

## 带有接入阈值和超时隙的认知无线网络频谱分配策略

金顺福\* 代羽

(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)

**摘要:** 为了提高认知用户的响应性能,并降低传输中断的概率,通过限制进入系统的认知用户数据包数量,并令授权用户以超时隙为单位优先使用信道,提出一种带有接入阈值和超时隙的集中式认知无线网络频谱分配策略。结合时隙序号及系统中认知用户数据包的数量建立2维离散时间 Markov 链模型,给出认知用户数据包的平均延迟、吞吐量及信道切换率等性能指标的表达式。建立系统收益函数,针对不同的超时隙大小给出接入阈值的优化设置方案,并利用优化结果,进行系统实验。实验结果显示:合理的接入阈值和超时隙大小可以有效提高认知用户的传输质量。

**关键词:** 认知无线网络; 频谱分配; 接入阈值; 超时隙; 系统优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)08-1817-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01417

## A Spectrum Allocation Strategy with an Access Threshold and Super-slot in Cognitive Radio Networks

Jin Shun-fu Dai Yu

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to improve the response performance and decrease the transmission interruption probability, a centralized spectrum allocation strategy with an access threshold and super-slot for cognitive radio networks is proposed by limiting the number of data packets in the system and allowing the primary users access spectrum with a pre-emptive priority based on a super-slot. Through combining the sequence number of the specified slot in a super-slot and the number of data packets for the cognitive users in the system, a two-dimensional discrete-time Markov chain model is established presenting the formulas for the performance measures in terms of the average latency, the throughput and the channel switching ratio as well. A profit function is created; the access threshold is optimized for different super-slot sizes and the system experiments are conducted via the use of the optimization results. The experiment results show that a reasonable access threshold and a proper super-slot size can improve the transmission quality for the cognitive users.

**Key words:** Cognitive radio networks; Spectrum allocation; Access threshold; Super-slot; System optimization

### 1 引言

随着无线电通信技术的不断进步和无线业务的飞速发展,无线频谱的需求量逐渐增加,频谱资源则愈发短缺。相关的测量报告<sup>[1,2]</sup>显示,大部分授权频谱的利用率较低,静态频谱分配方案已不能满足现有无线数据业务的需求。因此,以提高空闲频谱利用率为出发点的频谱共享技术——认知无线电技术<sup>[3,4]</sup>受到了无线通信领域的广泛关注。动态频谱分配技术从网络结构上看,可分为分布式和集中式两

种。分布式结构下,认知用户通过竞争获取对空闲频谱的使用权<sup>[5]</sup>;在集中式频谱分配策略中,则由中央控制节点对空闲频谱进行分配,有效避免了认知用户间的无序竞争。

部分学者针对认知无线网络中的分布式频谱分配策略做了相关研究工作。Zhao 等人<sup>[6]</sup>针对基于 IEEE802.11 的认知无线网络,提出了一种分布式频谱分配策略,分别考虑单信道和多信道情形,分析了认知用户数量对非饱和吞吐量的影响。为了提高系统的吞吐量,Bae 等人<sup>[7]</sup>提出了一种改进的分布式频谱分配策略。该策略采用机会式接入信道的方式,基于当前时隙剩余时间片的大小,动态调度不同长度的认知用户数据包进行传输。在认知无线网络授权信道和非授权信道共存的情况下,针对被阻塞的

2013-09-17 收到, 2013-12-10 改回

国家自然科学基金(11201408)和河北省自然科学基金(2012203093)

资助课题

\*通信作者: 金顺福 jsf@ysu.edu.cn

认知用户是否重新进入退避过程, Zhu 等人<sup>[8]</sup>采用连续时间排队理论, 对认知用户数据包吞吐量及损失率进行了性能比较。

还有一些学者针对集中式频谱分配策略进行了相关的研究。Azarfar 等人<sup>[9]</sup>面向机会式频谱接入的认知用户, 建立了一种传输时间服从一般分布的排队模型, 给出了认知用户平均传输时间和发生中断后恢复传输所用时间的表达式, 并且对固定传输率和无优先权排队情况下的传输延迟进行了分析。考虑次级用户数据包的传输中断可能会产生较大延迟, Li 等人<sup>[10]</sup>提出了一种基于队列长度的个人最优策略, 得出了个人最优策略并不产生社会最优的结论。考虑认知无线电队列间的多样性以及信道间切换的成本, Bayhan 等人<sup>[11]</sup>从实现能源效率最大化的角度进行规划调度, 提出了一个多项式时间启发式算法。该算法把空闲频率分配给能够获得最高能源效率的认知无线电。

