

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306299

认知物联网基于边缘计算的频谱感知-分配方法^{*}

王 诗¹ 朱笑莹^{1,2} 孙 浩¹ 张 敏¹ 边廷玥¹

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105; 2. 辽宁工程技术大学研究生院 葫芦岛 125105)

摘 要:针对多终端多信道复杂认知无线电-物联网 (cognitive-radio Internet of Things, CR-IoT) 当中的频谱感知-分配问题,提出了一种基于边缘计算思想的协作频谱感知-分配方法。为了评估边缘计算思想的引入为 CR-IoT 系统带来的性能提升,设计了一种能够量化对授权用户的干扰以及认知用户的服务质量的性能评估系统 (performance evaluation system, PES)。在该系统中,基于排队论以离散时间马尔可夫模型对系统状态进行建模,能够对可配置参数的异构终端进行独立分析,进而对不同的频谱感知-分配方法进行性能评估。使用 PES 所进行的仿真结果表明,相比于中心感知-分配方法,所提出的边缘计算方案能够实现更低的对授权用户的干扰以及对于认知用户更好的服务质量。这一结果同样证明了,所提出的 PES 具有帮助网络监管者设计频谱感知-分配方案的能力。

关键词: 认知无线电; 物联网; 边缘计算; 频谱感知; 频谱分配; 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:**

Spectrum sensing-spectrum allocation strategy based on edge computing for cognitive-radio internet of things network

Wang Shi¹ Zhu Xiaoying^{1,2} Sun Hao¹ Zhang Min¹ Bian Tingyue¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. Graduate School, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In multi-user multi-channel cognitive radio networks for the internet of things (CR-IoT), a spectrum co-sensing-allocation strategy based on edge computing is proposed. To evaluate the performance of the proposed strategy, a performance evaluation system (PES) capable of quantifying the quality of service (QoS) of cognitive users and the interference to primary users is developed. In the PES, a Markov model is established to describe the CR-IoT system state based on queuing theory. The performance metrics of heterogeneous cognitive users with configurable parameters can be analyzed independently. Thus, various spectrum sensing-allocation strategy can be evaluated using the proposed PES. Numerical results show that the proposed edge computing strategy outperforms central computing strategy in QoS of cognitive users and the quantified interference to primary user. It proves that the PES can help regulators design various spectrum sensing-allocation strategy.

Keywords: cognitive radio; internet of things; edge computing; spectrum sensing; spectrum allocation; performance evaluation

0 引 言

随着 5G 技术的出现,能够实现万物互联的物联网 (Internet of Things, IoT) 似乎有希望得到更好的发展^[1]。对于多异构终端、海量连接需求的 IoT 网络,为了满足未来多种设备的连接需求,需要设计新的无线电技术和网

络架构^[2-3]。认知无线电 (cognitive radio, CR)^[4] 是一种极具前途的技术,能够以动态接入频谱的方式实现频谱共享,可以帮助克服 IoT 网络中由于部署多个通过无线电链路连接到基础设施的终端对象而产生的冲突和频谱短缺问题,已有许多在此领域学者分析了将 CR 技术应用于物联网当中的可行性及其良好前景^[5]。

在集中式 CR-IoT 中,一般由中心节点作为网络监管者进行频谱感知、频谱分配等工作。在实际无线通信环境中,终端移动、信道衰落、阴影等都会对节点感知结果造成影响,即存在一定感知误差,这导致完成频谱分配后被分配到信道的次用户可能会对主用户产生一定干扰^[6]。在不同的频谱接入方式下,如 Underlay 范式^[7]中,若感知识别为无 PU 占用,SU 的功率有可能超出限制;在 Overlay 范式^[8]中更是如此,授权用户(primary user, PU)占用时次用户(secondary user, SU)是不被允许使用信道的,然而感知误差使得可能有 SU 破坏规则。

在上述背景下,如何提升感知精度以降低对 PU 干扰是被许多在此领域的学者广泛研究的问题。文献[9]中提出了一种考虑无线传感器网络中的传感器节点协作感知的基于时空相关性的算法,以达到更加精确的感知结果;多用户协作感知方案也被有关学者证明优于非协作式感知^[10-11]。为了提升感知检测概率,也有许多学者基于边缘计算的思想将不同方法应用于 CR-IoT 中的协作感知与分配:如机器学习^[12-13],动态压缩宽带^[14],检测博弈^[15],考虑误差检测的全 SUs 传感测量^[16],基于证据预处理理论^[17]等。对于结构复杂、数据包小且数据量大的 CR-IoT 网络,边缘节点协作感知的方式不仅能够一定程度上提升感知精度,还能够为中心节点分担算力,进而提升网络性能。然而,上述研究大多仅关注于如何降低 PU 干扰,而难以将 SU 的服务质量纳入考虑。

现实情况下,对 PU 干扰的下降意味着 SU 系统将拥有更少的信道资源。为了分析不同频谱感知-分配方式下的 SU 性能,有研究使用排队论对 SU 系统进行分析^[18],数据传输过程能够用马尔可夫模型描述^[19],以吞吐量、丢包率作为评价指标能够对不同信道分配协议进

行性能评估^[20]。文献[21]中,所建立的性能分析框架能够对不同频谱分配协议下的复杂 CR 多用户系统进行分析。在这些研究中,对 SU 性能进行了量化,但同时 PU 的干扰进行量化从而权衡对 PU 的干扰和 SU 性能存在研究空白。

本文根据上述内容,建立了一种基于排队论的频谱感知-分配方法分析框架,以离散马尔可夫模型对系统进行了建模,能够对 SU 性能和对 PU 的干扰进行量化以及权衡。基于这一分析框架,设计了一种基于边缘计算思想的协作频谱感知-分配方法,并进行了性能仿真。

本文主要工作及贡献如下:首先,提出了一种多用户多信道 CR-IoT 系统中的频谱感知-分配方法性能分析框架,以帮助网络监管者设计频谱感知-分配方法并评估其性能。接着,基于边缘计算的思想,设计了一种边缘节点感知的协作频谱感知-分配方法。最后,使用性能评估框架对边缘节点感知的协作频谱感知-分配方法以及中心节点感知的频谱感知-分配方法进行了对比评估。

1 系统模型及假设

1.1 网络基础模型

本文考虑具有一个中心节点、 M 个边缘节点(SU 用户)以及 N 个可用 PU 信道的多用户多信道异构集中式 CR-IoT 网络,SU 终端以 Overlay 范式接入频谱空穴,即认知用户仅能使用主用户未使用的频段,当主用户占用该频段时,认知用户应立即退出。在网络当中,以时隙作为时间单位,系统在单位时隙内的行为被分为频谱感知、频谱分配以及数据传输 3 个连续部分。CR-IoT 网络结构如图 1 所示,SU 网络以及中心节点在 PU 网络覆盖的区域工作。

