

带有组间切换的认知无线网络混合式信道分配策略及性能研究

金顺福^{1,2}, 解洪亭³, 赵媛^{1,2}

(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. 山东中医药大学附属医院网络中心, 山东 济南 250011)

摘要: 针对认知无线网络中的非实时通信业务, 综合使用随机退避方式和控制中心调度方式, 考虑两组授权信道, 提出一种带有组间切换机制的混合式信道分配策略。基于认知用户数据分组数量及两组授权信道上分别传输的授权用户数据分组数量, 建立三维 Markov 模型, 导出认知用户的阻塞率、数据丢失率及平均延迟等性能指标表达式。数值实验和系统仿真的结果表明, 随着退避时间的变化, 不同性能指标间存在一定的折衷关系, 通过选取最低的系统成本, 给出退避参数的优化设置方案。

关键词: 认知无线网络; 混合式频谱分配; 组间切换; Markov 模型; 退避时间

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)12-0011-09

Hybrid channel allocation strategy with group switching and performance evaluation in cognitive radio network

JIN Shun-fu^{1,2}, XIE Hong-ting³, ZHAO Yuan^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China;

3. Affiliated Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250011, China)

Abstract: Considering the non-real-time traffic in cognitive radio networks and two groups of licensed channels, combining the methods of random back-off and control center schedule, a novel hybrid channel allocation strategy with channel group switching mechanism was proposed. Taking into account the total number of the cognitive packets and the numbers of the primary packets on each group channels, a three-dimensional Markov model was constructed, some cognitive user measures in terms of the blocking ratio, the packet loss ratio and the average delay were derived accordingly. Numerical results with analysis and simulation show that, as the back-off time changes, a tradeoff exists between different performance measures. Therefore, by minimizing the system cost, the back-off time can be optimized.

Key words: cognitive radio network; hybrid spectrum allocation; group switching; Markov model; back-off time

1 引言

频谱是实现无线通信的重要媒介, 频谱短缺问题一直是影响无线通信技术发展的屏障之一。相关研究发现, 在采用静态方式分配出去的授权频谱中, 只有 6% 左右处于活动状态^[1,2], 而公用的开放频谱则被频繁使用着。当前, 动态频谱分配机制及应用已成为无线通信领域的一项重要研究课题, 承载着解决频谱短

缺与授权频谱利用率低之间矛盾的使命。而在以认知无线电理论为基础的认知无线网络中, 授权频谱中出现的频谱空穴被具有感知功能的认知用户机会式地占用, 从而提高授权频谱的利用率。

认知无线网络中信道分配策略主要包括分布式和集中式 2 种类型。在采用分布式信道分配策略的系统中, 各认知用户对周围信道进行感知, 然后根据各自的感知结果或者通过与周围认知用户交

收稿日期: 2012-07-27; 修回日期: 2013-11-10

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

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

互感知结果,独立地做出信道接入决策^[3]。在采用集中式信道分配策略的系统中,控制中心接收认知用户的信道感知结果,通过分析各信道的当前状态,对信道进行全局优化配置。

认识无线网络在未来应用中具备巨大的潜力,信道分配策略相关的研究得到国内外学者的广泛关注。

Bae 等人假设时隙为由认知用户构成的次网络的时间单位,且次网络中存有大小不同的两类数据分组;假设超时隙为由授权用户构成的主网络的时间单位。认知用户在进行信道竞争时,采用经典的二进制退避算法,获胜的认知用户根据当前超时隙所剩时隙的个数,决定发送哪一类数据分组。该策略有效降低了数据分组在传输过程中的中断率,且不影响系统的吞吐量^[4]。Shiang 等人基于对传输延迟比较敏感的网络应用,提出了一种架构在博弈论基础上的分布式信道分配策略。依据信道上数据帧丢失的概率,动态地调整每个认知用户的信道选择行为。该策略在进行信道选择时利用了认知用户所传输数据量的宏观比例,由此降低了算法复杂度,具有一定的实用价值^[5]。

Hoang 等人基于跨层设计的思路,在物理层实现频谱感知,在 MAC 层实现信道接入控制,提出了一种分布式频谱分配策略(distributed opportunistic spectrum access)。在进行网络的系统性能分析时,将物理层感知过程中出现的误警率和误检率纳入考察范围^[6]。为了避免 IEEE 802.11 标准协议中的竞争窗口的抖动问题,朱艺华等人提出了一种两步指数退避(two-step binary exponential backoff)算法,并在该算法的基础上建立了马尔科夫模型,通过最大化系统的吞吐量,对竞争窗口的复位值进行了优化设计^[7]。

