道占用情况和信道状态转移信息,不同的信道状态代表用户在信道传输过程中的不同衰落情况。第  $j$  条 PU 信道根据 SU 接收机的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)分为  $Q_s^j$  个信道状态区间,设置为有干扰无记忆的离散信道, SU 在第  $j$  条 PU 信道上的状态概率转移矩阵表示为:

$$\boldsymbol{\theta}_j = \begin{bmatrix} \theta_{1,1} & \cdots & \theta_{1,Q_s^j} \\ \vdots & \theta_{a,b} & \vdots \\ \theta_{Q_s^j,1} & \cdots & \theta_{Q_s^j,Q_s^j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\theta_{a,b}$  表示在第  $j$  条信道上,信道状态由状态  $a$  变化为状态  $b$  的转移概率。假设状态变化仅发生在 2 个相邻状态之间,即  $|a-b| > 1, \theta_{a,b} = 0$ 。

设定信道为瑞利信道, SNR 呈概率密度指数分布,表达式为:

$$p(\gamma_i^j) = \frac{\exp(-\gamma_i^j/\bar{\gamma}_i^j)}{\bar{\gamma}_i^j} \quad (3)$$

式中:  $\gamma_i^j \geq 0$  表示第  $i$  个 SU 在第  $j$  条信道上的 SNR;  $\bar{\gamma}_i^j$  为其平均值;  $\Gamma_k$  为  $k$  状态边界的 SNR 值,第  $i$  个 SU 在第  $j$  条信道上第  $k$  种状态所对应的稳态概率为:

$$\pi_{CS,i(k)}^j = \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} p(\gamma_i^j) dx \quad (4)$$

已知稳态概率后,信道状态  $k$  变为状态  $k+1$  的概率计算式为:

$$\theta_{k,k+1} \approx \frac{f_m T}{\pi_{CS,i(k)}^j} \sqrt{\frac{2\pi\Gamma_{k+1}}{\bar{\gamma}_i^j}} \exp\left(-\frac{\Gamma_{k+1}}{\bar{\gamma}_i^j}\right) \quad (5)$$

式中:  $f_m$  为最大多普勒频率。信道状态  $k$  变为状态  $k-1$  的概率计算式为:

$$\theta_{k,k-1} \approx \frac{f_m T}{\pi_{CS,i(k)}^j} \sqrt{\frac{2\pi\Gamma_k}{\bar{\gamma}_i^j}} \exp\left(-\frac{\Gamma_k}{\bar{\gamma}_i^j}\right) \quad (6)$$

已知信道状态转移概率后,所有信道的状态转移矩阵表示为:

$$\boldsymbol{\Phi} = (\mathbf{P}_1 \otimes \cdots \otimes \mathbf{P}_N) \otimes (\boldsymbol{\theta}_1 \otimes \cdots \otimes \boldsymbol{\theta}_N) \quad (7)$$

通过计算,得到信道状态转移矩阵,从而完成频谱感知。

## 2 队列模型

队列模型用于描述队列中数据包的到达传输过程,包括数据包到达、调制方式、SU 队列状态。

### 2.1 数据包到达

SU 数据包到达状态独立且概率相同<sup>[8]</sup>,到达

概率向量  $\boldsymbol{\alpha}$  为:

$$\boldsymbol{\alpha} = \{\alpha_i | \alpha_i = (\alpha_i(0), \cdots, \alpha_i(m_i)) | i \in [1, M]\} \quad (8)$$

式中:  $\alpha_i(j)$  表示第  $i$  个用户到达  $j$  个数据包的概率;  $m_i$  为第  $i$  个 SU 到达数据包数量最大值;  $M$  为 SU 数量。

不同数据包到达概率之和为 1,即:

$$\sum_{j=1}^{m_i} \alpha_i(j) = 1 \quad (9)$$

$T$  时隙下第  $i$  个 SU 到达数据包总数可表示为:

$$A_T^i = \sum_{j=1}^{m_i} \alpha_i(j) j \quad (10)$$

数据包到达后,按照分配协议进行用户和信道分配。分配完成后,为了能够准确量化每个协议下 SU 分配结果,将结果转化为统一形式,由概率向量矩阵  $\mathbf{V}_{ur}$  表示,即:

$$\mathbf{V}_{ur} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (11)$$

式中:  $a_{ij} \in \{0, 1\}$ ,  $a_{ij} = 1$  表示第  $i$  个 SU 和第  $j$  条信道匹配成功,  $a_{ij} = 0$  表示未匹配成功。

### 2.2 调制方式

信道分配完成后,采用 AMC 技术将待传输数据发送到基站,完成数据包传输<sup>[22]</sup>。在 SU 数据传输过程中,其调制方式(modulation coding scheme, MCS)由 SU 传输信道状态决定,每个信道状态区间(信噪比区间)有一个对应的调制方式。SU 通过选择合适的 MCS 以实现 AMC 过程并保证系统传输质量<sup>[24]</sup>。基站则根据代表终端信道服务质量的 SNR 来选择合适的 MCS<sup>[25]</sup>。