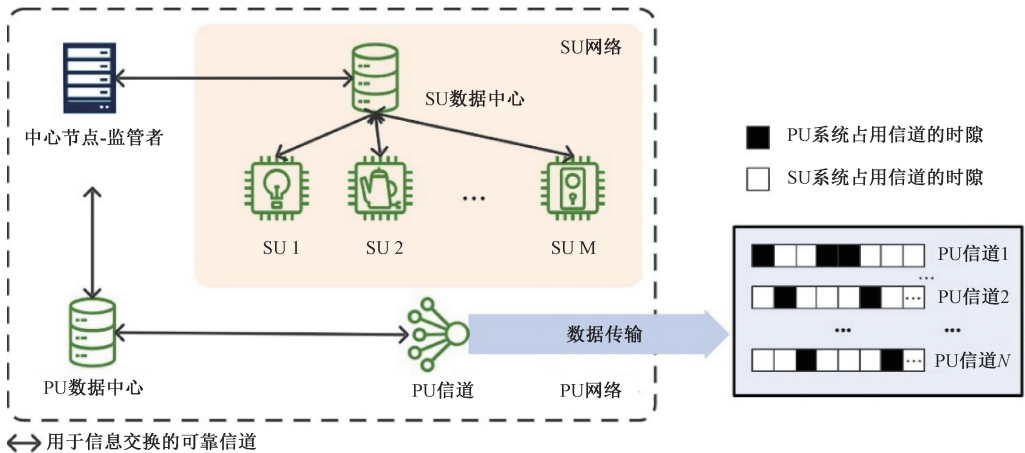


图 1 CR-IoT 网络结构

Fig. 1 The network model of CR-IoT

其中,PU 和 SU 网络均由一个数据中心与多个移动终端组成,PU 数据中心、SU 数据中心分别与中心节点之间

存在可靠信道用于交换频谱感知结果、频谱分配结果等信息。并且,本系统主要考虑上行数据传输,所有数据传

输均为离散数据包形式, SU 具有有限大小的缓冲区用于存储等待传输的数据包。

1.2 PU 活动模型

在本研究中, 将 PU 信道的现实活动情况抽象为一个具有两状态(占用与非占用)的马尔可夫链, 即此时隙 PU 对信道的占用状态只受前一个时隙占用状态的影响。

对于系统中的第 i 个 PU 信道, 能够建立活动状态 $u_i \in \{0, 1\}$, $u_i = 1$ 表示第 i 个 PU 为非占用信道状态(信道空闲); 而 $u_i = 0$ 则反之, 表示第 i 个 PU 为占用信道状态(信道忙碌)。

因此, 可建立 PU 活动状态转移概率矩阵 $\mathbf{P}_U^i$:

$$\mathbf{P}_U^i = \begin{bmatrix} p_{0 \rightarrow 0}^u & p_{0 \rightarrow 1}^u \\ p_{1 \rightarrow 0}^u & p_{1 \rightarrow 1}^u \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $p_{0 \rightarrow 1}^u$ 表示从 t 时隙到 $t+1$ 时隙, PU 对于信道的占用状态由占用状态转换为非占用状态的概率。可知 $p_{0 \rightarrow 0}^u + p_{0 \rightarrow 1}^u = p_{1 \rightarrow 0}^u + p_{1 \rightarrow 1}^u = 1$ 。

1.3 节点感知模型

假设 CR-IoT 网络中所有节点均具有接收感知信号的能力, 在接收端采用能量检测方法对所接收到的信号进行判决, 以获得感知结果。能量检测方法的具体流程为: 首先, 节点接收到感知信号后进行采样; 接着, 计算采样点幅度的平方以获得能量; 然后, 对采样点能量进行统计平均; 最后, 设置感知门限对所获得的能量统计平均值进行判决, 若能量统计平均值小于等于感知门限则认为此时 PU 信道空闲, 反之则认为此时 PU 信道忙碌。

以 $y_j(t)$ 代表节点 j 在某一时刻所接收到的感知信号, 可建立频谱感知二元假设模型, 令 E_0 表示 PU 未占用信道, 而 E_1 表示 PU 占用信道, 有:

$$y_j(t) = \begin{cases} p(n), E_0 \\ hx(n) + p(n), E_1 \end{cases}, n = 1, 2, \dots, \phi \quad (2)$$

其中, $x(n)$ 为发送端信号; $p(n)$ 为加性高斯白噪声; 信道增益为 h 。 ϕ 为信号采样点数量, 对于带宽为 W 、感知时间为 t 的感知信号, 根据奈奎斯特定理, 有:

$$\phi = 2tW \quad (3)$$

因此, 可得能量统计平均值为:

$$\bar{\xi}_j = \frac{\sum_{n=1}^{\phi} y_j(t)}{\phi} \quad (4)$$

根据中心极限定理可知, 对于较大的 ϕ , $\bar{\xi}_j$ 近似服从高斯分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。因此, 以 λ 表征感知门限时, 对于所感知信道的检测概率 P_d 、误检概率 P_f 和漏检概率 P_m 可表示为:

$$P_d = P(\bar{\xi}_j > \lambda \mid E_1) = Q\left(\frac{\lambda}{\sqrt{tW}} \cdot \left(\frac{\lambda}{(1+\gamma)\sigma^2} - 1\right)\right) \quad (5)$$

$$P_f = P(\bar{\xi}_j > \lambda \mid E_0) = Q\left(\sqrt{tW} \cdot \left(\frac{\lambda}{\sigma^2} - 1\right)\right) \quad (6)$$

$$P_m = 1 - P_d \quad (7)$$

其中, γ 为感知信噪比, 有 $Q(\cdot)$ 函数:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (8)$$

在对所接收到的感知信号进行门限判决后, 能够获得感知结果。将节点 j 感知 PU 信道 i 的结果建立为 $s_e^{i,j} \in \{0', 1'\}$, 其中, $s_e^{i,j} = 0'$ 表示此时该节点所感知到的信道条件状态为被 PU 占用, $s_e^{i,j} = 1'$ 则反之。

1.4 数据传输模型

SU 系统在与 PU 系统同步的时隙内传输数据。为了指导频谱分配, 也需要确定传输条件信息。因此, 本文建立了信道条件状态用于描述每个 SU 移动站占用信道时的传输条件(如收发器处信噪比等)。

对于第 i 个 PU 信道, SU 接收机处的信噪比被划分为 N_{SNR}^i 个状态, 可建立信道条件状态为 $s_i \in \{0, \dots, N_{\text{SNR}}^i\}$ 。为了更好地利用信道资源, SU 系统应用了自适应调制和编码(AMC)方案。SU 的调制方案由信道条件确定, 并且信道条件状态被建立为有限状态马尔可夫模型。第 i 个 PU 信道的条件状态转移概率矩阵由物理模型^[18]确定, 可表示为:

$$\mathbf{P}_s^i = \begin{bmatrix} p_{(0,0)}^s & \cdots & p_{(0,N_{\text{SNR}}^i)}^s \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{(N_{\text{SNR}}^i,0)}^s & \cdots & p_{(N_{\text{SNR}}^i,N_{\text{SNR}}^i)}^s \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $p_{(n,m)}^s$ 表示信道条件状态由状态 n 转移为状态 m 的概率。

根据 SU 系统在频谱感知中所收集的 PU 活动信息, 以及每个 SU 终端的传输条件, 中心节点将可用信道分配给 SU, 用于在当前时隙进行数据传输。本文假设一个 PU 信道只能分配给一个 SU, 并且一个 SU 仅能够被分配一个 PU 信道。

