

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307090

用户决策在异构认知网络接入中的算法研究^{*}

王诗^{1,2} 严洁^{1,2} 蓝浩^{1,3} 张波^{1,2} 王昕^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105; 2. 辽宁省无线射频大数据智能应用重点实验室 葫芦岛 125105; 3. 中国铁塔股份有限公司大连市分公司 大连 116011)

摘要: 由于用户体验在当今通信系统的发展中起着越来越重要的作用, 体验质量 (QoE) 成为了一种广泛使用的度量标准, 它直观地反映了终端用户对无线服务的体验感受。针对智能家居环境中多业务多信道的异构认知无线网络 (Het-CRN) 当中的接入与分配问题, 提出了一种基于 QoE 驱动的无线资源分配方案, 该方案结合改进的简单加权法 (SAW) 和层次分析法 (AHP), 全面评估了用户偏好、业务需求以及影响用户体验的信道参数, 以获取不同业务的客观权重和主观权重, 并进一步计算出综合权重。同时, 采用排队论以离散时间马尔科夫模型对系统状态进行建模, 能够有效的对不同用户负载下的行为进行分析, 进而对不同的接入与分配算法进行性能评估。仿真结果表明, 所提出的综合权重法相对于 SAW 法和 AHP 法, 显著提高了不同业务的用户满意度, 显著提升了用户体验质量。通过结合相对标准偏差对性能结果的分析进一步证明了综合权重法吞吐量、时延、拒绝率等关键性能指标上展现出更高的精密度, 更准确地满足了用户的实际需求。

关键词: 认知无线电; 异构网络; 多属性决策; 体验质量; 网络接入选择; 性能评估

中图分类号: TN014 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Access selection algorithm based on user-driven for heterogeneous cognitive radio networks

Wang Shi^{1,2} Yan Jie^{1,2} Lan Hao^{1,3} Zhang Bo^{1,2} Wang Xin^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. Liaoning Key Laboratory of Radio Frequency and Big Data for Intelligent Applications, Huludao 125105, China;
3. China Tower Co., Ltd., Dalian Branch, Dalian 116011, China)

Abstract: In the evolution of contemporary communication systems, user experience plays an increasingly vital role, making quality of experience (QoE) a widely utilized metric that intuitively reflects the end-users' perception of wireless services. To addresses the access and allocation problems within Het-CRN in smart home environments with multi-service multi-channel, a QoE-driven wireless resource allocation scheme is proposed. This scheme combines the improved simple additive weighting (SAW) and analytic hierarchy process (AHP) method to comprehensively evaluate the user preferences, service requirements, and channel parameters that affect user experience to obtain the objective and subjective weights of different services and further calculate the comprehensive weighs. In this scheme, a Markov model is established to describe the Het-CRN system state based on queuing theory. The model can effectively analyze the behavior under different user loads. Thus, the performance of different access and allocation algorithms can be evaluated by using the proposed scheme. Numerical results show that the proposed comprehensive weighting method significantly improves the user satisfaction of different services and significantly improves the quality of user experience compared to the SAW and AHP methods. By analyzing the performance results in conjunction with the relative standard deviation, it is further demonstrated that the comprehensive weighting method exhibits higher precision on key performance indicators such as throughput, delay, and rejection rate, and more accurately meets the actual user needs.

Keywords: cognitive radio; heterogeneous networks; multi-attribute decision making; quality of experience; network access; performance evaluation

收稿日期: 2023-11-29 Received Date: 2023-11-29

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1403303)、辽宁省博士启动基金 (2019-BS-114) 项目资助

0 引言

随着智能家居技术与物联网^[1]的融合,异构网络(heterogeneous networks, HN)^[2]正迅速成为家庭环境中的主流通信架构。然而,当前网络的容量^[3]难以满足日益增长的通信需求,尤其是在多种业务类型共存的场景下。这种需求的增长直接影响了终端用户的体验质量(quality of experience, QoE)。认知无线电(cognitive radio, CR)^[4]技术可以根据用户需求和不同应用场景自适应地调整信道资源的分配^[5-6],从而提高用户的通信质量和性能。其技术内在的感知能力,使次级用户(secondary user, SU)能共享主用户(primary user, PU)的授权频谱,实现动态接入频谱^[7-8]。已有许多在此领域学者对将 CR 技术应用于 HN 当中的可行性及其良好前景^[9]进行了分析。

在异构认知无线网络(heterogeneous cognitive radio network, Het-CRN)中,CR 根据 SU 的特定服务质量(quality of service, QoS)指标选择最佳可用频谱。然而,随着异构多媒体业务的迅速增长,现有服务提供商主要集中在 QoS 的提升上,而对终端用户的 QoE^[10-11]考量相对较少。这种偏重导致了在实际应用中,用户的实际感知和满意度往往未能得到充分优化。例如,某些用户可能偏好更稳定的连接而非最快的速度,或者在低延迟而非高吞吐上有更高的优先级。这表明,用户的体验质量不仅取决于客观的网络性能指标,还受到其个人偏好影响。QoE 涉及用户对应用和网络性能的感知、体验和期望,这在媒体交付中显得尤为重要。

因此,为了全面提升用户的体验质量,网络接入选择算法和策略无疑是实现这一目标最关键的因素之一^[12]。基于多属性决策(multiple attribute decision-making, MADM)方法进行频谱切换,提供了一种综合考虑用户个性化 QoE 需求和网络 QoS 指标的更广泛和最优的选择方案。文献[13]针对 CR 网络的三网融合业务,提出了一种基于熵方法与简单加权法(simple additive weighting, SAW)、逼近理想解排序法、灰色关联度分析和基于代价函数的方法相结合的频谱切换方案来进行最优网络选择。在文献[14]中提出了一种将熵权法^[15]和改进的逼近理想解排序法^[16]相结合的优化算法,通过熵权法获得其客观权重,优化了多属性决策的过程,从而选出最优的网络进行接入。文献[17]通过灰关联投影理论^[18]结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)法和反熵权法,建立了一种综合评估模型,以提高配网自动化通信安全性的评估精度。为了提升用户的体验质量 Giral-Ramfrez^[19]、Zou^[20]、Bayrakdar^[21]、Divya^[22]等许多学者基于 MADM 对 CR 网络进行了研究。这些研究为基于用户

体验的资源分配提供了基础。

进一步地,现有研究通过采用多种方法,增强了对频谱资源分配效果的理解和评估。有研究数据传输过程基于已知状态序列的隐马尔科夫模型^[23],这些研究将吞吐量和丢包率^[24]作为主要性能指标,用以评估不同的分配协议^[25]。尽管这些方法为频谱资源的评估提供了有价值的工具,但难以将用户个性化 QoE 需求和网络 QoS 指标进行综合考虑。

在此基础上,本研究基于离散时间队列模型,构建了协议评估框架,得到吞吐量、时延、拒绝率等综合性能评估指标。

主要工作及贡献如下:

