

异构认知物联网响应定制需求的动态频谱报价策略

王诗,徐晓惠*,朱笑莹,姜涵,曹大焱

(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:针对多用户多信道异构认知物联网频谱交易背景下的资源分配问题,为满足多业务次用户衡量频谱报价性价比的需求,设计一种适用于不同网络环境、不同运营商频谱分配策略设置的通信性能数学分析方法。通过推导频谱交易成本及吞吐量、丢包率等性能指标的闭式表达式,独立分析用户成本及通信性能问题,提出一种满足定制化用户性能需求的动态报价策略,实现用户频谱交易成本及通信性能的多目标最优化。仿真结果表明,相比于固定报价策略和基于用户需求动态报价策略,所提动态报价策略能有效保障用户的服务质量。

关键词:认知物联网;资源分配;动态频谱共享;动态频谱交易;性能评估

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

引用格式:王诗,徐晓惠,朱笑莹,等.异构认知物联网响应定制需求的动态频谱报价策略[J].山东大学学报(工学版),2025,55(3):100-110.

WANG Shi, XU Xiaohui, ZHU Xiaoying, et al. A dynamic pricing spectrum strategy responded customized requirements in heterogeneous cognitive radio-based Internet of Things[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(3):100-110.

A dynamic pricing spectrum strategy responded customized requirements in heterogeneous cognitive radio-based Internet of Things

WANG Shi, XU Xiaohui*, ZHU Xiaoying, JIANG Han, CAO Dayan

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

Abstract: To address the resource allocation problem in multi-user multi-channel heterogeneous cognitive radio-based Internet of Things (CR-IoT) network under the context of spectrum trading, a mathematical analysis method for communication performance was designed, which was developed to meet the need for evaluating the cost-effectiveness of spectrum pricing for multi-service secondary users (SUs) and was applicable to various network environments and operator-specific spectrum allocation strategies. Closed-form expressions for spectrum transaction costs and performance metrics, such as throughput and packet loss rate, were derived. The cost and communication performance of SUs were analyzed independently. A dynamic pricing strategy with customized performance requirements for users was proposed to achieve multi-objective optimization of spectrum trading costs and communication performance. Simulation results demonstrated that the proposed dynamic pricing strategy effectively ensured SUs' quality of service, outperforming fixed pricing strategies and demand-based dynamic pricing strategies.

Keywords: cognitive radio-Internet of Things; resource allocation; dynamic spectrum sharing; dynamic spectrum trading; performance evaluation

0 引言

为了推动具有海量连接、节点多通信需求、动态网络等特点的未来物联网(Internet of Things,

IoT)快速响应、智慧网络、泛在聚合等智能化发展进程^[1],实现高效、高通信性能频谱管理及分配是一个关键且具有挑战性的问题。认知无线电(cognitive radio, CR)技术提供全面有效的技术手段^[2],有助于解决IoT中动态频谱利用和高效频谱

收稿日期:2024-04-07

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB1403303);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-06,LNTU20TD-20)

第一作者简介:王诗(1983—),男,辽宁阜新人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为认知无线电、最优化理论。

E-mail:wangshi@lntu.edu.cn

*通信作者简介:徐晓惠(1999—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电。E-mail:13285452635@163.com

管理的复杂问题,成为应对大规模异构 IoT 网络中频谱利用问题的重要工具^[3]。认知物联网(cognitive radio-based Internet of Things, CR-IoT)网络通过引入 CR 技术,使每个设备节点具备动态频谱访问能力,是未来最有前途的无线物联网网络之一^[4]。在集中式 CR-IoT 网络中,次用户(secondary user, SU)通常以向虚拟网络运营商(virtual network operator, VNO)租赁频谱的方式获得频段主用户(primary user, PU)非传输状态下该频段的使用权^[5]。然而,频谱共享的高实时性要求导致 SU 难以报价、衡量性价比,因此 CR-IoT 网络中的高效动态频谱交易尤为困难。

在动态频谱交易背景下,为 SU 分配频谱的 VNO 实际产生利润与 SU 对频谱的报价密不可分^[6]。目前,已有大量研究关注如何提升 VNO 的收益,例如:文献[7]研究多个 VNO 相互竞争场景下实现利润最大化的定价问题;文献[8]研究频谱供应不确定性和非同质 SU 下 VNO 的最优投资和定价决策问题。面对已有的频谱分配策略^[9],在平衡服务质量(quality of service, QoS)及成本的前提下,策略适应性地对频谱租赁报价是 SU 亟须解决的一大问题。多数研究通常将 SU 报价与 QoS 考虑为线性关系,难以将各类评价指标客观量化^[10-11],将 QoS 及成本量化考虑为符合现实情况的非线性关系并纳入 SU 报价策略评估体系的研究仍然较少,面临研究瓶颈。文献[12]基于排队论和马尔可夫模型,推导考虑 SU 吞吐量及其报价之间函数关系下的 VNO 收益。然而,SU 的业务多样性及差异化 QoS 需求进一步增加评估性能、成本的不确定性和难度,将 SU 的动态定制化性能需求纳入报价策略性能评估考量是一个正待研究的方向。

为了辅助具有不同业务需求的 SU 进行频谱租赁报价,对异构 CR-IoT 网络中的 SU 进行低延时独立量化性能分析和评估至关重要。排队论适用于分析 CR 中各种资源分配方法的性能,可推导性能评价指标闭式表达式,因此被广泛应用^[13]。基于排队论,CR 系统中数据传输过程可以用有限状态马尔可夫模型表征^[14]。从跨业务层、数据链路层的角度出发,文献[15]将 CR 网络传输的信息描述为离散数据包,推导出平均队列长度、数据包拒绝率、吞吐量和平均数据包延迟等性能指标,客观量化 SU 的 QoS;文献[16]推导独立 CR 用户的吞吐量和延迟计算方法。基于排队论,建立能够量化网络中独立 SU 频谱交易成本、通信性能指标的性能分析方法,能够帮助 SU 制定频谱报价策略,对提升 SU 频

谱交易性价比具有实际价值。

对于 CR-IoT 网络的资源分配过程,许多研究证明动态频谱接入能够满足异构 SU 的 QoS 要求^[17]。考虑网络中 SU 设备移动性及业务时变性,为了应对动态频谱共享下 SU 产生对定制化通信性能报价的需求,文献[18]运用 Bertrand 博弈对主、次基站的交易行为进行建模,研究基于纳什议价方案的频谱共享;文献[19]根据 SU 的检测能力强弱设置优先级,实现更公平合理的频谱共享;文献[20]研究基于拍卖的频谱接入机制。然而,SU 报价在相关研究中通常被简化建模,不能良好地适应多样化、动态化业务需求。未来,提升设备算力使 SU 在频谱交易中能够实现更好的灵活性和决策能力^[21],进一步为制定 SU 适应性动态定制化需求报价策略提供可能。