当完成信道分配以后, SU 能够使用被分配到的 PU 信道进行数据传输。此时, 对于第 i 个 SU, 当所占信道条件状态为 j 时, 根据调制方案, 用户的离散数据包传输概率分布可表示为:

$$\bar{\tau}_{i,j} = [\tau_{i,j}(0), \dots, \tau_{i,j}(t_r)] \quad (10)$$

其中, $\tau_{i,j}(m)$ 当前时隙内传输 m 个数据包的概率, t_r 为此时最大可传输数据包数量。

2 基于边缘计算的协作频谱感知-分配方法

边缘计算考虑在网络边缘设备端附近产生计算, 这一思想可应用于 CR-IoT 网络中的协作频谱感知。本节

中介绍了将边缘计算应用于 CR-IoT 网络的理论基础,以及所设计的边缘计算感知-分配方法。

2.1 边缘计算应用于 CR-IoT 的理论基础

边缘计算是为应用开发者和服务提供商在网络的边缘侧提供云服务和 IT 环境服务;目标是在靠近数据输入或用户的地方提供计算、存储和网络带宽。在与数据产生源靠近的一侧,边缘计算节点能够产生更快的服务响应和决策,提供最近端服务,以此满足网络在实时业务等方面的需求。在物联网中,边缘特指网络中的数据处理中心或设备端。

在集中式 CR-IoT 系统中,若由中心节点进行频谱感知、分配工作,需要将所接收到的每个 PU 信道的感知信号进行计算以及决策。对于多终端移动网络而言,将产生海量数据,在低延迟需求下,对中心节点的算力和带宽要求十分苛刻。面对这种场景,边缘计算应用于频谱感知主要体现出的优势在于,边缘计算节点能够通过算法

及时对感知信号进行处理并获得感知结果,进而迅速将可用信道分配给认知用户,实现就近迅速响应和决策,使得海量连接和海量数据处理成为可能。

2.2 基于边缘计算的频谱感知-分配方法

在本文所考虑的集中式 CR-IoT 网络中,基于边缘计算的思想所设计的边缘感知-分配方法与中心感知-分配方法节点功能对比示意如图 2 所示。其中,边缘感知-分配方法是由 M 个 SU 终端节点进行联合感知,由 SU 数据中心作为边缘计算节点,对每个节点接收端所接收到的感知信号进行集中处理,进而计算联合感知结果并进行频谱分配决策;而中心感知-分配方法是由中心节点进行频谱感知、频谱分配工作。

就单一 PU 信道而言,单位时隙内 w 个节点能够接收到的感知信号集合为 $Y(t) = \{y_1(t), \dots, y_w(t)\}$,根据节点感知模型,能够获得节点 i 所接收感知信号的能量统计平均值 ξ_i ,有联合感知能量统计平均值 $\bar{\xi}$ 为:

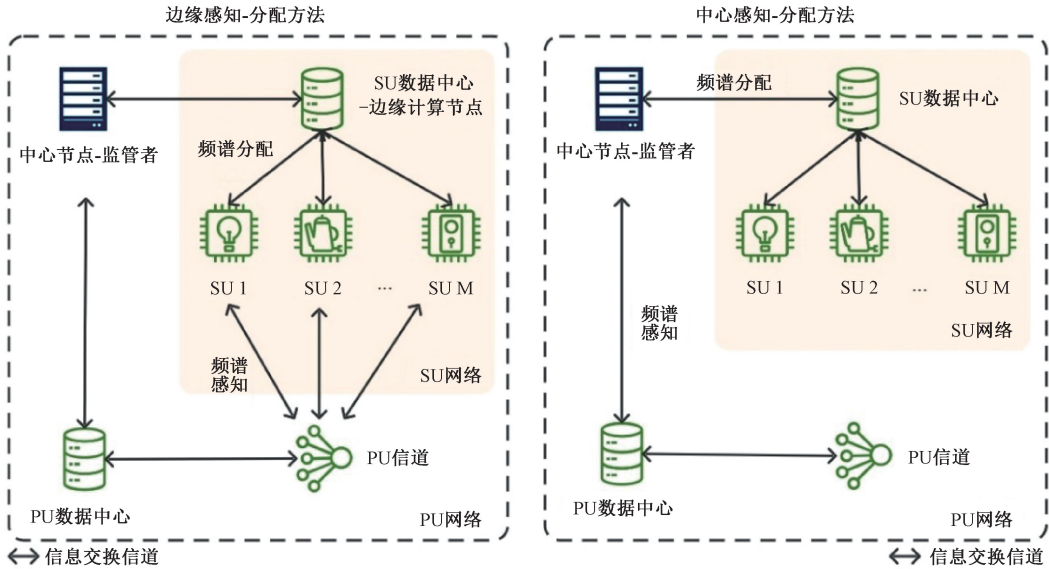


图 2 两种频谱感知-分配方法示意图

Fig. 2 Two spectrum sensing-allocation strategies

$$\bar{\xi} = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w \bar{\xi}_i = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w \frac{\sum_{n=1}^{\phi} \|y_i^n(t)\|}{\phi} \quad (11)$$

对于设置感知门限为 λ 的共 w 个边缘节点的联合感知,能够获得联合感知结果 $\vec{s}_e^i = \{s_e^{i,1}, \dots, s_e^{i,w}\}$;对于中心节点感知方式,恒为 $w = 1$ 。将 PU 活动情况的感知结果抽象为概率分布模型,中心节点对联合感知结果进行处理,对于第 i 个 PU 信道,能够建立感知测量矩阵 S_e^i :

$$S_e^i = \begin{bmatrix} p_{0 \rightarrow 0'}^s & p_{0 \rightarrow 1'}^s \\ p_{1 \rightarrow 0'}^s & p_{1 \rightarrow 1'}^s \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $p_{0 \rightarrow 1'}^s$ 表示在 t 时隙时,PU 的实际活动状态为

占用信道、感知结果为非占用信道的概率。可知:

$$p_{0 \rightarrow 0'}^s + p_{0 \rightarrow 1'}^s = p_{1 \rightarrow 0'}^s + p_{1 \rightarrow 1'}^s = 1 \quad (13)$$

根据 PU 活动模型以及感知测量矩阵,能够获得对 PU 信道 i 感知行为以后的 PU 活动状态转移概率矩阵 P_m^i :

$$P_m^i = P_U^i \cdot S_e^{iT} \quad (14)$$

对于边缘感知方式,感知测量矩阵 $P_m^i(w)$,其中 $w > 1$ 且 $w \in N^*$ 。而对于中心感知方式,感知测量矩阵为 $P_m^i(1)$ 。

为了探究不同频谱感知方式对于系统性能的影响,在边缘、中心两种感知-分配方法中设置了相同的频谱分

配协议。基于文献[22]中所提出的最大吞吐协议(SU的吞吐量由信道传输能力和缓冲区容量之间的最小值表示),本文应用KM算法^[23]实现了一种改进式的最大吞吐协议,具体改进之处在于:为了提升分配信道的公平性,通过获得每个信道的每个SU的潜在吞吐量矩阵,利用KM算法获得最大吞吐量分配结果,这使得信道数不少于用户数时,每个用户能够被分配到至少一个信道。

频谱分配协议详细算法如算法1所示。

算法1 改进式最大吞吐分配协议

输入: SU数量: M ; PU信道: N ; PU活动状态: $\vec{u} = (u_1, \dots, u_N)$;

SU缓冲区状态: $\vec{b} = (b_1, \dots, b_M)$; 总体到达概率分布: $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_M]$; 调制方案: $\vec{\tau}_{i,1}, \dots, \vec{\tau}_{i,N_{\text{SNR}}}$

