

基于博弈论的空时频谱共享：动态接入与惩罚策略

牛阳阳, 尉志青, 冯志勇

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要: 为了解决时空域频谱资源利用不充分的问题, 针对异构网络中多个次用户通过感知空时频谱机会动态接入的场景, 提出一种基于博弈论的可靠频谱共享策略。首先, 次用户通过信道采样感知主用户的活跃程度, 并进一步寻找适合的空时频谱机会。其中, 每个次用户旨在寻求更多的频谱资源, 须避免对主用户的通信质量造成损害。为此, 次用户与主用户之间需进行个人效用的协商, 以达到混合纳什均衡状态。当次用户发射功率异常时, 其行为将被视为违规。然后, 结合违规次数和网络中活动节点数, 对次用户采用退避时间补偿算法进行惩罚。最后, 仿真结果验证了引入惩罚机制的空时频谱机会共享策略的有效性。

关键词: 认知无线网络; 空时频谱机会; 混合纳什均衡; 退避时间补偿

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023218

Space-time spectrum sharing based on game theory: dynamic access and penalty strategy

NIU Yangyang, WEI Zhiqing, FENG Zhiyong

Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: To tackle the challenge of inefficient utilization of spatiotemporal spectrum resources in heterogeneous networks, a reliable spectrum sharing strategy based on game theory was proposed for scenarios where multiple secondary users dynamically access through sensing spatiotemporal spectrum opportunities. Firstly, secondary users sensed the activity state of primary users through channel sampling and subsequently seek suitable spatiotemporal spectrum opportunities. Each secondary user aimed to access more spectrum resources while preventing quality degradation between primary users. Consequently, a negotiation of individual utilities between secondary and primary users was needed, in order to reach a mixed Nash equilibrium. When the secondary user's transmission power was abnormal, its behavior would be regarded as a violation. Then, a backoff time compensation algorithm was presented to penalize the secondary users, according to the number of violations and active nodes in the network. Finally, simulation results validate the effectiveness of the spatiotemporal spectrum opportunities sharing strategy with the penalty mechanism.

Keywords: cognitive radio network, spatiotemporal spectrum opportunity, mixed Nash equilibrium, backoff time compensation

0 引言

为了应对爆炸式增长的无线电业务, 合理划分频谱资源并有效利用有限频谱资源成为一个持续

被关注的议题。美国联邦通信委员会(FCC, Federal Communications Commission)指出, 频谱“稀缺”真正的原因是频谱资源在固定的频谱分配模式下没有被充分利用^[1-2]。认知无线网络(CRN, cog-

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-09-20

通信作者: 尉志青, weizhiqing@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62271081); 国家重点研发计划基金资助项目(No.2020YFA0711302)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62271081), The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFA0711302)

ognitive radio network) 通过感知和挖掘空闲的频谱资源, 为非授权用户提供可用频段, 从而实现了无线电频谱资源的高效利用^[3-4]。在 CRN 中, 频谱感知是首要任务也是实现频谱共享的前提^[5], 其中, 被授权使用频谱的实体被称为主用户 (PU, primary user)。在不影响 PU 通信服务质量 (QoS, quality of service) 需求的前提下, 非授权用户, 即次用户 (SU, secondary user) 可以通过充分利用这些空闲频谱资源来提高频谱的利用效率。

然而, 在 PU 和 SU 之间的频谱共享过程中, 博弈关系引发了一系列挑战。首先, SU 追求最大化空闲频谱资源利用的目标, 但须避免对 PU 造成干扰, 以维持共存和平衡^[6]。其次, SU 的参与可能扰乱频谱检测, 虚警概率和误检概率是反映频谱共享可靠性的重要性能指标, 因此, 建立精确的频谱感知机制至关重要^[7-8]。当 PU 通信受到干扰时, 与 SU 的频谱共享将无法带来预期性能增益。为此, 在制定频谱共享策略时, 同时制定适应性的惩罚机制, 以确保频谱共享的有效性和整体系统的稳定性是亟待解决的。上述挑战构成了 PU 和 SU 频谱共享博弈的关键要素, 强调了博弈论在解决这一复杂问题中的应用价值^[9-10]。

针对非授权用户接入方面的研究, 有 2 种主要研究思路: 一种是将 SU 视为窃听器, 通过优化 PU 的保密率保证频谱共享的有效性^[11]; 另一种是假设 SU 可以访问 PU 控制通道信息, 通过监测反馈信道中 PU 的控制信号, 最大化 SU 的传输速率^[12]。在此基础上, 博弈论的引入, 特别是非协作博弈, 通过假设参与者之间缺乏协调, 进而降低了控制信号的开销^[13], 有利于实现频谱资源的公平竞争。

基于博弈论的频谱共享策略研究可以分成两方面, 即博弈模型的构建和频谱共享的公平性设计。博弈模型的构建方面, 利用非协作博弈建立一种改进的前馈策略, 提高频谱检测的准确性和安全性。例如, 文献[14]以集体行动囚徒困境模型模拟 CRN 中的非协作攻击, 并借助 PU 的反馈信息来识别恶意非授权用户。文献[15]中采用非合作博弈来实现功率控制, 在满足 PU 的信干噪比 (SINR, signal-to-interference-plus-noise-ratio) 的前提下, 最大化整体系统容量。文献[16]基于改进的讨价还价博弈模型实现了分布式协商以优化信道利用, 深入探讨了有限和无限时间框架下的最优策略, 并明确了博弈的帕累托最优均衡对网络性

能的增益。然而, 单个维度上的空闲资源再利用无法实现多维度的频谱共享机会, 限制了频谱共享带来的潜在增益。频谱共享的公平性设计方面, 为防止 SU 对 PU 的性能产生损害, 研究者们从基于多认知用户的潜在博弈动态频谱分配算法^[17]、功率分配算法^[18]和基于数据库辅助的 PU 模拟攻击 (PUEA, primary user emulation attack) 检测方法^[19]等多角度展开广泛研究。然而, 惩罚措施并没有考虑当前时刻的 CRN 的网络状态和非授权用户的信用度, 因此对 SU 做出的惩罚措施不具备公平性和全局性。

本文提出了一种在恶意竞争频谱资源的情况下, 反映认知用户频谱需求的效用函数, 并引入一种具备惩罚策略的频谱共享方案, 以确保频谱共享的可靠性。本文的贡献如下。1) 在时空域机会异构网络模型中引入虚警概率和检测概率作为评估指标, 建立定量表达式。2) 基于非合作博弈理论, 通过纳什均衡 (NE, Nash equilibrium) 为频谱共享提供效用最大化的策略, 减小频谱检测失误, 使系统的频谱共享增益进一步提升。3) 为了避免恶意竞争, 在 NE 的基础上提出了一种动态惩罚策略, 利用 CRN 中活动节点数量以及非授权用户违规次数信息, 对 SU 的数据传输过程进行限制。

