

基于超时隙的集中式认知无线网络频谱分配策略及性能分析^①金顺福^{②*} 代羽^{***} 徐秀丽^{***}

(* 燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

(** 河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室 秦皇岛 066004)

(***) 燕山大学理学院 秦皇岛 066004)

摘 要 令授权用户在超时隙边界处抢占频谱,认知用户基于时隙传输数据,提出了一种基于超时隙的集中式频谱分配策略。结合当前时隙在超时隙中的编号及系统中认知用户数据包的数量,建立了一个二维 Markov 链模型。利用矩阵几何解方法求出系统的稳态分布,给出了认知用户的数据包平均延迟、吞吐量以及信道切换率等性能指标的表达式。实验结果表明,所提出的集中式认知无线网络频谱分配策略有效地提高了认知用户的吞吐量,降低了信道切换率。考虑不同的性能指标之间存在着折中关系,建立了一个系统收益函数,给出了超时隙大小的优化设置方案。

关键词 认知无线网络,频谱分配,集中控制,超时隙,Markov 链模型

0 引 言

随着现代通信技术的快速发展,频谱资源匮乏状况日渐突出,现有为特定无线服务划分固定频谱范围的政策虽然有效避免了不同业务之间的相互干扰,但也造成了频谱利用效率的低下。相关报告^[1]指出,在 4.9 GHz 频段仅有低于 3% 的授权用户在使用频谱。为了有效缓解频谱资源紧缺而整体利用效率低的局面,在认知无线电技术^[2]中,提出了对授权信道中的频谱空穴进行二次利用的思想。在认知无线网络中,认知用户广泛采用机会式频谱接入方式^[3]。网络采用集中式频谱分配策略,且核心思想是由中央控制器对空闲频谱进行统一管理,以有效避免认知用户间的无序竞争和由此带来的资源浪费及能量消耗。近年来,一些学者对集中式认知无线网络频谱分配策略及其系统性能进行了相关研究。Jeong 和 Yoo 提出了一种新的频谱“空洞”管理策略,通过在基站和认知节点之间建立控制信道,实现中继功能,保证了通信服务网络的稳定性^[4]。Eraslan 等基于拍卖理论,通过中央基站协调认知用户对频谱空域和时域的使用,提出了一种新的集中

式认知无线网络频谱分配策略。该策略将可用频谱的空域和时域看作拍卖资源,使用一次出价的密封投标拍卖机制对资源进行竞标^[5]。Tumulura 等提出了一种改进的集中式频谱分配策略:基于授权用户活动状态和信道质量,动态调整所要传输数据帧的大小;采用 Markov 链方法计算出单位时间内认知用户传输数据包数量的期望值,并根据该期望值分配相应授权信道^[6]。本文提出了一种基于超时隙的集中式频谱分配策略,建立一个在超时隙边界处传输可中断的二维 Markov 模型,进行了系统的性能研究与优化设计。

1 基于超时隙的集中式频谱分配策略及系统模型

1.1 基于超时隙的集中式频谱分配策略

假设认知无线网络中包含一条公共控制信道和若干条授权信道。其中,控制信道用于中央控制器和认知用户间彼此通信,传输认知用户的信道感知结果及控制中心的各种控制信息;授权信道简称为“信道”,用于传输授权用户和认知用户的数据。授权用户的数据传输以超时隙为单位。为避免对授权

① 国家自然科学基金(11201408)和河北省自然科学基金(F2012203093, A2013203148)资助项目。

② 女,1966 年生,教授,博士生导师;研究方向:无线网络资源管理,计算机通信网络的系统建模与性能分析,排队论应用等;联系人, E-mail: jsf@ysu.edu.cn
(收稿日期:2012-09-10)

用户造成干扰,认知用户在每个超时隙的边界处进行频谱感知,机会式地接入当前超时隙下空闲的授权信道,并以时隙为单位传输数据。

在每个超时隙的开始时刻,令网络中的所有认知用户感知授权用户的活动状态,并将感知结果通过控制信道发送给中央控制器,其感知项包括:认知用户的编号、信道的编号、相应信道上授权用户的活动状态等。中央控制器对所有收集到的感知结果进行数据分析与数据融合,得出当前时刻系统中各信道的特性,为相应的认知用户分配可用信道,并将分配信息组装成控制包,通过控制信道广播给各个认知用户。申请信道的认知用户在收到中央控制器发来的控制包后,在相应信道上传输数据。

