

概率反馈动态频谱分配策略及性能分析

金顺福^{1,2}, 葛世英^{1,2}, 霍占强³

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了折衷认知用户吞吐量与平均时延, 并适应多种网络业务需求, 在认知无线网络中引入概率反馈机制和能量检测阈值, 提出一种新的动态频谱分配策略。针对认知用户的非理想感知结果, 建立一种2类用户可能相互干扰的优先级排队模型, 并构造状态转移概率矩阵。采用矩阵几何解方法求出系统的稳态分布, 给出信道利用率、认知用户吞吐量、认知用户平均延迟及授权用户干扰率等性能指标的表达式。通过数值实验和系统仿真验证所提动态频谱分配策略性的有效性, 并给出能量检测阈值的优化设置方案。

关键词: 认知无线网络; 动态频谱分配策略; 概率反馈; 非理想感知; 优先级排队模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Dynamic spectrum allocation strategy with probabilistic feedback mechanism and performance analysis

JIN Shun-fu^{1,2}, GE Shi-ying^{1,2}, HUO Zhan-qiang³

(1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. The Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China;
3. College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: By introducing probabilistic feedback mechanism and energy detection threshold to cognitive radio networks, a novel dynamic spectrum allocation strategy is proposed to trade off the throughput and average delay of secondary users, as well as meet various network requirements. Considering the imperfect sensing results of secondary users, a kind of priority queueing model is established, in which two classes of users may interfere with each other, then the state transition probability matrix is constructed. Employing the method of matrix-geometric solution, the stationary distribution of system model is derived. Accordingly, the expressions for the performance measures in terms of channel utilization, throughput of secondary users, average delay of secondary users and interference ratio of primary users are given. With numerical experiments and system simulations, the effectiveness of the proposed dynamic spectrum allocation strategy is verified. Finally, the optimal design of energy detection threshold is provided.

Key words: cognitive radio networks; dynamic spectrum allocation strategy; probabilistic feedback; imperfect sensing; priority queueing model

1 引言

随着无线电通信技术的飞速发展, 频谱资源短缺与频谱需求增加之间的矛盾日渐突出。在传统的固定频谱资源管理方式下, 频谱资源利用率极低^[1], 如何改善无线资源的分配方式成为一个亟待解决

的问题^[2]。认知无线电技术(CR, cognitive radio)为提高无线资源的利用率带来了新思路, 被预言为未来最热门的无线技术之一^[3,4], 其动态频谱分配策略的相关研究得到了广泛的关注。

国内外学者从不同的角度分析了认知无线网络的系统性能指标。ZHANG 等^[5]以抢占式多优

收稿日期: 2014-08-30; 修回日期: 2014-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61472342, 11201408); 河北省自然科学基金资助项目(2012203093)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61472342, 11201408); The Natural Science Foundation of Hebei Province (2012203093)

先级 M/M/1 排队模型为基础,分析了认知用户的响应时延,提出了中断后优先级提升策略,设定中断认知用户的优先级高于新到达的认知用户的优先级,进而对授权用户到达率进行优化设置,减少了被中断认知用户的平均响应时间。ASHOUR 等^[6]以合作式频谱分配为基础,引入概率中继机制,在稳态条件下分析了认知用户与授权用户时延之间的折衷关系,对中继概率进行优化设置,保证了系统的吞吐量。WANG 等^[7]以流模型为基础,引入多通道多接口机制,使认知用户可以随机接入空闲信道,成功减少了认知用户的排队时延。在以上的性能分析研究中均假设认知用户的感知结果没有差错,即理想的。然而,在实际应用中,受衰落信道和随机噪声的影响^[8],认知用户在检测频谱状态时既可能产生漏检错误,也可能产生误警错误。

认知用户感知结果是影响系统性能的重要因素。考虑到感知结果的准确程度取决于感知频谱的时间和参与感知频谱的认知用户数量,BHOWMICK 等^[9]研究了一种合作频谱感知策略,在保证系统吞吐量的前提下,对检测时间进行了优化设置。然而,在分析系统吞吐量时,未考虑授权用户对认知用户数据传输的抢占行为。张晶等^[10]以多信道感知-传输模型为基础,研究了一种基于时隙的优化调度方案,若 N 条信道均处于忙碌状态,感知到授权用户到达的认知用户让出信道,返回缓存队列。通过对感知时间进行优化设置,在授权用户可容忍干扰概率的约束条件下,最大化认知用户的吞吐量。显然,被中断的认知用户全部返回缓存队列的策略会影响认知用户的响应性能。

本文针对以上所提问题,结合多种网络业务需求,提出一种概率反馈动态频谱分配策略。通过建立 2 类用户可能相互干扰的优先级排队模型,分析反馈概率和能量检测阈值对系统性能的影响,并进行能量检测阈值的优化设计。

