

# 激光与光电子学进展

## 基于概率分布向量的频谱分配协议性能评估系统

王诗<sup>1</sup>, 蓝浩<sup>1,2\*</sup>, 朱笑莹<sup>1</sup>, 张敏<sup>1</sup>, 曾芷珊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125100;

<sup>2</sup>辽宁工程技术大学研究生院, 辽宁 葫芦岛 125100

**摘要** 认知无线网络中认知用户和信道的数量、状态等具有很强的时变性,在复杂环境下则需要考虑到更多因素。针对目前各种分配协议的性能评估问题,提出了一种基于概率分布向量的频谱分配协议性能评估系统(PES-SAP)。该系统能更加灵活地评估信道分配协议。针对可用频谱,提出了一种公平随机分配协议,尽可能使更多的次用户获得信道。利用 PES-SAP 对公平随机分配协议与传统随机分配协议进行了综合性能评估,仿真结果表明,PES-SAP 可以明显地区分两种协议,且在一定数量值内公平随机分配协议的部分性能优于随机分配协议。

**关键词** 光纤光学; 认知无线电; 信道分配协议; 性能评估系统; 概率分布向量; 排队模型

中图分类号 TP393

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1306001

### Performance Evaluation System of Spectrum Allocation Protocols Based on Probability Distribution Vector

Wang Shi<sup>1</sup>, Lan Hao<sup>1,2\*</sup>, Zhu Xiaoying<sup>1</sup>, Zhang Min<sup>1</sup>, Zeng Zhishan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University,  
Huludao 125100, Liaoning, China;

<sup>2</sup>Institute of graduate, Liaoning Technical University, Huludao 125100, Liaoning, China

**Abstract** In cognitive radio networks, the number and state of cognitive users and channels vary strongly with time. In complex environments, more factors need to be considered. To evaluate the current performance of various allocation protocols, a performance evaluation system of spectrum allocation protocols (PES-SAP) based on a probability distribution vector is proposed in this study. The system can flexibly evaluate channel allocation protocols. Moreover, an equitable and random allocation protocol is proposed herein to enable maximum secondary users to obtain channels for the available spectrum. The PES-SAP is used to evaluate the comprehensive performance of the equitable and random allocation and traditional random allocation protocols. The simulation results show that the PES-SAP can clearly distinguish these two protocols and some of the equitable and random allocation protocols have better performance within a certain number of values in the random allocation agreement.

**Key words** fiber optics; cognitive radio; channel allocation protocol; performance evaluation system; probability distribution vector; queuing mode

## 1 引言

认知无线电(CR)可以感知周围环境中的无线电通信变化,通过动态频谱感知、频谱分配以及频谱接入等工作提高频谱利用率,以应对未来可能出现的频谱资源稀缺问题,进而提高通信质量<sup>[1-2]</sup>。对无线电资源分配协议进行设计研究与评估之前,必须明确无线电资源的模

型以及一个无线电资源系统如何利用资源的模型<sup>[3]</sup>。排队模型分析法是目前分析认知无线网络(CRN)性能的一种有效方法,有助于分配频谱资源<sup>[4]</sup>。

有限状态的马尔科夫模型是解决无线资源分配进程各状态的有效方法<sup>[5]</sup>,可衡量CRN中主用户(PU)对信道的占用情况、信道状态等。Wang等<sup>[6]</sup>开发的性能评估函数能有效评估系统的传输性能。Wang等<sup>[7]</sup>

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2021-07-31; 录用日期: 2021-08-05

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)、辽宁工程技术大学学科创新团队(LNTU20TD-06, LNTU20TD-20)

通信作者: \*lanhao347229@163.com

提出了一种分布概率矩阵方法,可描述不同分配协议下的分配结果,进而评估协议的性能。Wang 等<sup>[8]</sup>针对复杂的多用户多信道环境提出了一种目标可配置、计算效率高的信道分配框架。Aghazadeh 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于瑞利衰落信道的基础频谱共享系统多用户分集性能评估方法,验证了在一定情况下基于阈值的用户选择方案复杂度低于采用全信道状态信息(CSI)的用户选择方案。Singh 等<sup>[10]</sup>提出了一种改进的分组保留多址接入协议,并利用时隙数量与次用户传输数据包数量变化产生的吞吐量评估协议性能。Liu 等<sup>[11]</sup>提出了 CRN 中授权信道的多睡眠模式,并从次用户(SU)包的吞吐量、平均延迟、系统节能效率和信道利用率等方面对系统的性能进行了评估。对于设计的评估系统,需要相似的协议进行实例化测试,以验证评估系统的可用性。Wang 等<sup>[12-13]</sup>将一种随机分配协议(RAP)与机会调度广泛应用于 CR 的研究中,为 CR 中频谱分配协议的构建提供了思路。