在认知用户传输数据的过程中,首先需要判断当前时隙占用信道的认知用户数据包是否传输完毕。若此数据包传输完毕,且该认知用户仍有其他数据需要传输,则下一个数据包立即接入信道,并进行数据传输;若该认知用户的所有数据均完成传输,将释放所占用的信道资源。如果当前时隙占用信道的数据包没有传输完毕,则需要判断当前时隙是否为超时隙边界。由于授权用户的到达可能发生在任意一个超时隙边界处,为避免对授权用户造成干扰,在每个超时隙的开始处,认知用户都要对授权用户活动状态进行感知。如果感知到有授权用户到达,则中断当前数据包的传输,并丢弃该数据包,同时发送中断信息给中央控制器,中央控制器为该认知用户重新分配信道。如果没有授权用户的到达,则认知用户将继续进行数据传输。

1.2 系统模型的建立

认知用户机会式地接入授权信道,并基于时隙进行数据传输。假设认知用户的数据包以 Bernoulli 过程到达信道,即认知用户在一个时隙内以概率 λ 到达一个数据包,以概率 $\bar{\lambda} = 1 - \lambda$ 无数据包到达。令一个认知用户数据包的传输时间 S 服从参数为 μ ($0 \leq \mu \leq 1$) 的几何分布,即认知用户数据包在一个时隙内以概率 μ 完成传输并离开信道,以概率 $\bar{\mu} = 1 - \mu$ 继续占用信道。

令一个超时隙由 m 个时隙构成。假设授权用户数据包以 Bernoulli 过程到达信道,即授权用户在每个超时隙以概率 α 到达一个数据包,以概率 $\bar{\alpha} = 1 - \alpha$ 无数据包到达。约定被抢占的认知用户均能切换至其他可用信道,授权用户与认知用户数据包的到达过程相互独立,传输时间相互独立。

将系统中认知用户数据包的数量定义为系统的

水平,当前时隙在超时隙中的序号定义为系统的阶段。令 $X(t)$ 表示时刻 t 系统所处的水平, $Y(t)$ 表示时刻 t 系统所处的阶段,则 $\{X(t), Y(t)\}$ 构成一个离散时间的二维 Markov 过程。其状态空间为

$$\Omega = \{(x, y) : x \geq 0, 1 \leq y \leq m\}$$

当认知用户负载 $\rho = \lambda/\mu < 1$ 时,系统可以达到稳态。定义 $\pi_{i,j}$ 为稳态下系统处在 i 水平 j 阶段的概率,则 $\pi_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) = i, Y(t) = j\}$ 。

2 系统模型解析

设随机过程 $\{(X(t), Y(t)), t \geq 0\}$ 的一步转移概率矩阵为 P , $P(i, k)$ 表示系统由水平 i 转移至水平 k 的 m 阶一步转移概率子矩阵。

(1) 当系统经过一步转移仍保持在水平 0, 即 $i = 0, k = 0$ 时,系统的一步转移概率子矩阵为 $P(0, 0)$ 。记 $P(0, 0) = B$, 则矩阵 B 可表示为

$$B = \begin{pmatrix} 0 & \bar{\lambda} & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \bar{\lambda} \\ \bar{\lambda} & & & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) 当系统由水平 0 经一步转移至水平 1, 即 $i = 0, k = 1$ 时,系统的一步转移概率子矩阵为 $P(0, 1)$ 。记 $P(0, 1) = C$, 则矩阵 C 可表示为

$$C = \begin{pmatrix} 0 & \lambda & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \lambda \\ \lambda & & & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

(3) 当系统由水平 1 经一步转移至水平 0, 即 $i = 1, k = 0$ 时,系统的一步转移概率子矩阵为 $P(1, 0)$ 。记 $P(1, 0) = E$, 则矩阵 E 可表示为:

$$E = \begin{pmatrix} 0 & \bar{\lambda}\mu & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \bar{\lambda}\mu \\ \bar{\lambda}\mu + \bar{\lambda}\mu\alpha & & & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

(4) 当系统经过一步转移仍保持在水平 1, 即 $i = 1, k = 1$ 时,系统的一步转移概率子矩阵为 $P(1, 1)$ 。记 $P(1, 1) = A_1$, 则矩阵 A_1 可表示为

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & \lambda\mu + \bar{\lambda}\mu & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \lambda\mu + \bar{\lambda}\mu \\ \lambda\mu + \bar{\lambda}\mu\bar{\alpha} + \bar{\lambda}\mu\alpha & & & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(5) 当系统由水平 $i (i \geq 1)$ 经一步转移至水平 $k (k = i + 1)$ 时, 其一步转移概率子矩阵为 $\mathbf{P} (i, i + 1)$ 。记 $\mathbf{P} (i, i + 1) = \mathbf{A}_0$, 则矩阵 $\mathbf{A}_0$ 可表示为:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} 0 & \lambda\bar{\mu} & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \lambda\bar{\mu} \\ \lambda\bar{\mu}\bar{\alpha} & & & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