2 概率反馈动态频谱分配策略及系统模型

2.1 概率反馈动态频谱分配策略

将时间轴分为长度间隔相等的时间序列,每个时间间隔称为一个时隙,认知用户和授权用户均以时隙为单位同步传输数据。认知用户数据分组到达系统后首先进入系统缓存,在中央控制器的协调下,处于缓存首位或传输过程中的认知用户数据分组在每个时隙的开始处检测信道状态。

处于缓存首部的认知用户数据分组检测信道上的能量值是否低于检测阈值,以决定能否接入信道开始数据传输。在信道被授权用户占用的情况下,若认知用户检测到的能量值低于检测阈值,则产生漏检错误,该认知用户数据分组接入信道,与授权用户数据分组相互碰撞,2 个数据的传输均告失败并离开系统。在信道未被授权用户占用的情况下,若认知用户检测到的能量值高于检测阈值,则产生误警错误,该认知用户数据分组无法接入信道,信道只能处于空闲状态。

传输过程中的认知用户数据分组检测信道上的能量值是否高于检测阈值,以决定能否占用信道继续数据传输。在有授权用户到达的情况下,若认知用户检测到的能量值低于检测阈值,则产生漏报错误,该认知用户将继续占用信道传输数据,与授权用户数据分组相互碰撞,2 个数据的传输均告失败离开系统。在授权用户未到达的情况下,若认知用户检测到的能量值高于检测阈值,则产生误警错误,该认知用户将释放信道,同样会使信道处于空闲状态。

为了折衷认知用户的吞吐量和平均时延,同时考虑被中断认知用户的不耐烦行为,被迫释放信道的认知用户数据分组可能返回系统缓存首位,也可能离开系统。一般来讲,用户对传输中断的忍耐程度要低于在缓存中对等待较长时间的忍耐程度,因此,令返回系统缓存的认知用户数据分组居于缓存的首位,一旦检测到信道上的能量值低于检测阈值将立即重新传输数据。

认知无线网络中概率反馈动态频谱分配策略的工作流程如图 1 所示。

2.2 系统模型

考虑离散时间排队模型,令数据分组的到达发生在时隙 n 的首端 (n, n^+) , 离开发生在时隙 n 的末端 (n^-, n) 。

假设授权用户和认知用户数据分组分别以参数为 λ_{pu} 和 λ_{su} 的 Bernoulli 过程到达,即一个时隙内以概率 λ_{pu} 到达一个授权用户数据分组,以概率 λ_{su} 到达一个认知用户数据分组;以概率 $\bar{\lambda}_{pu} = 1 - \lambda_{pu}$ 没有授权用户数据分组到达,以概率 $\bar{\lambda}_{su} = 1 - \lambda_{su}$ 没有认知用户数据分组到达。假设授权用户和认知用户数据分组的传输时间分别服从参数(服务率)为 μ_{pu} 和 μ_{su} 的几何分布,即一个时隙内以概率 μ_{pu} 完成一

个授权用户数据分组的传输, 以概率 μ_{su} 完成一个认知用户数据分组的传输; 以概率 $\bar{\mu}_{pu} = 1 - \mu_{pu}$ 继续传输授权用户数据分组, 以概率 $\bar{\mu}_{su} = 1 - \mu_{su}$ 继续传输认知用户数据分组。

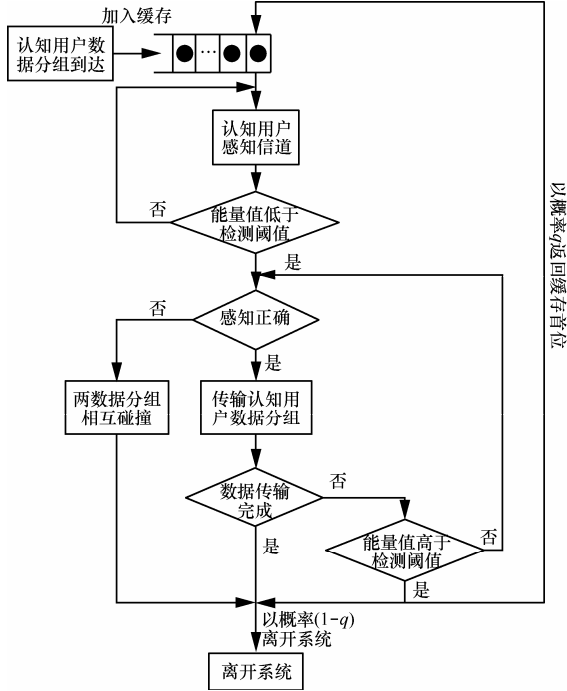


图 1 概率反馈动态频谱分配策略工作流程

将授权用户数据分组与认知用户数据分组抽象为 2 类顾客, 将信道抽象为服务台, 将数据传输抽象为服务, 基于授权用户对信道的抢占优先特点及被迫释放信道的认知用户的不耐烦行为, 考虑感知过程中的漏检错误及误警错误, 建立一种 2 类用户可能相互干扰的优先级排队模型。