基于授权用户主网络与认知 ad hoc 网络共存的情况,Kaur 等人构造了一种以空中接口方式管理系统资源的策略,并建立起 2 个连续时间排队模型: M/M/1 和 M/G/S/N,从认知 ad hoc 网络的可用带宽的角度出发,分析了系统的性能^[8]。Wang B 等人考虑 ad hoc 认知无线网络环境中覆盖式频谱(spectrum underlay)共享方式,依据“节点准入规则”控制系统可接入的节点数目,提出一种集中式的节点分配策略。该策略较好地满足了网络中非实时数据与流数据的 QoS 要求^[9]。Kim 针对含有单个授权用户和多个认知用户(享有不同优先级)的单信道认知无线网络环境,在提出的“ T -抢占优先”策略中,控制中心以时间间隔 T 轮询检查每个队列。当由控制中心

检测到需要发送数据的认知用户的优先级高于正在传输数据认知用户的优先级时,具有高优先级用户将抢占信道。通过建立一个连续时间优先级排队模型,分析了两类用户的信道利用情况及数据响应性能^[10]。Tumuluru 等人基于具有多认知用户的离散多信道网络环境,首先计算即将要传输的所有数据分组大小。以此为依据,网络的控制中心可以动态地调整信道分配。通过系统实验,验证了该策略对于提高聚合传输速率的有效性^[11]。石华等人考虑接入网的频谱需求,接入网之间的干扰及异构网络重叠信道之间的干扰约束,将频谱资源分配建模为非线性约束 0-1 整数规划问题,提出了一种基于克隆选择的认知异构网络动态频谱分配算法^[12]。

本文综合集中式和分布式信道分配策略,令认知用户可以在不同信道组之间切换,提出了一种新型的混合式信道分配策略。将系统建模为三维 Markov 链,导出包含认知用户阻塞率、数据丢失率及平均延迟在内的评价指标的数学表达式。进行系统实验,刻画带有组间切换的混合式信道分配策略的系统性能,并给出系统退避参数优化设置方案。

2 带有组间切换机制的混合式信道分配策略

在集中式认知无线网络的信道分配策略中,通过控制中心协调和管理网络中授权用户和认知用户对信道的使用,能够降低用户间争用信道带来的冲突,优化信道配置。但网络中的用户量越大,控制中心和控制信道的负载也就越大,限制了网络处理性能的提升。在分布式信道分配策略中,网络节点通常以 CSMA/CA 等技术竞争接入信道,系统中的每个认知用户通过感知信道状态,依据本地或合作检测信息,进一步协调信道的使用。然而,“隐终端”问题存在于本地检测方式中,而基于节点间合作检测的方法又会引起节点间的大量信息交互,从而降低了网络的有效数据传输性能。

在带有组间切换机制的混合式信道分配策略中,授权用户信道分配由控制中心完成,认知用户则利用随机退避方法实现用户间的竞争接入,并通过控制中心处理系统中出现的中断、阻塞及组间切换等事件。

较无分组、无切换的信道分配策略,在带有组间切换的系统中,当某一组信道上的认知用户被该组信道上的授权用户抢占时,被中断的认知用户数据分组有机会通过组间切换功能在其他信道组上继续传输,因此具有更低的数据丢失率及更高的信道利用率。

2.1 数据结构

本文所提出的混合式信道分配策略的系统由以下几部分组成：控制中心、控制信道、若干认知用户、授权用户 PU1 和 PU2，以及这 2 个授权用户分别对应的授权信道组 G1、G2。同时，授权信道组 G1、G2 又分别包含若干条数据信道。

控制信道的作用是用来传输系统中的相关控制信息，实现控制中心与系统各用户间的信息交换。本文将被授权用户占用的数据信道、被认知用户占用的数据信道及空闲信道分别标记为 A 类信道、B 类信道及 C 类信道。令控制中心在每个时隙的开始处优先处理来自授权用户的传输请求。同时赋予授权用户抢占优先权，即当授权用户所在信道组已满且该信道组上有认知用户数据分组存在时，该授权用户新到达数据分组可以抢占所属信道组中的 B 类信道以进行数据传输。而认知用户新到达的数据分组则只能占用 C 类信道。