输出: 概率分布向量: $\vec{V}$

Begin

1: Set $\vec{V} \leftarrow [V_1, \dots, V_{(M+1)^N}]$

($V_i = 1; i = 1, \dots, (M+1)^N$)

2: Set $\mathbf{W} \leftarrow [\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_{(M+1)^N}]$ ($\mathbf{W}_i$ 是 V_i 所对应的信道分配矩阵, $i_{m,n}$ 是 $\mathbf{W}_i$ 第 m 行第 n 列, $i_{m,n} = 1$ 为第 m 个SU占用PU信道 n)

3: Set $p \leftarrow 0$

4: Set $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{M1} & \dots & d_{MN} \end{bmatrix}$

($d_{ij} = 0; i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N$)

5: for i_1 to M do

6: for i_2 to N do

7: $n_a \leftarrow \text{Conv}(b_{i_1}, \vec{\alpha}_{i_1})$ 的期望

8: end for

9: for j_1 to N do

10: if $m_{i_2} = 1$ then

11: $n_t \leftarrow \vec{\tau}_{i_1 j_4}$ 的期望

12: $d_{i_1 j_1} \leftarrow \min(n_a, n_t)$

13: end if

14: end for

15: end for

16: $\mathbf{R} = [r_1, \dots, r_x]$ (r_i : 分配矩阵) $\leftarrow \text{KM}(\mathbf{D})$ ^[23]

17: for $i = 0$ to $(M+1)^N$ do

18: for j to x do

19: if $r_j = \mathbf{W}_i$ then

20: $p \leftarrow p + 1$

21: else

22: $V_i \leftarrow 0$

23: end if

24: end for

25: end for

26: Let $\vec{V} \leftarrow \vec{V} \cdot 1/p$

End

3 频谱感知-分配方法性能评估系统

为了对不同的频谱感知-分配方法进行分析,需要建立一定性能评价指标。在本节所建立的频谱感知-分配方法性能评估系统(performance evaluation system, PES)中,以漏检概率量化对PU的干扰情况;基于排队论建立马尔可夫模型,以获得SU吞吐量、队长以及数据包拒绝率等性能评价指标,用于表征SU的QoS。

3.1 对PU干扰的概率

对PU干扰可定义为PU占用信道但感知结果为信道空闲的概率,即为PU漏检概率。节点 j 感知PU信道 i 时,PU漏检概率可表示为:

$$P_m^{i,j} = P(s_e^{i,j} = 1' \mid u_i = 0) \quad (15)$$

同样可得误检概率,即PU未占用信道但感知结果为信道忙碌的概率 $P_f^{i,j}$:

$$P_f^{i,j} = P\{s_e^{i,j} = 0' \mid u_i = 1\} \quad (16)$$

为了推导总体漏检概率,需要考虑PU现实活动模型。根据PU信道 i 的活动状态转移概率矩阵 $\mathbf{P}_U^i$,可得稳态概率分布为 $\vec{\Lambda}_i = \{p_{PU}^i(0), p_{PU}^i(1)\}$,其中 $p_{PU}^i(0)$ 表示该信道被PU占用的稳态概率, $p_{PU}^i(1)$ 则反之。

在本文所建立的感知模型下,能够将PU受到的干扰进行量化,即获得漏检概率。对于 w 个节点,信道 i 的联合检测漏检概率可表示为 Q_m^i :

$$Q_m^i = \prod_{n=1}^w [P_m^{i,n}(1 - P_f^{i,n}) + (1 - P_m^{i,n})P_f^{i,n}] \quad (17)$$

3.2 频谱分配性能评估

对于频谱分配的性能评估,在PES中将频谱分配协议作为系统可配置参数,使用概率分配向量^[24]对频谱分配协议进行量化描述。以马尔可夫模型描述CR-IoT系统总体状态及其转移情况,对SU缓冲区进行排队分析,以获得吞吐量、队长以及数据包拒绝率作为SU性能评价指标。

1) 概率分配向量

为了对不同的频谱分配协议进行通用形式的数学描述,本文开发了一种对信道分配协议进行量化表述的 $(M+1)^N$ 维度概率分布向量:

$$\vec{V} = (V_1, \dots, V_{(M+1)^N}) \quad (18)$$

其中, V_i 表示第 i 个分配方案的概率,为将概率分布向量中的元素的下标与分配方案对应,以 N 进制对向量中元素下标进行表示。

具体方式如下:将信道分配方案 i 表示为 $\vec{R}_i = [R_i^1, \dots, R_i^N]$,即第 R_i^x 个信道分配给第 x 个用户,若 $R_i^x = 0$ 则为该信道被主用户占用。可计算概率分布向量中 $\vec{V}_i$ 的

下标 i :

$$i = \sum_{j=1}^N R_i^j \cdot M^{j-1} \quad (19)$$

在上述的形式下,在确定可用信道数量和 SU 数量的情况下,所有的信道分配结果能够用概率的形式进行表示,这意味着不同的信道分配协议能够以转化为概率分布向量的形式适应本文所提出的性能分析框架。

2) 马尔可夫模型的建立

为了推导 SU 的性能评价指标,对于 CR-IoT 系统,建立了离散时间马尔科夫模型。以状态转移描述系统运行规律,并且推导了系统状态转移概率矩阵。在此基础上,能够获得用于推导性能评价指标的系统状态稳态分布。通过对 SU 缓冲区的排队分析,以马尔科夫链描述系统运行情况能够获得排队分析中吞吐量、队长及数据包拒绝率等闭式表达式,相比于数值解法,能够使得所获得的性能评价指标更加精确。

(1) 系统状态

以联合状态的形式描述 SU 系统,系统状态包含了主用户活动状态、信道条件状态以及 SU 缓冲区状态。

对于系统中的所有 PU 信道,建立活动状态:

$$\vec{u} \in \mathbf{U} = \{(u_1, \dots, u_N) \mid u_i \in \{0, 1\}\}, \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (20)$$

以及信道条件状态:

$$\vec{s} \in \mathbf{S} = \{(s_1, \dots, s_N) \mid s_i \in \{0, \dots, N_{\text{SNR}}^i\}\}, \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad (21)$$

对于 SUs,有缓冲区状态:

$$\vec{b} \in \mathbf{B} = \{(b_1, \dots, b_M) \mid b_i \in \{0, \dots, C_i\}\}, \quad i \in \{1, \dots, M\} \quad (22)$$

其中,第 i 个 SU 缓冲区容量为 C_i 。

因此,考虑时隙 t 下的系统状态 $\vec{o}(t)$ 的空间表示为 $\mathbf{O}$:

$$\vec{o}(t) \in \mathbf{O} = \{\vec{u}(t), \vec{s}(t), \vec{b}(t)\} \mid \vec{u}(t) \in \mathbf{U}, \vec{s}(t) \in \mathbf{S}, \vec{b}(t) \in \mathbf{B}\} \quad (23)$$

(2) 系统状态的转移概率矩阵及稳态概率

基于所建立的 SU 系统联合状态,为了获得系统状态的转移概率矩阵的闭式表达式,对 PU 活动状态、信道状态以及 SU 状态的状态转移情况进行了推导。

完成频谱感知后的 PU 活动联合状态的转移概率分布矩阵用 $\mathbf{P}_U$ 表示,有:

$$\mathbf{P}_U = \mathbf{P}_U^1 \otimes \mathbf{P}_U^2 \otimes \dots \otimes \mathbf{P}_U^N \quad (24)$$