综上所述,本研究设计一个能够通过独立分析 SU 性能及成本,量化评估具有定制化业务需求的 SU 各种报价策略的性能评估方法。该方法将运营商频谱分配策略、信道条件等环境参数作为可控部分,凭借方法的灵活性及一般性,帮助 SU 制定满足定制化性能需求的报价策略,对各种频谱报价策略进行多量化指标下的评估和验证。本研究提出一种可适应 SU 动态业务传输需求、允许动态定制化报价的频谱共享策略,旨在实现各类环境、不同 VNO 设定的分配规则下 SU 通信性能及成本的多目标最优化,为定制化需求 SU 进行最优性价比下的动态报价。本研究通过定义系统模型并建立关键假设,为优化异构认知物联网中资源分配的应用提供理论支持。

1 系统模型与假设

1.1 网络模型

本研究考虑具有一个 VNO、 M 个 SU、 N 个可用 PU 信道的多用户多信道异构 CR-IoT 网络。SU 终端以 Overlay 范式接入频谱空穴,即 SU 仅能用 PU 未使用的频段,当 PU 占用该频段时,SU 应立即退出。VNO 的功能是感知频谱空洞,将频谱空洞分配给 SU。本研究考虑的网络模型如图 1 所示。SU 系统及 VNO 在 PU 系统覆盖的区域内工作,SU 系统由一个基站与多个移动端组成,PU、SU 分别与 VNO 之间存在可靠的信道,可以交换信道条件、频谱感知结果等信息。本系统主要考虑上行数据传输,所有用户的数据传输均为离散数据包形式。SU 具有有限大小的缓存区,用于存储等待传输的数据包。在本研究的仿真中, $M=2, N=2$ 。

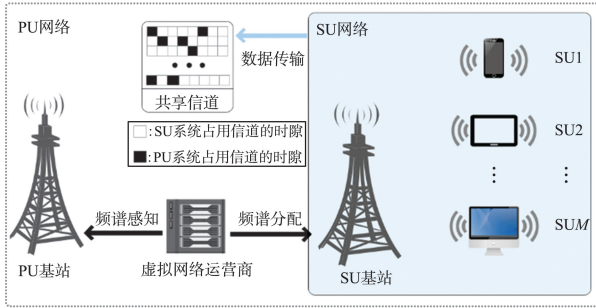


图1 网络模型

Fig.1 Network model

1.2 PU 活动状态模型

将 N 个信道上 PU 活动状态的组合表示为联合 PU 活动状态。 t 时隙的第 i 个联合 PU 活动状态

$$\mathbf{a}^i = [a_1(t) \ a_2(t) \ \cdots \ a_N(t)], \quad (1)$$

式中: $\mathbf{a}^i \in \mathbf{A}$, \mathbf{A} 为所有可能的 PU 活动状态集合, $i \in \{1, 2, \dots, x_n\}$, 其中 x_n 为 PU 活动状态的数量, $x_n = 2^N$; $a_n(t)$ 为 t 时隙第 n 个信道的 PU 活动状态, $a_n(t) \in \{0, 1\}$, 其中 $a_n(t) = 1$ 表示非占用信道状态(信道空闲), $a_n(t) = 0$ 表示占用信道状态(信道忙碌)。

1.3 信道状态模型

信道状态用于描述每个 SU 占用信道时信道的传输条件(如收发端信噪比等)。信道状态随时间变化而改变。 t 时隙第 n 个信道上第 j 个信道状态

$$\mathbf{b}^j = [b_1(t) \ b_2(t) \ \cdots \ b_N(t)], \quad (2)$$

式中: $\mathbf{b}^j \in \mathbf{B}$, \mathbf{B} 为所有可能的信道状态集合, $j \in \{0, 1, \dots, y_n\}$, 其中 y_n 为信道状态的数量,

$y_n = \prod_{n=1}^N N_{\text{SNR}}^n$, N_{SNR}^n 为第 n 个 PU 信道上信道状态总数; $b_n(t)$ 为 t 时隙第 n 个 PU 信道的信道状态,

$b_n(t) \in \{1, 2, \dots, N_{\text{SNR}}^n\}$ 。

1.4 SU 系统模型

1.4.1 数据传输模型

通信环境具有动态性和多样性,为了有效适应不同条件下的信道状态, SU 系统引入自适应调制与编码方案^[22]。SU 数据传输时采用基于当前信道状态的调制方式。假设 VNO 和 SU 系统之间存在完美的信息交互,在每个时隙开始时, SU 基站会向 VNO 发送信道传输条件。

根据文献[22]中的数据传输模型,用 w_n 表示第 n 个信道信噪比状态, $w_n \in \{1, 2, \dots, N_{\text{SNR}}^n\}$ 。当信道被第 m 个 SU 占用,且处于第 j 个信道状态时,分组传输概率分布

$$\beta_j^m = [\beta_j^m(0) \ \beta_j^m(1) \ \cdots \ \beta_j^m(k_{\max})], \quad (3)$$

式中, $\beta_j^m(x)$ 为在当前时隙内 SU 传输 x 个数据包

的概率, $x \in \{0, 1, \dots, k_{\max}\}$, 其中 k_{\max} 为当前时隙内 SU 能够传输的数据包的最大数量, $j \in \{0, 1, \dots, N_{\text{SNR}}^n\}$ 。本研究仿真中,信道状态为 0 时, SU1 的调制方案 $\beta_0^1 = [0.4 \ 0.4 \ 0.2 \ 0 \ 0]$, SU2 的调制方案 $\beta_0^2 = [0.1 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.3]$; 信道状态为 1 时, SU1 的调制方案 $\beta_1^1 = [0.1 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.3]$, SU2 的调制方案 $\beta_1^2 = [0.4 \ 0.4 \ 0.2 \ 0 \ 0]$ 。

1.4.2 缓存区状态模型

缓存区状态模型用于描述每个 SU 在数据传输完成后缓存区的状态。将联合缓存区状态表示为 M 个 SU 缓存区状态。 t 时隙的第 k 个缓存区状态

$$\mathbf{c}^k = [c_1(t) \ c_2(t) \ \cdots \ c_M(t)], \quad (4)$$

式中: $\mathbf{c}^k \in \mathbf{C}$, \mathbf{C} 为所有可能的缓存区状态集合, $k \in \{0, 1, \dots, z_n\}$, 其中 z_n 为缓存区状态的数量,

$z_n = \prod_{m=1}^M L_m$, L_m 为第 m 个 SU 的缓存区大小; $c_m(t)$ 为 t 时隙第 m 个 SU 的缓存区状态, $c_m(t) \in \{0, 1, \dots, L_m\}$ 。