MCS 由不同数量数据包离开排队系统概率表示。MCS 所计算的期望值越高,数据包离开数量越多。根据信道变化条件选择合适的 MCS,可最大限度提高无线信道的传输容量。第  $i$  个 SU 的调制方式  $\mathbf{M}_i$  表示为:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} r_{10} & \cdots & r_{1Q_s^j-1} \\ \vdots & r_{zn} & \vdots \\ r_{Q_s^j,0} & \cdots & r_{Q_s^j,Q_s^j-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{M}_i$  为第  $i$  个 SU 所对应的  $Q_s^j$  种调制方式集合;  $r_{zn}$  为第  $z$  种 MCS 下  $i$  个数据包离开的概率。在时隙  $T$  下,第  $i$  个 SU 在第  $z$  种 MCS 下数据包离开数量为:

$$R_T^i = \sum_{n=0}^{Q_s^j-1} nr_{zn} \quad (13)$$

信道实现高效传输的 MCS 选择过程如下:1) 统计信道所对应的 SNR 下各种 MCS 的误码率(bit error rate, BER);2) 判断 MCS 对应误码率大小是否符合要求选择调制方式,即若误码率小于瑞利信

道计算出的数据包误码率固定值,则选择该调制方式;否则,该调制方式不被选择。MCS选择后,数据包传输数量得以计算,传输质量也得以保证。

MCS的BER和SNR满足以下关系:

$$\text{BER}_i^z = \int_{\frac{1}{\sqrt{2\text{SNR}}}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\sqrt{2\text{SNR}}}{2} x\right) dx \quad (14)$$

### 2.3 SU队列状态

队列状态是 $T$ 时隙末队列中数据包数量,由上时隙末队列中数据包数量、本时隙数据包到达数量和传输离开的数据包数量组成:

$$L_T^i = L_{T-1}^i - R_T^i + A_T^i \quad (15)$$

式中: $L_{T-1}^i$ 为 $T-1$ 时隙末队列中数据包数量。

数据包到达数量大于缓存区能够容纳的最大数据包数量后,超出的部分则会被拒绝。 $T$ 时隙第 $i$ 个SU拒绝数据包个数表示为:

$$D_T^i = A_T^i - K_i + L_{T-1}^i + R_T^i \quad (16)$$

式中: $K_i$ 为第 $i$ 个SU缓存区大小。

## 3 分配协议

### 3.1 基本信息

TTC协议是基于申请方对于待分配方的喜好排序进行分配的过程且适用条件是双方数量相等。在实际的通信系统中,PU对于信道的占用和待分配SU进行数据传输的过程都具有随机性, $M$ 和 $N$ 的数量不一定相等,TTC协议在通信系统中不具有普适性。本文针对用户和信道不等和相等的情况均进行了预处理,使得用户能够保留较为喜欢的信道进行分配且适用于无线通信中信道的变化情况。经过预处理后,待分配用户和信道数量相等,此时可使用TTC协议进行分配。

SU对于信道的喜好排序与用户在信道上的传输速率相对应。在分配过程中,未分配用户在喜好列表的可选信道中,选择喜好度最高的信道,而信道按照固定的方式选择用户,若构成循环,则用户和所选信道匹配成功,SU获得该信道<sup>[26-27]</sup>。若未构成循环,SU继续在剩余可选择的信道中进行选择,直到分配成功<sup>[27]</sup>。

### 3.2 SU的喜好列表

SU对于信道喜好排序是基于SU在不同信道上的传输速率获得的,而传输速率受MCS和信道状态信息影响。为了便于对信道排序,结合信道状态信息特性,使用不影响当前时隙状态信息的初始状态代表不同信道,所有信道初始状态表示为:

$$I = \{I_j | I_j \in [1, N], j \in [1, N]\} \quad (17)$$

式中: $I_j$ 为第 $j$ 条信道的初始状态;第 $i$ 个在初始状态为 $j$ 的信道上传输数据包数量是SU在第 $j$ 种MCS的期望值。

传输数据包数量越多,用户对于该信道喜好程度越高。反之,喜好越靠后。因此,可得到SU对所有信道由高到低的喜好排序。本文设置了 $M$ 个用户和 $N$ 个信道,所有SU对于信道的喜好排序表示为:

$$F_{\text{su}} = \begin{bmatrix} c_{f_{11}} & \cdots & c_{f_{1N}} \\ \vdots & c_{f_{ij}} & \vdots \\ c_{f_{M1}} & \cdots & c_{f_{MN}} \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (18)$$

式中: $c_{f_{ij}} \in \{c_1, \dots, c_N\}$ , $c_{f_{ij}}$ 表示第 $i$ 个SU喜好排序中第 $j$ 个信道, $f_{ij} \in \{1, \dots, N\}$ , $f_{ij}$ 表示第 $i$ 个SU喜好排序中第 $j$ 个信道所对应的下标。

### 3.3 算法描述

ITTC进行分配前,若待分配用户和频谱感知后可用信道数量不同,需选择出等数量的用户和信道进行分配。假设可用信道数量为 $B$ , $1 \leq B \leq N$ 。为更大限度保证每个SU参与分配的可能性相同并能获得最喜欢的信道,ITTC需进行预处理。