对于所有信道的条件状态,转移概率分布矩阵为

$$\mathbf{P}_S: \quad \mathbf{P}_S = \mathbf{P}_S^1 \otimes \mathbf{P}_S^2 \otimes \dots \otimes \mathbf{P}_S^N \quad (25)$$

SU 缓冲区数据包数量状态的转移受到数据包到达、

离开过程的影响。依据排队理论能够对 SU 缓冲区数据包的排队过程进行分析,对于缓冲区状态为 b_i 的第 i 个 SU,基于到达概率分布 $\vec{\alpha}_i$ 以及确定信道条件状态下的传输概率分布 $\vec{\tau}_{i,1}, \dots, \vec{\tau}_{i,N_{\text{SNR}}}$,单位时隙内的数据包到达、传输总体状态概率分布向量能够被推导,表示为 $\vec{\Gamma}_i$:

$$\vec{\Gamma}_i = \text{Conv}(\vec{b}_i, \vec{\alpha}_i, \vec{\tau}_{i,1}, \dots, \vec{\tau}_{i,N_{\text{SNR}}}) \quad (26)$$

信道分配协议也对 SU 缓冲区数据包数量状态的转移产生影响,因此需要将信道分配协议概率分布向量纳入推导 SU 缓冲区状态转移概率矩阵的考量。

当 PU 活动状态为 $\vec{u}_k = (u_1, \dots, u_N)_k$,其中 u_k 表示第 k 个 PU 活动状态,且 $k \in \{0, \dots, 2^N\}$ 。定义 $\vec{z}_k = (z_k^1, \dots, z_k^N)$ 用于描述信道被 SU 占用的情况,其中 $z_k^i = 0$ 表示第 i 个信道被主用户占用,而 $z_k^i = x$ 则表示该信道被第 x 个 SU 占用,且 $x \in \{1, \dots, M\}$ 。因此,对于 PU 活动状态为 $\vec{u}_k$ 时,基于概率分布向量,能够获得所有可能的分配结果概率之和,表示为 h_a^k :

$$h_a^k = \sum_{k=1}^{2^N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{(M+1)^N} \sum_{z_i=R_i^j} V_j \quad (27)$$

对于确定的缓冲区状态 b_i ,转移概率分布能够被推导,表示为:

$$\vec{p}_b^i = \sum_{k=1}^{2^N} \sum_{z_k^i \neq 0} h_a^k \cdot \vec{\Gamma}_i \quad (28)$$

当 SU 系统中总体的缓冲区状态为 $\vec{b}_j = (b_1, \dots, b_N)_j$,联合的转移概率分布是:

$$\vec{p}_B^j = \vec{p}_B^1 \otimes \vec{p}_B^2 \otimes \dots \otimes \vec{p}_B^M \quad (29)$$

SU 缓冲区状态转移概率分布矩阵由每个缓冲区状态下的联合转移概率分布构成,表示为:

$$\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} \vec{p}_B^1 \\ \vdots \\ \vec{p}_B^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{0 \rightarrow 0}^b & \dots & p_{0 \rightarrow n_b}^b \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n_b \rightarrow 0}^b & \dots & p_{n_b \rightarrow n_b}^b \end{bmatrix} \quad (30)$$

其中, $p_{i \rightarrow j}^b$ 表示联合状态由 b^i 转为 b^j 的概率, n_b 是系统缓冲区状态的总数,且 $n_b = \prod_{i=1}^M C_i$ 。

综上所述,根据 PU 状态转移概率分布、信道条件状态概率转移分布以及 SU 状态转移概率分布, SU 系统的状态转移概率分布矩阵被推导,表示为:

$$\mathbf{\Theta} = \mathbf{P}_U \otimes \mathbf{P}_S \otimes \mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} \mathcal{E}_{0 \rightarrow 0} & \dots & \mathcal{E}_{0 \rightarrow n_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{E}_{n_s \rightarrow 0} & \dots & \mathcal{E}_{n_s \rightarrow n_s} \end{bmatrix} \quad (31)$$

其中, $\mathcal{E}_{i \rightarrow j}$ 表示从 $t-1$ 时隙到 t 时隙,系统状态由 i

转移为 j 的概率, 系统状态总数 $n_s = 2^N \cdot \prod_{i=1}^M C_i \cdot \prod_{j=0}^N N_{\text{SNR}}^j$ 。

根据系统状态转移概率矩阵, 系统状态稳态分布向量能够获得, 表示为 $\vec{\pi}$:

$$\vec{\pi} = [\xi_0, \dots, \xi_{n_s}] \quad (32)$$

其中, ξ_i 为系统状态为 i 时的稳态概率。

3) SU 性能评估指标

基于马尔可夫模型中所获得的稳态概率分布, 排队分析中的一些性能指标, 如吞吐量、队长以及数据包的拒绝率能够被推导, 以此分析 CR-IoT 系统中每个 SU 的性能。PES 的优势在于, 每个终端的服务质量都能够被独立地量化评估, 对于网络监管者而言, 能够更加方便地分析 SU 网络情况。

(1) 吞吐量

吞吐量定义为单位时隙内 CR-IoT 中 SU 缓冲区能够传输的数据包数量之和的期望。第 i 个 SU 传输数据包数量概率分布能够被推导:

$$\vec{t}_p^i = \vec{\pi} \sum_{k=1}^{N_{j=0}^{N_{\text{SNR}}}} h_s^k \cdot \min(b_i, C_i) \cdot \text{Conv}(b_i, \vec{\alpha}_i, \vec{\tau}_{i,1}, \dots, \vec{\tau}_{i,N_{\text{SNR}}}) \quad (33)$$

对于 $\vec{t}_p^i = [tr_i^0, \dots, tr_i^{C_i}]$, tr_i^j 是单位时隙第 i 个用户传输 j 个数据包的概率。

因此, 第 i 个 SU 的吞吐量为:

$$T_r^i = \sum_{j=0}^{C_i} j \cdot tr_i^j \quad (34)$$

(2) 队长

队长定义为单位时隙内 CR 系统中所有 SU 缓冲区内数据包数量之和的期望。根据稳态分布向量, 能够求得第 i 个 SU 缓冲区状态边缘概率分布:

$$\vec{q}_i = [q_i^0, \dots, q_i^{L_i}] \quad (35)$$

表 1 系统默认参数设置

Table 1 Default parameter

符号	含义	参数设置
M	SU 数量	2
N	信道数量	2
P_s^1, P_s^2	信道条件状态转移概率矩阵	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$
$P_m^i(1)$	中心感知测量矩阵	$\begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$
$P_m^i(w)$	边缘感知测量矩阵	$\begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix}$
$\vec{\tau}_{1,0}$	SU1 在信道状态 0 时的传输概率分布	[0.25, 0.25, 0.25, 0.2]
$\vec{\tau}_{1,1}$	SU1 在信道状态 1 时的传输概率分布	[0.1, 0.2, 0.3, 0.4]
$\vec{\tau}_{2,0}$	SU2 在信道状态 0 时的传输概率分布	[0.25, 0.25, 0.25, 0.25]
$\vec{\tau}_{2,1}$	SU2 在信道状态 1 时的传输概率分布	[0.4, 0.3, 0.2, 0.1]