将系统中认知用户数据分组的数量定义为水平, 信道的状态定义为阶段(0 表示信道处于空闲状态; 1 表示信道处于被授权用户占用状态; 2 表示信道处于被认知用户占用状态; 3 表示信道处于混乱状态)。令 $X(n^+)$ 和 $Y(n^+)$ 分别表示 n^+ 时刻系统所处的水平与阶段, $\{(X(n^+), Y(n^+)), n \geq 0\}$ 构成二维 Markov 过程, 其状态空间 Ω 表示为

$$\Omega = \{(x, y) : x \geq 0, y = 0, 1, 2, 3\}$$

3 系统模型解析

3.1 漏检率和误警率的计算

认知用户检测信道时可能出现 2 种错误, 即漏

检错误和误警错误。基于能量检测方法^[8], 漏检率 p_{md} 和误警率 p_{fa} 表示为

$$\begin{cases} p_{md} = 1 - P\{T(n) > \tau | Y(n) = 1\} \\ = 1 - Q\left(\left(\frac{\tau}{\sigma^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{N}{2\gamma + 1}}\right) \\ p_{fa} = P\{T(n) > \tau | Y(n) = 0\} \\ = Q\left(\left(\frac{\tau}{\sigma^2}\right)\sqrt{N}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $Q(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_v^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$, $T(n)$ 为 n 时刻认知用户检测到的信道能量值, τ 为能量检测阈值, N 为认知用户检测信道的次数, γ 为信噪比, σ 为噪声方差^[11]。

3.2 转移概率矩阵

设二维 Markov 过程 $\{(X(n^+), Y(n^+)), n \geq 0\}$ 的一步转移概率矩阵为 \mathbf{P} 。令 $\mathbf{P}(i, k)$ 表示系统由水平 i 转移至水平 k 的一步转移概率子阵。

1) 当 $i=0, k=0$ 时, 表示在 0 水平的基础上经过一步转移过程仍然没有认知用户数据分组到达, 此时的阶段转移只与授权用户是否到达与离去有关。令 $\mathbf{B}_{00} = \mathbf{P}(0, 0)$, 子阵 \mathbf{B}_{00} 表示为

$$\mathbf{B}_{00} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} & \bar{\lambda}_{su} \lambda_{pu} \\ \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} & \bar{\lambda}_{su} W_{pu} \end{pmatrix}$$

其中, $W_{pu} = \bar{\mu}_{pu} + \lambda_{pu} \mu_{pu}$ 表示信道中授权用户个数在非零的条件下保持不变的概率。

2) 当 $i=0, k=1$ 时, 表示在一步转移过程中有一个认知用户数据分组到达。系统的阶段转移取决于授权用户的行为以及认知用户的感知结果。令 $\mathbf{B}_{01} = \mathbf{P}(0, 1)$, 子阵 \mathbf{B}_{01} 表示为

$$\mathbf{B}_{01} = \begin{pmatrix} \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & \lambda_{su} \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{su} \lambda_{pu} p_{md} \\ \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} p_{fa} & \lambda_{su} W_{pu} \bar{p}_{md} & \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{su} W_{pu} p_{md} \end{pmatrix}$$

其中, $\bar{p}_{md} = 1 - p_{md}$, $\bar{p}_{fa} = 1 - p_{fa}$ 分别表示未发生漏检和未发生误警的概率。

3) 当 $i=1, k=0$ 时, 表示经过一步转移系统中的认知用户数据分组离去且没有新的认知用户数据分组到达。认知用户数据分组可能因为传输完成离开系统, 也可能因为感知到有授权用户到达而中断传输离开系统, 还可能因为与授权用户冲突而离开系统。当信道处于空闲状态或被授权用户占用

状态时，不可能发生认知用户数据分组的离去；当信道处于被认知用户占用状态时，阶段转移取决于授权用户是否到达、认知用户对信道的感知结果以及传输中断后认知用户的不耐烦行为；当授权用户与认知用户发生冲突时，信道处于混乱状态，此时的阶段转移仅取决于信道恢复正常后是否有授权用户到达。令 $\mathbf{B}_{10} = \mathbf{P}(1, 0)$ ，子阵 \mathbf{B}_{10} 表示为

$$\mathbf{B}_{10} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} (\mu_{su} + \bar{q} \bar{\mu}_{su} p_{fa}) & \bar{\lambda}_{su} \lambda_{pu} (\mu_{su} + \bar{q} \bar{\mu}_{su} \bar{p}_{md}) \\ \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} & \bar{\lambda}_{su} \lambda_{pu} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{su} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_{su} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{su} \mu_{su} + q \bar{\mu}_{su} \bar{\lambda}_{su} + \bar{q} \bar{\mu}_{su} \lambda_{su} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{su} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{pu} p_{md} \\ \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} p_{fa} & W_{pu} \bar{p}_{md} & \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} \bar{p}_{fa} & W_{pu} p_{md} \\ \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{pu} p_{md} \\ \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{pu} p_{md} \end{pmatrix}$$