当 $M > B$ ,按照等概率原则,随机选择出 $B$ 个SU作为待分配用户。

当 $M < B$ ,需选择 $M$ 个信道进行分配。每个SU依次选择一个信道,将其纳入待分配信道集合。每个SU在选择时,总是在可用信道中选择最喜欢的信道作为待分配信道。若该信道未被其他SU选择,则该信道直接成为待分配信道。若该信道已经被其他SU所选择,则SU将选择喜好列表中下一个可选信道,以此类推。

当 $M = B$ ,直接进行SU和可用信道分配。ITTC预处理过程如算法1所示。

算法1 ITTC协议的预处理

---

输入 PU所有信道集合 $C = \{c_j | j \in \{1, 2, \dots, N\}\}$ ;PU空闲信道集合 $C_1 = \{c_j | j \in \{1, 2, \dots, B\}\}$ , $C_1 \subseteq C$ ;SU用户集合 $U = \{u_i | i \in \{1, 2, \dots, M\}\}$ ,SU的喜好排序 $F_{\text{SU}}$

输出 待分配信道集合 $C_2$ ,待分配用户集合 $U_1$ ,仅含可用信道喜好排序矩阵 $F_{\text{SU}}$

Initialize  $C_2 \leftarrow \{\}$ ,  $U_1 \leftarrow \{\}$

if  $M = B$  then

$C_2 \leftarrow C_1$ ,  $U_1 \leftarrow U$

else if  $M > B$  then

add  $M$   $u_i$  from  $U$  randomly into  $U_1$ ,  $C_2 \leftarrow C_1$

else

$U_1 \leftarrow U$

for  $i = 1$  to  $M$  do

for  $j = 1$  to  $N$  do

if  $c_{f_{ij}} \notin C_2$  and  $c_{f_{ij}} \in C_1$  then

add  $c_{f_{ij}}$  to  $C_2$

end if

end for

end for

end if

返回: $C_2$ ,  $U_1$ 和 $F_{\text{SU}}$

---

在进行完预处理后,得到数量相等的待分配的可用信道和待传输数据的用户,此时可以使用经典 TTC 协议进行信道分配,分配过程如算法 2 所示。

算法 2 TTC 协议的预处理

输入:待分配信道集合  $C_2$ ,待分配用户集合  $U_1$ ,仅保留了可用信道的喜好排序矩阵  $F_{SU}$

输出:分配结果矩阵  $V_{UR} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}_{M \times N}$

初始化:令  $a_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, M\}, j \in \{1, \dots, N\}, G \leftarrow \{\}$

迭代过程:

while  $U_1 \neq \emptyset$  do

  for  $c_j \in C_2$  do

    for  $u_i \in U_1$  do

      add  $(u_i, c_{f_{ij}})$  to  $G, c_{f_{ij}} \in F_{SU}$

      add  $(c_j, u_i)$  to  $G, |j-i|$  is min  $|j-i|$

    end for

  end for

  for  $(c_j, u_i) \in G$  do

    for  $(u_i, c_{f_{i1}}) \in G$  do

      if  $c_j$  of  $(c_j, u_i) \neq c_{f_{i1}}$  then

        delete the  $(c_j, u_i)$  in  $G$

        delete the  $(u_i, c_{f_{i1}})$  in  $G$ , which  $u_i$  of  $(u_i, c_{f_{i1}}) = u_i$  of  $(c_j, u_i)$

        break

      else

$G \leftarrow G$

      end if

    end for

  end for

  for  $(u_i, c_{f_{i1}}) \in G$  do

$a_{if_{i1}} = 1$

    delete the  $c_{f_{i1}}$  in  $F_{SU}$  and  $C_2$

    delete the  $u_i$  in  $U_1$

  end for

end while

返回:  $V_{ur}$

分配完成后,由  $V_{ur}$  矩阵表示分配结果进行数据传输。在数据传输过程中,记录不同协议下各个 SU 的传输数据,计算性能指标值。

### 3.4 性能指标计算

PEM-SU 使用平均吞吐量、平均时延、平均拒绝率和平均队长等 4 个性能指标进行信道分配结果评估。

1) 平均吞吐量。平均吞吐量表示一个时隙  $T$  内传输数据包数量期望的平均值,是衡量网络性能主要指标,单位 kbit/s,计算为:

$$\overline{Th} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T R_T^i \quad (19)$$

2) 平均时延。平均时延表示一个数据包从到达到结束的平均时间,计算式为:

$$\overline{D} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T L_T^i \frac{T}{R_T^i} \quad (20)$$

式中:  $\frac{T}{R_T^i}$  为一个数据包从到达离开所需要的时间。

3) 平均拒绝率。平均拒绝率为  $T$  时隙下被拒绝数据包数量与数据包到达数量比值的平均值,计算式为:

$$\overline{Re} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T \frac{D_T^i}{A_T^i} \quad (21)$$

4) 平均队长。平均队长为  $T$  时隙下第  $i$  个 SU 队列状态平均值,计算式为:

$$\overline{L} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T L_T^i \quad (22)$$