为了对系统的当前状态进行实时记录和描述，控制中心需要维护以下几张数据表：记录由于用户间冲突导致信道分配失败的冲突信息表 TCM；记录每个数据信道状态的信道状态表 TS；记录信道组 G1 和信道组 G2 中的 B 类信道相关信息的 B 类信道表 TB1 和 TB2；记录信道组 G1 和信道组 G2 中的 C 类信道相关信息的 C 类信道表 TC1 和 TC2。

控制中心按如下步骤对所维护的数据表进行更新。

1) 广播信道分配信息。

2) 针对信道状态表 TS，将表内 A、B 两类信道记录中的剩余时间减 1，并将剩余时间减为 0 的信道状态置为 C 类。

3) 清空冲突信息表 TCM 内的无效记录。

4) 依据信道状态表 TS，将信道组 G1 及信道组 G2 上的 B 类信道分别记录到表 TB1 和表 TB2 中，将信道组 G1 及信道组 G2 上的 C 类信道分别记录到表 TC1 和表 TC2 中。

2.2 授权用户的信道接入

在控制中心的调度下，完成授权用户 PU1 和 PU2 的信道接入过程。

当 PU1 有新的数据分组要发送时，首先将信道申请信息发送至控制中心，控制中心根据接收到的申请信息检查 C 类信道表 TC1，尝试为该数据分组分配一条空闲的 C 类信道。若分配失败，即信道组 G1 中的每个信道上均有任务在发送，控制中心会

检索 B 类信道表 TB1，尝试以抢占的方式为该授权用户数据分组分配一条 B 类信道。若抢占失败，即当前时刻信道组 G1 中的所有信道上均有授权用户数据分组在发送，则 PU1 的信道申请失败。若抢占成功，控制中心检查 C 类信道表 TC2，尝试在信道组 G2 上为被抢占信道的认知用户数据分组分配一条新的 C 类信道，并进行信道切换。若切换失败，即信道组 G2 上的所有信道均处于传输状态，则丢弃被抢占认知用户的数据分组。基于授权用户数据分组的信道分配结果，控制中心更新相应的信道记录。同时，将相关的阻塞、中断、信道分配及信道切换等相关信息写入广播数据分组。PU2 的信道接入过程与 PU1 相同，不再赘述。

2.3 认知用户的信道接入

认知用户采用控制中心调度和随机退避相结合的策略。

令每个认知用户在进行信道感知前首先进入退避过程，以减少认知用户间由于争用信道产生的冲突。令退避时间服从几何分布。此处的几何分布参数称为退避参数，它是本文的优化对象。若该认知用户没有感知到 C 类信道，则会进入下一次退避过程。若认知用户感知到了 C 类信道，则从中随机选择一条 C 类信道记为信道 g 。认知用户在信道 g 中发送数据的同时，将对信道 g 的占用信息发送回控制中心。由于认知用户间的感知过程独立于认知用户的退避过程，不同认知用户可能在同一时隙尝试占用同一条空闲信道。因此，控制中心在收到认知用户的信道占用信息后，将判断并处理可能的冲突。具体规则如下：若本条信息上选择的是信道 g ，而信道表 TC1 或 TC2 中显示该信道为空闲，即信道占用成功，则改 C 类信道表中信道 g 的相应记录，并将占用成功的相关信息写入广播分组。若信道表 TC1 或 TC2 中显示信道 g 被占用，即信道中出现了冲突，控制中心则将该条占用信息记录到冲突信息表 TCM 中。在处理完毕所接收到的全部占用信息后，对表 TCM 内的记录统一进行二次分配。二次分配过程如下：控制中心检索 C 类信道表 TC1 及 TC2，如果有 C 类信道存在，则为表 TCM 中的冲突数据分组重新分配信道，并根据分配结果更新信道状态表 TS；如果没有 C 类信道存在，表明认知用户的本次信道占用失败。最后，控制中心将信道分配信息或相关阻塞信息写入广播分组。

2.4 用户行为的调整

认知用户根据接收到的广播数据分组调整其数据发送行为：若成功获得信道，则在其上进行相应的数据传输；若发生阻塞，则开始新的退避过程；若收到的是切换信息，则跳转至指定信道上继续传输数据；若收到的是中断信息，则将本次正在传输的数据分组丢弃。