本文给出了一种可对分配协议进行量化表述的概率分布向量(PDV),并设计了一种频谱分配协议性能评估系统(PES-SAP)对现实情况进行建模,以评估频谱分配协议的性能。针对随机分配产生的弊端,利用一种公平随机分配协议(ERAP)进行改进,即在每一

时隙内,尽可能为更多的 SU 分配信道。将 PES-SAP 应用于传统 RAP 与 ERAP 的性能评估中,以验证基于 PDV 的 PES-SAP 的灵活性与实用性。最后,分析了 ERAP 与传统 RAP 的性能区别及其适应环境。

## 2 系统模型

考虑到模型为主用户网络覆盖下的 SU 系统模型, SU 基站被覆盖在一个或多个 PU 基站下工作,如图 1 所示。常见的 CR 应用场景中, SU 系统在一个或多个 PU 网络覆盖范围内工作, SU 需要与 PU 共用相同的信道<sup>[14]</sup>。当信道处于空闲状态(PU 处于非占用状态)时, SU 可占用该信道传输数据。传输过程中,所有数据以包的形式存在,且数据包均在 PU 与 SU 网络的时隙中产生与发送。设定在某时隙下,共存  $M$  条空闲信道与  $N$  个需要发送数据包的 SU,  $p_i^j$  表示将第  $j$  条信道分配给第  $i$  个 SU 的概率。在该模型下,设计的性能评估系统能更好地评价认知用户的传输性能。在时隙开始时,由 SU 产生数据包并存入用户缓冲区等待发送,数据包的传输遵循先到先服务的排队原则<sup>[15]</sup>。SU 系统检测该时隙环境中空闲状态的 PU 信道列表并获得用户列表,然后根据分配协议将信道分配给各 SU。本研究仅考虑数据的上行传输。

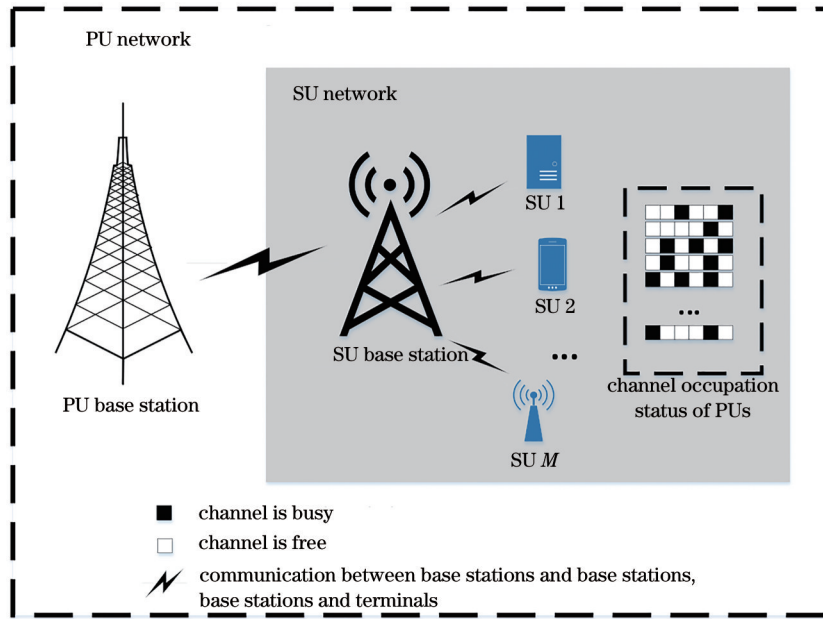


图 1 本系统的结构

Fig. 1 Structure of the system

## 3 排队分析

### 3.1 用户模型

#### 3.1.1 PU 模型

PU 对信道的占用情况会影响 SU 的传输,而每个时隙的 PU 对于信道的占用情况都可能发生变化。因此,可以将 PU 对信道的状态描述为一个具有两状态

(占用与非占用)的马尔可夫链,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。描述 PU 对每条信道占用情况的矩阵可表示为

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

式中,  $p_{0 \rightarrow 1}$  为从某时隙到下一个时隙 PU 对信道由占用状态转换为非占用状态。

### 3.1.2 SU 模型

在 PES-SAP 中, SU 模型建立及参数设置对传输系统的最终评估具有重要作用。在每个时隙的开始, SU 基站会感知周围信道上 PU 的占用情况: 如果某一时刻 SU 到达的数据包数量超过队列缓冲区可存储数据包的数量, 超出部分的数据包会被拒绝; 反之, 数据包会进入缓冲区排队等待发送。系统根据信道分配协议为 SU 提供信道, SU 通过被分配的信道发送数据包。用离散时间队列模型对 CR 系统进行建模和性能分析。在 SU 模型中, 到达、服务和缓冲区的参数至关重要, 具体设置如下。