5) 当 $k = i + 1 (i \geq 1)$ 时，表示在一步转移过程中没有认知用户数据分组离去且有一个新的认知用户数据分组到达。在阶段 0 和 1 状态下，认知用户数据分组不可能离开系统，其阶段转移只与授权用户的行为以及认知用户感知结果有关；在阶段 2 状态下，阶段转移还取决于认知用户对数据传输中断的不耐烦行为；在阶段 3 状态下，经过一步转移系统水平不可能增加。令 $\mathbf{A}_0 = \mathbf{P}(i, i + 1)$ ，子阵 \mathbf{A}_0 表示为

$$\mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & \lambda_{su} \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{su} \lambda_{pu} p_{md} \\ \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} p_{fa} & \lambda_{su} W_{pu} \bar{p}_{md} & \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{su} W_{pu} p_{md} \\ q \lambda_{su} \bar{\mu}_{su} \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & q \lambda_{su} \bar{\mu}_{su} \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \lambda_{su} \bar{\mu}_{su} \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \lambda_{su} \bar{\mu}_{su} \lambda_{pu} p_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\lambda}_{su} (\mu_{su} + \bar{q} \bar{\mu}_{su}) \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & \bar{\lambda}_{su} (\mu_{su} + \bar{q} \bar{\mu}_{su}) \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \bar{\lambda}_{su} \mu_{su} \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \bar{\lambda}_{su} \mu_{su} \lambda_{pu} p_{md} \\ \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} p_{fa} & \bar{\lambda}_{su} \lambda_{pu} \bar{p}_{md} & \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} \bar{p}_{fa} & \bar{\lambda}_{su} \lambda_{pu} p_{md} \end{pmatrix}$$

至此，系统一步转移概率矩阵 \mathbf{P} 的每个元素均已给出。矩阵 \mathbf{P} 可以表示为分块三对角矩阵如下

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{00} & \mathbf{B}_{01} & & & \\ \mathbf{B}_{10} & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 & & \\ & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 & \\ & & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix}$$

矩阵 \mathbf{P} 的结构表明，系统的状态转移只能发生

4) 当 $k = i (i \geq 1)$ 时，表示经过一步转移系统水平保持不变且大于 0，既可能是没有认知用户数据分组的到达或离开，也可能是有一个认知用户数据分组离去但又有一个新的认知用户数据分组到达。在阶段 0 和 1 状态下，认知用户数据分组不可能离开系统。在阶段 2 状态下，若认知用户数据分组没有传输完成，则必须保证没有新的认知用户数据分组到达；若认知用户数据分组因为传输完成或者对数据传输中断的不耐烦而离开系统，则必须保证有新的认知用户数据分组到达。在阶段 3 状态下，经过一步转移与授权用户冲突的认知用户数据分组以概率 1 离开系统。令 $\mathbf{A}_1 = \mathbf{P}(i, i)$ ，子阵 \mathbf{A}_1 表示为

6) 当 $k = i - 1 (i \geq 2)$ 时，表示在一步转移过程中有一个认知用户数据分组离开且没有新的认知用户数据分组到达。在阶段 0 和 1 状态下，认知用户数据分组不可能发生离去；在阶段 2 状态下，认知用户可能因为数据传输完成离开系统，也可能因为对数据传输中断的不耐烦离开系统，阶段转移取决于授权用户是否到达、认知用户对信道的感知结果以及对数据传输中断的不耐烦行为；在阶段 3 状态下，与授权用户冲突的认知用户数据分组必然离开系统，而阶段转移则取决于是否有授权用户到达以及认知用户的感知结果。令 $\mathbf{A}_2 = \mathbf{P}(i, i - 1)$ ，子阵 \mathbf{A}_2 表示为

在相邻水平处，则 $\{(X(n^+), Y(n^+)), n \geq 0\}$ 是一种拟生灭过程。令 $\boldsymbol{\Pi}_i$ 表示系统处在 i 水平的稳态概率向量，则 $\boldsymbol{\Pi}_i = (\pi_{i,0}, \pi_{i,1}, \pi_{i,2}, \pi_{i,3})$ 。令 $\boldsymbol{\Pi}$ 为系统的稳态概率分布，则 $\boldsymbol{\Pi} = (\boldsymbol{\Pi}_0, \boldsymbol{\Pi}_1, \boldsymbol{\Pi}_2, \dots)$ 。由平衡方程及归一化条件可得

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Pi} = \boldsymbol{\Pi} \mathbf{P} \\ \boldsymbol{\Pi} \mathbf{e} = 1 \end{cases}$$

其中, \mathbf{e} 为一个全 1 列向量。利用矩阵几何解(MGS, matrix-geometric solution)方法^[12], 可得系统的稳态概率分布 Π 。