1 系统模型

1.1 机会异构网络模型

本文考虑一个 CRN 场景中存在多个 PU 和多个 SU 共享同一无线电频谱资源的场景。CRN 系统模型如图 1 所示。设在 CRN 中包含 N 个 SU 和 M 个 PU。每个 SU 的能量检测周期为 τ , 观测信号带宽为 W 。因此, τ 时间内得到的样本点数为 $K = 2\tau W$, 其中 τW 表示时间带宽积。图 1 给出了空时频谱机会的分布情况。PU 的保护区定义为 $0 \leq d_{pi} \leq D_{pp}$, 是一个包含灰区和黑区的空间。其中, d_{pi} 为用户到基站的直线距离^[20]。在保护区之外的白区资源拥有丰富的频谱共享潜力, 由于资源恶意占用对通信质量的负面影响概率较低, 因此本文将频谱共享和相关惩罚重点考虑灰区和黑区。授权频谱空闲时, PU 维持不活跃状态, 从而使 SU 有机会进行频谱共享; 然而, 当 PU 活跃时, 在不影响 PU 通信质量的前提下, 在灰区仍然存在一定的空间频谱机会。但是, 无论采用何种共享机制, 其核心问题是 PU 和 SU 之间效用函数的平衡。

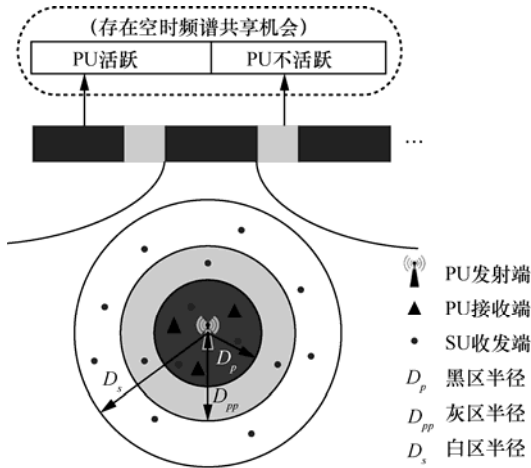


图 1 CRN 系统模型

频谱共享策略包含 2 个阶段，分别为频谱感知阶段和数据传输阶段。假设 CRN 采用周期感知策略，根据感知结果决定在接下来的数据传输时间内是否进行传输。感知阶段，SU 分别对 PU 进行能量采样，并将采样数据送到智能基站 S-eNodeB 中进行融合分析，包括收集波段信息，监控并分配未授权频段给 SU 使用^[21-22]。当有时域或空域频谱机会可以接入时，再进行数据传输阶段。当 SU 在白区或灰区时有空域频谱机会，当 PU 传输功率没有被检测到时有时域频谱机会，此时 S-eNodeB 可以决定是否将这段频谱给 SU 使用；当 SU 在黑区时，SU 没有空时频谱机会，因为该区域内距离 PU 发射端近且 PU 活跃。因此，为了保证 PU 的通信质量，需要对这个 SU 进行惩罚。

假设 t 时刻来自第 i 个能量检测器的采样值可用二元假设检验模型表示，即

$$y_i(t) = \begin{cases} n_i(t), H_0 \\ h(d_{pi})x_i(t) + n_i(t), H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $n_i(t)$ 为高斯白噪声， $x_i(t)$ 为 PU 能量信号采样。假设 $n_i(t)$ 和 $x_i(t)$ 都服从高斯分布，则有 $n_i(t) \sim N(0, \sigma_w^2)$ ， $x_i(t) \sim N(0, \sigma_s^2)$ 。来自不同信道和不同检测器的 $n_i(t)$ 独立同分布。针对某个信道的感知结果 $y_i(t)$ ，可以将信道的使用情况分为 2 种： H_0 表示 PU 不活跃，信道空闲； H_1 表示 PU 活跃，信道被用于传输通信数据。在检测周期内，感知结果为 H_0 表示 SU 具有时域频谱共享机会；感知结果为 H_1 表示 PU 在使用该频段，此时 SU 仅有空间频谱共享机会。当 SU 共享 PU 的授权频段时，PU 通过提高发射功率保证 QoS 少受影响。这会导致 SINR 增大，进而使检

测器检测到的能量值偏大。这种检测周期内获得的能量值向量 $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_M]$ 成为进一步频谱共享的依据。这些数据不仅为合理调整 PU 发射功率以维护通信质量提供了依据，还为监测 SU 对主要用户频谱资源的侵占提供了线索^[20]。PU 和第 i 个能量检测器之间的信道增益 $h(d_{pi})$ 定义为^[23]

$$h(d_{pi}) = \sqrt{P_t \text{PL}(d_{pi}) g_i} = \sqrt{P_t \left(\frac{c_0}{4\pi f_c d_{pi}} \right)^2 g_i} \quad (2)$$

其中， P_t 表示 PU 发射机传输功率； g_i 表示考虑衰落是均值为 0、方差为 1 的复高斯随机过程； $\text{PL}(d_{pi})$ 表示路径损耗，与能量检测器到 PU 的距离、光速 c_0 、载波频率 f_c 和无线电传播损耗 γ 有关。因为只考虑大尺度衰落，在 SU 的一个扫描角度内信道增益均视为实参量。

上述感知模型可以用来判断时域空闲频谱资源，考虑空域频谱机会检测可以用另外一个假设检验问题来表示^[24]，即

$$O_0: y_i(t) = \begin{cases} n_i(t), 0 \leq d_{pi} \leq D_s \\ h(d_{pi})x_i(t) + n_i(t), D_p < d_{pi} \leq D_s \end{cases} \quad (3)$$

$$O_1: y_i(t) = h(d_{pi})x_i(t) + n_i(t), 0 \leq d_{pi} \leq D_p$$

其中， O_0 表示 SU 有空时频谱机会与 PU 共享频段，包含 2 种情况，一种情况是 PU 不存在，另一种情况是 PU 存在，但是 SU 处在灰区； O_1 表示 SU 处在黑区，此时 SU 没有空域频谱机会，但是可以利用频谱时域空闲机会传输数据。

1.2 空时二维检测指标

对于一个给定的感知周期 τ ，令检测统计量为 Y_i ，阈值为 ε ，决策函数为 $\delta_i^{\text{ST}}(\cdot)$ 。假设 PU 信号出现的概率为 p_0 ，则检验统计量 Y_i 为

$$Y_i = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |y_i(t)|^2 \quad (4)$$