为了有效降低数据包的平均延迟, 本文通过控制认知用户数据包进入认知无线网络系统的数量, 同时令授权用户基于超时隙优先使用频谱, 提出一种带有接入阈值和超时隙的集中式频谱分配策略 (Centralized Spectrum Allocation Strategy with Access Threshold and Super-Slot, ATSS-CSAS)。采用离散时间排队理论, 将系统建模为一个 2 维 Markov 链, 导出认知用户数据包的平均延迟、吞吐量及信道切换率等性能指标的表达式。通过数值实验和系统仿真, 定量分析该频谱分配策略的系统性能, 给出接入阈值的优化方案。

## 2 带有接入阈值和超时隙的频谱分配策略

带有接入阈值和超时隙的集中式信道分配系统主要由以下几部分组成: 一条控制信道, 若干条授权信道, 一个控制中心, 若干认知用户和授权用户。其中, 授权信道又称为数据信道, 简称为“信道”。

### 2.1 系统的数据结构

为了记录系统的当前状态信息, 控制中心储存的相关数据表为: 感知数据表  $T_s$ , 用于收集认知用户在超时隙处对可感知范围内信道状态的感知结果; 空闲信道数据表  $T_f$ , 用于记录该网络中的可用信道的相关信息; 申请信道用户表  $T_u$ , 用于记录申请信道的认知用户信息; 信道分配表  $T_c$ , 用于记录控制中心对信道的分配情况。此外, 为了记录当前超时隙接入系统的数据包数量, 设置接入计数器  $Timer$ 。

### 2.2 认知用户的信道获取过程

为了降低认知用户由于传输中断而切换信道的频率, 提高认知用户数据包的吞吐量, 结合授权用

户对频谱利用率较低的客观现象, 令授权用户和认知用户分别基于超时隙和时隙进行数据传输。其中, 时隙是认知用户数据传输的基本时间单位, 超时隙则是由多个连续时隙组成的固定时间段。在超时隙的开始时刻, 网络中的所有认知用户对其可感知的信道资源进行感知, 并将感知结果通过控制信道发送到控制中心。

控制中心首先将感知结果存储到感知数据表  $T_s$  中, 再对所收集到的感知结果进行数据分析, 得出当前时刻系统中空闲信道的信道编号及申请信道的认知用户编号, 分别存放于空闲信道数据表  $T_f$  及申请信道用户表  $T_u$ 。控制中心利用  $T_f$ ,  $T_u$  两表中的数据为相关认知用户分配可用信道。控制中心把信道的分配情况记录在信道分配表  $T_c$  中, 并将分配信息组装成控制包, 通过控制信道进行广播。

### 2.3 认知用户数据包的接入过程

申请信道的认知用户在收到控制中心发来的控制包后, 在相应信道上传输数据。通过设置接入阈值控制进入系统的认知用户数据包数量, 目的是减少认知用户数据包的平均延迟, 降低由于数据包逗留系统而引起的成本开销。

令接入阈值为  $H$ 。一个新到达的认知用户数据包能否进入系统, 首先需要考虑当前时隙占用信道的数据包是否传输完毕。如果传输完毕, 则接入计数器  $Timer$  减 1, 更新后的接入计数器  $Timer$  必然小于系统的接入阈值  $H$ 。因此, 对于当前时隙有新认知用户数据包到达, 且信道中有认知用户包传输离去的情况, 无论是否有授权用户抢占该信道, 新到达的认知用户数据包都能够进入系统。如果当前时隙没有数据包离开信道, 则需查看接入计数器  $Timer$  的状态。如果接入计数器  $Timer$  已达到阈值  $H$ , 则新到达的认知用户数据包将被系统阻塞; 否则, 新到达的认知用户数据包能够进入系统。对于进入系统的认知用户数据包能否立即接入信道传输, 需要考虑进入时刻的接入计数器  $Timer$ 。若接入计数器  $Timer$  为 0, 则该数据包可以立即在信道上传输; 否则, 该数据包进入系统的缓存空间排队等待传输。