**到达设置:** SU 的到达过程决定了数据包的到达数量, 进而影响系统的可视化性能指标<sup>[16]</sup>。SU 的到达状态可由一组向量表示, 第  $i$  个 SU 的到达过程可表示为概率向量  $\alpha_i = (p_0, \dots, p_m)$ , 到达过程的概率分布可表示为  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)$ 。其中,  $p_x(x=0, \dots, m)$  为第  $i$  个 SU 在每个时隙到达  $x$  个数据包的概率,  $m$  为一个时隙下到达数据包数量的最大值。设第  $i$  个 SU 在第  $t$  个时隙到达的数据包数量为  $x_t^i$ , 仿真时长为  $S_T$ , 则每个 SU 在  $S_T$  内到达的数据包总量可表示为

$$S_P = \sum_{t=1}^{S_T} x_t^i \quad (2)$$

**缓冲区设置:** SU 缓冲区的大小是有限的, 设  $K_i$  为第  $i$  个 SU 的缓冲区大小。本模型中每个 SU 缓冲区的可承载量及缓冲区内数据包的数量能够影响吞吐量<sup>[16]</sup>、拒绝率等性能评估指标。为了表示  $N$  个 SU 的缓冲状态, 建立集合

$$b_t = \{(b_{1,t}, \dots, b_{N,t}) | b_{i,t} \in \{0, \dots, K_i\}, t \in \{1, \dots, S_T\}\} \quad (3)$$

式中,  $b_{i,t}$  为第  $t$  个时隙下第  $i$  个 SU 缓冲区中的数据包数量。

**数据包传输:** SU 的传输速率取决于频谱感知结果、信道分配结果和自适应调制编码(AMC)<sup>[17]</sup>调制方案的选择等。

### 3.2 概率分布向量

本模型中, 理想频谱分配是在每个时隙的开始重新分配信道, 以达到期望满足的某些条件, 如最大吞吐量、最短队长或最小延时, 但这会消耗大量的计算资源。因此, 提出了一种对频谱分配协议进行量化表述的  $N^M$  维度 PDV, 可表示为

$$V = (v_0, \dots, v_{N^M}) \quad (4)$$

式中,  $v_i$  为第  $i$  个分配方案的概率。为将 PDV 中的下标与现实情况对应, 以  $N$  进制表示向量中元素的下标, 具体方式: 将信道分配方案表示为  $A = [A_1, \dots, A_M]$ , 即将第  $y$  个信道分配给第  $A_y$  个用户, PDV 中  $v_i$  的下标  $i$  可表示为

$$i = \sum_{n=1}^M A_n \cdot N^{n-1} \quad (5)$$

PDV 可对不同协议中的分配策略进行数学表述, 进而利用频谱分配协议性能评估系统获取评价指标。

### 3.3 信道分配模型

对于  $N$  个用户、 $M$  个信道, 建立一个  $N \times M$  的信道分配矩阵

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \dots & d_{1,M} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{N,1} & \dots & d_{N,M} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $d_{j,i} = 1$  表示第  $j$  条信道分配给第  $i$  个用户,  $d_{j,i} = 0$  表示第  $j$  条信道没有分配给第  $i$  个用户。

综上所述, 基于 RAP 给出了一种 ERAP, 并设计了性能评估系统与排队分析法对两种协议的性能进行对比。

#### 3.3.1 随机分配协议

RAP 中, 系统将未分配的信道分配给任意 SU 的概率是相等的, 对于时隙中的  $M$  条信道、 $N$  个 SU 用户, 根据 PDV 共有  $N^M$  种分配结果。由于单位时隙内能产生的分配方案是等概率发生的, 则第  $i$  个时隙中最终得到某一分配结果的概率可表示为

$$v_i = v_1 = \dots = v_{N^M} = \frac{1}{N^M} \quad (7)$$

分配结果的概率是评价系统性能的一个重要参数, 具体流程如表 1 所示。

表 1 RAP 算法的流程

Table 1 Flow of the RAP algorithm

Algorithm 1: random allocation protocol

Input:  $N, M$

Output: distribution result matrix  $D$

1: set  $D = \mathbf{0}$  ( $d_{j,i} = 0$ , for all  $i$  and  $j$ )