当采样点数 K 足够大时，根据大数定律，检验统计量 Y_i 可以用高斯随机变量近似， Y_i 的分布为^[25-26]

$$Y_i(t) \sim \begin{cases} N\left(\sigma_w^2, \frac{1}{K}\sigma_w^4\right), H_0 \\ N\left((1+\gamma_s)\sigma_w^2, \frac{1}{K}(1+2\gamma_s)\sigma_w^4\right), H_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\gamma_s = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_w^2}$ 是感应信道的 SINR, $\sigma_s^2 = \sqrt{h(d_{pi})}$ 是

PU 信号的发射功率。

虚警是指 PU 不活跃时 SU 的能量检测器检测到的 $Y_i(t)$ 大于阈值, 或 SU 在灰区却检测到 $Y_i(t)$ 大于阈值, 用虚警概率 P_f 来定量描述。虚警会导致频谱使用效率下降。误检是指 PU 存在但是检测的能量值小于阈值, 用误检概率 p_m 来定量描述。发生误检时, SU 违规未被及时检测出来, 会在一定程度上造成 PU 的通信质量下降。检测概率 P_d 是 SU 违规并被正确检测出来的概率。SU 在 CRN 中的检测概率 P_d 、误检概率 P_m 、虚警概率 P_f 分别表示为^[24]

$$p_{f,i}(t) = P\{\delta_i(Y_i(t), \varepsilon) = O_1 | O_0\} = \begin{cases} P\{Y_i(t) > \varepsilon | H_0\}, 0 \leq d_{pi} \leq D_p \\ P\{Y_i(t) > \varepsilon | H_1\} p_0 + \\ P\{Y_i(t) > \varepsilon | H_0\} (1 - p_0), D_p < d_{pi} \leq D_s \end{cases} = \begin{cases} Q\left(\left(\frac{\varepsilon - \sigma_w^2}{\sigma_w^2}\right)\sqrt{K}\right), 0 \leq d_{pi} \leq D_p \\ p_0 Q\left(\left(\frac{\varepsilon - (1 + \gamma_s)\sigma_w^2}{\sqrt{1 + 2\gamma_s}\sigma_w^2}\right)\sqrt{K}\right) + \\ (1 - p_0) Q\left(\left(\frac{\varepsilon - \sigma_w^2}{\sigma_w^2}\right)\sqrt{K}\right), D_p < d_{pi} \leq D_s \end{cases} \quad (6)$$

$$p_{d,i}(t) = P\{\delta_i(Y_i(t), \varepsilon) = O_1 | O_1\} = P\{Y_i(t) > \varepsilon | H_1\} = Q\left(\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_w^2} - 1 - \gamma_s\right)\sqrt{\frac{K}{1 + 2\gamma_s}}\right), 0 \leq d_{pi} \leq D_p \quad (7)$$

$$p_{m,i}(t) = 1 - p_{d,i}(t), 0 \leq d_{pi} \leq D_p \quad (8)$$

其中, $Q(x)$ 为标准正态分布的互补累积分布函数, 即 Q 函数, i 为 SU 索引。

2 基于纳什均衡的混合策略分析

在频谱共享时, 每个 SU 只关心自己的效用函数最大化的共享策略, 并在传输数据前通过能量检测获取 PU 活跃状态。SU 通过选择适当的频谱共享机会共享频谱资源, 同时满足网络中 PU 的 QoS 需求^[27]。本节依次讨论黑区和灰区框架下的混合策略。

2.1 黑区框架下的混合策略

在特定频段上, PU 拥有这段频谱的所有权, NE 是由所有参与者的最优策略一起组成的, 效用函数用于量化博弈对象之间的损失。

设 SU 的欺骗概率为 p_c , PU 在 SU 欺骗时捕获 SU 的条件概率为 p_z , PU 在 SU 未欺骗的情况下捕获 SU 的概率为 p_y , PU 活跃的概率为 p_0 。由此, 效用函数可以使用 SU 有效占用 PU 的授权频段时间来进行衡量。黑区中 PU 与 SU 的效用函数如表 1 所示。设 SU 发射机与接收机之间的距离为 r , 以发射机为圆心形成一个圆形的干扰区域。假设 PU 的均匀分布密度为 λ_p , 干扰区域的半径为 $(1 + \Delta)r$, $\Delta \in [-1, 0]$, 用于调节 SU 在黑区中的覆盖区域。在黑区中, SU 所干扰 PU 的数量为 M_1 , 则有 $M_1 = \lambda_p \pi (1 + \Delta)^2 r^2$ 。设一个 PU 的损失为 c_p , 那么, 当 SU 欺骗 PU 成功时, PU 的效用函数为 $-c_p M_1$ 。当 SU 没有占用 PU 的频谱但是 PU 检测到 SU 违规时, PU 受影响的时间为此时的效用函数 $-c_s$ 。

设 SU 与 PU 的发射机距离为 l , SU 接收到的 SINR 为 $\gamma_s = \frac{P_s}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2}$, 其中, P_s 为 SU 发射功率, P_0

为 PU 发射功率, σ_w^2 为高斯白噪声方差。假设发射机全向发射, 检测器发射波束宽度为 α 的扫描波

表 1

黑区中 PU 与 SU 的效用函数

效用函数	PU (捕获 SU)	PU (未捕获 SU)
SU (欺骗)	$-TM_1 p_0, 0$	$K\tau(1 - p_0) \frac{\log\left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2}\right)}{\log\left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_w^2}\right)} - TM_1 p_0, -c_p M_1$
SU (未欺骗)	$-TM_1 p_0, -c_s$	$0, 0$

束，形状是圆锥。进一步地，其获得的速率为

$$R_s = \log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2} \right)$$

因此，当 SU 进行欺骗的时候，如果 PU 没有感知到，则不仅 PU 有效用损失，SU 也有效用损失，因此使用 SU 的有效欺骗时间

$$\frac{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2} \right)}{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_w^2} \right)}$$

来对它的效用进行衡量，其中，分

子是有 PU 干扰时的 SU 获得的传输的数据速率，分母是没有 PU 干扰时的传输数据速率。设 SU 的检测周期为 τ ，那么检测到 SU 欺骗时所需要的时间为 $K\tau$ 。此时 SU 的效用函数为

$$K\tau(1-p_0) \frac{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2} \right)}{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_w^2} \right)} - TM_1 p_0$$