### 2.4 认知用户数据包的传输过程

考虑到授权用户的到达可能发生在任意一个超时隙的边界处, 为避免对授权用户造成干扰, 成功接入信道的认知用户在每一个超时隙的开始处都要对信道状态进行感知, 以便获取拥有该信道的授权用户的状态信息。如果处于传输状态中的认知用户在超时隙边界感知到有授权用户到达, 则中断正在传输的数据包, 并将该数据包丢弃。同时, 该认知

用户发送中断信息给控制中心，控制中心为该认知用户重新分配可用信道。如果在超时隙边界没有授权用户到达，则认知用户将继续进行数据传输。

### 3 系统模型的建立及解析

#### 3.1 系统模型的建立

假设认知用户一定能够从控制中心得到可用信道进行数据传输，考虑到授权用户对信道的抢占优先权，建立一个传输过程可中断的排队模型。在该模型中，存在一个接入阈值  $H$ ，当系统中认知用户数据包数量达到  $H$  时，新到达的认知用户数据包不再进入系统。

假设认知用户数据包以 Bernoulli 过程到达系统。令系统在每一个时隙的首端以概率  $\lambda$  到达一个认知用户数据包，以概率  $\bar{\lambda} = 1 - \lambda$  无到达。假设授权用户数据包也以 Bernoulli 过程到达系统。令系统在每一个超时隙的开始处以概率  $\alpha$  到达一个授权用户数据包，以概率  $\bar{\alpha} = 1 - \alpha$  无到达。由于授权用户数据包对信道具有优先使用的权利，因此，授权用户数据包的到达将中断信道中认知用户数据包的传输。约定两种类型数据包的到达过程相互独立。令一个认知用户数据包的传输时间  $S$  服从参数为  $\mu$ ， $0 < \mu < 1$  的几何分布，即在一个时隙内一个认知用户数据包以概率  $\mu$  完成传输，传输完成的认知用户数据包在时隙末端立刻离开信道；以概率  $\bar{\mu} = 1 - \mu$  未完成传输，即该认知用户数据包继续占用信道。

#### 3.2 系统模型的解析

当阈值  $H = 1$  时，该系统退化为一个认知用户数据包无等待的纯消失系统。到达的认知用户数据包或者立刻接入信道传输，或者被系统阻塞而离开。当阈值  $H \geq 2$  时，若有认知用户数据包到达系统，且接入计数器已达到阈值  $H$ ，则该数据包被系统阻塞。只有未受到阻塞的认知用户数据包才有可能发生等待，即该系统是一个既有等待又有消失的混合制系统。显然，纯消失系统是混合制系统的一个特例。因此，本文针对接入阈值  $H \geq 2$  的情况进行系统模型分析。将系统中认知用户数据包的数量定义为水平，当前时隙在超时隙中的序号定义为阶段。

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 2 维马尔可夫过程。其状态空间为  $\Omega = \{(x, y) : x \geq 0, 1 \leq y \leq m\}$ 。

设随机过程  $\{(X(t), Y(t)), t \geq 0\}$  的一步转移概率矩阵为  $P$ ，元素  $P(i, k)$  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。针对不同的阈值  $H$ ，对  $P(i, k)$  进行分析如下。

(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  $P(0, 0)$ 。令  $P(0, 0) = B$ ，则  $B$  可表示为

$$B = \begin{pmatrix} 0 & \bar{\lambda} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \bar{\lambda} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 & \bar{\lambda} \\ \bar{\lambda} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{m \times m} \quad (1)$$