(6) 当系统由水平 $i (i \geq 2)$ 经一步转移至水平 $k (k = i - 1)$ 时, 其一步转移概率子矩阵为 $\mathbf{P} (i, i - 1)$ 。记 $\mathbf{P} (i, i - 1) = \mathbf{A}_2$, 则矩阵 $\mathbf{A}_2$ 可表示为

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & \bar{\lambda}\bar{\mu} & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \bar{\lambda}\bar{\mu} \\ \bar{\lambda}\bar{\mu} + \bar{\lambda}\bar{\mu}\bar{\alpha} & & & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

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 $\mathbf{P}$ 可表示为分块三对角矩阵如下:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{C} & & \\ \mathbf{E} & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 & \\ & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix}$$

令 Π_i 表示稳态下系统处在 i 水平的稳态概率向量, 则有 $\Pi_i = (\pi_{i,1}, \pi_{i,2}, \pi_{i,3}, \dots, \pi_{i,m})$ 。由平衡方程及归一化条件可得:

$$\begin{cases} \Pi = \Pi \mathbf{P} \\ \Pi e = 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中 e 为一个适当维数的全 1 列向量。

综上可知, 系统状态的转移只能发生在相邻水平处, 则 $\{(X(t), Y(t)), t \geq 0\}$ 是一种拟生灭过程。利用矩阵几何解方法^[7], 可得系统的稳态概率分布。

3 系统性能指标

认知用户数据包平均延迟 ω 定义为一个认知用户数据包从进入系统开始, 到结束传输离开系统为止所经历的平均时间长度。由 Little 公式^[8]可知, 数据包平均延迟的表达式为 $\omega = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^m \frac{i\pi_{i,j}}{\lambda}$ 。

认知用户的吞吐量 ζ 是衡量系统性能的重要指标之一, 定义为单位时隙内成功传输的认知用户数据包的个数。设一个认知用户的数据包在第 j 个时隙开始传输的概率为 A_j , 该数据包在传输过程中不被中断的概率为 B_j , 则有 $A_j = (\sum_{i=2}^{\infty} \mu\pi_{i,j-1} +$

$$\mu\lambda\pi_{1,j-1} + \lambda\pi_{0,j-1}) / (\sum_{i=2}^{\infty} \mu\pi_i + \mu\lambda\pi_1 + \lambda\pi_0); B_j = \sum_{k=1}^{\infty} \mu^{k-1} \mu\bar{\alpha} \left| \frac{k+j-2}{m} \right|。$$

认知用户吞吐量 ζ 可表示为 $\zeta = \lambda \sum_{j=1}^m A_j B_j$ 。

信道切换率 ψ 是衡量信道传输质量的重要指标之一, 定义为单位时隙内一个认知用户切换信道的次数。其表达式为 $\psi = \lambda (1 - \sum_{j=1}^m A_j B_j)$ 。

4 数值实验与仿真实验

为了进一步分析认知用户负载 ρ 、超时隙大小 m 及授权用户到达率 α 对系统性能的影响, 通过数值实验和系统仿真定量刻画认知用户的数据包平均延迟、吞吐量及信道切换率等性能指标的变化趋势。实验中设定认知用户数据包的传输率 $\mu = 5/6$ 。

图 1 刻画了不同的授权用户到达率 α 和超时隙大小 m 的情况下, 认知用户的数据包平均延迟 ω 随认知用户负载 ρ 的变化趋势。对于相同的授权用户到达率和超时隙, 认知用户的数据包平均延迟随着认知用户负载的增大而增大。对于相同的认知用户负载和相同的超时隙大小, 认知用户的数据包平均延迟随着授权用户的到达率增大而减小。对于相同的授权用户到达率和相同的认知用户负载, 认知用户的数据包平均延迟随着超时隙增大而增大。