首先,以多属性决策多用户为研究对象,以最大化用户 QoE 为研究目标。提出了一种基于改进的 SAW 法和 AHP 法的综合权重算法,在降低多属性决策带来的客观片面性和主观片面性的同时,提高了决策的全面性和准确性。接着,以用户满意度作为评估用户 QoE 的标准,以此更好地反应用户的真实需求和期望。最后,构建了一种综合的评估框架,以对不同权重法产生的性能进行评估,并结合相对标准偏差的概念,以确定不同算法的精确度。所提出的方案不是为了最大化系统整体性能,而是提供了向以用户为中心的方法的范式转变,根据不同业务在 QoE 方面的特定要求执行更合适的分配。

1 系统模型及假设

信道分配作为网络切换过程中的关键环节,对每个用户或设备在无线环境中获取的信道资源进行合理分配至关重要。因此,本研究的焦点在于如何从用户角度出发,找到最符合用户需求的信道分配策略,以实现有效的信道接入。在本研究中,构建了一个针对智能家居环境的多业务多信道异构集中式 Het-CRN 网络,由一个数据资源池、 N 个候选网络、 K 个 PU 信道以及 M 个产生数据的辅助用户(SU)组成。Het-CRN 网络结构如图 1 所示。

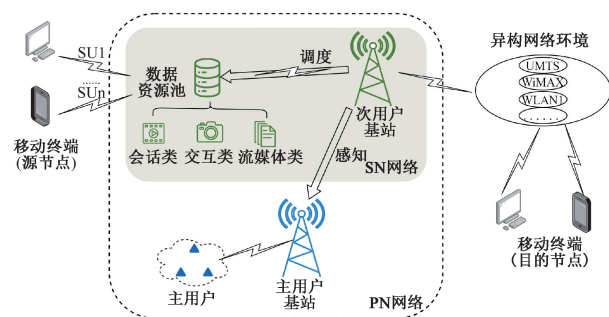


图 1 Het-CRN 结构图

Fig. 1 Structure of Het-CRN

其中,次用户以 overlay 模式实现对频谱空穴的动态接入,即次用户智能感知主用户行为,机会性地接入未被主用户占用的信道进行传输。在该网络中主用户网络(primary network, PN)由主用户基站(primary base station, PBS)和 PU 组成;次级用户网络(secondary network, SN)由次级基站(secondary base station, SBS)、SU 和一个数据资源池组成。此外,本系统主要考虑上行数据传输。在执行网络切换前,不同的业务将通过数据资源池进行分类管理和存储。其中, SU 的数据传输不仅受到 PU 信道占用情况的影响,还受无线信道状态的影响。

1.1 业务模型

1) 业务分类模型

3GPP^[26] 将业务分为了 4 种类别:会话类(conversational class, CC)、交互类(interactive class, IC)、流媒体类(streaming class, SC)以及背景类(background class, BC),且 SU 订阅的服务通常各不相同^[27]。主要考虑会话类、交互类和流媒体类 3 种业务。通过设定阈值(thresholds, T) T_{CC} 、 T_{IC} 、 T_{SC} 将业务进行分类,具体如图 2 所示。

(1) If $T \in T_{CC}$, 则数据属于会话类,其需求为获得较快的传输速率;

(2) If $T \in T_{IC}$, 则数据属于交互类,其需求包括较高的带宽和低丢包率;

(3) If $T \in T_{SC}$, 则数据属于流媒体类,其需求为相对较低的时延(允许一定的传输和处理时间),以及可容忍一定程度的数据丢失。

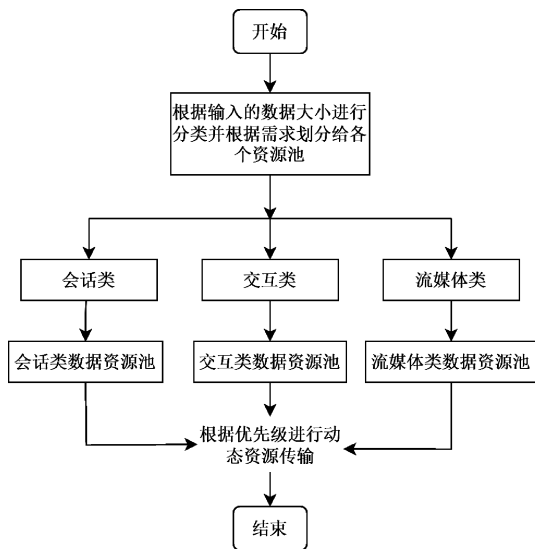


图 2 不同业务分类模型流程图

Fig. 2 Flowchart of different business classification models

同时,为了确保用户能够快速地接收和理解信息,上

述 3 种业务的优先级为:会话类业务>交互类业务>流媒体类业务。

2) 业务存储模型

根据不同的业务分类类别,构造相应的存储矩阵 $V = (v_{ij})_{m \times n}$,其中 v_{ij} 表示第 i 个 SU 的第 j 个数据。

通过将资源池中的数据划分到不同类别的资源池中,实现了资源的差异化分配,有助于更有效地管理不同类别的数据资源。

1.2 信道状态模型

在 overlay 模式下,认知用户仅能在主用户未使用的信道上进行传输,而每个时隙的 PU 对信道的占用情况都可能发生变化。因此,将 PU 对信道的状态描述为一个具有两状态(占用与非占用)的马尔科夫链,即该时隙 PU 对信道的占用状态只受前一个时隙占用状态的影响,建立 PU 状态转移概率矩阵 P_{PU} :

$$P_{PU} = \begin{bmatrix} P_{0 \rightarrow 0} & P_{0 \rightarrow 1} \\ P_{1 \rightarrow 0} & P_{1 \rightarrow 1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $P_{0 \rightarrow 1}$ 表示由 t 时隙到 $t+1$ 时隙, PU 对信道的占用情况从占用状态变成了非占用状态。有 $P_{0 \rightarrow 0} + P_{0 \rightarrow 1} = 1$; 同理 $P_{1 \rightarrow 0} + P_{1 \rightarrow 1} = 1$ 。

一条信道的总状态受多个因素影响,其中包括信道上主用户是否存在以及信道的质量状况。设发射机允许的最大发射功率为 P_t , SU 的发射功率为 P_s ,从源节点到目的节点的信道符合瑞利衰落,且信道增益 H 服从参数为 λ 的指数分布,其概率密度函数为:

$$f_x(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (2)$$

为了获得各个信道的信道状态,并且考虑到信道状态的变化会引起信道质量(channel, CSI)的变化。因此,使用信噪比对信道质量进行量化,用 $r_{i,t}^k$ 表示第 i 个 SU 在 t 时隙信道 k 上的 SNR,则表达式为:

$$r_{i,t}^k = \frac{P_i^k \cdot |h_i|^2}{I_i^k} \quad (3)$$

式中: P_i^k 表示第 i 个 SU 在信道 k 上的发射功率, $X = |h_i|^2$ 为第 k 个信道到目的节点的信道增益, I_i^k 表示在第 i 个 SU 在第 k 个信道上的干扰功率。

2 基于多属性决策的综合权重值算法

2.1 基于改进的 SAW 计算业务客观权重

在权重分配方面,SAW 法存在很强的主观性,使得所取的权重值不具有说服力。因此,提出了改进的简单加权法,并结合敏感性分析来获取业务的客观权重。

选取 m 个信道属性作为输入参数,表示为集合 $A = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_m]$,当前候选信道有 K 个。