2: for  $j = 1$  to  $M$  do

3:     set  $a$  from  $\{1, \dots, N\}$  with equal probabilities

4:     set  $d_{j,a} \leftarrow 1$

5: end for

#### 3.3.2 公平随机分配协议

公平随机分配是基于随机分配建立的一种分配协议, 可以避开 RAP 中一些较为极端的分配结果, 如将多条信道分配给某一用户导致其他用户无可用信道获得的情况。ERAP 中, 系统将剩余未分配的任意信道随机分配给未获得信道的任意用户, 已获得信道的 SU 不作为下一待分配信道的分配对象, 具体分配流程如表 2 所示。可以发现, 相比 RAP, ERAP 尽可能地保证更多的 SU 获得信道。对该协议进行多次实验仿真后, 依据大数定律获得 ERAP 下各分配方案的概率, 构成 PDV。将 ERAP 应用于复杂的 CRN 环境中, 可以有效证明频谱分配协议性能评估系统对协议评估的

表 2 ERAP 算法的流程

Table 2 Flow of the ERAP algorithm

Algorithm 2: equitable and random allocation protocol

Input:  $N, M$

Output: distribution result matrix  $\mathbf{D}$

- 1: set  $\mathbf{D} = \mathbf{0}$  ( $d_{j,i} = 0$ , for all  $i$  and  $j$ )
- 2: set priority user list:  $l = \{1, \dots, N\}$
- 3: for  $j = 1$  to  $M$  do
- 4:     set  $a$  from  $l$  with equal probabilities
- 5:     set  $d_{j,a} \leftarrow 1$
- 6:     remove  $a$  from  $l$
- 7:     if  $l$  is empty then
- 8:         set  $l \leftarrow \{1, \dots, N\}$
- 9:     end if
- 10: end for

能力。

根据  $\mathbf{D}$  可获得分配树中各分配结果及该结果的概率, 图 2 为 2 个用户 3 条信道下两种协议获得的最终分配树结果。其中, 分配树的最后一层表示获得的 8 种分配情况, 矩阵表示获得的各分配结果。如  $\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, 1/8\right)$  表示 3 条信道均分配给第 1 个用户, 且获得该分配结果的概率为 1/8。

### 3.4 信道模型

信道条件状态会影响 SU 的传输速率, 假设 SU 占用信道时, 信道的条件状态相同。根据信噪比及误码

率, 确定适应 AMC 的调制方案。在每时隙中系统采用的第  $k$  种调制方式为  $\mathbf{M}_k = [r_1, r_2, r_3, r_4]$ 。其中,  $r_n$  ( $n = 0, 1, 2, 3$ ) 为该时隙离开  $n$  个数据包的概率。若系统中的信道符合有限状态的马尔科夫模型<sup>[5]</sup>, 对于  $M$  条信道, 根据信道信噪比分为  $C$  个阈值区间, 每个区间为一种信道状态, 则每条信道共有  $C$  种信道状态,  $t$  时隙的信道状态转移矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} p_{0,0} & \cdots & p_{0,C} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{C,0} & \cdots & p_{C,C} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中,  $p_{l,q}$  为进入下一个时隙后信道从  $l$  状态变为  $q$  状态的概率。

### 3.5 性能评估

对分配协议的多种性能进行评估可以更准确地描述分配协议的优劣, 进而提高信道的分配效率与数据包的传输性能。在时长为  $S_T$  的仿真中, 先接收到达的数据包进入缓冲区, 然后进行频谱感知与频谱分配, 最后从缓冲区中取出数据包传输。数据包的传输过程如图 3 所示。在每个时隙结束时, 需要记录该时隙下系统数据包的传输情况, 包括第  $t$  个时隙下第  $i$  个用户的队列长度、吞吐量、拒绝数据包数量、所有数据包的等待时间等可视化数据, 便于观察传输状态。

队列长度  $s_{t,i}^i$  即 SU 缓冲区中数据包的数量, 表示第  $t$  个时隙中第  $i$  个 SU 在接收到达数据包后, 缓冲区中数据包的数量。