分配协议性能越好,传输数据包数量越多,传输速度越快,对应的平均吞吐量就越大,平均时延随之变小,平均队长越短。到达数据包被拒绝的数量减少,平均拒绝率就越低,响应能力及网络可靠性越高<sup>[28]</sup>。

### 3.5 PEM-SU 流程

PEM-SU 采用了排队模型,具体步骤如下:

**步骤 1** PU 信道建模。将 PU 对于信道的占用行为和信道状态变化建模为马尔科夫模型,获得可提供给 SU 使用的信道相关信息,完成频谱感知。

**步骤 2** SU 系统建模。对 SU 的缓存区大小、数据包到达过程,队列状态和 MCS 进行建模。

**步骤 3** 设置仿真次数  $Y$ 。进行多次仿真,得到性能分配指标的的稳定平均值。

**步骤 4** 信道分配。通过信道分配协议,将可用信道和待传输数据包的 SU 进行分配,结果转化为相同的概率向量矩阵。

**步骤 5** 数据传输。使用 AMC 技术,将数据传送到基站,并且记录相关性能指标。

**步骤 6** 判断是否达到仿真次数上限。若达到,求得性能指标平均值,算法结束;若未达到,返回步骤 3 继续进行仿真实验。

## 4 实验结果与分析

为验证 ITTC 协议应用于信道分配中的分配效果和是否具有防止作弊能力,设置 4 组仿真。

第 1 组仿真以缓存区大小作为自变量对比 ITTC 与 TTC 协议<sup>[19]</sup>的性能指标;第 2 组仿真以数据包到达数量作为自变量对比 ITTC 与 SPDA 协议<sup>[15]</sup>;第 3 组仿真以缓存区大小作为自变量,对比 ITTC 与 SPDA 在有无 SU 作弊行为下结果的变化,用于验证 ITTC 协议是否具有防止作弊的能力;第 4 组仿真对比 ITTC 与 SPDA 分配所需时间长

短,验证 ITTC 协议在分配时间上是否具有高效性。

仿真实验中相关参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数设置

参数	类型 1	类型 2	类型 3
$M, N$	$M=5, N=5$	$M=3, N=5$	$M=10, N=12$
用户名称	U1~U5	U1~U3	U1~U10
信道名称	C1~C5	C1~C5	C1~C12
初始状态	$I_1 \sim I_5$	$I_1 \sim I_3$	$I_1 \sim I_{12}$
调制方式	$M_1 \sim M_5$	$M_1 \sim M_3$	$M_1 \sim M_{10}$
状态转移矩阵	$\theta_1 \sim \theta_5$	$\theta_1 \sim \theta_5$	$\theta_1 \sim \theta_{12}$
PU 行为矩阵	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix}$
缓存区大小	[0,10]	10	[0,20]
到达概率 $\alpha$	(0.3,0.2,0.5)	$P \in [\frac{1}{1000}, 1]$	(0.3,0.2,0.5)
仿真次数 $Y$	1 000	1 000	1 000

#### 4.1 ITTC 与 TTC 分配协议性能评估

为满足 TTC 协议使用条件将参数设置为类型 1,在缓存区不断变化情况下,比较 ITTC 与 TTC 平均吞吐量和平均时延结果。由图 2 可知,仅改变缓存区大小,不同信道分配协议下平均吞吐量和平均时延逐渐增大。在相同缓存大小下,对于同一用户,ITTC 与 TTC 分配协议的结果显示,平均吞吐量前者较后者更高,而平均时延则前者较后者更低。

因此,IFFC 协议能够使用户获得更好的分配性能。

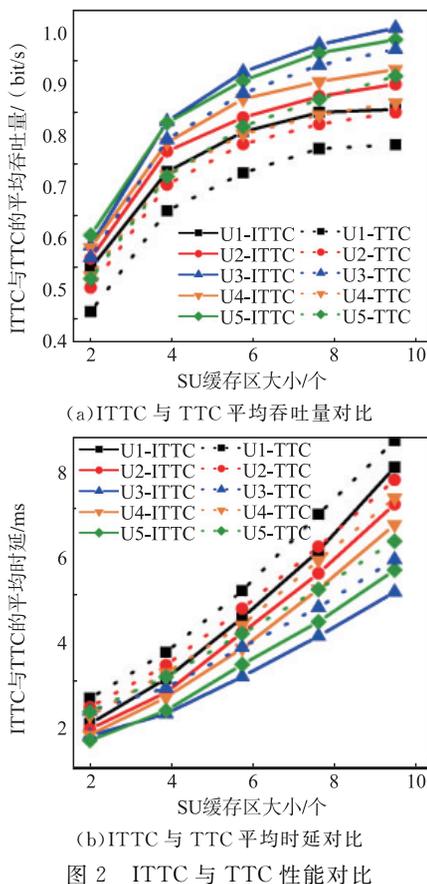


图 2 ITTC 与 TTC 性能对比

#### 4.2 ITTC 与 SPDA 分配协议性能评估

为检验本文所提出的 ITTC 信道分配协议和 PEM-SU 评估方法能否适用于不同条件下的多用户多信道 CR 系统,选择与 ITTC 同是基于喜好排序实现稳定分配的 SPDA 协议进行分配。参数设置如表 1 类型 2 所示,以平均拒绝率和平均队长作为评价指标,仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在其他参数保持不变,改变单位时隙内数据包到达数量时,不同信道分配协议下的平均队长逐渐增大;对于平均拒绝率,当到达的数据包未超过缓存区的最大值时,应用两种协议进行信道分配拒绝率均为 0,但当单位时隙数据包到达数量大于 400 时,ITTC 平均拒绝率小于 SPDA。因此,ITTC 协议相较于 SPDA 协议性能更好,且 PEM-SU 能够有效评估用户性能差距。