其中, ℓ_i 是单位时隙第 i 个用户缓冲区存在 j 个数据包的概率。

因此, 第 i 个 SU 的队长为:

$$Q_i = \sum_{j=0}^{C_i} j \cdot q_i^j \quad (36)$$

(3) 数据包拒绝率

在 SU 时隙的开始, 如果到达数据包数加上传输后排队的数据包数超过了 SU 缓冲区的大小, 多余的数据包将被丢弃。因此, 拒绝率定义为单位时隙内 CR 系统中所有 SU 缓冲区拒绝数据包数量之和的期望。第 i 个 SU 数据包拒绝率概率分布能够被推导:

$$\vec{r}_i = \vec{\pi} \sum_{k=1}^{N_{j=0}^{N_{\text{SNR}}}} h_s^k \cdot \sum_{j=0}^{a_{\max}} \max(0, b_i + j - C_i) \cdot \vec{\alpha}_i \quad (37)$$

其中, $a_{\max}$ 是单位时隙内最大到达数据包数量, 对于

$\vec{r}_i = [r_i^0, \dots, r_i^{C_i}]$, r_i^j 是单位时隙第 i 个用户缓冲区拒绝了 j 个数据包的概率。

因此, 第 i 个 SU 的拒绝率为:

$$R_e^i = \sum_{j=0}^{C_i} j \cdot r_i^j \quad (38)$$

4 仿真分析

为了更好地评估边缘计算频谱感知-分配方法的性能, 使用 PES 设置了该方法与传统中心感知-分配方法的对比仿真实验, 并对数值结果进行了分析。

4.1 仿真实验设置

为了控制 CR 系统的复杂性并体现一般性, 在仿真中设置 CR-IoT 系统中有 2 个 SU 和 2 个信道。为了统一中心感知-分配方式以及边缘感知-分配方式的仿真输入, 在本文所建立的频谱感知模型下, 以 PU 现实活动模型作为仿真输入, 能够分别计算两种方式下的感知结果。

系统的默认参数设置如表 1 所示。

所设置的仿真实验具体如下：

首先,为了分析边缘感知-分配方法在不同 SU 配置参数下的性能,并且探究 PES 对于异构终端的独立分析能力,以 SU 缓冲区容量作为自变量设置第 1 组仿真实验,获得中心、边缘两种感知-分配方式下每个 SU 的吞吐量、队长和数据包拒绝率。

接着,不同感知-分配方法下对 PU 干扰及 SU 的 QoS

的权衡是本文研究的主要内容。为了观察不同数据到达情况对权衡后的最优解的影响,在第 2 组实验中,以数据包到达概率分布作为自变量,在不同的感知测量矩阵设置下获得了干扰-QoS(以总吞吐量、总队长以及总数据包拒绝率表征)曲面,并选取确定的数据包到达概率分布下的一组干扰-QoS 数据进行可视化。

两次仿真实验的具体参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真实验中除默认参数外的其他系统参数设置

Table 2 System parameter settings other than default parameters in simulation experiments

符号	含义	第 1 组实验	第 2 组实验
C_1, C_2	SU 的缓冲区容量	$i, i = 2, \cdots, 8$	3
$\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2$	数据包到达概率分布	$[0.25, 0.25, 0.25, 0.25]$	$[j, 1-j], j = 0.2, \cdots, 0.8$
P_U^1, P_U^2	PU 活动状态转移概率矩阵	$\begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 \\ 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1-k & k \\ 1-k & k \end{bmatrix}, k = 0.4, \cdots, 0.9$

4.2 数值结果分析

在第 1 组仿真实验中,随着 SU 缓冲区容量变大,将导致更多的数据包等待在缓冲区中传输,而缓冲区变满的概率较小。图 3 中展示了性能评价指标的变化趋势,结果表明,在相同的缓冲区容量设置下,与中心感知-分配方法相比,边缘感知-分配方法能够使得每个用户都获得更高的吞吐量、更低的队长和时延。并且,在这组仿真实验的参数设置下,能够求得中心感知-分配方法时的漏检概率为 0.24,而边缘感知-分配方法时的漏检概率为 0.18。

因此,第 1 组仿真实验的数值结果证明了边缘感知-分配方法相比于中心感知-分配方法,能够降低 PU 干扰的同时提升 SU 性能。并且,证明了 PES 具有分析不同感知-分配方法下异构终端性能、量化对 PU 干扰的能力。

在第 2 组仿真实验中,以 SU 数据包到达概率以及

PU 现实活动情况作为自变量,可观察两种感知-分配方法下的对 PU 干扰以及 SU 性能指标。如图 4 和 5 所示,将 SU1 与 SU2 的性能指标求和作为 SU 系统总体性能。同样地,在相同的 SU 数据包到达概率、PU 现实活动情况设置下,与中心感知-分配方法相比,边缘感知-分配方法能够使得 SU 系统获得更好的性能指标以及实现更低的感知漏检概率。

在设置 SU 数据包到达概率为 0.5 时,图 6 展示了边缘、中心两种感知-分配方法下的干扰-性能曲线。以更低的干扰以及更高的吞吐、更低的队长和数据包拒绝率作为目标,能够求得权衡两种方法下的干扰-性能帕累托最优解。结果表明,在相同的其他参数设置下,边缘感知-分配方法相比于中心感知-分配方法所获得的干扰-性能帕累托最优解能够达到更低的干扰、更好的 SU 性能。

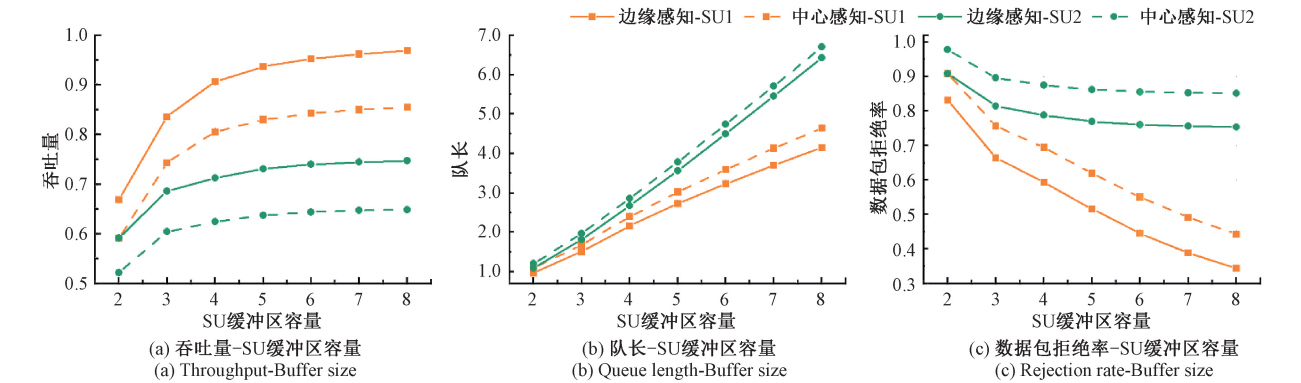


图 3 以 SU 缓冲区容量作为自变量时两种方法下的 SU1、SU2 吞吐量、队长及数据包拒绝率

Fig. 3 Throughput, queue length, and packets rejection of SU1 and SU2 versus buffer size under two strategies