首先,得到所有信道的属性参数,并构建了一个信道

参数矩阵 $\mathbf{D} = (d_{kv})_{K \times m}$, 其中 d_{kv} 表示第 k 个候选信道的第 v 个信道属性值。由于各个信道参数属性无法直接进行比较, 因此需要进行统一化。

再通过遍历所有的权重取值情况, 则第 n 次遍历时, 假设已获得业务的客观权重值为:

$$\mathbf{W}_{obj}^n = (w_1, w_2, \dots, w_v) \quad (4)$$

其中 $\sum_{v=1}^m w_v = 1$, 加权函数 Q_n^k 表示第 n 次遍历时, 第 k 个信道的信道评分值, 表达式为:

$$Q_n^k = \sum_{v=1}^m d_{kv} w_v \quad (5)$$

因此, 得到第 n 次遍历时 3 种业务类型在客观权重下的候选信道评分 $\mathbf{S}_{SAW}^n$, 分别表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{SAW, CC}^n &= [Q_{SAW, CC}^{1, C}, Q_{SAW, CC}^{2, C}, \dots, Q_{SAW, CC}^{k, C}] \\ \mathbf{S}_{SAW, IC}^n &= [Q_{SAW, IC}^{1, I}, Q_{SAW, IC}^{2, I}, \dots, Q_{SAW, IC}^{k, I}] \\ \mathbf{S}_{SAW, SC}^n &= [Q_{SAW, SC}^{1, S}, Q_{SAW, SC}^{2, S}, \dots, Q_{SAW, SC}^{k, S}] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $Q_{SAW, CC}^{k, C}, Q_{SAW, IC}^{k, I}, Q_{SAW, SC}^{k, S}$ 分别表示各业务在简单加权法下对第 k 个信道的评分值。

最后, 通过改进的简单加权法, 得到使得性能指标结果最佳的一组权重, 即为客观权重。

3 种业务的客观权重分别为 $\alpha_{CC}^{SAW} = (w_{C,1}, w_{C,2}, \dots, w_{C,m})$, $\alpha_{IC}^{SAW} = (w_{I,1}, w_{I,2}, \dots, w_{I,m})$ 和 $\alpha_{SC}^{SAW} = (w_{S,1}, w_{S,2}, \dots, w_{S,m})$ 。其中 $w_{C,v}, w_{I,v}, w_{S,v}$ 是简单加权法下各业务对第 v 个信道属性的权重值。

2.2 AHP 分析计算业务主观权重

采用层次分析法来获取业务的主观权重, 通过业务偏好来确定。

1) 构建层次结构

首先, 建立层次分析模型, 分别包括目标层、准则层和方案层, 如图 3 所示。

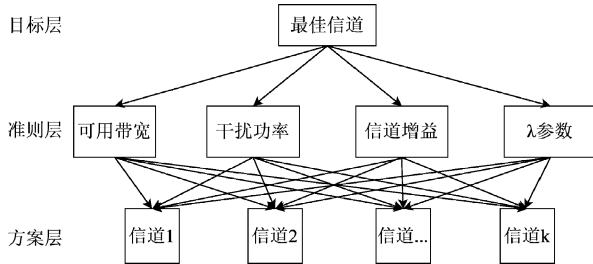


图 3 层次结构图

Fig. 3 Hierarchy diagram

2) 构建模糊互补矩阵

其次, 业务间根据其特定需求对准则层因素赋予不同的偏好权重。通过构建各业务的模糊互补判断矩阵 $\mathbf{R} = (r_{cd})_{n \times n}$, 其中 r_{cd} 的取值方法为 1~9 标度法^[28]。

3) 权重值计算

再进行主观权重计算:

$$\mathbf{W}_{obj} = (w_1, w_2, \dots, w_m) \quad (7)$$

其中, w_m 的计算公式为:

$$w_m = \frac{\sum_{c=1}^d r_{cd}}{n} \quad (8)$$

4) 一致性检验

通过一致性指标 (consistency indicator, CI) 来评估判断矩阵的一致性, 其公式为 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 。CI 值越大, 表示判断矩阵一致性越差; CI 值为 0 时, 表示判断矩阵具有完全一致性。一致性比率 (consistency ratio, CR), 其公式为 $CR = CI / RI$, 其中一致性比例 (random index, RI) 为平均随机一致性指标。若 $CR < 0.1$ 时, 则判断矩阵的一致性完全接受。

最后, 得到不同业务的主观权重, 会话类业务的权重值为 $\beta_{CC}^{AHP} = (w_{C,1}, w_{C,2}, \dots, w_{C,m})$ 、交互类业务的权重值为 $\beta_{IC}^{AHP} = (w_{I,1}, w_{I,2}, \dots, w_{I,m})$ 、流媒体类业务的权重值为 $\beta_{SC}^{AHP} = (w_{S,1}, w_{S,2}, \dots, w_{S,m})$ 。其中 $w_{C,v}, w_{I,v}, w_{S,v}$ 是层次分析法下相应业务对第 v 个信道属性的权重值。

并得到各业务在主观权重下的信道评分结果为 $\mathbf{S}_{AHP}^{CC}, \mathbf{S}_{AHP}^{IC}$ 和 $\mathbf{S}_{AHP}^{SC}$ 如下所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{AHP}^{CC} &= [Q_{AHP}^{1, C}, Q_{AHP}^{2, C}, \dots, Q_{AHP}^{k, C}] \\ \mathbf{S}_{AHP}^{IC} &= [Q_{AHP}^{1, I}, Q_{AHP}^{2, I}, \dots, Q_{AHP}^{k, I}] \\ \mathbf{S}_{AHP}^{SC} &= [Q_{AHP}^{1, S}, Q_{AHP}^{2, S}, \dots, Q_{AHP}^{k, S}] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $Q_{AHP}^{k, C}, Q_{AHP}^{k, I}, Q_{AHP}^{k, S}$ 分别表示各业务在层次分析法下对第 k 个信道的评分值。

根据层次分析法的算法流程, 为获得各信道参数指标对于不同业务的相对权重, 建立各业务的模糊互补判断矩阵。为了更直观地呈现结果, 将可用带宽简称为 AB, 干扰功率简称为 DP, 信道增益简称为 CG, 参数 λ 简称为 P。具体来说, 会话类业务、交互类业务和流媒体类业务的模糊互补判断矩阵 $\mathbf{A}$ 如下所示:

$$\mathbf{A}_{CC} = \begin{matrix} \begin{matrix} AB & DP & CG & P \end{matrix} \\ \begin{matrix} AB \\ DP \\ CG \\ P \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 5 & 4 & 2 \\ 1/5 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/4 & 2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$\mathbf{A}_{IC} = \begin{matrix} \begin{matrix} AB & DP & CG & P \end{matrix} \\ \begin{matrix} AB \\ DP \\ CG \\ P \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 9 & 8 & 3 \\ 1/9 & 1 & 0.167 & 0.143 \\ 1/8 & 6 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 7 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$\mathbf{A}_{SC} = \begin{matrix} \begin{matrix} AB & DP & CG & P \end{matrix} \\ \begin{matrix} AB \\ DP \\ CG \\ P \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 9 & 8 & 3 \\ 1/9 & 1 & 0.172 & 0.144 \\ 1/8 & 6 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 7 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