1.4.3 信道分配

根据接收的频谱感知结果, VNO 可以根据频谱分配协议为等待传输数据的 SU 分配可用信道。为了将频谱分配过程作为一个参数纳入性能评估体系,需要数学模型描述所有可能的频谱分配结果。频谱分配规则为每个信道可以分配给一个 SU, 一个 SU 可以使用多个信道。因此,当 N 个空闲信道分配给 M 个 SU 时,存在 $(M+1)^N$ 种频谱分配结果。为了给各种频谱分配协议提供一个通用的数学描述,本研究用一个 $(M+1)^N$ 维的概率分布向量 \mathbf{V} 表示所有可能的频谱分配结果,即

$$\mathbf{V} = (V_1 \ V_2 \ \cdots \ V_{(M+1)^N}), \quad (5)$$

式中 V_μ 为第 μ 种信道分配方案的概率。第 μ 种信道分配方案为 $\mathbf{R}_\mu = (R_1 \ R_1 \ \cdots \ R_N)$, 其中 R_n 为第 n 条信道的分配状态,若 $R_n = 0$,则该信道被 PU 占用,若 $R_n \neq 0$,将第 n 个信道分配给第 R_n 个用户。

由式(5)可知,当确定可用信道数量和 SU 数量时,所有信道分配结果能用概率形式表示。这意味着不同信道分配协议能以转化为概率分布向量的形式适应本研究提出的性能分析框架。

2 基于马尔可夫模型的排队分析方法

基于排队理论和马尔可夫过程,建立异构 SU 的离散时间队列模型,在频谱共享策略下对各 SU 进行独立的性能评估。建立基于马尔可夫的排队

模型包含两个步骤:确定系统状态空间;计算系统状态转移概率矩阵。利用转移概率矩阵进行各种性能评估,如用户平均吞吐量、平均队长等。

2.1 系统状态空间

本研究系统的状态空间包括联合 PU 活动状态、联合信道状态和 SU 缓存区状态。系统状态空间

$$\Phi = (a^i \ b^j \ c^k). \quad (6)$$

2.2 系统状态转移概率矩阵

为了获得系统状态转移概率矩阵,需要分别计算联合 PU 活动状态、联合信道状态和联合缓存区状态的转移概率矩阵。

2.2.1 联合 PU 活动状态的转移概率矩阵

假设 t 时隙第 n 个信道上的 PU 占用情况只与 $t-1$ 时隙的 PU 占用情况有关,引用一阶两状态马尔可夫模型描述 PU 占用情况。第 n 个信道上的 PU 活动状态转移概率矩阵

$$T_{PU}^n = \begin{bmatrix} P_{0 \rightarrow 0}^n & P_{0 \rightarrow 1}^n \\ P_{1 \rightarrow 0}^n & P_{1 \rightarrow 1}^n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $P_{0 \rightarrow 0}^n$ 为从 $(t-1)$ 到 t 时隙,第 n 个信道从忙碌状态(PU 在信道上传输)切换到忙碌状态的概率, $P_{0 \rightarrow 0}^n = P(a_n(t) = 0 | a_n(t-1) = 0)$, $P(\cdot | \cdot)$ 为条件概率; $P_{1 \rightarrow 1}^n$ 为从 $(t-1)$ 到 t 时隙,第 n 个信道从空闲状态(PU 不在信道上传输)切换到空闲状态的概率, $P_{1 \rightarrow 1}^n = P(a_n(t) = 1 | a_n(t-1) = 1)$ 。 $P_{0 \rightarrow 0}^n + P_{0 \rightarrow 1}^n = 1$, $P_{1 \rightarrow 0}^n + P_{1 \rightarrow 1}^n = 1$ 。在本研究仿真中,两个 PU 的活动状态转移矩阵 $T_{PU}^1 = T_{PU}^2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$ 。 N 个信道上联合 PU 活动状态的转移概率矩阵

$$P_{PU} = T_{PU}^1 \otimes T_{PU}^2 \otimes \dots \otimes T_{PU}^N = \begin{bmatrix} p_{PU}(1) \\ p_{PU}(2) \\ \vdots \\ p_{PU}(N) \end{bmatrix}_{x_n \times x_n}, \quad (8)$$

式中, $p_{PU}(n)$ 为第 n 个信道上联合 PU 活动状态的转移概率向量, \otimes 为矩阵的克罗内积。

2.2.2 联合信道状态的转移概率矩阵

对于任意信道 n ,信道状态总数 N_{SNR}^n 与信道状态转移概率矩阵可由物理信道模型确定。任意信道 n 的状态转移概率矩阵

$$T_\nu^n = \begin{bmatrix} T_{0 \rightarrow 0}^n & T_{0 \rightarrow 1}^n & \dots & T_{0 \rightarrow N_{SNR}^n}^n \\ T_{1 \rightarrow 0}^n & T_{1 \rightarrow 1}^n & \dots & T_{1 \rightarrow N_{SNR}^n}^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N_{SNR}^n \rightarrow 0}^n & T_{N_{SNR}^n \rightarrow 1}^n & \dots & T_{N_{SNR}^n \rightarrow N_{SNR}^n}^n \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, $T_{\rho \rightarrow \sigma}^n$ 为第 n 个信道从 $(t-1)$ 到 t 时隙,信道条件状态从 $b_n(t) = \rho$ 切换到 $b_n(t) = \sigma$ 的概率。

整个系统的联合信道状态转移概率矩阵

$$P_\nu = T_\nu^1 \otimes T_\nu^2 \otimes \dots \otimes T_\nu^N = \begin{bmatrix} p_\nu(1) \\ p_\nu(2) \\ \vdots \\ p_\nu(N) \end{bmatrix}_{y_n \times y_n}, \quad (10)$$

式中 $p_\nu(n)$ 为第 n 个信道上联合信道状态的转移概率向量。

2.2.3 联合缓存区状态的转移概率矩阵

信道分配协议对 SU 缓存区数据包数量状态的转移产生影响,在推导 SU 缓存区状态转移概率矩阵时,需要考虑信道分配协议概率分布向量。

定义 $Z_k = (Z_1 \ Z_2 \ \dots \ Z_N)$ 用于描述信道被 SU 占用的情况,其中 $Z_n = 0$ 表示第 n 个信道被 PU 占用, $Z_n = m$ 表示第 n 个信道被第 m 个 SU 占用, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。当 PU 活动状态为 a^i 时,基于概率分布向量获得第 ξ 种所有可能的分配结果概率之和

$$P_\xi^a = \sum_{\xi=1}^{2^{N \cdot M}} \sum_{\mu=1}^{(M+1)^N} \sum_{(R_n=Z_n)_\xi} V_\mu. \quad (11)$$

假设在排队过程中每个时隙 SU 数据包到达为伯努利过程,则第 m 个 SU 数据包的到达过程可以描述为概率分布向量

$$o_m = [p_m(0) \ p_m(1) \ \dots \ p_m(a_{\max})], \quad (12)$$

式中, $p_m(\varphi)$ 为一个时隙内第 m 个 SU 处到达 φ 个数据包的概率, a_{\max} 为第 m 个 SU 处能够到达的最大业务数据包数。在本研究仿真中, SU1 到达概率分布 $o_1 = [0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4]$, SU2 到达概率分布 $o_2 = [0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25]$ 。

当数据包到达后,可以得到第 m 个 SU 缓存区中队列状态概率分布向量

$$A_m = \text{Conv}(b^j, o_m), \quad (13)$$

式中 Conv 为卷积运算。当处于第 j 个信道状态时,根据 β_j^m 可得第 m 个 SU 的分组传输概率向量

$$R^m = \text{Conv}(\beta_0^m, \beta_1^m, \dots, \beta_{N_{SNR}^m}^m). \quad (14)$$