在黑区非合作博弈中，参与者通过猜测对方的行为意图使自己达到效用的最大化，从而形成一种动态均衡。利用混合 NE 得出各个参量之间的函数关系。利用函数关系，寻求参数的变化趋势以便制定惩罚规则。SU 选择使 PU 捕获与不捕获 SU 所获得的期望收益是完全相同的混合策略，即

$$-(1-p_c)c_s = p_c(-c_p M_1) \tag{9}$$

进而推导出

$$p_c = \frac{c_s}{c_s + c_p M_1} \tag{10}$$

可以观察到，SU 的欺骗概率 p_c 与所造成的 PU 干扰损失之间存在负相关关系。当 SU 成功干扰了多个 PU 时，SU 会主动减小对 PU 的欺骗概率，以降低被捕获的可能性。当 c_s 增大时， p_c 也随之增加。PU 错误捕获 SU 会导致 PU 的损失增大，此时 SU 的欺骗概率显著增加。因此，PU 制定的混合策略应使 SU 欺骗与不欺骗所获得的收益是同等效用的，即式(11)和式(12)。

$$\begin{aligned} & (-TM_1 p_0) p_z + \\ & \left(\frac{K\tau(1-p_0) \frac{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2} \right)}{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_w^2} \right)} - TM_1 p_0}{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_w^2} \right)} \right) (1-p_z) = \\ & (-TM_1 p_0) p_y \end{aligned} \tag{11}$$

$$p_y = 1 + (p_z - 1) \frac{K\tau(1-p_0)}{TM_1 p_0} \frac{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2} \right)}{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_w^2} \right)} \tag{12}$$

在黑区中，因为 SU 均匀分布在 PU 的发射区域内，可以认为 SU 对 PU 的期待收益是相同的。

$$\text{令 } F_1 = \frac{K\tau(1-p_0)}{TM_1 p_0} \frac{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_w^2} \right)}{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_w^2} \right)}, \text{ 则有}$$

$$p_y = 1 + (p_z - 1) F_1 \tag{13}$$

据此，可以有如下结论。

1) PU 在 SU 未欺骗时捕获 SU 的概率 p_y 和 PU 在 SU 欺骗时捕获 SU 的概率 p_z 呈正相关。如果欺骗被捕获的概率变大，那么该 SU 更容易被错误感知。

2) 当检测周期 τ 减小时，检测违规的时间变短，但是会引起多余的资源耗损。此时 p_y 会增大，意味着 SU 违规成功的可能性变小。

3) 当 PU 活跃的概率 p_0 增大时，对 SU 来说，时间频谱机会很少，又因为 SU 处在 PU 的发射区域内，所以此时的空时频谱机会降低。相应地， p_y 和 p_z 的值也降低且误检概率变化变缓。

4) 在黑区，应该避免 SU 利用空时频谱机会时对 PU 造成的干扰。如果增大惩罚力度 T ，从建立的 NE 中可以看到，SU 会降低欺骗概率，惩罚时间降低的同时虚警概率和漏检概率也降低了。

2.2 灰区框架下的混合策略

在黑区，SU 会有一个固定的辐射半径，而黑区中的 PU 是均匀分布的，所以辐射覆盖的 PU 数量是固定的。但是在灰区，随着 SU 远离 PU，SU 所构成的辐射区域覆盖黑区的面积会变得越来越

小，故其对 PU 的影响也越来越小。和黑区类似，在灰区可以得到 PU 和 SU 的效用函数，如表 2 所示。灰区具有更加丰富的空时频谱机会，通过建立 NE 表达式为惩罚策略提供依据仍然是这一节的思路。

表 2 灰区中 PU 与 SU 的效用函数

效用函数	PU (捕获 SU)	PU (未捕获 SU)
SU (欺骗)	$-TM_2 p_0, 0$	$K\tau(1-p_0) \frac{\log\left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^{\alpha_1}}}{\frac{P_0}{l^{\alpha_1}} + \sigma_w^2}\right)}{\log\left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^{\alpha_1}}}{\sigma_w^2}\right)} - TM_2 p_0, -c_p M_2$
SU (未欺骗)	$-TM_2 p_0, 0$	0, 0

在黑区中，SU 可能对 PU 造成干扰的区域可视为以 SU 为圆心的圆。而当 SU 位于灰区时，随着 SU 远离 PU，干扰区域所能覆盖的黑区面积越来越小。因此，在灰区 SU 所干扰的 PU 的数量 M_2 是一个关于 SU 与黑区中心距离的递减函数。鉴于两圆相交的面积公式过于复杂，本文抽取其中随着距离的变化面积在下降这个特点，构造计算式 $M_2 = \frac{1}{(1+\Delta)^2 l^2}$ 。因此，均衡计算式为

$$p_c = \frac{c_s}{c_s + c_p M_2} \tag{14}$$

$$p_y = 1 + (p_z - 1)F_2 \tag{15}$$

其中， $F_2 = \frac{K\tau(1-p_0)}{TM_2 p_0} \frac{\log\left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^{\alpha_1}}}{\frac{P_0}{l^{\alpha_1}} + \sigma_w^2}\right)}{\log\left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^{\alpha_1}}}{\sigma_w^2}\right)}$ ， α_1 为波束

扫描宽度。在灰区，SU 距离 PU 的距离较远，功率的衰减速度相对较快。SU 的能量检测器在进行频谱检测的时候波束的宽度会增大。

3 惩罚策略和策略更新

为了有效管理频谱资源并防止非预期干扰的产生，有必要引入灵活的惩罚策略。惩罚发生在频谱感知阶段之后，数据传输之前。S-eNodeB 可以对

SU 采集到的能量向量进行分析、监控并分配未授权频段给 SU 使用。同时，对 SU 的惩罚由 S-eNodeB 来执行。当 PU 的 QoS 受到干扰时，SU 被投入“频谱监狱”，基于退避时间补偿策略达成新的混合 NE 状态，实现均衡。惩罚策略与混合策略更新如图 2 所示。