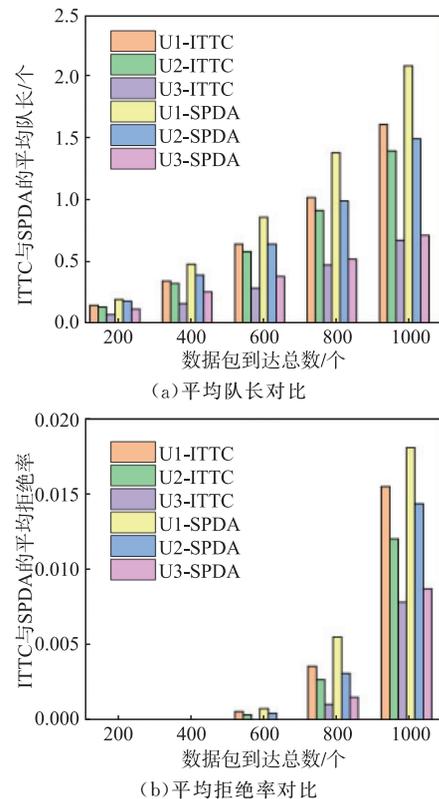


图 3 ITTC 与 SPDA 性能对比

#### 4.3 防止策略性操纵性能评估

##### 4.3.1 $M=3$ 时防止策略性操纵性能评估

为了验证 ITTC 和 SPDA 这 2 种稳定分配协议对于 SU 通过作弊企图操控信道分配结果这一行为的控制能力,分别采用 ITTC 以及 SPDA 协议在有、无用户作弊行为下进行多次重复信道分配仿真实验,获得用户性能评价指标。

仿真参数设置为表 1 中类型 2。通过第 4.2 节中的仿真数据结论可先验得知,用户 3 在各性能评价指标下较用户 1、2 更优,因此分别应用 ITTC 和 SPDA 2 种协议,获得用户 1、2 改变喜好排序下的

信道分配结果性能评价指标,与不改变喜好排序行为时进行对比。为使作弊行为能够有统一的方式,按照文献[29]中所提出的将申请者喜好排序进行反转,验证在此情况下申请者能否获得更高喜好匹配的方式进行实验,ITTC 协议和 SPDA 协议在有无用户作弊行为下的平均吞吐量如图 4 和图 5 所示,平均时延如图 6 和图 7 所示。

“Cheat”表示为用户 1、2 改变喜好排序,存在“作弊”行为下的仿真实验,以缓存区大小为 2 情况为例,每种情况进行 10 次重复实验。

由图 4~图 7 可知,应用 ITTC 协议进行信道分配时,用户 1、2 存在作弊行为(改变喜好排序)与不存在该行为相比,前者较后者平均吞吐量更低,而平均时延则前者较后者更高;反之,更加“诚实”的用户 3 在其他用户存在作弊行为与不存在该行为相比,前者较后者平均吞吐量更高,而平均时延则前者较后者更低。应用 SPDA 协议的结果可知,作弊用户获得平均吞吐量、时延性能更好的结果,未作弊者性能受作弊 SU 的影响,性能变差。上述结果表明:  $M=3$  时,ITTC 具有防止策略性操纵特性,而 SPDA 不具有此特性。