根据式(13)、(14),可得时隙上第 m 个 SU 的队列状态概率分布向量

$$J_m = \text{Conv}(A_m, R^m). \quad (15)$$

根据式(11)、(15),可以计算出第 m 个 SU 的缓存区状态转移概率分布

$$\gamma_m = \sum_{\xi=1}^{2^{N \cdot M}} \sum_{(Z_n \neq 0)_\xi} p_\xi^a J_m. \quad (16)$$

整个系统联合缓存区状态的转移概率矩阵

$$\mathbf{P}_b = \boldsymbol{\gamma}_1 \otimes \boldsymbol{\gamma}_2 \otimes \cdots \otimes \boldsymbol{\gamma}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_b(1) \\ \mathbf{p}_b(2) \\ \vdots \\ \mathbf{p}_b(M) \end{bmatrix}_{z_n \times z_n}, \quad (17)$$

式中 $\mathbf{p}_b(m)$ 为第 m 个 SU 缓存区的状态转移概率向量。

2.2.4 系统状态转移概率矩阵与稳态分布

通过 \mathbf{P}_{pu} 、 \mathbf{P}_v 、 \mathbf{P}_b , 可得系统状态转移概率矩阵

$$\mathbf{M} = \mathbf{P}_{pu} \otimes \mathbf{P}_v \otimes \mathbf{P}_b = \begin{bmatrix} M_{0 \rightarrow 0} & M_{0 \rightarrow 1} & \cdots & M_{0 \rightarrow s} \\ M_{1 \rightarrow 0} & M_{1 \rightarrow 1} & \cdots & M_{1 \rightarrow s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{s \rightarrow 0} & M_{s \rightarrow 1} & \cdots & M_{s \rightarrow s} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中:下标 s 为系统联合状态数量, $s = x_n y_n z_n$, $s \in \mathbf{N}^*$; $M_{q \rightarrow u}$ 为系统从第 q 个联合状态转换到第 u 个联合状态的概率, $q \in \{0, 1, \dots, s\}$, $u \in \{0, 1, \dots, s\}$ 。

进而可得系统状态的稳态分布向量

$$\boldsymbol{\Lambda} = [\Lambda(0) \quad \Lambda(1) \quad \cdots \quad \Lambda(s)], \quad (19)$$

式中, $\Lambda(g)$ 为第 g 个系统联合状态的稳态概率, $\sum_{g=0}^s \Lambda(g) = 1$ 。通过 $\boldsymbol{\Lambda}$ 建立系统评估模型, 得到性能评价指标。

2.3 性能评估模型

为了分析 SU 的 QoS, 进一步评估频谱共享策略的有效性, 本研究根据稳态分布向量得出以下性能指标: 吞吐量、队列长度和数据包拒绝率。

吞吐量为单位时隙内 CR 系统中所有 SU 缓存区能够传输的数据包数量之和的期望。根据式(14)、(15), 可得一个时隙内第 m 个 SU 可以发送的数据包数量的概率分布向量

$$\boldsymbol{\tau}_r^m = \sum_{l=0}^{k_{\max}} \mathbf{R}^m \mathbf{J}_l = [\tau_0^m \quad \tau_1^m \quad \cdots \quad \tau_{k_{\max}}^m], \quad (20)$$

式中, τ_l^m 为发送 l 个数据包的概率。根据稳态分布向量 $\boldsymbol{\Lambda}$, 可以求得系统吞吐量概率分布

$$\boldsymbol{\psi}_m = \boldsymbol{\Lambda} \sum_{\xi=1}^{x_n} p_{\xi}^a \boldsymbol{\tau}_r^m = [\psi_m^0 \quad \psi_m^1 \quad \cdots \quad \psi_m^{k_{\max}}], \quad (21)$$

式中 ψ_m^l 为系统吞吐量为 l 个数据包的概率。第 m 个 SU 的吞吐量

$$E_{\text{thr}}^m = \sum_{l=0}^{k_{\max}} l \psi_m^l. \quad (22)$$

队列长度为一个时隙内 SU 缓存区中数据包数量的期望。根据 $\boldsymbol{\Lambda}$ 可得第 m 个 SU 队列长度概率分布

$$\mathbf{l}_m = [l_m^0 \quad l_m^1 \quad \cdots \quad l_m^{L_m}], \quad (23)$$

式中 l_m^L 为第 m 个 SU 队列长度为 L 时的概率。得到第 m 个 SU 的队列长度

$$E_{\text{bf}}^m = \sum_{L=0}^{L_m} L l_m^L. \quad (24)$$

在一个时隙开始时, 如果数据包到达数目超过缓存区剩余空位, 则多余的数据包将被丢弃。数据包拒绝率为一个时隙内 CR 系统中所有 SU 缓存区拒绝的数据包数量之和的期望。一个时隙内第 m 个 SU 缓存区拒绝数据包数量的概率分布向量

$$\boldsymbol{\eta}_e^l = \sum_{l=0}^{r_{\max}} \max(0, b_m(t) + l - L_m) \mathbf{o}_m, \quad (25)$$

式中 r_{\max} 为单位时隙内 SU 缓存区最大到达数据包数量。根据稳态分布向量, 可得第 m 个 SU 拒绝数据包数量的概率分布向量

$$\boldsymbol{\chi}_m = \boldsymbol{\Lambda} \sum_{\xi=1}^{2N} p_{\xi}^a \boldsymbol{\eta}_e^l = [\chi_m^0 \quad \chi_m^1 \quad \cdots \quad \chi_m^{r_{\max}}], \quad (26)$$

式中 η_e^l 为拒绝数据包数量为 l 时的概率。可得稳态下第 m 个 SU 拒绝数据包数量的期望

$$E_{\text{rej}}^m = \sum_{l=0}^{r_{\max}} l \chi_m^l. \quad (27)$$

2.4 经济成本分析模型

2.4.1 SU 吞吐量-报价非线性多项式函数

假设 SU 能够提供吞吐量-报价非线性多项式函数, 以此为基站承担一定计算成本。基于频谱感知结果, 建立 SU 对于可用信道的报价函数参数列表

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1\vartheta} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2\vartheta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{M1} & e_{M2} & \cdots & e_{M\vartheta} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

式中, $e_{m\epsilon}$ 为第 m 个 SU 对于信道资源吞吐量-报价非线性函数的第 ϵ 项参数, $\epsilon \in \{1, 2, \dots, \vartheta\}$, ϑ 为 SU 能传输的最大数据包数。对于第 m 个 SU, 其吞吐量-报价函数

$$p_m = \begin{cases} e_{m1} & \omega \in [0, 1) \\ e_{m2} & \omega \in [1, 2) \\ \cdots & \cdots \\ e_{m\vartheta} & \omega \in [\vartheta-1, \vartheta) \end{cases}, \quad (29)$$