(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  $P(0, 1)$ 。令  $P(0, 1) = C$ ，则  $C$  可表示为

$$C = \begin{pmatrix} 0 & \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \lambda & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 & \lambda \\ \lambda & 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{m \times m} \quad (2)$$

(3) 当系统由水平  $i = 1, 1 \leq i \leq H - 1$  经一步转移至水平  $k, k = i - 1$  时，系统的一步转移概率子矩阵为  $P(i, i - 1)$ 。令  $P(i, i - 1) = A_2$ ，则  $A_2$  为

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & \bar{\lambda}\mu & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \bar{\lambda}\mu & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 & \bar{\lambda}\mu \\ \bar{\lambda}\mu + \bar{\lambda}\bar{\mu}\alpha & 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{m \times m} \quad (3)$$

(4) 当系统由水平  $i, 1 \leq i \leq H - 1$  经一步转移保持在水平  $i$  时，系统的一步转移概率子矩阵为  $P(i, i)$ 。令  $P(i, i) = A_1$ ，则  $A_1$  可表示为

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



据包在其传输过程中经过超时隙的边界处，且被授权用户数据包抢占信道，那么该认知用户数据包的传输会被中断，相应的认知用户立即切换到控制中心为其分配的其它空闲信道上继续进行数据传输。显然信道切换率等于进入系统的认知用户数据包在传输过程中被中断的概率。信道切换率  $\psi$  表示为

$$\psi = (\lambda - \phi) \left( 1 - \sum_{j=1}^m A_j B_j \right) \quad (15)$$

## 5 系统优化

不难推测，接入阈值的引入能够降低认知用户数据包的平均延迟，但认知用户数据包的吞吐量也会降低；另一方面，超时隙机制的引入，能够降低信道切换率，并提高认知用户数据包的吞吐量，但又会在一定程度上使授权用户响应速度变缓。因此，合理设置接入阈值和超时隙大小成为优化该频谱分配策略的关键因素。权衡系统的各性能指标，并考虑认知用户数据包查找可用存储空间的能量消耗和超时隙对授权用户响应性能的影响，构造系统的收益函数  $R(H)$  如下：

$$R(H) = \beta_1 \zeta - \beta_2 \omega - \beta_3 \psi - \beta_4 (\lambda - \zeta - \psi) - \beta_5 (H + 1) / 2 - \beta_6 m \alpha \quad (16)$$

其中， $\beta_1$  为单位时间成功传输一个认知用户数据包所获得的预期收入； $\beta_2$  为认知用户数据包延迟单位时间所需要的费用； $\beta_3$  为系统在单位时间内由于传输过程被中断而切换信道所引起的费用； $\beta_4$  为单位时间内一个认知用户数据包发生到达，但由于系统中的认知用户数据包已达到阈值而被阻塞所造成的损失； $\beta_5$  为单位时间内进入系统的认知用户数据包每次查找可用存储空间所消耗的费用； $\beta_6$  为超时隙大小对授权用户系统性能的影响因子。以  $\beta_1 = 40$ ， $\beta_2 = 6$ ， $\beta_3 = 2$ ， $\beta_4 = 2$ ， $\beta_5 = 4$ ， $\beta_6 = 1$ ， $\rho = 0.9$  及  $\alpha = 0.6$  为例，针对不同的超时隙大小  $m$ ，系统收益  $R(H)$  随着接入阈值  $H$  的变化趋势，如图 1 所示。

从图 1 可以看出，对于相同的超时隙大小，系统收益随着接入阈值的变化趋势分成两个阶段。当接入阈值取值较小时，接入阈值的增大会使认知用户数据包的吞吐量提高，单位时间成功传输认知用户数据包带来的收益增加，系统收益呈上升趋势；当接入阈值取值较大时，接入阈值的增大会使认知用户数据包的平均延迟增加，信道切换率也会提高，查找可用存储空间的能量消耗也越大，因此，系统中费用增多，系统收益呈现下降趋势。