平均队长  $\bar{q}_i$  即 SU 缓冲区中数据包数量的期望。平均队列长度可用来估计系统传输需求的满足程度和系统缓冲区大小的需求, 可表示为

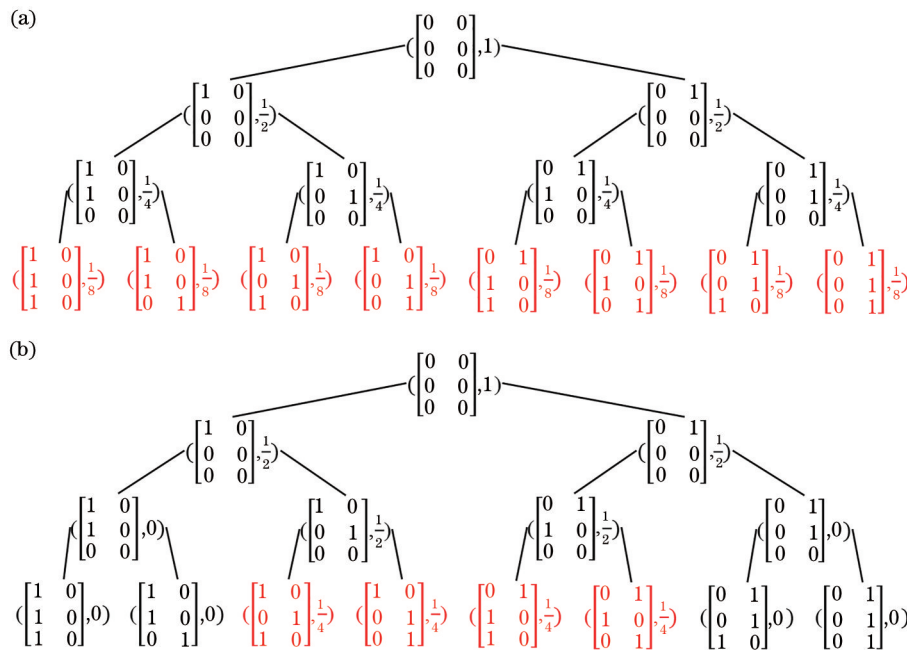


图 2 两种分配协议下 2 个用户、3 条信道的分配树。(a) RAP; (b) ERAP

Fig. 2 Allocation tree of 3 channels for 2 users under two allocation protocols. (a) RAP; (b) ERAP

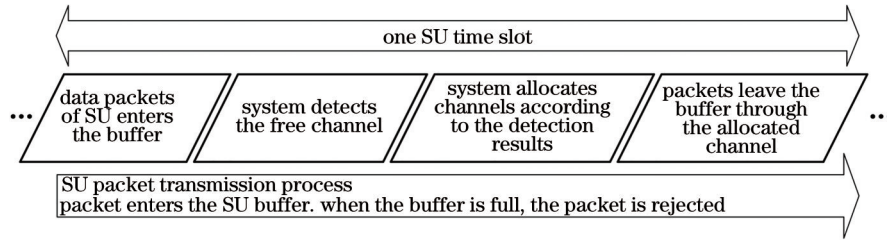


图 3 SU 数据包的传输流程

Fig. 3 Transmission process of SU data packets

$$q_i = \frac{\sum_{t=0}^{S_T} s_{i,t}^i}{S_T} \quad (9)$$

吞吐量可表示第  $t$  个时隙第  $i$  个 SU 发送的数据包数量。

平均吞吐量  $T_i$  为第  $i$  个 SU 在整个仿真时长内可以传输数据包的预期数量, 可表示为

$$T_i = \frac{\sum_{t=0}^{S_T} s_{i,t}^i}{S_T}, \quad (10)$$

式中,  $s_{i,t}^i$  为第  $i$  个 SU 在第  $t$  个时隙传输的数据包数量。

拒绝数据包数量: 假设每个时隙中 SU 先发送缓冲区中的数据包, 随机接收新到达的数据包, 拒绝数据包数量为第  $t$  个时隙中第  $i$  个用户由于缓冲区已满而被拒绝的数据包数量。

拒绝率  $R_i$  为由于缓冲区已满而无法进入缓冲区的预期数据包数量, 可表示为

$$R_i = \frac{\sum_{t=0}^{S_T} (b_{i,t} + x_t^i - s_{i,t}^i) - S_T \cdot K_i}{S_T}. \quad (11)$$

等待时间  $d_p$  即数据包进入缓冲区到发送成功

的时间间隔。第  $p$  个数据包在进入和离开缓冲区时会各记录一个时间, 取其差值即为该数据包的等待时间  $d_p$ 。

平均延迟  $D_i$  为数据包到达和传输之间的平均时间间隔, 可表示为

$$D_i = \frac{\sum_{p=1}^{S_p} d_p}{S_T}, \quad (12)$$

式中,  $S_p$  为数据包总数。

## 4 仿真结果与数值分析

### 4.1 仿真流程与参数设置

获取分配协议的 PDV 后, 根据该向量设置 CRN 的参数。以多用户、多信道模型进行仿真模拟, 以 SU 的缓存大小、 $S_T$  时间内到达的数据包总数  $S_p$  作为影响因素, 以延迟、队长、吞吐量、拒绝率作为评价指标对 PES-SAP 进行仿真分析, 进而评价两种分配协议的性能。其中, 衡量延迟的单位设定为时隙, 衡量队长、吞吐量、拒绝率的单位设定为数据包个数。假设 PU 对信道的占用状态转移概率相同, 信道各状态转移概率也相同, 模型中设置的时隙长度较小, 以保证每个时隙最多只能到达 1 个数据包, 数值仿真中设置的环境参数如表 3 所示, SU 参数设置如表 4 所示。