式中 ω 为离散数据包数。

2.4.2 SU 经济成本模型

在性能评估方法中, 通过计算 SU 的成本可以更好评估策略的有效性。将 SU 通过频谱资源分配

过程支出的经济花费作为成本,则第 m 个 SU 的支出成本

$$C^m = \sum_{l=0}^{k_{\max}} \sum_{\varepsilon=1}^{\vartheta} \psi_m^l e_{m\varepsilon} \circ \quad (30)$$

3 频谱共享策略模型

本研究的频谱共享策略旨在为定制化需求的 SU 提供基于最优性价比的动态报价。SU 通过综合优化用户的 QoS 和经济成本确定最优动态报价方案,基于最优动态报价方案,利用 Kuhn-Munkres (KM) 算法进行频谱资源分配。

3.1 响应定制需求的最优动态报价策略

本研究综合考虑用户传输需求与通信环境因素,将动态调整报价问题规范为一个非线性规划求解问题。该优化问题的目标函数为

$$\min S = \frac{C_{\theta}^m}{E_{\theta}^m}, \quad (31)$$

式中, E_{θ}^m 为用户 m 在第 θ 个报价函数参数列表下通信传输的吞吐期望, C_{θ}^m 为用户 m 在第 θ 个报价函数参数列表下通信传输的经济成本。优化问题的约束条件为 $e_{m\varepsilon} > 0$ 。

响应定制需求的最优动态报价策略求解步骤如下。

首先,根据用户对不同服务的需求程度调整固

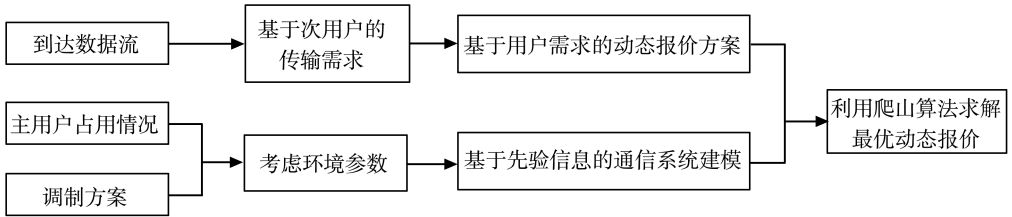


图2 最优动态报价示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optimal dynamic pricing

本研究仿真中用户固定报价函数参数列表 $E_0 =$

$$\begin{bmatrix} 23 & 26 & 29 & 31 \\ 23 & 26 & 29 & 31 \end{bmatrix}, \text{基于用户需求动态报价函数参}$$

$$\text{数列表 } E'_0 = \begin{bmatrix} 23 & 26 & 29 & 31 \\ 10.9 & 21.8 & 32.7 & 43.6 \end{bmatrix} \circ$$

3.2 基于用户报价的频谱分配协议

当系统状态确定后,根据 PU 活动状态 a^i 、缓存区状态 c^k 、数据包到达概率分布 o_m 、信道状态 b^j 及 SU 潜在吞吐向量 τ_r^m ,将潜在吞吐向量利用用户报价映射为潜在吞吐量-价格向量,得到每个 SU 潜在吞吐-价格分布的期望

定报价策略方案,得到一组初步调整后的报价,基于该报价计算步长,生成多组报价组合。假设固定报价列表向量为 E_0 ,第 m 个用户需求权重列表为 W ,对应该用户的数据包到达概率分布为 o_m ,即每个权重等同于相应数据包到达的概率。根据初始报价和用户需求列表,可得基于用户需求的报价方案 E'_0 ,其中 $e'_{m\varepsilon}$ 为 E'_0 的第 ε 项参数, $e'_{m\varepsilon} = w_{\varepsilon} \times \sum_{\varepsilon=1}^{\vartheta} e_{m\varepsilon}$, w_{ε} 为 W 的第 ε 项参数。解空间 Z 根据变步长进行排列组合,生成 $2nk$ 组报价方案,即

$$Z = \bigcup_{\rho=1}^{\vartheta} \{E_{\rho}^+, E_{\rho}^-\}, \quad (32)$$

式中: E_{ρ}^+ 为在第 ρ 个维度上增加变步长 λ_{ρ} 后的报价方案, $E_{\rho}^+ = (e_{m1} \ e_{m2} \ \dots \ e_{m\rho} + \lambda_{\rho} \ \dots \ e_{m\vartheta})$, $\lambda_{\rho} \in \{e_{m\varepsilon} - e'_{m\varepsilon}, \frac{e_{m\varepsilon} - e'_{m\varepsilon}}{2}, \dots, \frac{e_{m\varepsilon} - e'_{m\varepsilon}}{k}\}$,其中 k 受计算机算力限制; E_{ρ}^- 为在第 ρ 个维度上减少变步长 λ_{ρ} 后的报价方案, $E_{\rho}^- = (e_{m1} \ e_{m2} \ \dots \ e_{m\rho} - \lambda_{\rho} \ \dots \ e_{m\vartheta})$ 。

其次,基于先验观测构建通信系统预测模型,考虑包括信道状态、PU 活动状态及其他 SU 情况等信息。这一预测模型的目的是计算实际通信系统可能达到的性能。

最后,利用爬山算法求解在性能与经济成本之间达到最优平衡的报价方案。最优动态报价示意图如图2所示。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{M1} & d_{M2} & \dots & d_{MN} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

式中 d_{mn} 为将第 n 个信道分配给第 m 个 SU 时, SU 潜在吞吐量-价格的期望。利用 KM 算法^[23] 获得最大价格下的信道分配结果。频谱分配协议详细算法如算法1所示。

算法1 基于 KM 算法的频谱分配协议

输入: $E_0, M, N, a^i, c^k, b^j, o_m, \beta_j^m$ 。

输出: R_{μ} 。

$$(1) \mathbf{D} \leftarrow \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{M1} & d_{M2} & \cdots & d_{MN} \end{bmatrix} (d_{mn} = 0);$$

(2) for i_1 in $[1, M]$ do;

(3) for i_2 in $[1, N]$ do;

(4) $\mathbf{A}_{arr} \leftarrow \text{Conv}(\mathbf{b}_{i_1}, \mathbf{o}_{i_1})$;

(5) end for;

(6) for j_1 in $[1, N]$ do;

(7) $p \leftarrow []$;

(8) if $\mathbf{o}_{i_1} = \mathbf{1}$ then;

(9) $\boldsymbol{\gamma}_{tr} \leftarrow \boldsymbol{\beta}_{j_1}^{i_1}$;

(10) $w \leftarrow []$;

(11) for k in $\boldsymbol{\gamma}_{tr}$;

(12) for l in \mathbf{A}_{arr} ;

(13) if $k \leq l$;

(14) $v \leftarrow v + \boldsymbol{\gamma}_k \times \mathbf{A}_l$;

(15) $w.append(v)$;

(16) end if;

(17) end for;

(18) end for;

(19) end for;

(20) for g in w ;

(21) $c \leftarrow w_g \times e_{i_1} g$;

(22) $p.append(c)$;

(23) $d_{mn} = \text{sum}(p)$;

(24) end for;

(25) end for;