对于所有的超时隙大小，收益函数均存在最大值，且能够对应取得最优的接入阈值。当超时隙大

小为 2 时，接入阈值的最优值为 4，系统收益的最大值为 21.04；当超时隙大小为 4 时，接入阈值的最优值为 6，系统收益的最大值为 26.38；当超时隙大小为 6 时，接入阈值的最优值为 6，系统收益的最大值为 28。

## 6 数值实验与仿真实验

利用系统优化的结果确定接入阈值  $H$  及超时隙大小  $m$ ，针对 ATSS-CSAS 策略进行数值实验，并将 ATSS-CSAS 策略与基于超时隙的频谱分配策略 (Spectrum Allocation Strategy based on Super-Slot, SS-SAS) 进行性能比较。为了验证系统模型建立的合理性和解析结果的正确性，采用事件驱动法，利用 MATLAB R2010a 进行仿真实验，每次仿真运行 300,000 个时隙。考虑到非稳定状态下的仿真结果可能会带来一定程度的误差，丢弃起始的 2,000 个时隙内和最后的 2,000 个时隙内产生的数据。

针对基于 Wi-Fi 技术的无线传感器网络，遵循 IEEE 802.11 b/g 标准，选取 2.4 GHz 频段，根据文献[15-17]，设置实验中的公共参数，如表 1 所示。

表 1 两种策略下的公共参数设置

参数名称	参数值
时隙	1 ms
数据包大小的均值	1650 Byte
物理层数据速率	11 Mbps
授权用户数据包到达率	0.1-0.9
认知用户数据包到达率	0.75

不同接入阈值  $H$  和超时隙大小  $m$  下，认知用户数据包的平均延迟  $\omega$  随授权用户数据包到达率  $\alpha$  的变化趋势如图 2 所示。

从图 2 可知，SS-SAS 策略和 ATSS-CSAS 策略下的认知用户数据包的平均延迟均随着授权用户数据包到达率的增大而减小。对于相同的接入阈值和超时隙大小，授权用户数据包到达率的增大，会造成认知用户数据包传输过程发生中断的次数增加，中断丢弃的认知用户数据包数量增多，使得系统中认知用户数据包的平均等待时间减少，认知用户数据包的平均延迟因此降低。图 2 的比较结果表明，对于相同的超时隙大小和授权用户数据包到达率，ATSS-CSAS 策略下的认知用户数据包平均延迟要低于 SS-SAS 策略下的认知用户数据包平均延迟。这是因为接入阈值的引入影响了进入系统的认知用户数据包数量，使得系统中认知用户数据包的平均等待时间减少，认知用户数据包的平均延迟也会减少。由图 2 还可以看出，随着授权用户数据包到达

率的增加,与 SS-SAS 策略相比,ATSS-CSAS 策略在认知用户响应性能方面优势愈发明显。

图 3 描述的是不同接入阈值  $H$  和超时隙大小  $m$  下,认知用户数据包的吞吐量  $\zeta$  随授权用户数据包到达率  $\alpha$  的变化趋势。

从图 3 可以看出,SS-SAS 策略和 ATSS-CSAS 策略下的认知用户数据包的吞吐量均随着授权用户数据包到达率的增大而降低。对于相同的接入阈值和超时隙大小,授权用户数据包到达率越大,认知用户数据包在超时隙处被中断的概率越大,传输过程发生中断的认知用户数据包数量越多,成功传输的认知用户数据包的数量相应减少,认知用户数据包的吞吐量因此降低。图 3 的比较结果表明,对于相同的超时隙大小和授权用户数据包到达率,ATSS-CSAS 策略下的认知用户数据包的吞吐量要低于 SS-SAS 策略下的认知用户数据包吞吐量。主要原因是接入阈值的引入,使得进入系统的认知用户数据包相对减少,则成功传输的数据包的数量有所降低。从图 3 还可以看出,随着授权用户数据包到达率的增加,与 SS-SAS 策略相比,ATSS-CSAS 策略在认知用户数据包的吞吐量方面略有不足。