表 3 环境参数的设置

Table 3 Setting of environmental parameters

Parameter	Value setting
PU occupation $P_{PU}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$
Number of channel states $C$	4
Channel state transition matrix $M_i$	$\begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \end{bmatrix}$
Modulation scheme $M_k$	$\begin{cases} M_0 = [0.5, 0.5, 0, 0] \\ M_1 = [0.2, 0.5, 0.3, 0] \\ M_2 = [0.2, 0.3, 0.3, 0.2] \\ M_3 = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4] \end{cases}$
Simulation time $S_T$	1000 time slots
Maximum number of packets arriving per time slot $m$	1

表 4 SU 参数的设置  
Table 4 Setting of SU parameters

Simulation code	User number	Buffer size $K_i$	Total number of packets arrived $S_p$	SU arrival process probability vector $\alpha_i$
Simulation 1	U1	10-35	600	(0.4, 0.6)
	U2		400	(0.6, 0.4)
Simulation 2	U1	7	370-610	(0.63, 0.37)-(0.39, 0.61)
	U2	10		
	U3	7		
	U4	10		
Simulation 3	U1	7	670-1000	(0.33, 0.67)-(0, 1)
	U2	10		
	U3	10		
	U4	10		

仿真过程使用 Python3.8 作为仿真环境。以信道与 SU 的数量为基础,记录 SU 每个时隙传输中的实际

情况,在仿真完成后计算获取各项评价指标,仿真流程如图 4 所示。

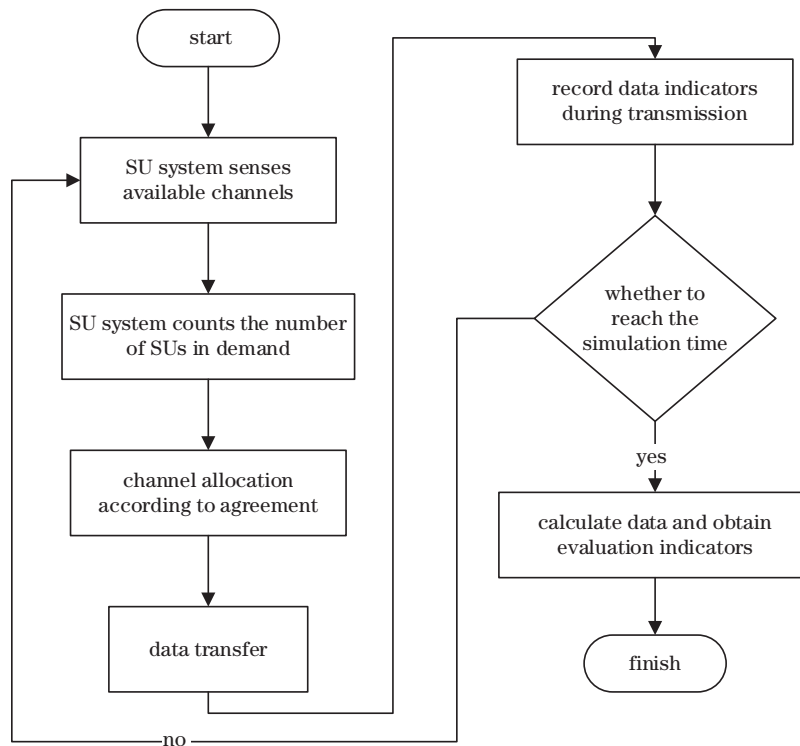


图 4 仿真流程

Fig. 4 Simulation process

## 4.2 数值结果与讨论

### 4.2.1 仿真 1

仿真 1 采用 2 用户、2 信道的仿真模型,在性能度量中,延迟分析是一个重要指标<sup>[18]</sup>。PES-SAP 以平均延迟(以时隙数量为单位)作为评价指标,通过调整两用户的缓冲区大小(以数据包个数作为衡量缓冲区大小的单位)评估两种分配协议的性能。将上述设置代入性能评估系统得到的仿真结果如图 5 所示。可以发现,数据包到达率  $\rho_1$  较大的用户平均延迟较大,RAP

的平均延迟比 ERAP 高。这表明基于 PDV 的 PES-SAP 能对不同分配协议的性能进行评估与区分,在一定数据包到达数量下 ERAP 能改善 RAP 在平均延迟评价指标下的实际性能。

### 4.2.2 仿真 2

基于 PDV 的频谱分配协议性能评估系统能同时获得多种分配协议性能评价指标,且多种参数灵活可调。仿真 2 中采用 4 用户、4 信道进行仿真,PES-SAP 可用于集中覆盖 CRN 的多用户多信道模型。通过调