(26) 将 \mathbf{D} 输入到 KM 算法中, 得到最大权重

分配结果列表 \mathbf{R}_μ ;

(27) 输出 \mathbf{R}_μ ;

(28) end。

4 数值结果与分析

为了便于计算和理解, 仿真以两个 PU 信道、两个 SU 为例, 分别从 PU 活动强度情况和 SU 缓存区大小两个角度展开, 研究不同资源共享策略下用户各项性能指标, 证明最优动态报价的有效性; 研究不同场景下评估方法的有效性。

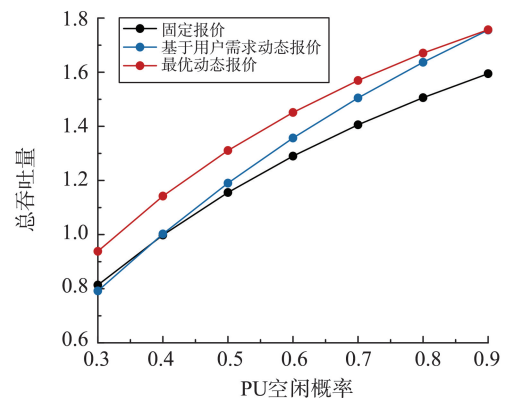
4.1 参数设置和环境设置

在异构 CR-IoT 网络中存在不同类型和需求的用户, 一些终端可能需要高带宽和低时延的通信, 如高清摄像头或传感器网络^[24]; 一些终端用户可能对成本和资源消耗更敏感, 如低功耗传感器节

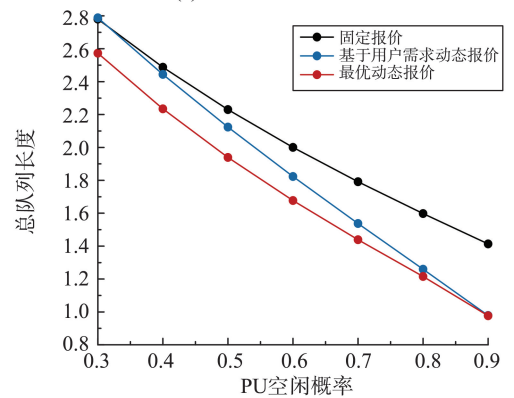
点^[25]。为了研究的全面性, 本研究考虑两种不同类型的用户终端: SU1 代表具有高带宽需求的用户终端, SU2 代表成本敏感的用户终端。为了研究最优动态报价策略的有效性, 搭建两个不同配置的通信环境: 配置 I 中 SU 均使用固定报价策略; 配置 II 中 SU1 采用固定报价策略, SU2 采用最优动态报价策略。通过不同配置环境的仿真对比, 证明动态报价策略对提升 SU 性能的有效性, 为资源分配策略对系统性能的影响提供理论和实证分析。

4.2 数值分析

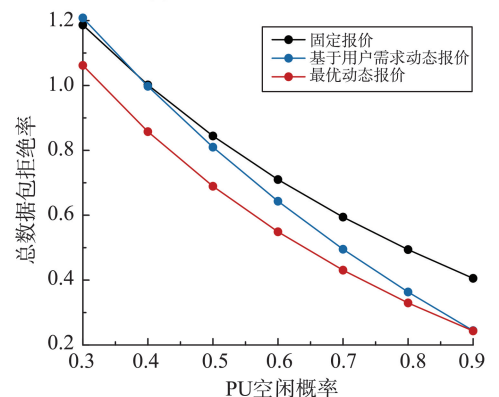
PU 空闲概率改变时, 不同报价下系统各项性能指标如图 3 所示。



(a) PU空闲概率-总吞吐量



(b) PU空闲概率-总队列长度



(c) PU空闲概率-总数据包拒绝率

图3 PU 空闲概率改变时, 不同报价下系统各项性能指标
Fig.3 Various system performance metrics under different pricing when PU idle probability was changed

由图3可以看出:当PU空闲概率变大时,SU可以使用更多频谱资源传输更多数据,在SU缓存区中等待或被拒绝的数据包更少;随着PU空闲概率增大,3种报价策略下的系统总吞吐量不断增高,总队列长度和总数据包拒绝率均不断降低。SU缓存区改变时,不同报价下系统各项性能指标如图4所示。

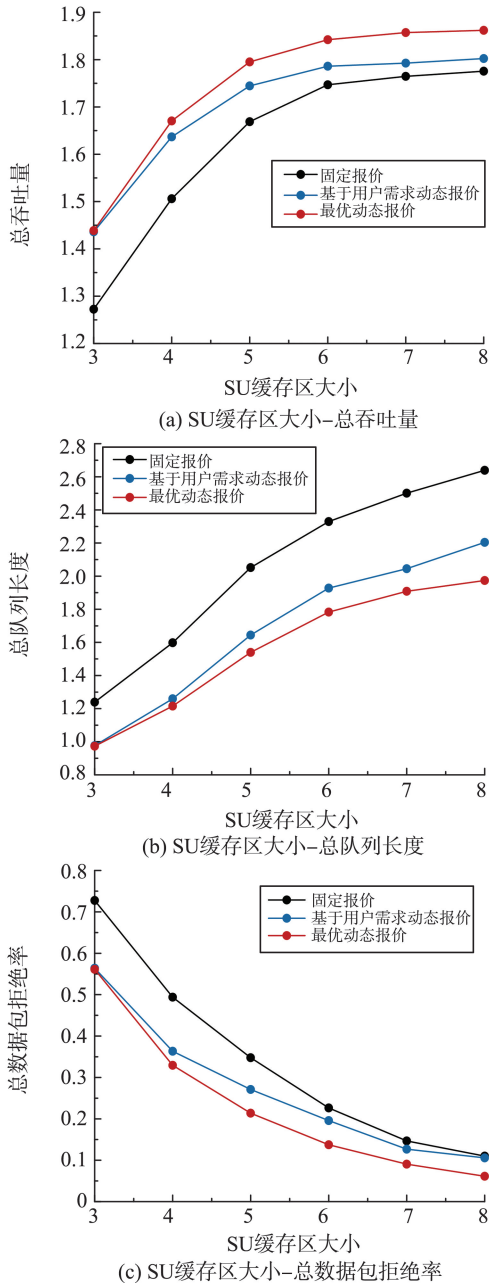


图4 SU缓存区改变时,不同报价下系统各项性能指标
Fig.4 Various system performance metrics under different pricing when the buffer size of SUs was changed

由图4可以看出,随着SU缓存区变大,缓存区中等待传输的数据包数目变多,降低了数据包被拒绝的概率,3种报价策略下的系统总吞吐量和队列长度不断增高,总数据包拒绝率不断降低。在图3、4所示的第一组仿真中,从PU活动强度和SU缓存

区大小两个维度,分别评估用户使用固定报价策略、基于用户需求动态报价策略和最优动态报价策略下的系统性能指标。仿真结果表明,最优动态报价策略在吞吐量、队列长度和数据包拒绝率方面优于其他两种策略。