要发送数据的授权用户也要根据接收到的广播数据分组调整其数据发送行为：若成功地获得信道，则在其上进行数据传输；若因发生阻塞事件而未能获得信道，则丢弃本次要发送的数据分组。

3 系统模型及模型解析

将每组信道所包含的数据信道的个数称为信道组容量。假设 2 个信道组容量相同，表示为 M ，假设系统具有 N 个认知用户，令 $N = 2M$ 。进一步假设系统处于饱和状态，也就是说，在每一时隙都有认知用户需要传输数据。因此，系统退避计数器减为 0 的时刻可以看作是认知用户数据分组的到达时刻。在离散时间领域，假设系统中所有数据分组的到达和离去均发生在时隙边界处。

3.1 系统模型

假设授权用户 PU1 的数据分组到达间隔服从参数为 l_1 的几何分布，传输时间服从参数为 m_1 的几何分布。假设授权用户 PU2 的数据分组到达间隔服从参数为 l_2 的几何分布，传输时间服从参数为 m_2 的几何分布。假设认知用户数据分组的传输时间服从参数为 m_3 的几何分布。假设系统的退避时间服从参数为 l_3 的几何分布。

将信道组 G1 中为授权用户 PU1 提供传输服务的数据信道个数定义为信道组 G1 的水平；信道组 G2 中为授权用户 PU2 提供传输服务的数据信道个数定义为信道组 G2 的水平；系统中正在为认知用户提供传输服务的数据信道的总数定义为系统的阶段。记 $t = n^+$ 时刻信道组 G1 的水平为 $L_1(n^+)$ ， $t = n^+$ 时刻信道组 G2 的水平为 $L_2(n^+)$ ，记 $t = n^+$ 时刻系统的阶段为 $S(n^+)$ 。结合上述的 2 个信道组水平和一个系统阶段，构建 Markov 链 $\{(L_1(n^+), L_2(n^+), S(n^+)), n = 0\}$ 。该 Markov 链的状态空间 O 为

$$O = \{(p, q, r) : 0 \leq p \leq M, 0 \leq q \leq M, 0 \leq r \leq 2M\}$$

3.2 无中断条件下的状态转移

从 3.1 节给出 Markov 链的构成可知，系统的状态转移过程可以分解为信道组 G1 的水平转移、信道组 G2 的水平转移和系统的阶段转移。

令 $P_{G1}(i, j)$ 表示信道组 G1 的水平由 i 转移到 j 的概率，其中， $0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq M$ 。对 $P_{G1}(i, j)$ 分以下情况讨论。

1) 当 $i+1 < j \leq M$ 时，考虑到一次状态转移过程中 PU1 所能传输的最大数据分组个数为 1。则有

$$P_{G1}(i, j) = 0$$

2) 当 $j = i+1$ 时，即在本次状态转移过程中，系统中 PU1 的数据分组个数增加 1。表明系统中原有 PU1 数据分组均未传输完成，同时又有一个新的 PU1 数据分组到达。则有

$$P_{G1}(i, j) = \bar{m}_1^i l_1$$

3) 当 $j = i$ 且 $j = M$ 时，表明本次转移前后，信道组 G1 的水平均为 M 。则有

$$P_{G1}(i, j) = \binom{i}{1} m_1 \bar{m}_1^{i-1} l_1 + \bar{m}_1^i$$

4) 当 $j = i$ 且 $j = 0$ 时，即本次转移前后，信道组 G1 的水平均为 0。则有

$$P_{G1}(i, j) = \bar{l}_1$$

5) 当 $j = i$ 且 $0 < j < M$ 时，即在本次转移前后，信道组 G1 的水平保持不变，其可能的转移过程包括以下 2 种情况：信道组 G1 上正在传输的数据分组中有一个完成传输离开系统，同时又有一个新的 PU1 数据分组到达；信道组 G1 上正在传输的数据分组在本时隙结束时均未离开系统，同时没有新的 PU1 数据分组到达。则有

$$P_{G1}(i, j) = \binom{i}{1} m_1 \bar{m}_1^{i-1} l_1 + \bar{m}_1^i \bar{l}_1$$

6) 当 $j < i$ 且 $j = 0$ 时，即在一次状态转移后，信道组 G1 的水平降低至 0。这种情况表明信道组 G1 中所有的 PU1 数据分组均在本时隙结束时离开系统，且没有新的 PU1 数据分组到达。则有

$$P_{G1}(i, j) = m_1^i \bar{l}_1$$

7) 当 $j < i$ 且 $0 < j < M$ 时，系统的状态转移过程包括以下 2 种可能：信道组 G1 上有 $(i-j)$ 个数据分组离去，且没有新的数据分组到达；信道组 G1 上有 $(i-j+1)$ 个数据分组离去，但有一个新数