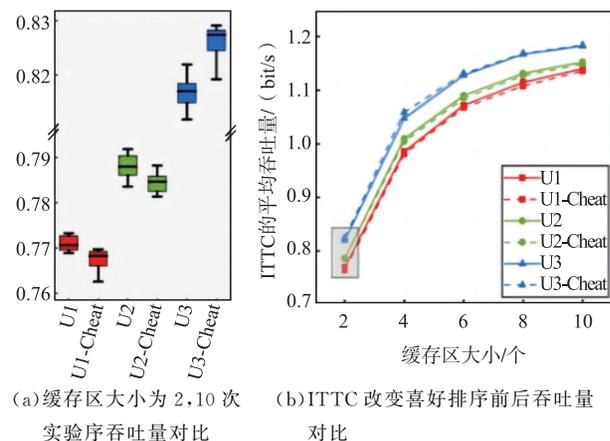


图 4 ITTC 用户作弊前后平均吞吐量对比

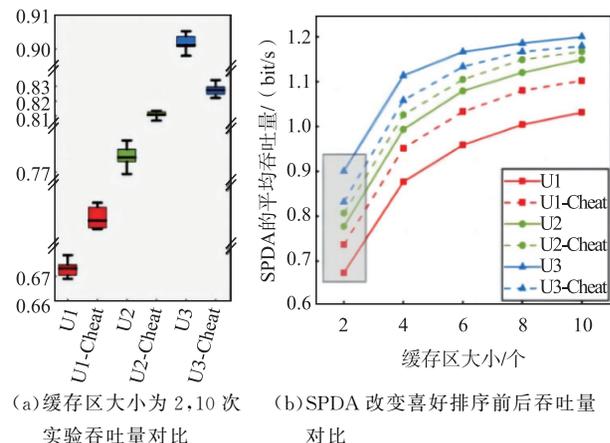


图 5 SPDA 用户作弊前后平均吞吐量对比

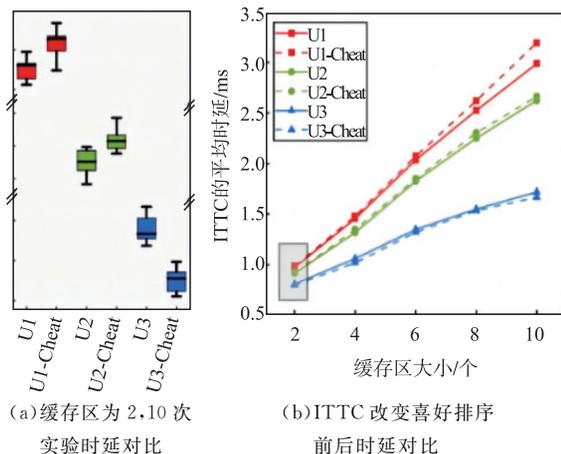


图 6 ITTC 用户作弊前后平均时延对比

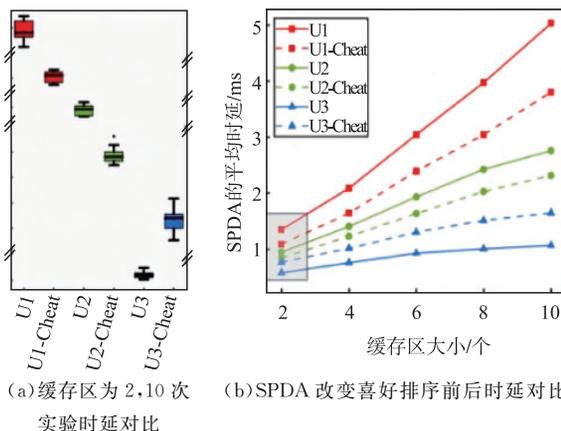


图 7 SPDA 用户作弊前后平均时延对比

4.3.2  $M=10$  时防止策略性操纵性能评估

为验证 ITTC 和 SPDA 协议在 SU 数量较多的情况下是否具有防止策略操纵的特点,将参数设置为类型 3,对比 SU 在有无作弊行为下的性能结果见表 2。

表 2 ITTC 协议存在作弊与非作弊行为的结果对比

用户	平均吞吐量/ (bit/s)	平均时延/ ms	平均队长/ 个	平均拒绝率/ %
U1-TRUE	0.827 9	6.004 7	5.437	914.98
U1-UNCHEAT	0.893 6	5.886 2	5.118 5	9.24
U2-TRUE	0.887 9	5.986 3	5.213 4	13.69
U2-UNCHEAT	0.900 8	5.689 4	4.985	86.14
U3-TRUE	0.748 9	6.534 2	6.324	917.56
U3-CHEAT	0.698 2	6.985 6	6.859 6	22.85
U4-TRUE	0.801 2	6.057 8	5.569 8	12.89
U4-UNCHEAT	0.835 9	5.748 9	5.230	79.89
U5-TRUE	0.768 6	6.452 3	5.996 3	14.87
U5-CHEAT	0.735 6	6.854 6	6.398	516.56
U6-TRUE	0.817 5	6.124 5	5.489 6	11.78
U6-UNCHEAT	0.836 5	5.852 3	5.412 3	8.65
U7-TRUE	0.687 9	7.896 3	7.698 5	23.56
U7-CHEAT	0.645 6	8.214 6	8.015 6	25.42
U8-TRUE	0.827 8	6.152 3	5.984 6	12.48
U8-UNCHEAT	0.866 9	5.802 5	5.326 9	6.45
U9-TRUE	0.637 8	8.214 5	7.845 9	18.26
U9-CHEAT	0.604 8	8.679 8	8.015 6	23.58
U10-TRUE	0.859 6	5.756 9	5.304 7	5.95
U10-UNCHEAT	0.889 6	5.468 9	5.004 2	3.76

由表2可知,当用户按照真实喜好“true”排序进行分配时,用户1、2、4、6、8、10获得喜好度更高,传输性能更好的信道。而用户3、5、7、9的性能较差。反向改变较差用户的喜好排序构成作弊“cheat”行为,结果表明存在作弊行为的SU相比于未发生作弊行为时平均吞吐量降低;平均时延、平均队长和平均拒绝率增大。同时,未作弊用户平均吞吐量提高;平均时延、平均队长和平均拒绝率降低,获得了更好的分配结果。因此,ITTC协议能够有效抑制策略性操纵行为。