两种配置下SU的平均吞吐量、平均队列长度、平均数据包拒绝率随PU空闲概率的变化情况如图5所示。

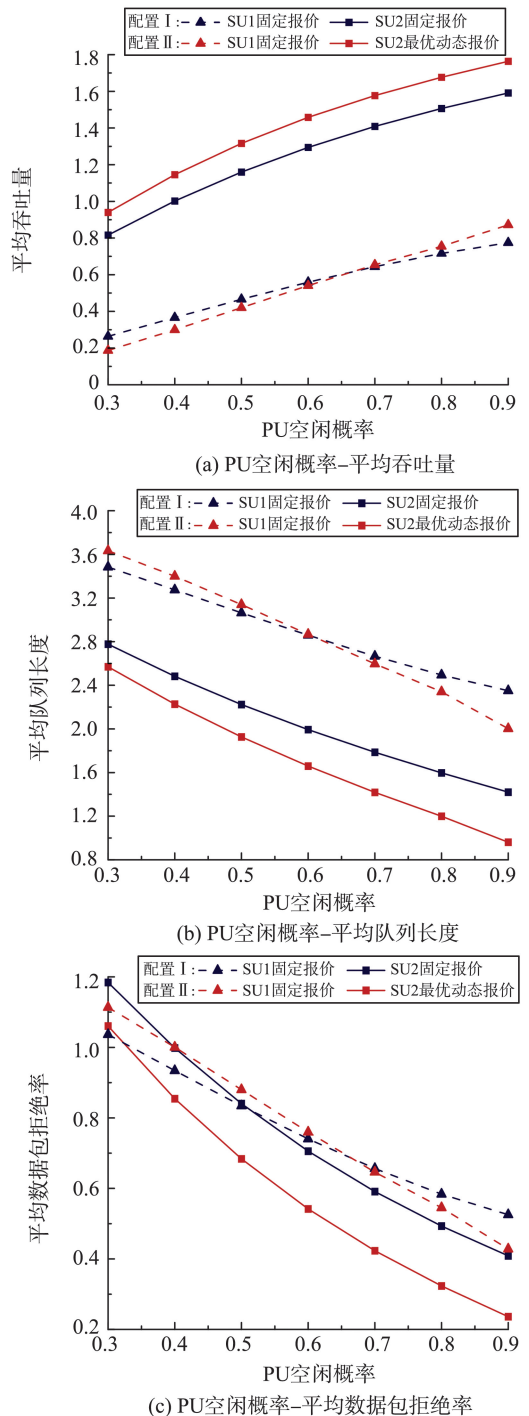


图5 PU空闲概率改变时,不同报价下系统中用户各项性能指标
Fig.5 The performance metrics of each SU under different pricing when the PU idle probability was changed

由图5可以看出,对比配置I,配置II中SU2使用最优动态报价策略的平均吞吐量更高,平均队列长度更短,平均数据包拒绝率更低。两种配置下SU性能随缓存区大小的变化情况如图6所示。

队分析框架的有效性,能全面评估异构SU的性能指标。两种配置在不同PU空闲概率及SU缓存区大小下各SU的经济成本如表1~4所示。由表1~4可知,本研究的评估方法能精确量化系统中每个异构SU在通信过程中的经济成本。

表1 不同PU空闲概率下配置I中SU的经济成本

Table 1 Economic costs of SU in configuration I under different PU idle probability

PU 空闲概率	固定报价/元	
	SU1	SU2
0.3	23.72	23.50
0.4	24.00	23.81
0.5	24.29	24.14
0.6	24.56	24.48
0.7	24.80	24.80
0.8	25.02	25.09
0.9	25.20	25.42

表2 不同PU空闲概率下配置II中SU的经济成本

Table 2 Economic costs of SU in configuration II under different PU idle probability

PU 空闲概率	SU1 固定报价/元	SU2 最优动态报价/元
0.3	25.05	25.54
0.4	25.54	27.00
0.5	25.95	28.22
0.6	26.32	29.25
0.7	26.64	30.11
0.8	26.93	30.83
0.9	27.19	29.71

表3 不同SU缓存区大小下配置I中SU的经济成本

Table 3 Economic costs of SU in configuration I under different SU's buffer size

SU 缓存区大小	固定报价/元	
	SU1	SU2
3	24.92	24.98
4	25.02	25.09
5	25.10	25.17
6	25.15	25.22
7	25.19	25.26
8	25.22	25.29

表4 不同SU缓存区大小下配置II中SU的经济成本

Table 4 Economic costs of SU in configuration II under different SU's buffer size

SU 缓存区大小	SU1 固定报价/元	SU2 最优动态报价/元
3	26.59	29.89
4	26.93	30.83
5	27.30	31.67
6	27.47	31.98
7	27.51	32.08
8	27.53	32.12

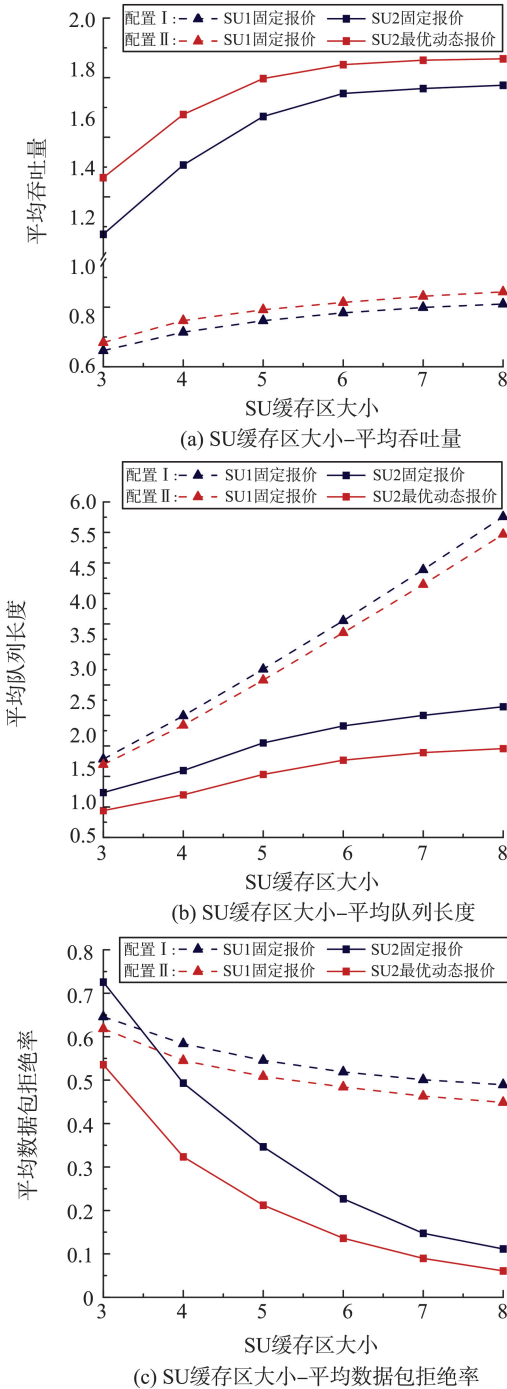


图6 SU缓存区改变时,不同报价下系统中用户各项性能指标

Fig.6 The performance metrics of each SU under different pricing when the buffer size of SUs was changed