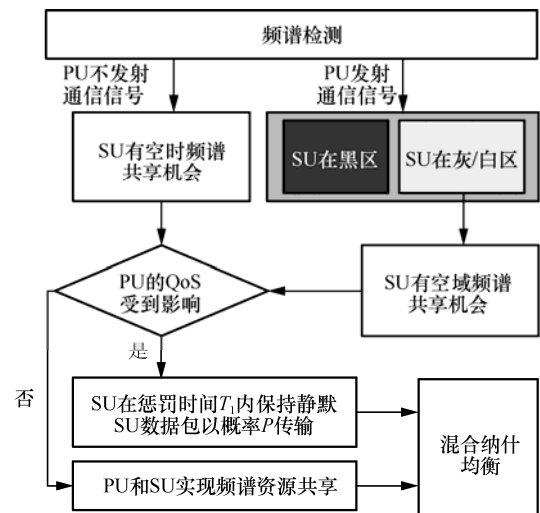


图 2 惩罚策略与混合策略更新

3.1 惩罚策略

引入惩罚策略是为了确保频谱资源的有效管理和 PU 的 QoS 维护，下面从惩罚时间和数据包传输角度来进行讨论。

首先，采用一个固定的时间 T 来对违法的 SU 进行惩罚。在惩罚阶段，S-eNodeB 对 SU 实施惩罚，禁止其传输通信数据包，但允许持续监测信道使用情况，以确保在惩罚阶段结束时能够尽快进行数据传

输。然而，这种方法在警示性惩罚方面存在合理性不足以及难以实施的问题。因此，本节引入了截断二进制指数退避算法中的退避思想，将退避惩罚时间由固定值转变为与网络状态和用户信誉度相关的参数。

首先，定义 CRN 中需要发送数据包的节点为移动节点。当 SU 节点活跃时，发生碰撞的可能性也增加，适当的惩罚有助于维护 CRN 频谱共享时的有效性和公平性。对于 PU，当其需要发送数据包时，具有绝对优先级。网络中的节点数为 $M + N$ ，信道数为 c 。假设所有优先级的包到达的概率 η 服从泊松分布。根据泊松理论，在网络中的活动节点数可以定义为^[28]

$$n = (M + N) \left(1 - e^{-\frac{2\eta}{c}} \right) \quad (16)$$

由于 NE 的成立是建立在一个连续值上的，因此退避持续时间按照原来的选取随机数的方法不适用。因此，在第 i 次退避中，避免碰撞导致的退避时间定义为

$$t = \left\lceil -\frac{2}{\ln \frac{n}{M + N + 1}} \right\rceil \quad (17)$$

进一步地，考虑到在 CRN 中有一种严重的安全威胁是攻击者发送模仿主信号特征的信号以防止 SU 传输的 PUEA。此外，MAC 层上入侵节点伪造控制信道消息，可以使特定网络的公共信道饱和。活动节点的活跃可能不是由于正常的频谱共享，因此，仅根据活动节点的活跃程度是不够的。类比以太网载波侦听多址访问协议，本文提出了一种基于线性 P -坚持退避补偿算法的惩罚策略，具体实现步骤如下。

1) 确定基本惩罚时间（基数）为 T 。

2) 定义参数 k 表示违规次数，惩罚时间更新为 $T_1 = kT + t$ 。

3) 发送数据包时，以概率 P 直接发送，以概率 $1 - P$ 延迟一个检测周期 τ 后发送。

相较于固定禁止通信时间的惩罚机制，线性 P -坚持退避算法能够更好地体现网络中节点的状态以及频谱共享中的信用度。因此，在维护 CRN 的网络共享公平性和鲁棒性方面具有优势，同时也有助于减轻信道共享过程中的干扰和恶意攻击。

3.2 混合策略更新

惩罚策略建模使用了 2 个概率，PU 在 SU 进行

欺骗时捕获 SU 的概率为 p_z ，PU 在 SU 未进行欺骗时捕获 SU 的概率为 p_y 。而在混合 NE 策略中也使用了 2 个概率，即检测概率 p_d 与虚警概率 p_f 。本质上这 2 对概率是分别对应的，于是有 $p_z = p_d$ 和 $p_y = p_f$ 成立。由此检测概率 p_d 与虚警概率 p_f 的关系可以总结为

$$p_d(t) = \frac{1}{F} p_f - \frac{1}{F} + 1 \quad (18)$$

其中，在黑区有

$$F = F_1 = \frac{K\tau(1-p_0)}{(kT+t)M_1p_0} \frac{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\frac{P_0}{l^\alpha} + \sigma_\omega^2} \right)}{\log \left(1 + \frac{\frac{P_s}{r^\alpha}}{\sigma_\omega^2} \right)} \quad (19)$$

在灰区， $F=F_2$ 同理。此时，对感知节点的约束是根据信道状态决定的，可以限制数据包对信道的访问。同时，根据网络中活动节点的数量可以调整退避持续时间。

4 仿真结果分析

仿真实验参数如表 3 所示。本文算法涵盖了空时联合频谱共享策略以及惩罚策略，并在黑区与灰区分别建立混合 NE 策略。通过对不同参数的影响进行比较来探讨算法在 CRN 中的有效性。

表 3 仿真实验参数

参数名称	参数值
主用户数 M / 个	4
次用户数 N / 个	10
信道数 c / 个	15
每个用户接入的带宽 / MHz	30
基本惩罚时间 T / 符号时间	2
频谱检测时间 τ / 符号时间	1
采样点数 K	1 000
小区半径 / m	500
MATLAB 仿真版本	R2023a

PU 发射功率对检测概率的影响如图 3 所示。在频谱感知阶段，PU 的发射功率对系统性能至关重要，尤其在存在恶意 SU 的情况下，PU 可以通过增加发射功率来提高其活跃程度，从而减轻 SU 对频谱资源的恶意占用，以此增加检测概率。仿真结

果表明，在黑区，当 PU 增加其发射功率以提高活跃程度时，检测概率显著提升。而灰区由于空间频谱资源相对丰富，增加 PU 的发射功率并没有明显提高对 SU 非法行为的检测概率。因此，在黑区中通过增大 PU 发射功率对系统检测概率的提升较灰区更有效。

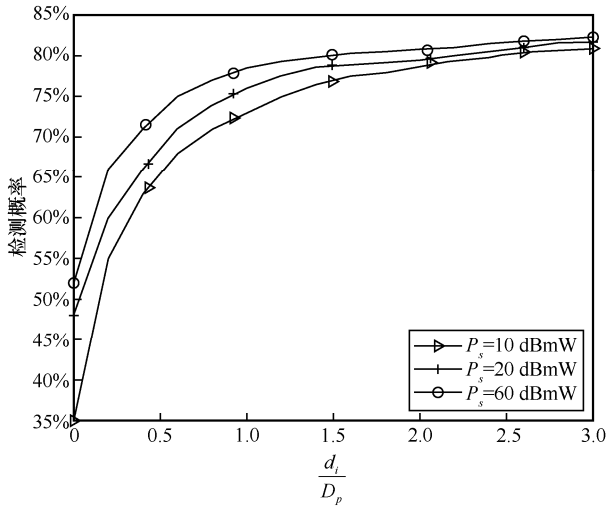
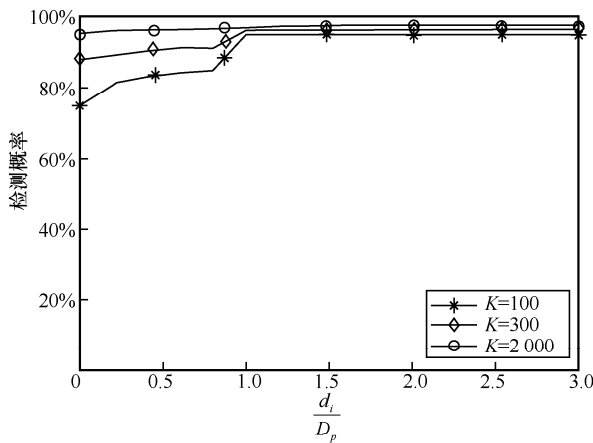