由主观判决矩阵确定的权重值及计算的一致性比如表 1 所示。

表 1 每类业务的权重值及一致性比
Table 1 Weights and consistency ratios for each operation

业务	可用带宽/ %	干扰功率/ %	信道增益/ %	λ 参数/ %	一致 性比
会话类	51.154	9.856	14.663	24.327	0.018
交互类	55.819	4.04	13.992	26.149	0.093
流媒体类	59.776	3.999	13.444	22.781	0.096

由表 1 可以看出,各类业务判决矩阵 A 均具有满意的一致性。

2.3 组合权重设计

传统的多属性决策算法在信道选择中通常只侧重于信道属性的客观权重或主观权重,这导致选择结果存在偏见。为了实现更均衡的信道分配,提出了一种综合权重算法。如图 4 所示,该算法首先通过改进的 SAW 确定业务的客观权重,再通过 AHP 获取满足业务需求的主观权重。最后,将这两类权重相结合,形成每个业务的综合权重,其能够更全面地反应业务的实际需求,从而实现信道的最优分配。

首先通过改进的 SAW 法,得到使得各业务最优时的客观权重分别: $\alpha_{CC}^{SAW}, \alpha_{IC}^{SAW}, \alpha_{SC}^{SAW}$; 再根据层次分析法,得到使得各业务最优时的主观权重分别为: $\beta_{CC}^{AHP}, \beta_{IC}^{AHP}, \beta_{SC}^{AHP}$ 。因此,综合权重为:

$$\mathbf{W}_{cop} = (w_1, w_2, \dots, w_m) \tag{10}$$

其中, w_m 如下所示:

$$w_m = \frac{\alpha_i^{SAW} \times \beta_i^{AHP}}{\sum_{i=1}^m (\alpha_i^{SAW} \times \beta_i^{AHP})} \tag{11}$$

因此,会话类业务的综合权重为 $\boldsymbol{\eta}_{CC}^{cop} = (w_{C,1}, w_{C,2}, \dots, w_{C,m})$,交互类业务的综合权重为 $\boldsymbol{\eta}_{IC}^{cop} = (w_{I,1}, w_{I,2}, \dots, w_{I,m})$,流媒体类的综合权重为 $\boldsymbol{\eta}_{SC}^{cop} = (w_{S,1}, w_{S,2}, \dots, w_{S,m})$ 。

采用简单加权法计算每个业务针对 K 个信道的评分,并以此作为信道分配的依据。因此,可以得到会话类业务、交互类业务和流媒体类业务针对所有信道的评分集合,表示为 $\mathbf{S}_{cop}^{CC}, \mathbf{S}_{cop}^{IC}$ 和 $\mathbf{S}_{cop}^{SC}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{cop}^{CC} &= [Q_{cop}^{1,C}, Q_{cop}^{2,C}, \dots, Q_{cop}^{k,C}] \\ \mathbf{S}_{cop}^{IC} &= [Q_{cop}^{1,I}, Q_{cop}^{2,I}, \dots, Q_{cop}^{k,I}] \\ \mathbf{S}_{cop}^{SC} &= [Q_{cop}^{1,S}, Q_{cop}^{2,S}, \dots, Q_{cop}^{k,S}] \end{aligned} \tag{12}$$

其中, $Q_{cop}^{k,C}, Q_{cop}^{k,I}, Q_{cop}^{k,S}$ 是相应业务对应对第 k 个信道的排序。

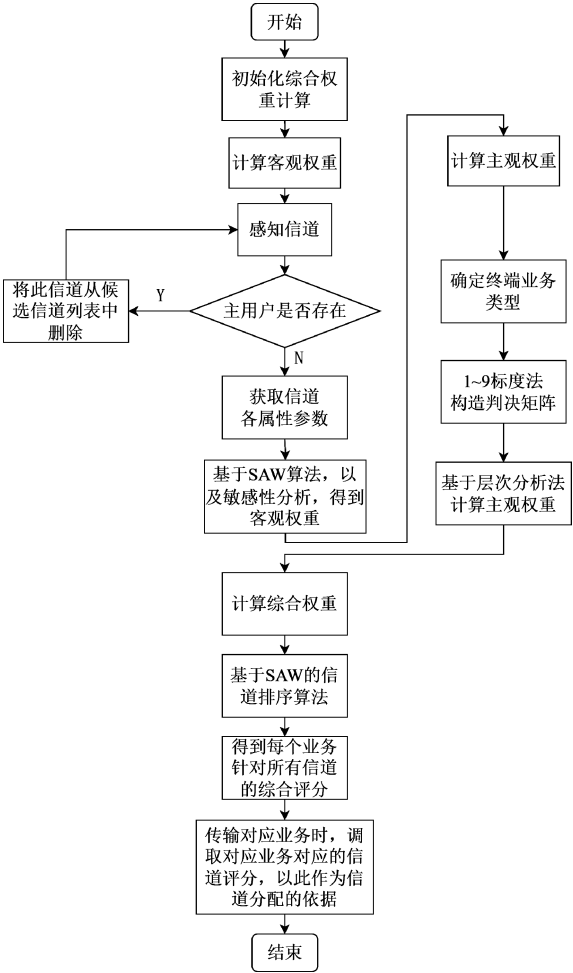


图 4 综合权值算法流程图

Fig. 4 Diagram of the integrated weights algorithm

3 基于用户决策的接入-分配算法

如表 2 所示,提出了基于用户决策接入-分配算法是一种基于业务优先级的智能分配算法。该策略结合了主观权重和客观权重,得到综合权重,为每个业务生成最终信道的评价集合,分别表示为 $\mathbf{S}_{cop}^{CC}, \mathbf{S}_{cop}^{IC}, \mathbf{S}_{cop}^{SC}$ 。通过将综合权重运用于 SAW 法中,并根据此评价集合和业务优先级来执行信道接入-分配,以确保用户能够获得满意的信道并有效地分配信道资源。

该算法基于用户的优先级进行智能分配,避免了极端情况,例如将多条信道全部分配给高优先级用户,从而导致其他用户无可用信道获取的情况。在本算法中,保证低优先级用户至少获得一条信道,且高优先级用户和低优先级用户均具有接入多条信道的机会。

表 2 用户决策的接入与分配算法

Table 2 User Decision Access and Allocation Algorithm

用户决策的接入与分配算法

输入:信道总数:K;仿真次数:n;

会话类业务对信道的评分集合: $S_{cop}^{CC} = [Q_{cop}^{1,C}, Q_{cop}^{2,C}, \dots, Q_{cop}^{k,C}]$;

交互类业务对信道的评分集合: $S_{cop}^{IC} = [Q_{cop}^{1,I}, Q_{cop}^{2,I}, \dots, Q_{cop}^{k,I}]$;

流媒体类业务对信道的评分集合: $S_{cop}^{SC} = [Q_{cop}^{1,S}, Q_{cop}^{2,S}, \dots, Q_{cop}^{k,S}]$;

输出:

3 个业务各自的信道分配结果: $D_{CC} = []$, $D_{IC} = []$, $D_{SC} = []$;