表 2 针对不同的接入阈值  $H$  和超时隙大小  $m$ ,从信道切换率的角度,对 ATSS-CSAS 策略与 SS-

SAS 策略进行了性能比较。

从表 2 可知,SS-SAS 策略和 ATSS-CSAS 策略下的信道切换率均随着授权用户数据包到达率的增大而增加。对于相同的接入阈值和超时隙大小,授权用户数据包到达率的增大,会造成传输被中断的认知用户数据包数量随之增加,使得认知用户切换信道的次数增多,从而信道切换率随之增加。表 2 的比较结果表明,对于相同的超时隙大小和授权用户数据包到达率,ATSS-CSAS 策略下的信道切换率略低于 SS-SAS 策略下的信道切换率。这是因为接入阈值的引入,使得进入系统的认知用户数据包数量有所减少,认知用户数据包传输过程发生中断的可能性减小,认知用户切换信道的概率随之变小,信道切换率因此降低。

由表 2 还可以看出,随着授权用户数据包到达率的增加,与 SS-SAS 策略相比,ATSS-CSAS 策略在信道切换率方面略有优势。

综合图 2、图 3 及表 2 的实验结果可知,本文提出的 ATSS-CSAS 策略,有效降低了认知用户数据包的平均延迟和信道切换率,而本策略所要付出的代价是认知用户数据包的吞吐量有所降低。表明该策略更适用于对实时性比较敏感,而对丢失率没有过多要求的网络业务,如视频会议等多媒体业务。

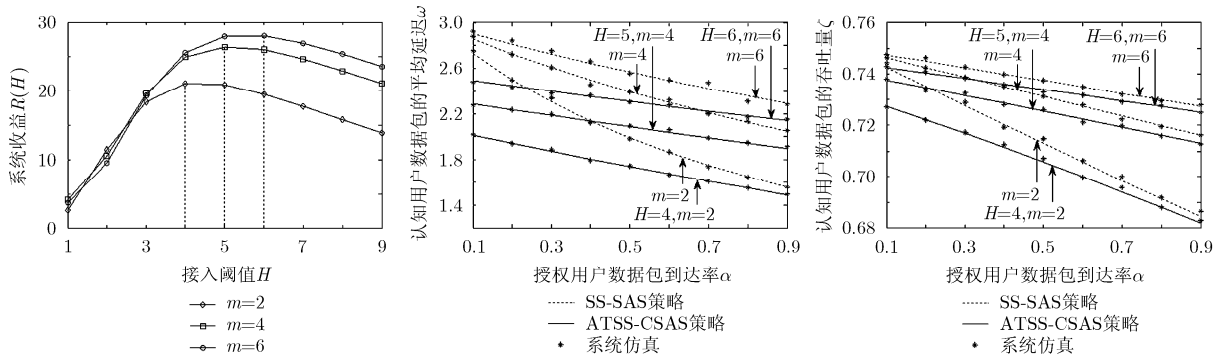


图 1 系统收益随接入阈值的变化趋势 图 2 认知用户数据包的平均延迟的变化趋势 图 3 认知用户数据包的吞吐量的变化趋势

表 2 ATSS-CSAS 策略与 SS-SAS 策略下信道切换率的比较

授权用户数据包到达率 $\alpha$	超时隙大小 $m$	ATSS-CSAS 策略			SS-SAS 策略	
		接入阈值 $H$	数值实验	仿真实验	数值实验	仿真实验
0.1	2	4	0.00732	0.00735	0.00748	0.00758
	4	5	0.00371	0.00359	0.00375	0.00371
	6	6	0.00248	0.00247	0.00250	0.00253
0.4	2	4	0.02926	0.02834	0.02962	0.02998
	4	5	0.01488	0.01421	0.01500	0.01447
	6	6	0.00996	0.01000	0.01001	0.01009
0.7	2	4	0.05101	0.04673	0.05134	0.05058
	4	5	0.02611	0.02556	0.02627	0.02558
	6	6	0.01747	0.01749	0.01754	0.01782