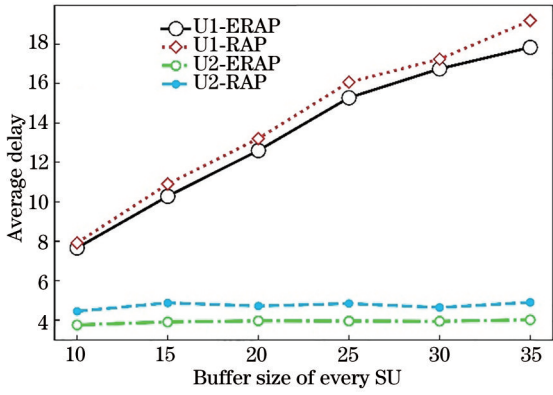


图 5 SU不同缓存大小的平均延迟

Fig. 5 Average delay for different SU cache sizes

整仿真中到达的数据包数量  $S_p$  改变 SU 的到达率, 观察不同到达率下用户的平均队长(以数据包数量作为单位)变化情况。以 U1、U2 为例, 仿真结果如图 6 所示。可以发现, 各用户的平均队长在数据包到达数量增加时逐渐升高, 且在一定到达率下采用 ERAP 的用户较采用 RAP 的用户平均队长更低。

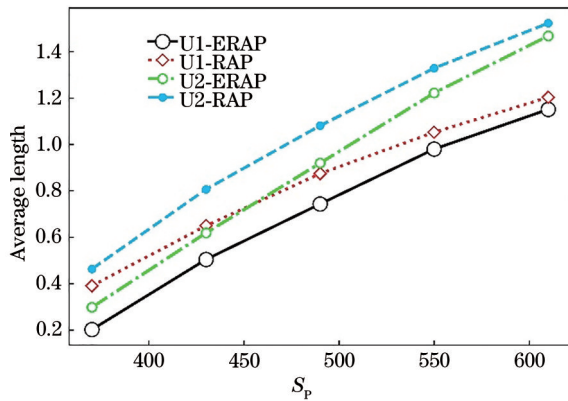


图 6 SU 在不同到达数据包数量下的平均队长

Fig. 6 Average length SU under different numbers of arriving packets

#### 4.2.3 仿真 3

仿真 3 采用多用户多信道模型, 以 4 用户、6 信道模型为样例进行仿真, 以观察多用户多信道模型下平均吞吐量、拒绝率随数据包总数  $S_p$  的变化, 结果如图 7、图 8 所示。仿真取 U1、U2 两个不同缓冲区大小的用户数据作为结果。可以发现, 在一定数据包到达数量下使用 ERAP 时, 拒绝率更小, 平均吞吐量更高, 这表明基于 PDV 的 PES-SAP 对不同协议具有高匹配能力, 也证明了 ERAP 在以平均吞吐量、拒绝率作为评价指标时, 传输性能优于随机分配。

综上所述, 基于 PDV 的频谱分配协议性能评估系统可获取不同分配协议性能评价指标, 对需要综合性性能评估的不同信道分配协议进行量化对比, 有利于对信道分配协议的设计及评估。结果表明, 不同环境下的 ERAP 优于 RAP, 且 ERAP 与该性能评估系统可以