表3 SPDA协议存在作弊与非作弊行为的结果对比

用户	平均吞吐量/平均时延/平均队长/平均拒绝率/			
	(bit/s)	ms	个	%
U1-TRUE	0.804 8	6.537 2	5.869 3	16.75
U1-UNCHEAT	0.833 6	6.002 3	5.856 9	12.34
U2-TRUE	0.768 9	6.942 2	6.345 1	17.63
U2-CHEAT	0.744 5	7.025 1	6.551 4	17.99
U3-TRUE	0.748 5	6.536 2	6.326 6	17.98
U3-CHEAT	0.791 6	6.121 5	5.681 6	13.82
U4-TRUE	0.799 5	6.060 3	5.573 4	13.02
U4-UNCHEAT	0.776 5	6.108 8	5.699 2	13.99
U5-TRUE	0.762 5	6.482 2	6.003 3	14.98
U5-CHEAT	0.769 8	6.412 5	5.998 2	14.31
U6-TRUE	0.811 9	6.127 7	5.501 1	12.01
U6-UNCHEAT	0.799 6	6.381 7	5.725 4	12.87
U7-TRUE	0.680 3	7.910 1	7.700 6	23.97
U7-CHEAT	0.692 5	7.872 5	7.695 2	23.18
U8-TRUE	0.815 5	6.152 3	5.984 6	12.48
U8-UNCHEAT	0.842 5	5.915 7	5.284 4	6.81
U9-TRUE	0.623 3	8.468 5	7.966 4	18.59
U9-CHEAT	0.615 3	8.589 7	8.252 4	23.07
U10-TRUE	0.844 5	5.853 3	5.745 5	6.01
U10-UNCHEAT	0.826 7	5.976 1	5.988 8	8.32

由表3可知,当用户按照真实喜好“true”排序进行分配时,用户1、4、6、8、10传输性能更好。而用户2、3、5、7、9的性能较差。反向改变较差用户的喜好排序构成作弊“cheat”行为,结果表明用户3、5、7存在作弊行为相比于未发生作弊行为时平均吞吐量增加;平均时延、平均队长和平均拒绝率减小,获得了更好的分配结果。未作弊用户4、6、10平均吞吐量降低;平均时延、平均队长和平均拒绝率增大,获得了更差的分配结果。因此,在作弊行为出现时,SPDA协议结果具有不可控性。同时,由表2和表3可知,在缓存区大小均为10的情况下,ITTC协议平均吞吐量大于SPDA协议,平均时延、队长和拒绝率略小于SPDA协议。

在ITTC分配过程中,由于SU对于信道的喜好排序与信道能够传输数据包数量呈正相关关系,对于用户而言,按照真实喜好排序进行信道选择,匹配的结果是最优解。当SU企图通过改变自身喜好

列表排序获得更好的分配结果时,存在其余SU和信道的指向关系未发生改变,即使作弊SU提前与改变喜好排序后喜好度更高的信道构成匹配,此时分配结果所对应的信道相比于真实喜好排序中信道相同或者传输速率更差。

在SPDA分配过程中,由SU依次向信道发出申请,信道则从中选择出最喜欢的用户,存在SU未被较喜欢的信道选择甚至落选的情况,SU分配结果较差。在SU改变喜好排序时,受信道抉择的影响,待分配SU结果波动性较大。

由上述结果可知,ITTC协议在用户存在作弊行为时,具有防止策略性操纵特性能有效保证分配的公平性,而SPDA协议则不具有此特性。

#### 4.4 分配协议运行时间仿真

为了比较协议的运行时间,分别记录ITTC和SPDA在两种参数设置下10次重复实验下分配所需平均时间,实验结果如表4所示。由表4可知,SU数量越大,所需要分配运行时间越长。在相同数量下,ITTC协议运行时间短于SPDA协议。

表4 ITTC和SPDA协议仿真时间对比

SU数量	ITTC平均运行时间/s	SPDA平均运行时间/s
M=3	337	356
M=5	527	634
M=10	1 537	2 334

## 5 结语

本文提出了一种实现动态信道分配的ITTC协议,该协议具有防止策略性操纵特性,能有效保证分配公平性的同时,使用户实现更好分配结果。为了验证ITTC协议的优劣性,本文设计并使用了一套能够有效量化每个SU分配结果的性能评估方法,并使用该方法设计实施了多组仿真实验。实验结果表明:①ITTC协议在平均吞吐量、平均时延、平均拒绝率和平均队长各项分配性能指标上优于TTC和SPDA协议;②ITTC更有利于防止用户作弊行为,能够减少分配过程中的不公平性,且ITTC协议所需分配时间短于SPDA协议;③PEM-SU能够有效评估不同协议的SU分配结果。

#### 参考文献

- [1] 董金福. 基于认知无线电的频谱感知技术经典算法研究[J]. 通信与信息技术, 2023(1): 16-20.
- [2] 朱圣铭, 杨霄鹏, 肖楠, 等. 星地认知网络中基于图论的动态频谱划分算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(3): 41-46.