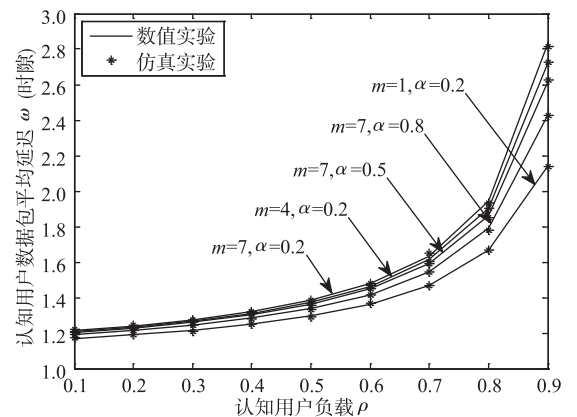


图 1 认知用户数据包平均延迟的变化趋势

图 2 揭示了不同的授权用户到达率 α 和超时隙大小 m 的情况下, 认知用户的系统负载 ρ 对吞吐量 ζ 的影响。对于相同的授权用户到达率和相同的超时隙大小, 认知用户吞吐量随着认知用户负载的增

大而增大。对于相同的认知用户负载和相同的超时隙大小,认知用户吞吐量随着授权用户的到达率的增大而减小。对于相同的授权用户到达率和相同的认知用户负载,认知用户吞吐量随着超时隙大小的增大而增大。

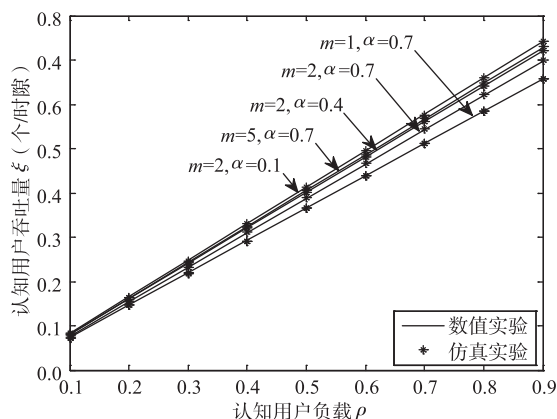


图2 认知用户吞吐量的变化趋势

图3反映了不同的授权用户到达率 α 和超时隙大小 m 的情况下,信道切换率 ψ 随认知用户负载 ρ 的变化趋势。对于相同的授权用户到达率和相同的超时隙大小,信道切换率随着认知用户负载的增大而增大。对于相同的认知用户负载和相同的超时隙大小,信道切换率随着授权用户的到达率的增大而增大。对于相同的授权用户到达率和相同的认知用户负载,信道切换率随着超时隙大小的增大而减小。

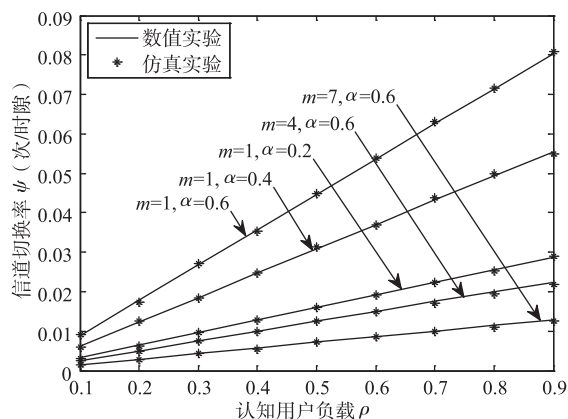


图3 信道切换率的变化趋势

综合图1至图3的实验结果可知,与基于时隙($m=1$)的集中式频谱分配策略相比,本文提出的基于超时隙($m>1$)的集中式频谱分配策略,有效提高了认知用户的吞吐量、降低了信道切换率,但认

知用户数据包的平均延迟略有增加。实验结果还表明,在进行超时隙大小的设置时,系统不同的性能指标之间存在着折中关系。

5 系统优化

为了实现系统收益的最大化,需要对超时隙的大小进行优化设计。为此,权衡系统的各性能指标,构造系统的收益函数为 $R = r_1\zeta - r_2\omega - r_3\psi$,其中, r_1 为单位时间内成功传输一个认知用户数据包所获得的预期收入; r_2 为认知用户数据包延迟单位时间所需要的费用; r_3 为单位时间内发生的数据传输中断引起的损失。

设 $\mu = 0.4, \alpha = 0.7, r_1 = 38, r_2 = 1.5, r_3 = 2.5$,不同的认知用户到达率 λ 下,系统收益 R 随着超时隙大小 m 的变化趋势如图4所示。