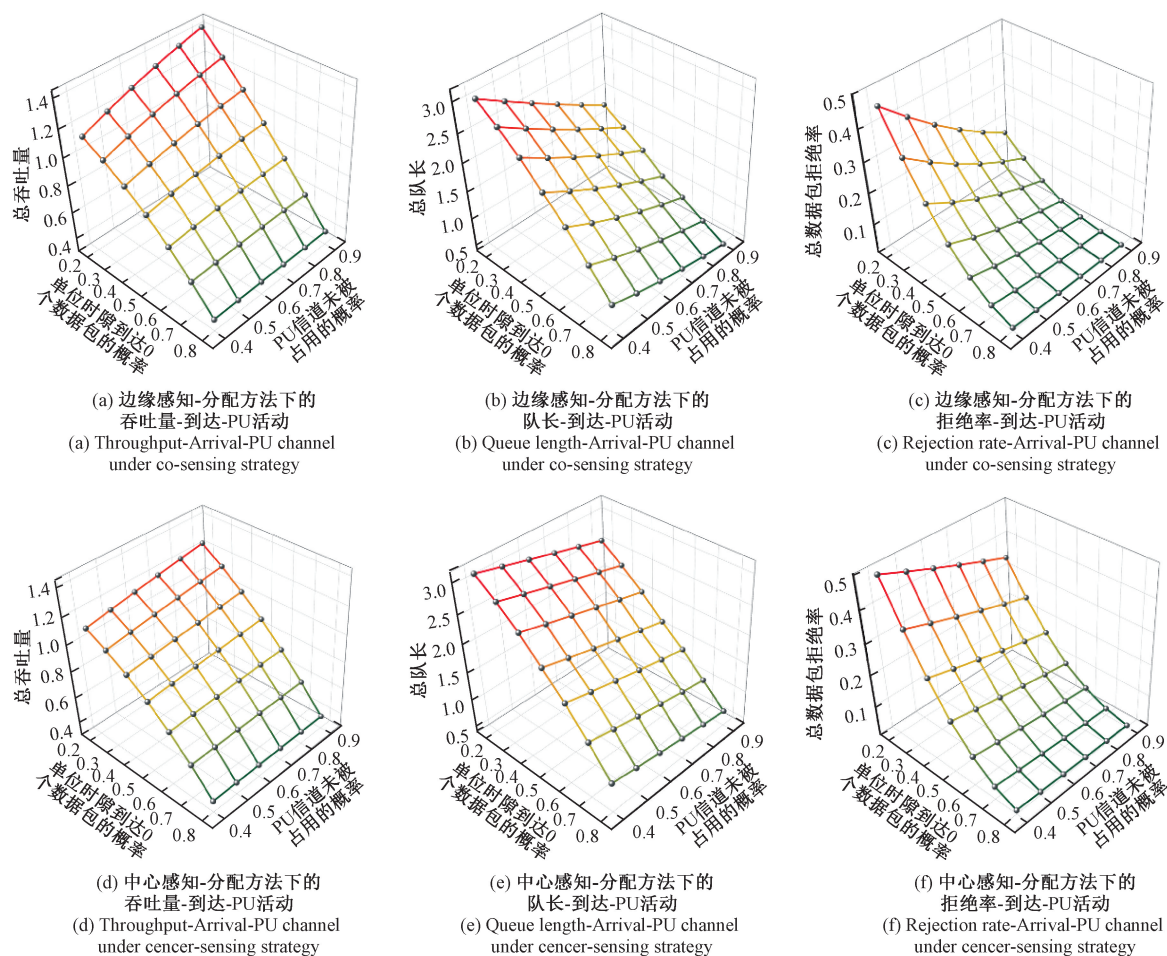


图4 以到达概率分布及PU活动模型作为自变量时的两种方法下的SU吞吐量、队长及数据包拒绝率

Fig.4 Throughput, queue length, and packets rejection of SU versus the arrival probability of one packet and the probability of PU channel “free” state under two strategies

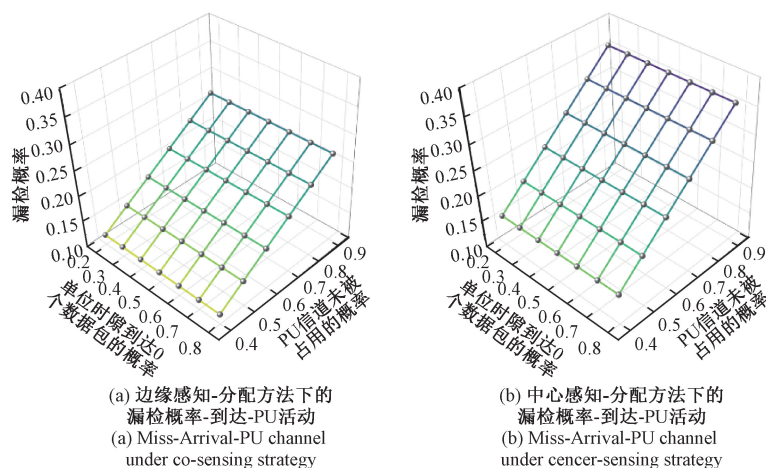


图5 以到达概率分布及PU活动模型作为自变量时的两种方法下的漏检概率

Fig.5 The probability of miss versus the arrival probability of one packet and the probability of PU channel “free” state under two strategies

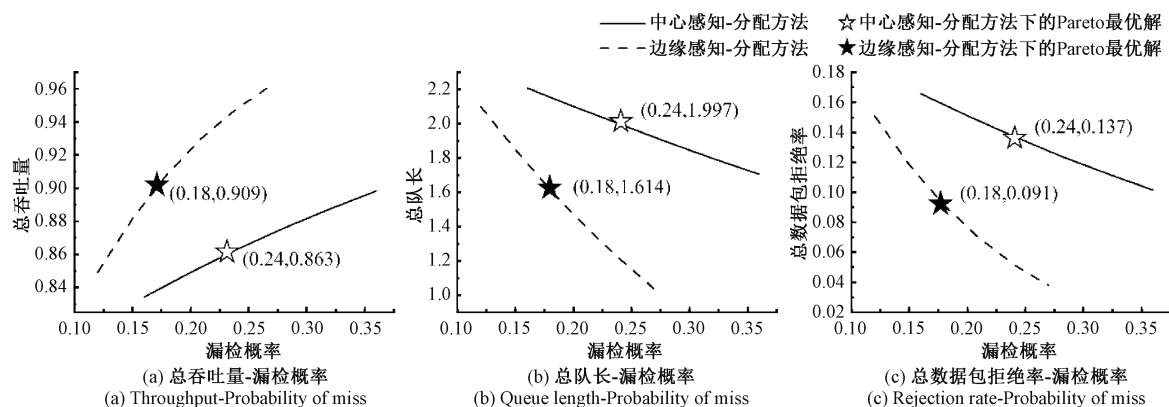


图 6 两种频谱感知-分配方法的干扰-性能曲线及帕累托最优解

Fig. 6 The probability of miss - QoS curves and Pareto optimal solutions of two strategies