- [3] ZHU S, WANG J, LI W. Optimal Service Rate in Cognitive Radio Networks with Different Queue Length Information [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 51577-51586.
- [4] WANG Y, TANG X, WANG T. A Unified QoS and Security Provisioning Framework for Wiretap Cognitive Radio Networks: A Statistical Queueing Analysis Approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(3): 1548-1565.
- [5] ZHENG K, LIU X Y, LIU X, et al. Hybrid Overlay-Underlay Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(7): 4669-4682.
- [6] LIU Y, QIN X, HUANG Y, et al. Maximizing Energy Efficiency in Hybrid Overlay-Underlay Cognitive Radio Networks Based on Energy Harvesting-Cooperative Spectrum Sensing [J]. *Energies*, 2022, 15(8): 2803.
- [7] 唐一强, 杨霄鹏, 肖楠, 等. 基于深度强化学习的卫星信道动态分配算法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 23(2): 61-67.
- [8] WANG S, MAHARAJ B T, ALFA A S. A Maximum Throughput Channel Allocation Protocol in Multi-Channel Multi-User Cognitive Radio Network [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2018, 20(2): 111-121.
- [9] SOFIA D S, EDWARD A S. Auction Based Game Theory in Cognitive Radio Networks for Dynamic Spectrum Allocation[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2020, 86: 106734.
- [10] YILMAZEL R, INANÇ N. A Novel Approach for Channel Allocation in OFDM Based Cognitive Radio Technology[J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 120(1): 307-321.
- [11] ALOQAILY M, SALAMEH H B, AL RIDHAWI I, et al. A Multi-Stage Resource-Constrained Spectrum Access Mechanism for Cognitive Radio Iot Networks; Time-Spectrum Block Utilization[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 110: 254-266.
- [12] HONG M, PARK J. Core and Top Trading Cycles in a Market with Indivisible Goods and Externalities[J]. *Journal of Mathematical Economics*, 2022, 100: 102627.
- [13] TROYAN P. Obviously Strategy-Proof Implementation of Top Trading Cycles[J]. *International Economic Review*, 2019, 60(3): 1249-1261.
- [14] SHRIVASTAV V, DHURANDHER S K, WOUNGAN I, et al. Game Theory-Based Channel Allocation in Cognitive Radio Networks[C]//2016 IEEE Global Communications Conference. [S. l.]:IEEE, 2016: 1-5.
- [15] RAHIM M, ALFAKEEH A S, HUSSAIN R, et al. Efficient Channel Allocation Using Matching Theory for QoS Provisioning in Cognitive Radio Networks [J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1872.
- [16] KYRYK M, PLESKANKA N, YANYSHYN V. Performance Evaluation Model for Spectrum Decision Methods in Cognitive Radio[C]//2017 14th International Conference the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. [S. l.]:IEEE, 2017: 289-291.
- [17] BORKOTOKY S S, KOTTAPALLI S L, PURSLEY M B. Analytical Methods for Performance Evaluations of Adaptive Modulation and Coding in Cognitive Radio Systems that Employ Distance Statistics [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(1): 73-81.
- [18] 朱圣铭, 杨霄鹏, 刘东健, 等. 基于干扰效率的星地认知网络功率分配算法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(3): 62-67.
- [19] DOĞAN B, EHLERS L. Robust Minimal Instability of the Top Trading Cycles Mechanism[J]. *American Economic Journal: Microeconomics*, 2022, 14(4): 556-582.
- [20] 韩旭. 认知无线电 Underlay 模式下的宽带频谱感知关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2020.
- [21] 刘婷婷, 申海, 张琳. 认知无线电现状及关键技术探讨[J]. *信息系统工程*, 2018(03): 31.
- [22] PHUNG-DUC T, AKUTSU K, KAWANISHI K, et al. Queueing Models for Cognitive Wireless Networks with Sensing Time of Secondary Users[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 310(2): 641-660.
- [23] LIN S, ZHANG H, DING J, et al. Fast Simulation of Vehicular Channels Using Finite-State Markov Models[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(4): 1056-1059.
- [24] HAN X, SCHORMANS J. Cross-Layer Queueing Analysis for Aggregated ON-OFF Arrivals with Adaptive Modulation and Coding [J]. *IET Communications*, 2016, 10(17): 2336-2343.
- [25] 秦博伟, 蒋磊, 郑万泽, 等. 基于半监督生成对抗网络的通信信号调制识别算法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(5): 75-81.
- [26] STAVROPOULOS D, MILIOTIS V, KORAKIS T, et al. On the Implementation of Matching Theory Based Resource Allocation in Networking Testbeds [C]//NOMS 2020-2020 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. [S. l.]:IEEE Press, 2020: 1-2.
- [27] MANDAL P, ROY S. On Obviously Strategy-Proof Implementation of Fixed Priority Top Trading Cycles with Outside Options[J]. *Economics Letters*, 2022, 211: 110239.
- [28] 付皓通, 王翔, 赵尚弘, 等. 基于网络分域的航空信息网络控制器部署方法[J]. *空军工程大学学报*, 2023, 24(2): 83-90.
- [29] GUILLEN P, VESZTEG R F. Strategy-Proofness in Experimental Matching Markets[J]. *Experimental Economics*, 2021, 24: 650-668.

(编辑:徐楠楠)