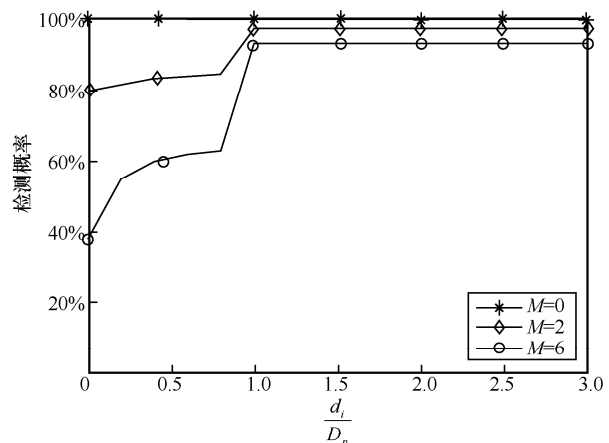
图 3 PU 发射功率对检测概率的影响

图 4(a)分析的是采样点数对检测概率的影响。在黑区，随着采样点数的增加，检测概率增加。灰区有更多的空域频谱机会，检测概率高于黑区，当采样点数增加时，同样会有更好的检测表现。相应地，采样点数的增加会导致检测成本的增加。由于 $K = 2\tau W$ ，在分析同一段授权频段的时候， τ 对检测概率的影响和 K 对检测概率的影响是等效的。同样地，检测周期 τ 变大虽然可以在一定程度上提高频谱感知的效果，但是会大大加重感知成本。因此，在检测效果和投入检测成本之间需要做一个折中。

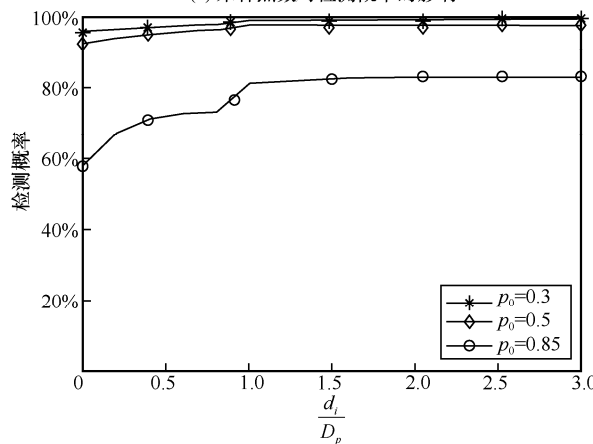
图 4(b)分析的是 PU 的总个数对检测概率的影响。考虑到整个 CRN 环境中，信号检测到的能量值可能来自多个用户，因此仿真分析假设检测到的能量值是多个信号的融合，而不考虑各信号的具体成分。仿真结果表明，当 SU 没有影响任何一个 PU 的时候，检测概率是最高的，此时和 PU 不存在时的感知结果是等效的，SU 有巨大的空时频谱机会。然而，受影响的 PU 数越多，CRN 的异构网络越复杂，导致频谱感知难度越大，进而检测概率越低，越容易



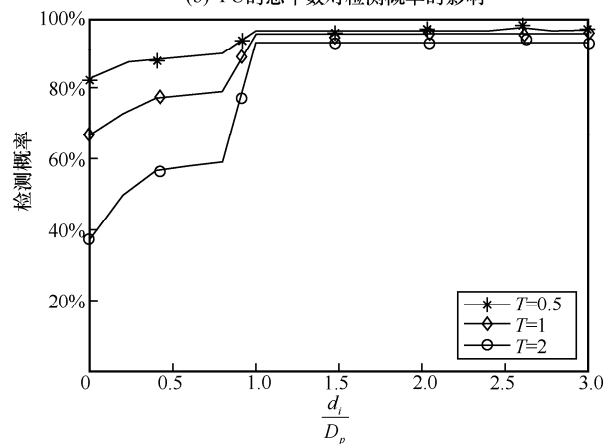
(a) 采样点数对检测概率的影响



(b) PU 的总个数对检测概率的影响



(c) PU 活跃的概率对检测概率的影响



(d) 惩罚时间对检测概率的影响

图 4 NE 下检测概率影响因素

发生恶意侵占频谱资源的情况。

图 4(c)分析的是 PU 活跃的概率对检测概率的影响。在混合 NE 中， p_0 越高说明 SU 在同一时刻使用授权频段的机会越小。 p_0 直接影响的是时域频谱机会的大小。也就是说， p_0 直接限制检测概率的上限值。从图 4(c)可以看到， p_0 对黑区和灰区的影响是同步的。当 p_0 达到 0.85 时，黑区和灰区的检测概率明显降低。此时，时域共享机会大大减小，SU 应在远离 PU 的灰区寻求空域频谱共享机会，降低 PU 的性能损失。

图 4(d)分析的是惩罚时间对检测概率的影响。惩罚时间增大意味着一旦 SU 侵占 PU 授权频段被捕获，将会被惩罚在这段时间内不允许进行通信。为躲避惩罚，SU 欺骗的概率会降低，导致 SU 欺骗或不欺骗的情况下 PU 捕获 SU 的条件概率都减小。因为此时 SU 的违规概率也相应降低了，所以虚警和漏检的数量也同时降低了。

从图 4 可以看到，检测概率在黑区很低，一旦出了黑区会有一个跃变。这个跃变在文献[29]中被描述为由噪声不确定性导致的。靠近黑区时，频谱空洞是不可恢复的。在黑区外，灰区检测概率保持稳定，且随着距离的增加空域虚警概率增大^[30-31]。达到混合 NE 后，SU 和 PU 维持混合 NE。在这个 NE 下，机会异构网络模型中 p_d 和 p_f 的关系由式(18)给出。由于 CRN 中认知用户 SU 在黑区并没有多少频谱机会，但是，一旦非法侵占了 PU 的授权频段，会对 PU 的通信质量产生负面影响，同时也会引发对 SU 的惩罚。在灰区，SU 位于 PU 的核心服务区外，因此具有更多的空时频谱机会。可以得出：影响黑区检测概率的因素比灰区要多。在这种情况下，建立新的博弈均衡可以提供参数调整的策略，进而提高频谱的有效利用。