据分组到达。则有

$$P_{G_1}(i, j) = \binom{i}{i-j} m_1^{i-j} \bar{m}_1^j \bar{l}_1 + \binom{i}{i-j+1} m_1^{i-j+1} \bar{m}_1^{j-1} l_1$$

令 $P_{G_2}(k, l)$ 表示信道组 G2 的水平由 k 转移至 l 的概率。由于信道组 G1 水平转移独立于信道组 G2 的水平转移，故 $P_{G_2}(k, l)$ 的求解方法与 $P_{G_1}(i, j)$ 相同，不再赘述。

在此基础上，进一步分析在信道组 G1 由水平 i 转移到水平 j ，信道组 G2 由水平 k 转移到水平 l 的条件下，系统阶段由 x 转移至 y 的概率 $P_s(x, y)$ 。

一次阶段转移涉及一个离去过程和一个到达过程。为了方便表示和计算，定义以下 3 个变量： $u = \max(0, x - y)$ 表示至少传输完成离开信道的认知用户数据分组的个数； v 表示实际传输完成离开信道的认知用户数据分组的个数； w 表示新到达的认知用户数据分组的个数。上述 3 个变量均表示系统在一次转移过程中的值，因此， $u + v = x$ 。

1) 当 $i + k + x = 2M$ & $j + l + y < 2M$ 时，

$$P_s(x, y) = \sum_{v=u}^x \binom{x}{v} m_3^v \bar{m}_3^{x-v} \binom{N}{y-x+v} l_3^{y-x+v} \bar{l}_3^{N-y+x-v}$$

2) 当 $i + k + x = 2M$ & $j + l + y = 2M$ 时，

$$P_s(x, y) = \sum_{v=u}^x \binom{x}{v} m_3^v \bar{m}_3^{x-v} \sum_{w=y-x+v}^N \binom{N}{w} l_3^w \bar{l}_3^{N-w}$$

3) 其他情况下，状态转移过程 $(i, k, x) \rightarrow (j, l, y)$ 均为不可能事件，因此，系统阶段由 x 转移至 y 的概率均为 0。

3.3 状态转移过程中的中断事件

在一个时隙内，系统中最多到达 2 个授权用户数据分组。系统发生中断事件必须具备以下 3 个必要条件。

1) 对于转移后的状态 (j, l, y) ，满足约束条件 $j + l + y = 2M$ 。

2) 对于转移前的状态 (i, k, x) ，满足约束条件 $x \neq 0$ 。

3) 对于转移前的状态 (i, k, x) ，满足约束条件 $i + k + x = 2M - 1$ 或 $i + k + x = 2M$ 。

基于必要条件 1) 与必要条件 2)，通过分析条件 3) 及系统的具体转移过程，对中断率 X 讨论如下。

1) 当 $i + k + x = 2M - 1$ & $j = i + 1$ & $l = k + 1$ 时，在本次状态转移过程中，若系统中已有的数据分组均未完成传输，同时，信道组 G1 和信道组 G2 上

又都有新的授权用户数据分组到达，则系统将发生中断事件。中断率 X 表示为

$$X = \bar{m}_1^i \bar{m}_2^k \bar{m}_3^x l_1 l_2$$

2) 当 $i + k + x = 2M$ & $j = i - 1$ & $l = k$ & $k \neq M$ 时，在本次状态转移过程中，若只有信道组 G1 中的一个授权用户数据分组完成传输，且信道组 G1 和信道组 G2 上又都有新的授权用户数据分组到达，则系统将发生中断事件。中断率 X 表示为

$$X = \binom{i}{1} m_1 \bar{m}_1^{i-1} \bar{m}_2^k \bar{m}_3^x l_1 l_2$$

3) 当 $i + k + x = 2M$ & $j = i$ & $l = k - 1$ & $i \neq M$ 时，在本次转移过程中，若只有信道组 G2 中的一个授权用户数据分组完成传输，且信道组 G1 和信道组 G2 上又都有新的授权用户数据分组到达，则系统将发生中断事件。中断率 X 表示为