4 系统性能指标

信道利用率 ψ 定义为单位时间内信道被认知用户或授权用户数据分组正常占用的概率。在阶段 0 状态下, 信道处于空闲状态; 在阶段 1 或 2 状态下, 信道处于被正常占用状态; 在阶段 3 状态下, 信道处于混乱状态。因此, 信道利用率 ψ 的表达式为

$$\psi = \sum_{i=0}^{\infty} (\pi_{i1} + \pi_{i2})$$

认知用户吞吐量 ϕ 定义为单位时间内成功传输认知用户数据分组的个数。认知用户数据分组在传输过程中可能会因为授权用户数据分组的到达而被中断, 被中断的认知用户数据分组又可能因为不耐烦而离开系统, 这部分数据分组最终没有成功传输; 在发生漏检错误的情况下, 认知用户数据分组与授权用户数据分组相互碰撞, 致使 2 个数据均不能成功传输。因此, 认知用户吞吐量 ϕ 的表达式为

$$\phi = \lambda_{su} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{su}} \left(\sum_{i=0}^{\infty} \pi_{i3} + \bar{q}\xi \right) \right)$$

其中, ξ 表示传输中的认知用户数据分组被中断的概率, $\xi = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_{i2} \bar{\mu}_{su} (\lambda_{pu} \bar{p}_{md} + \bar{\lambda}_{pu} p_{fa})$ 。

认知用户平均时延 ω 定义为认知用户数据分组从进入系统开始, 到离开系统为止所经历的平均时间长度。由 Little 公式^[12]可知, 认知用户平均时延 ω 的表达式为

$$\omega = \frac{1}{\lambda_{su}} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^3 i \pi_{ij}$$

授权用户干扰率 δ 定义为进入系统的授权用户被认知用户干扰的概率。当信道被一个授权用户数据分组占用时, 新到达的授权用户数据分组因无法进入系统而被阻塞, 阻塞概率为 $\sum_{i=0}^{\infty} \pi_{i1} \bar{\mu}_{pu} \lambda_{pu}$ 。受认知用户漏报错误的影响, 授权用户的数据传输可能被干扰, 使信道处于混乱状态, 即阶段 3 状态。因此, 授权用户干扰率 δ 的表达式为

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} \pi_{i3}}{\lambda_{pu} \left(1 - \sum_{i=0}^{\infty} \pi_{i1} \bar{\mu}_{pu} \lambda_{pu} \right)}$$

5 数值实验与系统仿真

为了进一步分析能量检测阈值和反馈概率对系统性能的影响, 通过数值实验和系统仿真定量刻画信道利用率、认知用户吞吐量、认知用户平均时延、授权用户干扰率等系统性能指标的变化趋势。

本文在 Matlab 7.0 环境下对所提策略进行数值实验和系统仿真实验。实验中, 设置漏检率 $p_{md} \leq 0.05$, 误警率 $p_{fa} \leq 0.5$ 。由式(1)对应地给出能量检测阈值 τ 的取值范围 $1.0 \leq \tau \leq 5.0$ 。仿真环境参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真环境参数	
参数名称	参数值
时隙/ms	1
物理层数据速率/Mbit·s ⁻¹	11
认知用户数据分组到达率	0.1
认知用户数据分组大小的均值/byte	1 760
认知用户数量/个	3 × 10 ⁶
授权用户数据分组到达率	0.1
授权用户数据分组大小的均值/byte	2 010
授权用户数量/个	3 × 10 ⁶
反馈概率	0~1.0
能量检测阈值	1.0~5.0
仿真时间/时隙	3 × 10 ⁶