5 结 论

本文基于边缘计算思想提出了一种适用于复杂环境下异构 CR-IoT 网络中的协作频谱感知-分配方法,在该方法中采用了边缘节点感知以及改进式的最大吞吐频谱分配协议。为了评估所提出的方法,开发了一个对 SU 缓冲区使用排队分析的频谱感知-分配方法性能评估框架。该框架能够获得各种系统和环境设置中每个 SU 的性能指标以及对 PU 的干扰,频谱感知方案以及频谱分配协议能够作为框架中可配置的参数。应用 PES 对 CR-IoT 网络进行性能分析,数值结果证明了,与中心节点感知-分配方法相比,边缘感知-分配方法能够实现更优的 PU 干扰-SU 性能权衡点,即更低的 PU 干扰和对于 SU 更高的吞吐量、更低的队长和数据包拒绝率。

总之,本文考虑了将物联网与 CR 技术相结合,所提出的框架提供了设计和分析异构、多用户多信道 CR-IoT 复杂环境中的不同频谱感知-分配方法的更多视角和详细的评估方法。本文所设计的边缘感知-分配方法在降低 PU 干扰、提升 SU 的 QoS 方面具有一定优势,能够实现更优的干扰-性能权衡。在未来,CR-IoT 网络环境更加复杂的条件下,基于边缘计算思想的协作感知方式能够为中心节点分担一定算力,使得在中心节点有限算力的基础上也许能够使用更为复杂且性能更佳的频谱分配协议,以提升系统总体性能。

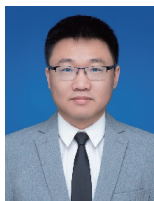
参考文献

- [1] HU F, CHEN B, ZHU K. Full spectrum sharing in cognitive radio networks toward 5G: A survey[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15754-15776.
- [2] 陈媛媛,李贤阳. 基于综合权值校准与均跳估测的移动物联网终端坐标感知算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 43-50.

- CHEN Y Y, LI X Y. Coordinate sensing algorithm for mobile internet of things terminal based on comprehensive weight calibration and mean jump estimation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 43-50.
- [3] 方子涵,李旦,蒋鹏,等. 无线传感器网络中延迟补偿的分布式时钟同步算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 92-100.
- FANG Z H, LI D, JIANG P, et al. Distributed clock synchronization for Kalman based delay estimation in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 92-100.
- [4] 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.
- [5] EJAZ W, IBNKAHIA M. Multiband spectrum sensing and resource allocation for IoT in cognitive 5G networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 150-163.
- [6] IGBINOSA I E, OYERINDE O O, SRIVASTAVA V M, et al. Spectrum sensing methodologies for cognitive radio systems: A review[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 2015, DOI:10.14569/IJACSA. 2015. 061203.
- [7] EL TANAB M, HAMOUDA W. Resource allocation for underlay cognitive radio networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 1249-1276.
- [8] YILMAZ Y, GUO Z, WANG X. Sequential joint spectrum sensing and channel estimation for dynamic spectrum access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(11): 2000-2012.
- [9] 王天荆,王敏,白光伟,等. 无线认知传感器网络中基于时空相关性的协作频谱感知算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 193-203.

- WANG T J, WANG M, BAI G W, et al. Cooperative spectrum sensing algorithm based on temporal-spatial correlation in wireless cognitive sensor networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5):193-203.
- [10] 徐雪松,曾智,邵红燕,等.基于个体-协同触发强化学习的多机器人行为决策方法[J].仪器仪表学报,2020,41(5):66-75.
- XU X S, ZENG ZH, SHAO H Y, et al. Multi-robot behavior decision making method based on individual-collaborative trigger reinforcement learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 66-75.
- [11] 吴鹏,孙备,苏绍璟,等.面向无人艇的航海雷达与光电吊舱协同环境感知方法[J].仪器仪表学报,2021,41(8):154-163.
- WU P, SUN B, SU SH J, et al. Cooperative environment perception method for nautical radar and photoelectric pod facing to unmanned surface vehicles[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 154-163.
- [12] SHAH H A, KOO I. Reliable machine learning based spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018: 1-17.
- [13] AHMED R, CHEN Y, HASSAN B, et al. CR-IoTNet: Machine learning based joint spectrum sensing and allocation for cognitive radio enabled IoT cellular networks[J]. Ad Hoc Networks, 2021, 112: 102390.
- [14] LI Z, CHANG B, WANG S, et al. Dynamic compressive wide-band spectrum sensing based on channel energy reconstruction in cognitive Internet of Things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2598-2607.
- [15] KIM S. Inspection game based cooperative spectrum sensing and sharing scheme for cognitive radio IoT system[J]. Computer Communications, 2017, 105: 116-123.
- [16] BHATTI D M S, AHMED S, SAEED N, et al. Efficient error detection in soft data fusion for cooperative spectrum sensing[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 88: 141-147.
- [17] 任欣悦,孙志国,陈增茂,等.基于证据预处理的协作频谱感知方法[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(9):1387-1394.
- REN X Y, SUN ZH G, CHEN Z M, et al. Cooperative spectrum sensing method based on evidence preprocessing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(9): 1387-1394.
- [18] 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.
- [19] 黎洁,刘羽西,李奇越.基于隐马尔可夫模型的认知无线频谱切换方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(1):69-74.
- LI J, LIU Y X, LI Q Y. Spectrum handoff method based on hidden Markov model in cognitive radio network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(1): 69-74.
- [20] 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.
- [21] ZHANG M, ZHU X, 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: 1-1.
- [22] 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.
- [23] 邝继顺,周颖波,蔡烁,等.用KM算法增强测试集的频谱主分量[J].电子测量与仪器学报,2017,31(1): 112-117.
- KUANG J SH, ZHOU Y B, CAI SH, et al. Enhance prominent spectral component of test set by using KM algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 112-117.
- [24] 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 of spectrum allocation protocols based on probability distribution vector [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 the B. Sc. and M. Sc. degrees from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, in 2006 and 2009, respectively, 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 main research interests include cognitive radio networks, radio resource allocation in wireless networks, and queuing theory.



朱笑莹 (通信作者), 2022 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研究生, 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: xyzhuuu@hotmail.com

Zhu Xiaoying (Corresponding author) received a B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. She is now a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University, Huludao, China. Her main research interests include cognitive radio, radio resource allocation in wireless networks, and queuing theory.



孙浩, 2022 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助理研究员, 主要研究方向为认知无线电、无线电资源分配和排队论。

E-mail: 1747404405@qq.com

Sun Hao received the B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. He is now a research assistant at Liaoning Technical University, Huludao, China. His main research interests include cognitive radio and radio resource allocation in wireless networks, and queuing theory.



张敏, 分别于 2006 年与 2011 年在北京邮电大学获得学士学位以及硕士学位, 2017 年于辽宁工程技术大学获得博士学位。现为辽宁工程技术大学讲师, 主要研究方向为认知无线电、嵌入式系统设计以及工程教育。

E-mail: zhangmin@lntu.edu.cn

Zhang Min received the B. Sc. and M. Sc. degrees from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, in 2006 and 2011, respectively. She received a Ph. D. degree from the College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, China, in 2017. She is now a lecturer with the School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao. Her main research interests include cognitive radio, embedded system design, engineering education, etc.



边廷玥, 分别于 2019 年与 2022 年在辽宁工程技术大学获得学士学位以及硕士学位, 现为辽宁工程技术大学讲师, 主要研究方向为压缩感知、频谱感知等。

E-mail: 764567925@qq.com

Bian Tingyue received the B. Sc. and M. Sc. degrees from Liaoning Technical University, in 2019 and 2022, respectively. She is now a lecturer with the School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao. Her main research interests include compressed sensing, spectrum sensing, etc.