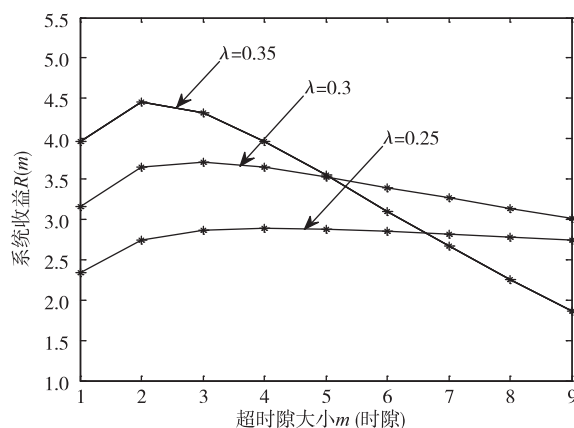


图4 系统收益的变化趋势

由图4可知,对于所有的认知用户到达率,系统收益的变化趋势分成两个阶段。当超时隙取值较小时,超时隙的增大会使成功传输数据包的数量增多,认知用户吞吐量变大,由此带来的单位时间所获得的收入增多,系统收益呈上升趋势;当超时隙取值较大时,超时隙的增大反而会使认知用户的数据包平均延迟增加,数据包延迟单位时间所需要的费用增多,使系统收益呈下降趋势。因此,存在一个最优的超时隙大小,使得系统的收益最大化。

当认知用户到达率为0.35时,超时隙大小的最优值为2,最大系统收益为4.45;当认知用户到达率为0.3时,超时隙大小的最优值为3,最大系统收益为3.64;当认知用户到达率为0.25时,超时隙大小的最优值为4,最大系统收益为2.9。

6 结 论

令认知用户机会式地接入授权信道,并基于时隙进行数据传输,授权用户则以超时隙为单位对信道具有抢占优先权,采用中央控制器对频谱分配实行统一管理,提出了一种新的基于超时隙的集中式认知无线网络频谱分配策略。建立了离散时间二维Markov链模型,给出了认知用户的数据包平均延迟、吞吐量以及信道切换率等性能指标的表达式,并进行了数值实验和仿真实验。实验结果表明,基于超时隙的集中控制频谱分配策略可有效解决认知用户传输被频繁中断的问题,提高认知用户的吞吐量,降低认知用户由于传输中断切换信道给系统带来的损失。在保证认知用户的数据包延迟和信道切换率的条件下,对超时隙大小进行优化设置,可使系统在经济层面得到最大收益。本文提出的集中控制频谱分配策略及相关的数学建模、性能分析与系统优化工作,为认知无线网络频谱分配算法的改进与优化提供了理论依据。为了进一步提高认知用户的响应性能,在今后的工作中,将进行带有接入阈值的集中式频谱分配策略及性能优化的研究。

参考文献

- [1] Federal Communications Commission. Fourth report and order and fifth further notice of proposed rulemaking. Washington, 2012
- [2] Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access. *Signal Processing Magazine*, 2007, 24(3): 79-89
- [3] Min A W, Kyu-han K, Singh J P, et al. Opportunistic spectrum access for mobile cognitive radios. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Computer Communications, Shanghai, China, 2011. 2993-3001
- [4] Jeong P J, Yoo M. Resource-aware rendezvous algorithm for cognitive radio networks. In: Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Communication Technology, Gangwon-Do, Korea, 2007. 1673-1678
- [5] Eraslan B, Gozupek D, Alagoz F. An auction theory based algorithm for throughput maximizing scheduling in centralized cognitive radio networks. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(7): 734-736
- [6] Tumuluru V K, Wang P, Niyato D. A novel spectrum-scheduling scheme for multichannel cognitive radio network and performance analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1849-1858
- [7] Alfa A S. Queueing Theory for Telecommunications. New York: Springer, 2010. 65-78, 118
- [8] 田乃硕,徐秀丽,马占友. 离散时间排队论. 北京: 科学出版社, 2008. 38-84, 144-147

A centralized spectrum allocation strategy based on super-slots for cognitive radio networks and its performance analysis

Jin Shunfu^{* **}, Dai Yu^{* **}, Xu Xiuli^{***}

(^{*} College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(^{**} Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Qinhuangdao 066004)

(^{***} College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

Letting primary users access spectrum with preemptive priority at the boundary of a super-slot, cognitive users transmit their data packets in a slot structure, a novel centralized spectrum allocation strategy for cognitive radio networks is proposed. Combining the sequence number of the current slot in a super-slot and the number of data packets for the cognitive users in the system, a two-dimensional Markov chain model is established. By using the method of matrix geometry solutions, the system model in steady state is analyzed, and the performance measures for the cognitive users, such as the throughput, the average latency of data packets and the spectrum switching ratio, are given accordingly. The experimental results show that the new centralized spectrum allocation strategy can improve the throughput, lower the spectrum switching ratio. Considering the trade-off between different performance measures, a profit function is constructed to optimize the number of slots in a super-slot.

Key words: cognitive radio network, spectrum allocation, centralized control, super-slot, Markov model