利用表 1 中的仿真参数生成认知用户数据分组和授权用户数据分组的到达间隔、服务时间等随机数列。按照本文所提策略的工作原理, 采用蒙特卡罗方法进行系统仿真。

图 2 和图 3 分别给出了不同反馈概率 q 下信道利用率 ψ 和认知用户吞吐量 ϕ 随着能量检测阈值 τ 的变化趋势。

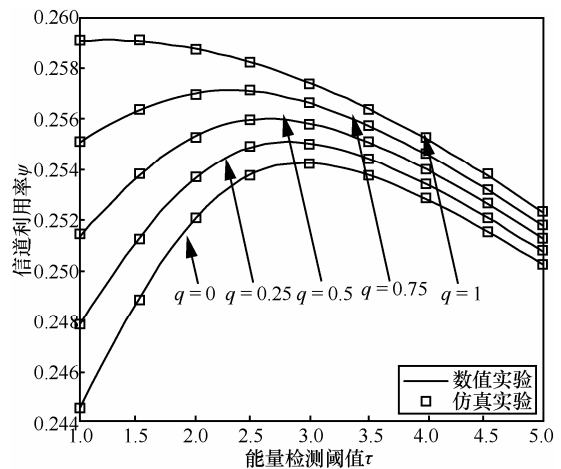


图 2 信道利用率的变化趋势

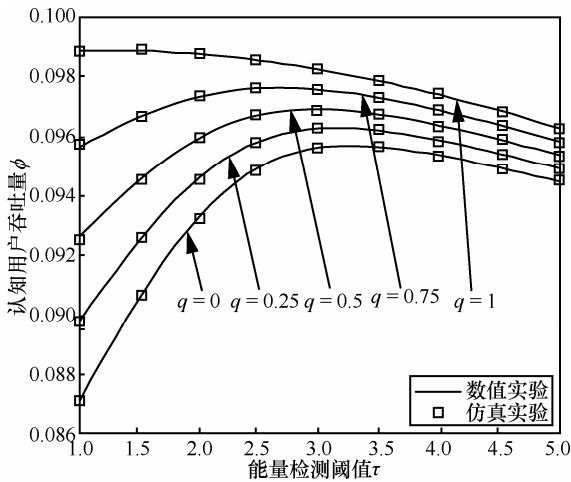


图 3 认知用户吞吐量的变化趋势

由图 2 和图 3 中的实验数据首先可以看出，理论分析结果与系统仿真结果一致。

图 2 的实验结果表明，在反馈概率固定的情况下，信道利用率随能量检测阈值的增大呈现出先增大再减小的趋势。能量检测阈值影响着漏检率和误警率的大小。在检测阈值较小时，误警率是影响信道利用率的主要因素，认知用户在检测信道时出现误警错误会使得信道处于空闲状态。随着能量检测阈值的增大，误警率降低，信道处于空闲状态的概率减小，信道利用率增大。在检测阈值较大时，漏检率成为影响信道利用率的主要因素，出现漏检错误会使信道处于混乱状态。随着能量检测阈值的增加，漏检率增大，认知用户数据分组与授权用户数据分组相互碰撞的可能性加大，信道处于混乱状态的概率变大，导致信道利用率降低。另一方面，对于固定的能量检测阈值，反馈概率越大，信道利用率也就越大。在本文所提策略中，传输中断后的认

知用户数据分组以一定概率返回缓存，反馈概率越大或系统中数据分组越多，信道被正常占用的时间也就越长，因此信道利用率提高。

图 3 的实验结果表明，在相同反馈概率的情况下，随着能量检测阈值的增大，认知用户吞吐量先增大再减小。在能量检测阈值较小时，误警率是影响认知用户吞吐量的主要因素。随着能量检测阈值的增大，误警率降低，传输中的认知用户数据分组被中断的可能性降低，中断后因不耐烦而离开系统的认知用户数据分组个数减小，认知用户吞吐量提高。在能量检测阈值较大时，漏检率是影响认知用户吞吐量的主要因素。随着能量检测阈值的增大，漏检率增大，认知用户与授权用户发生碰撞的概率增大，从而使数据分组成功传输的可能性减小，认知用户吞吐量降低。另一方面，在能量检测阈值固定的情况下，认知用户吞吐量随反馈概率的增大呈现出增大趋势。传输中断后的认知用户数据分组以一定概率返回系统缓存，反馈概率越大，中断后返回系统的数据分组越多，数据分组成功传输的可能性增加，认知用户吞吐量增大。

表 2 和表 3 分别描述了不同反馈概率 q 和不同能量检测阈值 τ 下认知用户平均时延 ω 和授权用户干扰率 δ 的变化趋势。

由表 2 和表 3 中的实验数据同样可以看出，理论分析结果与系统仿真结果一致。

表 2 的实验结果表明，在反馈概率固定的情况下，能量检测阈值越大，认知用户平均时延越小。随着能量检测阈值的增大，误警率减小，漏检率增大，而误警率的减小或漏检率的增大都会使系统中认知用户数据分组减少，因此，认知用户平均时延

表 2 认知用户平均时延的变化趋势

检测阈值 τ	反馈概率 $q=0$		反馈概率 $q=0.25$		反馈概率 $q=0.5$		反馈概率 $q=0.75$		反馈概率 $q=1$	
	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值
1.0	3.370 7	3.365 3	3.452 9	3.451 8	3.539 2	3.558 9	3.630 2	3.631 4	3.726 5	3.718 6
1.5	2.270 2	2.273 8	2.312 1	2.314 8	2.355 0	2.370 0	2.399 0	2.400 1	2.444 1	2.444 3
2.0	1.829 5	1.828 2	1.854 1	1.859 9	1.879 0	1.883 8	1.904 2	1.902 7	1.929 8	1.927 0
2.5	1.644 5	1.647 7	1.660 7	1.660 1	1.676 9	1.681 9	1.693 2	1.694 2	1.709 7	1.708 2
3.0	1.570 1	1.573 1	1.582 4	1.581 8	1.594 7	1.594 7	1.607 1	1.606 1	1.619 5	1.616 5
3.5	1.542 7	1.544 6	1.553 4	1.551 8	1.564 1	1.563 5	1.574 9	1.571 8	1.585 6	1.584 1
4.0	1.532 8	1.534 9	1.542 8	1.540 0	1.552 8	1.552 2	1.562 9	1.558 2	1.572 9	1.571 4
4.5	1.528 0	1.528 7	1.537 6	1.533 2	1.547 2	1.546 0	1.556 8	1.554 1	1.566 4	1.563 8
5.0	1.524 3	1.523 8	1.533 5	1.531 7	1.542 6	1.542 6	1.551 8	1.551 6	1.561 1	1.557 7