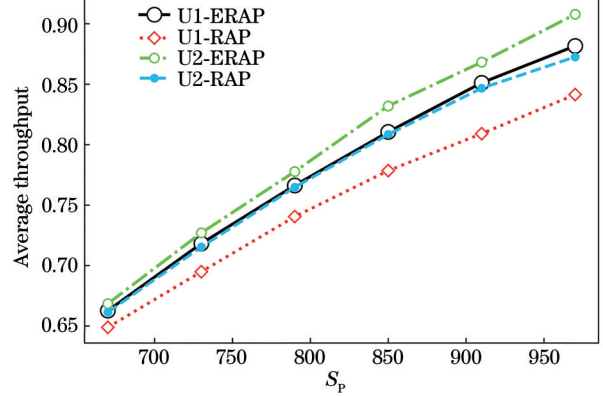


图 7 SU 在不同到达数据包总数下的吞吐量

Fig. 7 Throughput of SU under different total number of arriving packets

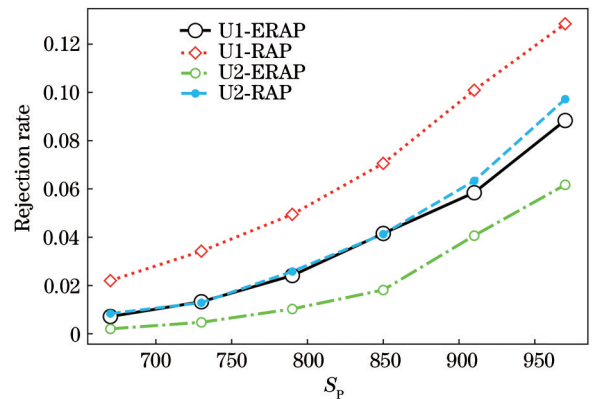


图 8 SU 在不同到达数据包总数下的拒绝率

Fig. 8 Rejection rate of SU under different total number of arriving packets

运用于多用户多信道模型中。

## 5 结 论

设计了一种基于 PDV 的频谱分配协议性能评估系统, 在 CRN 中可对多种协议进行性能评估。在此基础上, 设计一种 ERAP 对传统 RAP 进行改进, 并用 PES-SAP 将 RAP 与 ERAP 进行对比。考虑到在实际环境中, SU 需求与可用信道及其状态更为复杂, 在多种用户与信道环境下, 通过可视化数据对 ERAP 与传统 RAP 进行性能评估, 结果表明, ERAP 的整体性能优于 RAP。基于 PDV 的频谱分配协议性能评估系统可对 ERAP 和 RAP 进行性能分析, 有效评估多种分配协议在复杂环境下的性能。综上所述, 基于 PDV 的频谱分配协议性能评估系统能够作为多用户多信道通信环境中对信道分配协议进行性能分析评估的有效工具, 全面获取性能评价指标以对 CRN 进行性能优化。数值仿真结果表明, 在一定到达数据包数量和一定用户缓存大小情况下, ERAP 相比传统 RAP 更具有公平性、实用性, 更适用于复杂的多用户多信道 CRN。

## 参 考 文 献

- [1] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] 王灿, 李伟. 认知无线电资源分配技术综述[J]. 科技创新与应用, 2018(18): 11-12, 16.  
Wang C, Li W. Overview of cognitive radio resource allocation technology[J]. Technology Innovation and Application, 2018(18): 11-12, 16.
- [3] Yang H L, Xie X Z. Stackelberg game for resource allocation with QoS and fairness assurance in cognitive radio networks[J]. Journal of Communications, 2015, 12(10): 970-975.
- [4] 罗文君. 基于排队论的底衬认知无线网络传输性能研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017: 3-4.  
Luo W J. Underlay cognitive radio networks based on queueing theory[D]. Kunming: Yunnan University, 2017: 3-4.
- [5] Zhang Q Q, Kassam S A. Finite-state Markov model for Rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(11): 1688-1692.
- [6] Wang S, Maharaj B T, Alfa A S. Resource allocation and performance measures in multi-user multi-channel cognitive radio networks[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, May 15-18, 2016, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2016: 16138716.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Aghazadeh B, Torabi M. Performance evaluation of multi-user diversity in a SIMO spectrum sharing system with reduced CSI load[J]. Digital Signal Processing, 2018, 72: 160-170.
- [10] Singh R P, Sangwan A J, Godara K. Modified-PRMA MAC protocol for cognitive radio networks[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 107(2): 869-885.
- [11] Liu J P, Jin S F, Yue W Y. Performance evaluation and system optimization of Green cognitive radio networks with a multiple-sleep mode[J]. Annals of Operations Research, 2019, 277(2): 371-391.
- [12] Wang J, Huang A P, Cai L, et al. On the queue dynamics of multiuser multichannel cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1314-1328.
- [13] Rashid M M, Hossain M J, Hossain E, et al. Opportunistic spectrum scheduling for multiuser cognitive radio: a queueing analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5259-5269.
- [14] Peng W, Chen D Y, Sun W H, et al. Distributed adaptive channel allocation in multi-radio wireless sensor networks[J]. Journal of Communications, 2016, 11(11): 984-991.
- [15] Attahiru S A. Queueing theory for telecommunications [M]. Boston: Springer, 2010: 79-103.
- [16] 阙永红, 贺冰涛, 陈健. 携能通信协作认知网络稳态吞吐量分析和优化[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(6): 1-7.  
Kuo Y H, He B T, Chen J. Stable-throughput analysis and optimization of cooperative cognitive radio networks based on information and energy cooperation[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(6): 1-7.
- [17] 于洋, 谭学治. 基于信道分类和自适应调制编码的认知无线电决策引擎[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 371-376.  
Yu Y, Tan X Z. Cognitive radio decision engine based on channel classification and adaptive modulation and coding [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2): 371-376.
- [18] Le L B, Hossain E, Alfa T S. Delay statistics and throughput performance for multi-rate wireless networks under multiuser diversity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(11): 3234-3243.