## 7 结束语

动态频谱分配策略是认知无线网络领域的研究热点。本文引入阈值的设计思想, 结合超时隙技术, 给出了一种新的集中式认知无线网络频谱分配策略。通过建立一个离散时间 Markov 链模型, 导出了认知用户数据包的平均延迟、吞吐量, 及信道切换率等性能指标的表达式。通过构建系统的收益函数, 给出了接入阈值的优化设置方案, 并利用系统优化的结果, 结合数值实验和仿真实验研究了各性能指标随系统参数的变化趋势。实验结果验证了本文所提出的频谱分配策略的合理性和有效性。本文的研究工作为进一步进行动态频谱分配算法的改进与优化提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] McHenry M. Spectrum white space measurements[OL]. [http://www.newamerica.net/files/nafmigration/archive/Doc\\_File\\_185\\_1.pdf](http://www.newamerica.net/files/nafmigration/archive/Doc_File_185_1.pdf), 2003.
- [2] Domenico A D, Strinati E C, and Benedetto M G D. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Communications Surveys and Tutorials*, 2012, 14(1): 21-44.
- [3] 胡浩, 周文安, 宋俊德. 认知无线电中基于 SA-MIMO-OFDM 的动态频谱共享方案[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(7): 1548-1551.  
Hu Hao, Zhou Wen-an, and Song Jun-de. Dynamic spectrum sharing scheme based on spectrum adaptation and MIMO-OFDM in cognitive radio[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(7): 1548-1551.
- [4] Azarfar A, Frigon J F, and Sanso B. Improving the reliability of wireless networks using cognitive radios[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2012, 14(2): 338-354.
- [5] Chum S H and La R J. Secondary spectrum trading-Auction-based framework for spectrum allocation and profit sharing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2013, 21(1): 176-189.
- [6] Zhao Y, Jin S, and Tian N. Non-saturated throughput analysis of IEEE 802.11-based cognitive radio networks[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2012, 19(6): 6-13.
- [7] Bae Y H, Alfa A S, and Choi B D. Performance analysis of modified IEEE 802.11-based cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Communications Letters*, 2010, 14(10): 975-977.
- [8] Zhu D B and Choi B D. Performance analysis of CSMA in an unslotted cognitive radio network with licensed channels and unlicensed channels[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, (1): 1-7.
- [9] Azarfar A, Frigon J F, and Sanso B. Analysis of cognitive radio networks based on queuing model with server interruptions[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, 2012: 1703-1708.
- [10] Li H and Han Z. Socially optimal queuing control in cognitive radio networks subject to service interruptions: to queue or not to queue?[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(5): 1656-1666.
- [11] Bayhan S and Alagoz F. Scheduling in centralized cognitive radio networks for energy efficiency[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(2): 582-595.
- [12] 袁慰平, 孙志忠, 吴宏伟, 等. 计算方法与实习[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005: 71-80.  
Yuan Wei-ping, Sun Zhi-zhong, Wu Hong-wei, et al. *An Elementary Numerical Analysis*[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2005: 71-80.
- [13] Zhang Y. Dynamic spectrum access in cognitive radio wireless networks[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Beijing, 2008: 4927-4932.
- [14] Zhao Y, Jin S, and Yue W. Performance optimization of a dynamic channel bonding strategy in cognitive radio networks[J]. *Pacific Journal of Optimization*, 2013, 8(3): 577-594.
- [15] 韩霜. 基于 Wi-Fi 的无线传感器网络节点的设计及应用[D]. [硕士论文], 北京邮电大学, 2010.  
Han Shuang. Design and implementation of a Wi-Fi based wireless sensor network node[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [16] 吴呈瑜, 何晨, 蒋铃鸽. 认知无线网络中的频谱切换性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(11): 2590-2595.  
Wu Cheng-yu, He Chen, and Jiang Ling-ge. Performance analysis of spectrum handoff in cognitive radio networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2590-2595.
- [17] Kim K J, Kwak K S, and Choi B D. Performance analysis of opportunistic spectrum access protocol for multi-channel cognitive radio networks[J]. *International Journal of Communications and Networks*, 2013, 15(1): 77-86.

金顺福: 女, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为网络理论与技术、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。

代羽: 女, 1987年生, 硕士生, 研究方向为认知无线网络资源分配。