不同信道数下到包率和网络中活动节点数的关系如图 5 所示。从图 5 可以看出，随着信道数的增加，网络中的活动节点数呈现增加趋势。多个信道既扩展了频谱共享的潜在机会，也增加了碰撞发生的概率。网络中的活动节点数代表了在同一时间段内寻求信道共享的用户数量，活动节点数的增加导致发生数据包碰撞的概率增大，进一步说明了避免退避算法的必要性。更新后的退避时间与网络中的活动节点数以及违规次数之间存在密切关联。退避时间的根本目的在于限制网络中可能存在的恶意攻击和信道干扰，从而维护通信的可靠性和效率。

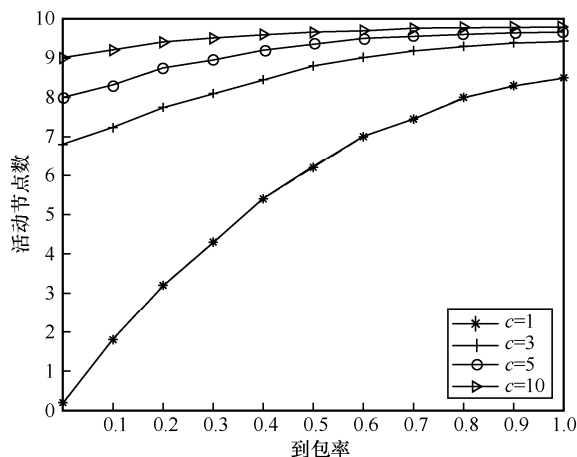


图 5 不同信道数下到包率和网络中活动节点数的关系

不同违规次数 k 下活动节点数对退避时间的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出，活动节点数的增加会导致退避时间的显著增加。此外，随着违规次数的不断增加，惩罚力度也逐渐增强。相对于简单地设定禁止通信时间，将退避时间与网络中的活动节点数量以及违规次数相互关联起来，能够显著提升检测性能，这一结合策略更加全面地考虑了网络状态和违规行为的复杂性。

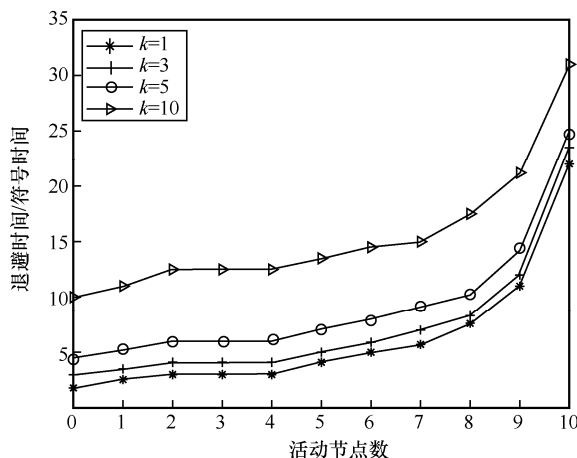


图 6 不同违规次数下活动节点数对退避时间的影响

固定惩罚时间和动态退避策略的检测概率如图 7 所示。从图 7 可以看出，新得到的混合 NE 下的检测概率在网络中活动节点数多时具有更好的表现。因为数据是以概率 P 发送的，会进一步减轻恶意节点的攻击。在 NE 下，由于引入了动态退避的惩罚策略，违规行为的代价增加，因此检测到恶意侵占频谱行为的概率下降。这也表明频谱共享的有效性和可靠性在某种程度上是相互矛盾的。对比图 7(a)和图 7(b)可知，与违规次数相比，网络中的

活动节点数对检测概率的影响相对较小。一旦信号能量超过了设定的阈值，就会触发相应的惩罚措施。因此，检测概率的下降既有助于保护 PU，减少授权频段受到恶意攻击可能性，同时也会降低信道的利用效率。设定可靠的动态阈值有助于提高频谱管理的效率和公平性。

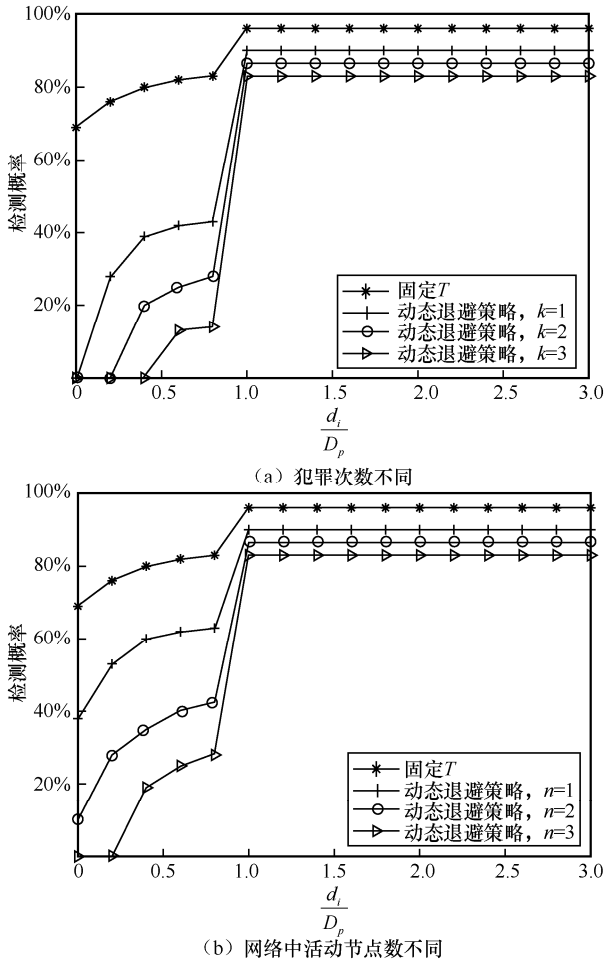


图 7 固定惩罚时间和动态退避策略检测概率

5 结束语

通过分析 CRN 中空时频谱机会共享的特点和主次用户之间的博弈关系，本文提出了一种融合惩罚机制的可靠频谱共享策略。该策略旨在空闲时间段和远离 PU 区域内探寻空时双重频谱共享机会，并通过最大化效用函数实现安全有效的频谱共享。为确保 PU 通信 QoS，引入了惩罚策略，对于恶意占用频谱资源的 SU 施加退避时间补偿惩罚。仿真实验验证了所提算法可以提升 SU 的检测概率，进而提升频谱共享的可靠性。然而，网络拓扑结构的动态变化、用户间干扰以及信道状况的时变性等因素需予以考