Begin

1. $N_{free} =$ 感知可用信道

2. $N'_{free} = |N_{free}|$ 复制可用信道列表

3. for t in range(n) do

4. for s in S_{cop}^{CC} do

5. $Best_{ch} =$ 得到评分最高的信道(N_{free}, S_{cop}^{CC})

6. $D_{CC} =$ 分配信道($Best_{ch}, s$)

7. $N_{free} -= \{Best_{ch}\}$

8. $N'_{free} -= 1$

9. end for

10. for m in S_{cop}^{IC} do

11. while $N'_{free} > 0$ and (信道已分配给会话类业务 $Best_{ch}$) do

12. $Best_{ch} =$ 得到次优信道(N_{free}, S_{cop}^{IC})

13. end while

14. $D_{IC} =$ 分配信道($Best_{ch}, m$)

15. $N_{free} -= \{Best_{ch}\}$

16. $N'_{free} -= 1$

17. end for

18. for b in S_{cop}^{SC} do

19. while $N'_{free} > 0$ and (信道已分配给小型业务($Best_{ch}$))

或信道已分配给中型业务($Best_{ch}$)) do

20. $Best_{ch} =$ 计算次优信道(N_{free}, S_{cop}^{SC})

21. end while

22. $D_{SC} =$ 分配信道($Best_{ch}, b$)

23. $N_{free} -= \{Best_{ch}\}$

24. $N'_{free} -= 1$

25. end for

26. end for

End

4 信道分配方法性能评估

为了有效、统一评估各种信道分配协议在复杂场景和多属性决策问题下的性能,基于文献[29]构建了一个性能评估系统(performance evaluation system, PES)。PES 采用了离散时间队列模型,该模型不仅能够获得吞吐量、时延等综合性能评估指标,而且通过引入新的参数设置和评估方法,提高了协议评估的效率和准确性。具体改进之处在于:引入了对到达过程、服务过程和缓存区的更精细控制。此外,该系统还考虑了用户行为的多样

性和网络条件的不确定性,从而提供了一个更为全面和灵活的评估系统。

在建立离散时间排队模型的过程中,需要设置到达、服务和缓存区等参数。

4.1 到达设置

假设 SU 数据包到达服从泊松分布,表达式为:

$$P(B_{i,t} = b) = \frac{\lambda_i}{b!} e^{-\lambda_i}, b \in N \quad (13)$$

式中: λ_i 表示第 i 个 SU 到达数据包的平均数量; $B_{i,t}$ 表示在 t 时隙第 i 个 SU 到达的数据包数。

4.2 缓存设置

假设在第 t 时隙刚开始时(第 $t-1$ 时隙结束),第 i 个 SU 队列缓冲区中数据包个数为 $C_{i,t}$,第 i 个 SU 缓存区大小为 U_i 。

4.3 服务设置

用 $\mu_{i,t}^k$ 表示第 i 个 SU 在 t 时刻信道 k 上实际传输的数据包数量。SU 数据包的传输可以分为两个连续的过程,分别为数据包到达过程和数据包发送过程。

在数据包到达过程中,如果在 t 时刻开始时 SU 到达的数据包数量超过该 SU 队列缓存中剩余缓存大小,超过缓存大小的数据包将会被拒绝。因此,可以得到缓存区中数据包的数量为 $\min(B_{i,t} + C_{i,t}, U_i)$,同时也可以得到在 t 时隙第 i 个 SU 被拒绝的数据包个数,记为 $D_{i,t}$,表达式为:

$$D_{i,t} = \max(0, B_{i,t} + C_{i,t} - U_i) \quad (14)$$

数据包到达后,数据包开始传输,数据包被服务、离开。其中每个信道的最大吞吐量为 $F_{i,t}^k$,表示为第 i 个 SU 在 t 时刻信道 k 上的最大吞吐量,表达式为:

$$F_{i,t}^k = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_i^k \cdot |h_i|^2}{I_i^k} \right) \quad (15)$$

其中, B 表示可用带宽,因此 t 时隙第 i 个 SU 分得的信道吞吐总和为:

$$E_{i,t} = \sum_{k=1}^K F_{i,t}^k \quad (16)$$

在数据包离开过程中,一个时隙内成功传输的所离开队列的包数,就是该时隙实际吞吐量,即为 $G_{i,t}^k$:

$$G_{i,t}^k = \begin{cases} E_{i,t}, \mu_{i,t}^k \geq E_{i,t} \\ \mu_{i,t}^k, \mu_{i,t}^k < E_{i,t} \end{cases} \quad (17)$$

用 G_i 表示第 i 个 SU 总吞吐量,则在总时隙 T 中 G_i 表达式为:

$$G_i = \sum_{t=1}^T G_{i,t}^k \quad (18)$$

假设第 p 个从数据包进入队列缓冲区到被成功传输等待的时间间隔为 t_p ,则第 i 个 SU 数据包的总时间 O_{sum} 间隔为:

$$O_{sum} = \sum_{p=1}^{G_i} t_p \tag{19}$$

业务满意度的定义是指在传输过程中,确保各个用户获得位于其信道排序集合中前列的信道,即分配给用户的信道应当能够满足他们的偏好。基于改进的 SAW 法、AHP 法和综合法得到不同业务对信道的评分结果,按照 K 到 1 的顺序为信道进行评分,并计算业务的满意度。则在 t 时隙信道 k 的得分为 N_i^k 。进而,可以得到主观、客观和综合权重下的业务满意度分别为 $M_{sbj}, M_{obj}, M_{cop}$, 则有:

$$M_{sbj,obj,cop} = \sum_{k=1}^K N_i^k \tag{20}$$

综上所述,对会话类业务、交互类业务和流媒体类业务可以分别得到:

平均吞吐量:用户在时隙 T 下的总吞吐量与时隙数 T 的比值,表达式为:

$$\bar{a}_{th} = \frac{\sum_{t=1}^T G_{i,t}}{T} \tag{21}$$

平均拒绝率:用户在时隙 T 下的总拒绝与时隙数 T 的比值,表达式为:

$$\bar{a}_{re} = \frac{\sum_{t=1}^T D_{i,t}}{T} \tag{22}$$

平均时延:用户在时隙 T 下的总时延与时隙数 T 的比值,表达式为:

$$\bar{a}_{de} = \frac{\sum_{p=1}^{G_i} t_p}{G_i} \tag{23}$$

用户平均满意度:用户在时隙数 T 的总满意度与时隙数 T 的比值,表达式为:

$$\bar{a}_{M_{sbj,obj,cop}} = \frac{\sum_{t=1}^T N_i^k}{T} \tag{24}$$

5 仿真分析

5.1 仿真实验设置

在智能家居环境中,智能电视作为多功能设备,可以完成包括视频通话、在线游戏和视频点播在内的多种服务。这些服务分别对应了会话类、交互类和流媒体类业务,它们影响着用户的体验质量(QoE)。本研究以智能电视为研究对象,设计了仿真实验,用以评估提出的用户决策接入与分配方案。仿真实验专注于智能电视在智能家居场景中的无线通信性能,综合考虑了影响用户体验的信道参数,包括可用带宽、干扰功率、信道增益、参数