在图5、6所示的第二组仿真中,通过比较两种通信环境配置下的用户性能指标,得出最优动态报价策略能够提升SU的QoS。同时,试验验证了在用户采用不同报价策略下基于马尔可夫模型的排

5 结论

在异构 CR-IoT 网络资源分配过程中,本研究提出的策略能够保障 SU 的收益,具有个体理性和诚实性等经济学属性,有效改进频谱利用率,提高用户 QoS。在动态报价过程中,SU 根据传输需求和网络状态调整报价方案,利用预测通信系统模型求解最优动态报价。通过离散马尔可夫建模,预测通信系统在频谱共享中展现出较好的适应性。该建模方法使 SU 报价过程更灵活,通过分析系统状态的随机性和转移规律预测通信系统,使 SU 在报价阶段能够动态调整策略,确保 SU 在变化的网络环境下获得较高的 QoS。与传统固定报价策略相比,最优动态报价策略更好地满足了 SU 多元化需求,为 SU 提供更优越的性能体验。

本研究建立的数学分析方法具有系统和环境设置可配置功能,能够全面评估吞吐量、队列长度、数据包拒绝率等多方面指标,为系统的综合性能评估提供有力支持。本研究方法能够评估每个 SU 在各种系统和环境设置中的性能指标,为异构 CR-IoT 网络设计信道分配协议提供更多参考。但排队分析模型仍存在不足,当 SU 或信道数目增加时,系统转移概率矩阵的推导复杂度呈指数性增加。这一问题将在后续研究中完善。

参考文献:

- [1] 曹宇慧, 黄昱泽, 冯北鹏, 等. 基于深度强化学习的物联网服务协同卸载方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(1): 83-90.
CAO Yuhui, HUANG Yuze, FENG Beipeng, et al. A collaborative service offloading approach for Internet of Things based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(1): 83-90.
- [2] 周明月, 李以峰. 性能选择的下垫式认知无线电功率分配[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(11): 3372-3378.
ZHOU Mingyue, LI Yifeng. Power allocation for a performance-selected underlay cognitive radio[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(11): 3372-3378.
- [3] LATIF S, AKRAAM S, KARAMAT T, et al. An efficient Pareto optimal resource allocation scheme in cognitive radio-based Internet of Things networks [J]. Sensors, 2022, 22(2): 451.
- [4] WANG J, JIANG W B, WANG H J, et al. Multiband spectrum sensing and power allocation for a cognitive radio-enabled smart grid[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8384.
- [5] ZHANG M, ZHU X Y, WANG S, et al. A channel allocation framework under responsive pricing in heterogeneous cognitive radio network[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(4): 872-883.
- [6] 王宏志, 姜方达, 周明月. 基于遗传粒子群优化算法的认知无线电系统功率分配[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1363-1368.
WANG Hongzhi, JIANG Fangda, ZHOU Mingyue. Power allocation of cognitive radio system based on genetic particle swarm optimization[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1363-1368.
- [7] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium, and collusion[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 192-202.
- [8] DUAN L J, HUANG J W, SHOU B Y. Investment and pricing with spectrum uncertainty: a cognitive operator's perspective[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(11): 1590-1604.
- [9] WANG S, 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.
- [10] MEHMETI F, SPYROPOULOS T. Performance analysis, comparison, and optimization of interweave and underlay spectrum access in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7143-7157.
- [11] WANG S, MAHARAJ S, ALFA A S. A virtual control layer resource allocation framework for heterogeneous cognitive radio network [J]. IEEE Access, 2019, 7: 111605-111616.
- [12] ZHANG M, ZHU X Y, WANG S, et al. A channel allocation framework under responsive pricing in heterogeneous cognitive radio network[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(4): 872-883.
- [13] 周惟风, 朱琦. 基于拍卖理论和补偿激励的频谱共享新算法[J]. 通信学报, 2011, 32(10): 86-91.
ZHOU Weifeng, ZHU Qi. Novel auction-based spectrum

- sharing scheme with the compensation and motivation mechanism[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(10): 86-91.
- [14] 张士兵, 张国栋, 包志华. 认知无线网络中基于代理的动态频谱交易算法[J]. *通信学报*, 2013, 34(3): 119-125.
ZHANG Shibing, ZHANG Guodong, BAO Zhihua. Agent-based dynamic spectrum trading algorithm in cognitive radio network [J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(3): 119-125.
- [15] HEO J, SHIN J, NAM J, et al. Mathematical analysis of secondary user traffic in cognitive radio system [C]// *Proceedings of the 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*. Calgary, Canada: IEEE, 2008: 1-5.
- [16] SADEGHI P, KENNEDY R A, RAPAJIC P B, et al. Finite-state Markov modeling of fading channels: a survey of principles and applications [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(5): 57-80.
- [17] SONG M, XIN C S, ZHAO Y X, et al. Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(1): 23-29.
- [18] 张翹, 曾碧卿, 杨劲松, 等. OFDMA 认知无线网络中面向需求的频谱共享[J]. *通信学报*, 2015, 36(8): 192-206.
ZHANG Chi, ZENG Biqing, YANG Jinsong, et al. Requirements-oriented spectrum sharing for OFDMA cognitive radio networks[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(8): 192-206.
- [19] 李鑫滨, 韩松, 刘志新, 等. 基于次用户检测能力的认知无线电频谱共享博弈[J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(4): 378-383.
LI Xinbin, HAN Song, LIU Zhixin, et al. Spectrum sharing for cognitive radio by game theory base on the detection capabilities of secondary users[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(4): 378-383.
- [20] 徐友云, 高林. 基于步进拍卖的认知无线网络动态频谱分配[J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(10): 1064-1069.
XU Youyun, GAO Lin. Dynamic spectrum allocation in cognitive radio networks based on multi-auctioneer progressive auction[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(10): 1064-1069.
- [21] SONG M, XIN C S, ZHAO Y X, et al. Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(1): 23-29.
- [22] GOLDSMITH A, CHUA S G. Adaptive coded modulation for fading channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1998, 46(5): 595-602.
- [23] ZHU H B, ZHOU M C, ALKINS R. Group role assignment via a Kuhn-Munkres algorithm-based solution [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2012, 42(3): 739-750.
- [24] 郭斌, 刘思聪, 刘琰, 等. 智能物联网: 概念、体系架构与关键技术 [J]. *计算机学报*, 2023, 46(11): 2259-2278.
GUO Bin, LIU Sicong, LIU Yan, et al. AIoT: the concept, architecture and key techniques [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2023, 46(11): 2259-2278.
- [25] 张晓茜, 徐勇军. 面向零功耗物联网的反向散射通信综述[J]. *通信学报*, 2022, 43(11): 199-212.
ZHANG Xiaoxi, XU Yongjun. Survey on backscatter communication for zero-power IoT[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(11): 199-212.

(编辑:孙亚彤)