虑。未来研究将侧重于具备抗干扰能力的频谱共享策略，以满足复杂多变的网络环境需求。

参考文献：

- [1] FRAGKIADAKIS A G, TRAGOS E Z, ASKOXYLAKIS I G. A survey on security threats and detection techniques in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 428-445.
- [2] FENG Z Y, WEI Z Q, CHEN X, et al. Joint communication, sensing, and computation enabled 6G intelligent machine system[J]. IEEE Network, 2021, 35(6): 34-42.
- [3] 杨宁, 郭道省. 星地融合网络中基于三维频谱感知的空时频谱机会检测[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(4): 67-74. Ning YANG, Daoxing GUO. Detection of 3D Spatial-Temporal Spectrum Opportunity in Satellite-Terrestrial Integrated Network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(4): 67-74.
- [4] ALQAHTANI A S, CHANGALASETTY S B, PARTHASARATHY P, et al. Effective spectrum sensing using cognitive radios in 5G and wireless body area networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 105: 1-10.
- [5] 孙佳琛, 王金龙, 丁国如, 等. 频谱知识图谱: 面向未来频谱管理的智能引擎[J]. 通信学报, 2021, 42(5): 1-12. SUN J C, WANG J L, DING G R, et al. Spectrum knowledge graph: an intelligent engine facing future spectrum management[J]. Journal on Communications, 2021, 42(5): 1-12.
- [6] LI Z, CHEN R, SHI J, et al. A game-theoretic approach to achieve covert communication in cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(10): 13011-13023.
- [7] ISNAWATI A F. A survey of game theoretical approach in cognitive radio network and 5G-6G communications[J]. Journal of Communications, 2022, 17(10): 830-843.
- [8] BHAVANA B, SABAT S L, NAMBURU S, et al. Energy detector for spectrum sensing using robust statistics in non-Gaussian noise environment[C]//Proceedings of 15th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 414-418.
- [9] SURIYA M, SUMITHRA M G. Overview of spectrum sharing and dynamic spectrum allocation schemes in cognitive radio networks[C]//Proceedings of 8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). Piscataway: IEEE Press, 2022: 934-937.
- [10] WANG B, WU Y, LIU K J R. Game theory for cognitive radio networks: an overview[J]. Computer Networks, 2010, 54(14): 2537-2561.
- [11] LIN P H, GABRY F, THOBABEN R, et al. Multi-phase smart relaying and cooperative jamming in secure cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2016, 2(1): 38-52.
- [12] LAPICCIARELLA F E, LIU X, DING Z. Distributed control of multiple cognitive radio overlay for primary queue stability[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1): 112-122.
- [13] GHOSH S, DE D, DEB P. Energy and spectrum optimization for 5G massive MIMO cognitive femtocell based mobile network using auction game theory[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 106: 555-576.

- [14] LOPEZ O L A, SANCHEZ S M, MAFRA S B, et al. Power control and relay selection in cognitive radio ad hoc networks using game theory[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 12(3): 2854-2865.
- [15] YANG G L, LI B, TAN X Z, et al. Adaptive power control algorithm in cognitive radio based on game theory[J]. IET Communications, 2015, 9(15): 1807-1811.
- [16] BRAHMA S, CHATTERJEE M. Spectrum bargaining: a model for competitive sharing of unlicensed radio spectrum[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2015, 1(3): 257-272.
- [17] TENG Z J, XIE L Y, CHEN H L, et al. Application research of game theory in cognitive radio spectrum allocation[J]. Wireless Networks, 2019, 25(7): 4275-4286.
- [18] GULZAR W, WAQAS A, DILPAZIR H, et al. Power control for cognitive radio networks: a game theoretic approach[J]. Wireless Personal Communications, 2022, 123(1): 745-759.
- [19] YU R, ZHANG Y, LIU Y, et al. Securing cognitive radio networks against primary user emulation attacks[J]. IEEE Network, 2016, 30(6): 62-69.
- [20] WEI Z Q, FENG Z Y, ZHANG Q X, et al. Three regions for space-time spectrum sensing and access in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 64(6): 2448-2462.
- [21] ALI A, HAMOUDA W, UYSAL M. Next generation M2M cellular networks: challenges and practical considerations[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 18-24.
- [22] CHEN X, FENG Z Y, WEI Z Q, et al. Concurrent downlink and uplink joint communication and sensing for 6G networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6): 8175-8180.
- [23] ZHANG Z, WEN X B, XU H X, et al. Sensing nodes selective fusion scheme of spectrum sensing in spectrum-heterogeneous cognitive wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(1): 436-445.
- [24] WU Q H, DING G R, WANG J L, et al. Spatial-temporal opportunity detection for spectrum-heterogeneous cognitive radio networks: two-dimensional sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 516-526.
- [25] ZHAI C, LIU J, ZHENG L N, et al. Wireless energy harvesting-based spectrum leasing with secondary user selection[J]. IET Communications, 2017, 11(4): 499-506.
- [26] LIU X, JING Q F, JIA Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cooperative multiple-input single-output cognitive radio[J]. International Journal of Communication Systems, 2015, 28(5): 848-860.
- [27] PASANDSHANJANI E, KHALAJ B H. Primary-secondary interaction modelling in cellular cognitive radio networks: a game-theoretic approach[J]. IET Communications, 2012, 6(10): 1212-1219.
- [28] ZHENG B, LI Y, CHENG W, et al. A multi-channel load awareness-based MAC protocol for flying ad hoc networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020, 181: 1-18.
- [29] TANDRA R, SAHAI A, VEERAVALLI V. Unified space-time metrics to evaluate spectrum sensing[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 54-61.
- [30] HAN W J, LI J D, LIU Q, et al. Spatial false alarms in cognitive radio[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(5): 518-520.
- [31] LIN Y E, LIU K H, HSIEH H Y. On using interference-aware spectrum sensing for dynamic spectrum access in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(3): 461-474.

[作者简介]



牛阳阳（1997- ），女，河南商丘人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为认知网络频谱共享、感知通信一体化干扰管理等。



尉志青（1987- ），男，山西大同人，博士，北京邮电大学副教授、博士生导师，主要研究方向为无人机群智能组网、感知通信一体化机器网络等。



冯志勇（1971- ），女，山西大同人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线网络架构设计、通信-感知-计算一体化技术等。