λ 。旨在从以下两个角度进行研究:

1) 性能结果是否满足用户实际需求;

2) 综合权重法对用户满意度的影响。

为了评估用户决策接入与分配方法的有效性,使用 PES 设置了相应的仿真实验。在 Het-CRN 系统仿真中,相应参数设置如表 3 和表 4 所示。

表 3 仿真参数的设置

Table 3 Settings of simulation parameters

符号	含义	值
K	信道数量	20
M	SU 数量	1
P_i^k	SU 发射功率	0. 1~2 W
I_i^k	干扰功率	7. 4~27. 4 dBW

表 4 业务参数的设置

Table 4 Setting of operational parameters

业务类型	缓存大小/M	数据大小/M	数据包到达率
会话类(CC)	25~25. 5	(0, 3]	0. 4~0. 9
交互类(IC)	50~50. 5	(3, 8]	0. 4~0. 9
流媒体类(SC)	180~185	(8, 20]	0. 4~0. 9

5.2 数值结果分析

在本研究中,会话类业务因其对实时性和交互性的高要求,被赋予了最高优先级。图 5 中会话类业务性能结果尤为显著,其在吞吐量、时延和数据包拒绝率等关键指标上均达到了最优。这些结果不仅验证了综合算法在满足高优先级业务需求方面的有效性,而且也证实了使用文献[29]的方法对所提算法性能进行评估的准确性和可靠性。综合权重法通过优化信道分配,确保了会话类业务在高数据包到达率下仍能维持低时延、低数据包拒绝率和高吞吐量,这对于保障智能家居环境中实时通信的流畅性和稳定性至关重要。

图 6 和图 7 分别展示了交互类和流媒体类业务在不同优先级和用户需求下的性能结果。尽管这些业务的性能指标与会话类业务相比未展现出相同的优势,但这种差异与它们的业务特性和用户需求紧密相关。本着从用户角度出发的原则,追求的目标并不仅仅是最佳性能,而是确保性能能够充分满足用户的实际需求。在本研究中,采用了平均相对标准偏差作为衡量算法性能是否符合用户需求的一个关键指标。通过计算不同权重算法下的性能指标(如吞吐量、时延和数据包拒绝率)的标准偏差和平均值,来验证了这一观点。

在会话类业务中,综合权重法的平均相对标准偏差为 0. 47,低于主观权重(0. 59)和客观权重(0. 58)的结果。对于交互类业务,综合权重法下的平均相对标准偏差为 0. 56,均低于主观权重(0. 67)和客观权重(0. 64)的平均相对标准偏差。流媒体类业务也显示了类似的趋

势,综合权重法下的平均相对标准偏差为 0.51,而主观权重和客观权重下的结果分别为 0.56 和 0.64。

这些数据表明,综合权重法在所有业务类型中都实现了最低的平均相对标准偏差,证明了即便在性能权衡

的情况下,也能保证服务质量达到用户的接受度。这验证了所提方法的精确性和适用性,且所提算法充分考虑了不同类型业务对 QoE 参数的需求,从而确保了用户满意度。

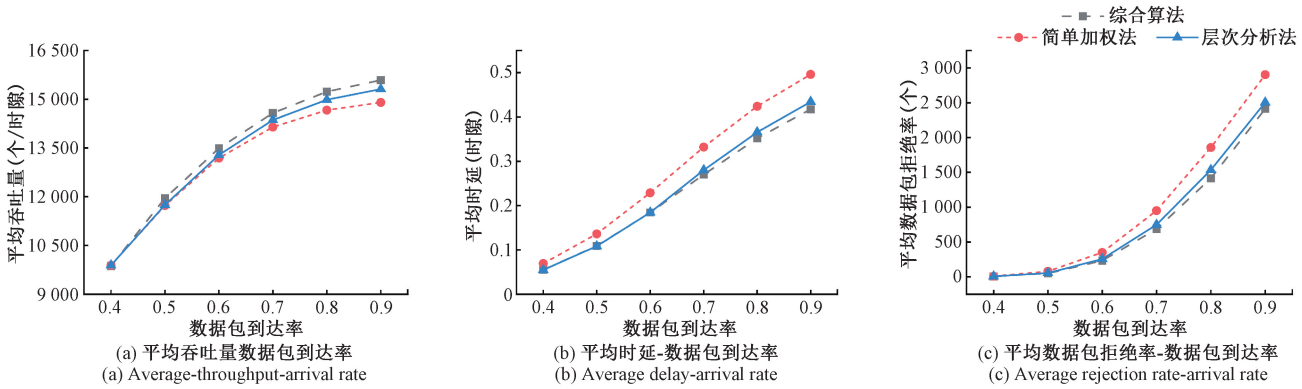


图 5 以数据包到达率作为自变量时 3 种方法下的会话类业务吞吐量、时延及数据包拒绝率

Fig. 5 Throughput, delay and packets rejection of Conversational class service versus packet arrival rate under three methods

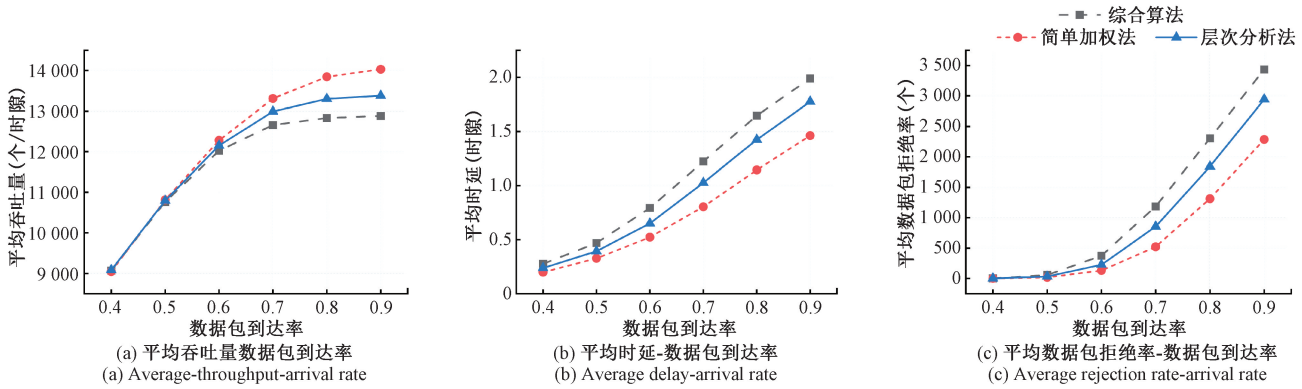


图 6 以数据包到达率作为自变量时 3 种方法下的交互类业务吞吐量、时延及数据包拒绝率

Fig. 6 Throughput, delay and packets rejection of Interactive class service versus packet arrival rate under three methods