表 3 授权用户干扰率的变化趋势

检测阈值 τ	反馈概率 $q=0$		反馈概率 $q=0.25$		反馈概率 $q=0.5$		反馈概率 $q=0.75$		反馈概率 $q=1$	
	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值	理论值	仿真值
1.0	0.010 3	0.010 2	0.010 6	0.010 8	0.010 9	0.010 9	0.011 3	0.011 6	0.011 7	0.011 8
1.5	0.010 6	0.010 7	0.010 8	0.011 2	0.011 1	0.011 3	0.011 3	0.011 5	0.011 6	0.012 0
2.0	0.011 9	0.011 5	0.012 1	0.012 2	0.012 4	0.012 3	0.012 6	0.012 8	0.012 8	0.013 4
2.5	0.014 2	0.013 9	0.014 4	0.014 5	0.014 6	0.014 5	0.014 8	0.014 6	0.015 0	0.015 1
3.0	0.017 3	0.017 5	0.017 5	0.017 7	0.017 8	0.017 9	0.018 0	0.017 9	0.018 2	0.018 0
3.5	0.021 2	0.021 3	0.021 5	0.021 7	0.021 8	0.021 7	0.022 0	0.021 9	0.022 3	0.022 5
4.0	0.025 9	0.026 3	0.026 2	0.026 5	0.026 5	0.026 7	0.026 8	0.026 8	0.027 1	0.027 6
4.5	0.031 2	0.031 5	0.031 5	0.031 6	0.031 9	0.032 1	0.032 2	0.032 4	0.032 6	0.032 5
5.0	0.037 1	0.037 1	0.037 5	0.037 1	0.037 9	0.037 8	0.038 3	0.038 1	0.038 7	0.039 5

缩短。另一方面，在能量检测阈值固定的情况下，认知用户平均时延随反馈概率的增大呈现出增大趋势。传输中断后的认知用户数据分组以一定概率返回缓存，显然，反馈概率的增加会使系统中的数据分组增多，因此，认知用户平均时延增大。

表 3 的实验结果表明，对于固定的反馈概率，能量检测阈值越大，授权用户干扰率越大。随着能量检测阈值的增大，漏检率增大，而认知用户检测信道时出现漏检错误是干扰授权用户数据传输的根本原因。另一方面，在能量检测阈值不变的情况下，授权用户干扰率随反馈概率的增大呈现出上升趋势。反馈概率越大，认知用户数据分组传输中断后返回缓存的概率越大，授权用户被干扰的可能性也就越大。

在以上的实验中，反馈参数 q 代表被中断的认知用户数据分组返回缓存的概率。当 $q=0$ 时，被中断的认知用户数据分组全部离开系统，即无反馈；当 $q=1$ 时，被中断的认知用户数据分组全部返回缓存，即全概率反馈。相比于无反馈系统，本文所提策略提高了认知用户吞吐量，但在一定程度上增加了认知用户的平均时延和授权用户干扰率；相比于全概率反馈系统，本文所提策略降低了认知用户平均时延和授权用户干扰率，却减少了认知用户的吞吐量。

在实际应用中，需根据不同的网络业务特点，综合考虑认知用户吞吐量、平均时延及授权用户干扰率，设置反馈系数 q 的大小。

由以上的实验结果还可以看出，最大信道利用率对应的能量检测阈值与最大认知用户吞吐量对应的能量检测阈值不一致，同时，从认知用户平

均时延的角度来看，能量检测阈值越大越好，而对授权用户干扰率来说，能量检测阈值则越小越好。

6 系统优化

为了优化能量检测阈值，权衡系统的各性能指标，构造系统收益函数为

$$R(\tau) = r_1\phi - r_2\delta - r_3\omega$$

其中， r_1 为单位时间内成功传输一个认知用户数据分组所得的收入； r_2 为单位时间内认知用户干扰授权用户导致系统分组丢失引起的损失； r_3 为认知用户数据分组延迟单位时间所需要的费用。

以 $r_1 = 30$ ， $r_2 = 80$ ， $r_3 = 2$ 为例，不同的反馈概率 q 下，系统收益 $R(\tau)$ 随着能量检测阈值 τ 的变化趋势如图 4 所示。