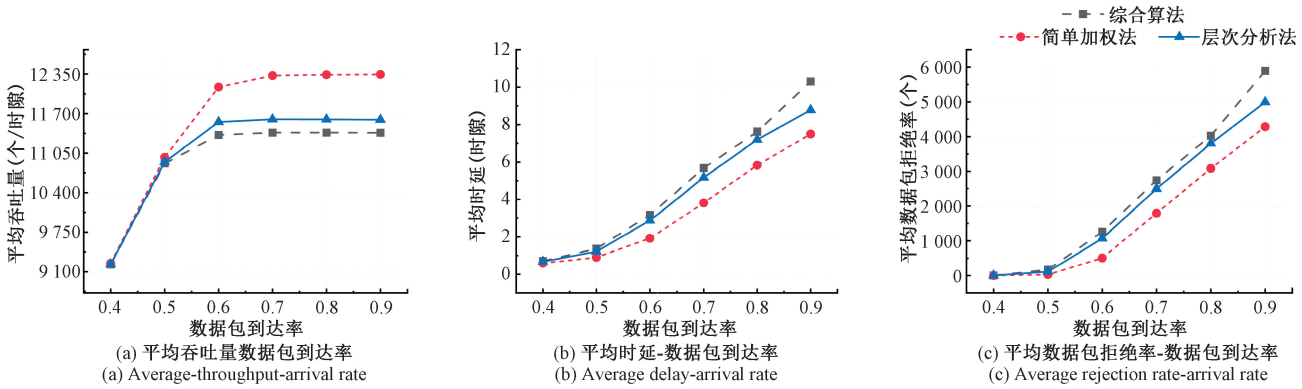


图 7 以数据包到达率作为自变量时 3 种方法下的流媒体类业务吞吐量、时延及数据包拒绝率

Fig. 7 Throughput, delay and packets rejection of streaming class service versus packet arrival rate under three methods

进一步,为了验证综合权重法对用户 QoE 的影响,提供了不同算法下的业务平均满意度结果,如图 8~图 10 所示。通过以 PU 信道被占用的概率为自变量,观察到当占用率为 0 时,对于会话类业务(图 8),综合权重法

和 AHP 法得到的业务平均满意度均为 99。然而,综合权重法避免了主观性的影响,因此更为适用。对于交互类业务(图 9),综合算法、层次分析法和简单加权法下业务平均满意度分别为 94、92 和 87;对于流媒体类业务(图

10), 3 种不同算法下用户平均满意度分别为 98、91 和 87。这显著证明了综合权重法在提升用户满意度方面的卓越性。

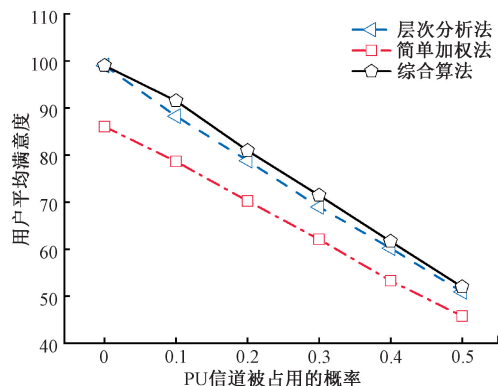


图 8 用户满意度-PU 活动-会话类业务

Fig. 8 User satisfaction-PU channel-conversational class

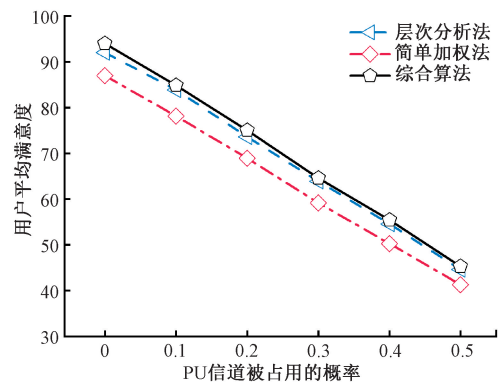


图 9 用户满意度-PU 活动-交互类业务

Fig. 9 User satisfaction-PU channel-interactive class

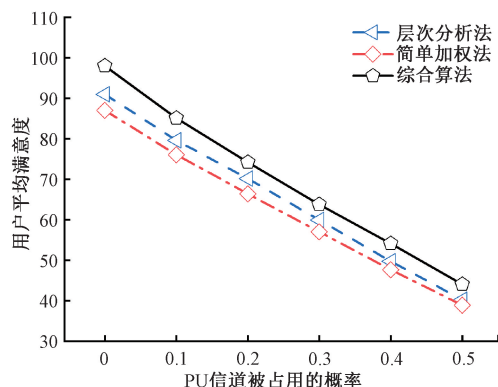


图 10 用户满意度-PU 活动-流媒体类业务

Fig. 10 User satisfaction-PU channel-streaming class

随着 PU 信道被占用概率的增加,各方法下用户平均满意度普遍呈下降趋势,因为可用信道逐渐减少,导致用户满意度下降。然而,综合权重法下的用户满意度仍

高于层次分析法和简单加权法产生的用户满意度,这为本算法提升用户 QoE 的全面性提供了有力支持。

6 结 论

在本研究中,针对智能家居环境中的异构认知无线网络(Het-CRN),提出了一种创新的多终端多业务信道接入-分配方法。该方法的核心在于通过结合主观和客观权重,全面评估了用户偏好、业务需求以及信道可用带宽、干扰功率等关键因素,在保证用户 QoE 得到提升的基础上,实现了用户最佳通信。同时,基于多模终端技术,采用简单加权法对信道进行分配,实现了多信道接入-分配,提高了系统整体效率。在系统性能分析方面,采用了离散时间队列模型,确保了所提方法在满足多样性用户需求方面的有效性,进而得到满足各用户需求的吞吐量、时延和数据包拒绝率等评估指标。进一步地,仿真实验结果与相对标准偏差的分析相结合,验证了综合权重算法在提升用户 QoE 方面的有效性,在获得更高用户满意度的同时降低了模糊算法的主观片面性和客观片面性。

综上,本研究将异构网络与 CR 技术相结合,在智能家居环境下提供了一种从用户角度出发设计和分析复杂环境下的不同信道分配方法。未来的研究方向将扩展到考虑移动终端用户的接收信道强度和速度等更多动态因素,这些因素对于频谱资源的动态分配至关重要。通过将这些因素与所提出的网络选择方法相结合,可以进一步提升系统的性能,更好地满足用户在复杂网络环境中的服务需求。

参考文献

- [1] KHASAWNEH M, AZAB A, ALRABAE S, et al. Convergence of IoT and cognitive radio networks: A survey of applications, techniques, and challenges[J]. IEEE Access, 2023, 11: 71097-71112.
- [2] ZHANG H, HUANG CH, ZHOU J, et al. QoS-aware virtualization resource management mechanism in 5G backhaul heterogeneous networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 19479-19489.
- [3] SO H, MARUTA K, NAKAYAMA Y. Adaptive C-RAN architecture using crowdsourced radio units for smart city[J]. IEEE Access, 2023, 11: 81124-81133.
- [4] ALI M, YASIR M N, BHATTI D M S, et al. Optimization of spectrum utilization efficiency in cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(3): 426-430.
- [5] 王海东, 谭国平, 周思源. 基于时延约束的 D2D 异构网络资源动态分配[J]. 电子测量技术, 2020,