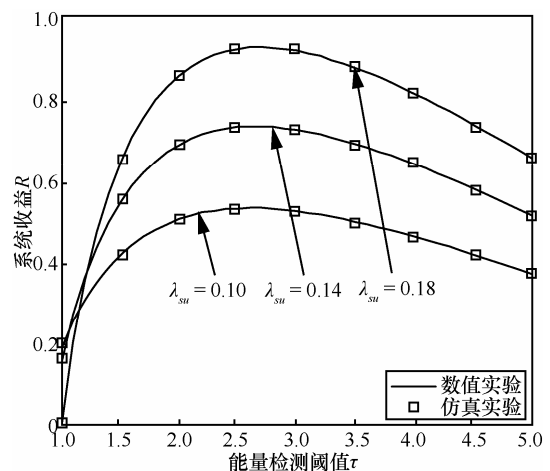


图 4 系统收益的变化趋势

由图 4 可知，对于所有的反馈概率，系统收益的变化趋势分成 2 个阶段。当能量检测阈值取值较

小时，认知用户吞吐量和认知用户平均时延是影响系统收益的主要因素：随着能量检测阈值的增大，认知用户吞吐量增大，认知用户平均时延减小，因此，系统收益呈现递增趋势。当能量检测阈值较大时，认知用户吞吐量和授权用户干扰率对系统收益起主导作用：随着能量检测阈值的增大，认知用户吞吐量减小，授权用户干扰率增大，因此，系统收益呈现下降趋势。

综上，存在一个最优的能量检测阈值 τ^* ，使系统的收益 $R(\tau)$ 最大，即 $\tau^* = \arg \max_{1 \leq \tau \leq 5} \{R(\tau)\}$ 。

表4给出了不同反馈概率 q 下系统的最大收益值 R_{\max} ，以及取得该最大收益时对应的最优能量检测阈值 τ^* 。

表4 能量检测阈值的优化结果

反馈概率 q	系统最大收益 R_{\max}	最优检测阈值 τ^*
0	3.647	2.85
0.25	3.668	2.80
0.50	3.691	2.70
0.75	3.715	2.65
1.00	3.741	2.55

7 结束语

为了兼顾认知用户的吞吐量和平均时延，提出了一种带有概率反馈的动态频谱分配策略。基于非理想感知结果，建立了2类用户可能相互干扰的优先级排队模型，并给出了信道利用率、认知用户吞吐量、认知用户平均延迟及授权用户干扰率等性能指标的表达式。通过数值实验和系统仿真定量分析了反馈概率与能量检测阈值对系统性能的影响，揭示了不同系统性能指标之间的折衷关系。实验结果表明本文所提策略能够适应不同网络业务需求，采用本文给出的能量检测阈值的最优方案，可以使系统收益最大化。

本文提出的概率反馈动态频谱分配策略及所构建的相关数学建模与性能分析工作，对认知无线网络动态频谱分配策略的选择具有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access[A]. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]. Honolulu, USA, 2007. 79-89.
- [2] GEIRHOFER S, TONG L, SADLER B M. Cognitive medium access: constraining interference based on experimental models[J]. IEEE

- Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 95-105.
- [3] LIANG Y C, CHEN K C, LI G Y, *et al.* Cognitive radio networking and communications: an overview[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(7): 3386-3407.
- [4] WANG B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 5-23.
- [5] ZHANG Y, JIANG T, ZHANG L, *et al.* Analysis on the transmission delay of priority-based secondary users in cognitive radio networks[A]. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing[C]. Hangzhou, China, 2013. 1-6.
- [6] ASHOUR M, EL-SHERIF A A, ELBATT T, *et al.* Cognitive radio networks with probabilistic relaying: stable throughput and delay tradeoffs[J]. arXiv preprint arXiv:1404.6112, 2014.
- [7] WANG S, ZHANG J, TONG L. Delay analysis for cognitive radio networks with random access: a fluid queue view[A]. International Conference on Computer Communications[C]. Zürich, Switzerland, 2010. 1-9.
- [8] 郭彩丽, 冯存燕, 曾志民. 认知无线网络技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 38-40.
- GUO C L, FENG C Y, ZENG Z M. Cognitive Radio Network Technologies and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 38-40.
- [9] BHOWMICK A, DAS M K, BISWAS J, *et al.* Throughput optimization with cooperative spectrum sensing in cognitive radio network[A]. International Advance Computing Conference[C]. Gurgaon, India, 2014. 329-332.
- [10] 张晶, 陆音, 高西奇等. 主用户干扰约束下的机会频谱接入感知-传输时隙优化调度[J]. 通信学报, 2013, 34(12): 42-48.
- ZHANG J, LU Y, GAO X Q, *et al.* Sensing-then-transmission slot scheduling optimization for opportunistic spectrum access under the interference constraint of primary users[J]. Journal on Communications, 2013, 34(12): 42-48.
- [11] LIANG Y C, ZENG Y, PEH E C Y, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [12] ALFA A S. Queueing Theory for Telecommunications[M]. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2010.118-121.

作者简介:



金顺福 (1966-), 女, 朝鲜族, 内蒙古满洲里人, 燕山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络资源分配与优化、排队论研究与应用等。

葛世英 (1989-), 女, 河北满城人, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为网络资源分配与优化。

霍占强 (1979-), 男, 河北邯郸人, 河南理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机系统及网络的性能分析、离散时间排队理论、计算机网络协议的分析。