- 43(17): 130-136.
- WANG H D, TAN G P, ZHOU S Y. Dynamic allocation of resources in D2D heterogeneous networks based on delay constraints [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(17): 130-136.
- [6] 陆卫强, 张朝路, 田毅辉, 等. 基于博弈论的认知无线电频谱分配算法[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(12): 58-63.
- LU W Q, ZHANG CH L, TIAN Y H, et al. Game theory based spectrum allocation algorithm for cognitive radios[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(12): 58-63.
- [7] RAWAT P, SINGH K D, BONNIN J M. Cognitive radio for M2M and internet of things: A survey[J]. *Computer Communications*, 2016, 94: 1-29.
- [8] SANTHAMURTHY T, PARASURAMAN K. Epubdra: Efficient priority based dynamic resource allocation in heterogeneous MIMO cognitive radio networks [J]. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2018, 11: 276-285.
- [9] XU Y J, GUI G, GACANIN H, et al. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 668-695.
- [10] WANG L, YANG J J, SONG X J. A QoE-driven spectrum decision scheme for multimedia transmissions over cognitive radio networks[C]. 2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). 2017: 1-5.
- [11] DAI J Y, WANG SH W. QoE-driven resource allocation method for cognitive radio networks [C]. 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2016: 1-6.
- [12] BDRANY A, SADKHAN S B. Decision making approaches in cognitive radio-status, challenges and future trends [C]. 2020 International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE). 2020: 195-198.
- [13] KUMAR K, PRAKASH A, TRIPATHI R. Spectrum handoff scheme with multiple attributes decision making for optimal network selection in cognitive radio networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2017, 3(3): 164-175.
- [14] XIAO K, LI C. Vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks based on entropy and improved TOPSIS [C]. 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT). 2018: 706-710.
- [15] LIN H F, DU L, LIU Y F. Soft decision cooperative spectrum sensing with entropy weight method for cognitive radio sensor networks [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 109000-109008.
- [16] ALI J, ROH B H. An effective hierarchical control plane for software-defined networks leveraging TOPSIS for end-to-end QoS class-mapping[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 88990-89006.
- [17] 蒿峰. 基于灰关联投影的配电自动化通信网络安全性评判研究 [J]. *电子测量技术*, 2019, 42(20): 143-147.
- HAO F. Research on security judgment of distribution automation communication network based on gray correlation projection [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(20): 143-147.
- [18] MA M F, ZHU AN Q, GUO S T, et al. Intelligent network selection algorithm for multiservice users in 5G heterogeneous network system: Nash Q-learning method[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 11877-11890.
- [19] GIRAL-RAMÍREZ D A, HERNÁNDEZ-SUAREZ C A, PARRA I P P. Novel methodological proposal for decision-making in decentralized cognitive radio networks based on information exchange between SU [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 133993-134008.
- [20] ZOU J N, HUANG L W, GAO X F, et al. Joint pricing and decision-making for heterogeneous user demand in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(11): 3873-3886.
- [21] BAYRAKDAR M E, CALHAN A. Fuzzy logic based spectrum handoff decision for prioritized secondary users in cognitive radio networks [C]. 2015 Fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC). 2015: 71-76.
- [22] DIVYA A, NANDAKUMAR S. Adaptive threshold based spectrum sensing and spectrum handoff using MADM methods for voice and video services [C]. 2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN). 2019: 1-6.
- [23] 黎洁, 刘羽西, 李奇越. 基于隐马尔可夫模型的认知无线电频谱切换方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(1): 69-74.
- LI J, LIU Y X, LI Q Y. A hidden markov model-based approach to cognitive radio spectrum switching [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(1): 69-74.

- [24] 王诗, 朱笑莹, 孙浩, 等. 认知物联网基于边缘计算的频谱感知-分配方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 81-92.
WANG SH, ZHU X Y, SUN H, et al. An edge computing-based spectrum sensing-allocation approach for the internet of cognitive things[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 81-92.
- [25] WANG SH, MAHARAJ B T, ALFA A S. Queueing analysis of performance measures under a new configurable channel allocation in cognitive radio[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9571-9582.
- [26] 张钰, 刘胜美. 基于多属性判决的网络选择算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(6): 120-124.
ZHANG Y, LIU SH M. A network selection algorithm based on multi-attribute verdict [J]. Computer Science, 2015, 42(6): 120-124.
- [27] LIU B, HE L. QoE-based resource allocation for mixed services over cognitive radio networks [C]. 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Kauai, HI, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [28] 任云良. 基于 1-9 标度法的交互性资产绩效管理评价体系[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(11): 259-262.
REN Y L. Evaluation system of interactive asset performance management based on 1-9 scale approach[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(11): 259-262.
- [29] 王诗, 蓝浩, 朱笑莹, 等. 基于概率分布向量的频谱分配协议性能评估系统[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 160-167.
WANG SH, LAN H, ZHU X Y, et al. Performance evaluation system for spectrum allocation protocols based on probability distribution vectors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 160-167.

作者简介



王诗, 分别于 2006 年与 2009 年在北京邮电大学获得学士学位以及硕士学位, 2018 年于比勒陀利亚(Pretoria)大学获得博士学位。现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为认知无线电、无线电资源分配以及排队论。
E-mail: wangshi@lntu.edu.cn

Wang Shi received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, in 2006 and 2009, and the Ph. D. degree in engineering from the University of Pretoria, Pretoria, South Africa, in 2018. He is now an Associate Professor with the School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University,

Huludao, China. His research interests include cognitive radio networks, radio resource allocation in wireless networks, and queuing theory.



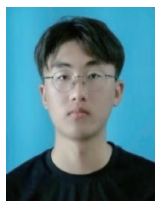
严洁(通信作者), 2022 年于重庆邮电大学移通学院获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学电子与信息工程学院硕士研究生。主要研究方向为认知无线电、异构网络、无线电资源分配以及排队论。
E-mail: yanjie099046@qq.com

Yan Jie (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Chongqing College of Mobile Communication in 2022. She is now a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University, Huludao, China. Her research interests include cognitive radio, heterogeneous network, radio resource allocation in wireless networks, and queuing theory.



蓝浩, 分别于 2020 年与 2023 年在辽宁工程技术大学获得学士学位和硕士学位, 现就职于中国铁塔股份有限公司大连市分公司, 主要研究方向为认知无线电和排队论。
E-mail: lanhao3@chinatowercom.cn

Lan Hao received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Liaoning Technical University in 2020 and 2023, respectively. He is now working for China Tower Corporation Limited, Dalian Branch. His main research interests include cognitive radio and queuing theory.



张波, 2023 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学电子与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为认知无线电、无线电资源分配、频谱感知等。
E-mail: 2511277823@qq.com

Zhang Bo received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2023. He is now a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University, Huludao, China. His main research interests include cognitive radio, radio resource allocation, and spectrum sensing, etc.



王昕, 分别于 2012 年与 2015 年在黑龙江东北石油大学获得学士学位和硕士学位。现为辽宁工程技术大学助教, 主要研究方向为数字信号处理、无线通信。
E-mail: 15904291180@139.com

Wang Xin received her B. Sc. and M. Sc. degrees from Northeast Petroleum University, Heilongjiang, China, in 2012 and 2015, respectively. She is now an Assistant Professor with the School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao. Her research interests include digital signal processing and wireless communication.