$$X = \binom{k}{1} \bar{m}_1^i m_2 \bar{m}_2^{k-1} \bar{m}_3^x l_1 l_2$$

4) 当 $i + k + x = 2M$ & $j = i$ & $l = k + 1$ & $i = M$ & $k \neq M$ 时，在本次状态转移过程中，系统发生中断事件的情况包括以下 2 种：所有数据分组均未结束传输离开信道，且有新的授权用户数据分组接入信道组 G2；只有一个授权用户数据分组完成传输离开信道组 G1，且新到达 2 个授权用户数据分组分别接入信道组 G1 和信道组 G2。中断率 X 表示为

$$X = \bar{m}_1^i \bar{m}_2^k \bar{m}_3^x l_2 + \binom{i}{1} m_1 \bar{m}_1^{i-1} \bar{m}_2^k \bar{m}_3^x l_1 l_2$$

5) 当 $i + k + x = 2M$ & $j = i + 1$ & $l = k$ & $i \neq M$ & $k = M$ 时，系统发生中断事件的情况包括以下 2 种：在本次状态转移过程中，所有数据分组均未结束传输，且有新的授权用户数据分组接入信道组 G1；在本次状态转移过程中，只有一个授权用户数据分组完成传输离开信道组 G2，且新到达 2 个授权用户数据分组分别接入信道组 G1 和信道组 G2。中断率 X 表示为

$$X = \bar{m}_1^i \bar{m}_2^k \bar{m}_3^x l_1 + \binom{k}{1} \bar{m}_1^i m_2 \bar{m}_2^{k-1} \bar{m}_3^x l_1 l_2$$

6) 针对条件 $i + k + x = 2M$ & $i \neq M$ & $k \neq M$ 下的其他情况， X 取值的讨论如下。

当 $j = i + 1$ & $l = k$ 时，

$$X = \bar{m}_1^i \bar{m}_2^k \bar{m}_3^x l_1 \bar{l}_2$$

当 $j = i \& l = k + 1$ 时 ,

$$X = \bar{m}_1^i \bar{m}_2^k \bar{m}_3^x \bar{l}_1 l_2$$

当 $j = i + 1 \& l = k + 1$ 时 ,

$$X = \bar{m}_1^i \bar{m}_2^k \left(\bar{m}_3^x l_1 l_2 + \begin{pmatrix} x \\ 1 \end{pmatrix} m_3 \bar{m}_3^{x-1} l_1 l_2 \right)$$

7) 其他条件下不可能发生中断事件。中断率 X 表示为

$$X = 0$$

3.4 稳态分析

令系统的一步状态转移概率矩阵为 P , 矩阵 P 中的元素 $P_{(i,k,x),(j,l,y)}$ 为系统由状态 (i, k, x) 经过一步转移到达状态 (j, l, y) 的概率 , 表达式为

$$P_{(i,k,x),(j,l,y)} = P_{G1}(i, j) P_{G2}(k, l) P_S(x, y) + X$$

3.2 节和 3.3 节的分析结果涵盖了转移概率矩阵 P 中的所有元素。由矩阵 P 的结构可知 , 本文所建立的 Markov 链 $\{(L_1(n^+), L_2(n^+), S(n^+)), n \geq 0\}$ 具有非周期性、不可约性及正常返性。令 p_{z_1, z_2, z_3} 表示信道组 G1 的水平为 z_1 、信道组 G2 的水平为 z_2 、系统阶段为 z_3 的稳态概率 , 则 p_{z_1, z_2, z_3} 可以表示为

$$p_{z_1, z_2, z_3} = \lim_{n \rightarrow \infty} P\{L_1(n^+) = z_1, L_2(n^+) = z_2, S(n^+) = z_3\}$$

定义 $\mathbf{?} = (p_{0,0,0}, p_{0,0,1}, p_{0,0,2}, \dots, p_{M,M,2M})$ 为系统的稳态概率向量。由系统的平衡条件及归一化条件 , 可得

$$\begin{cases} \mathbf{?} P = \mathbf{?} \\ \sum_{z_1=0}^M \sum_{z_2=0}^M \sum_{z_3=0}^{2M} p_{z_1, z_2, z_3} = 1 \end{cases}$$

利用高斯—赛德尔迭代法求解该方程组 , 可以给出系统的稳态向量 $\mathbf{?}$ 。

4 系统的性能指标

4.1 信道利用率

信道利用率反映系统对频谱的总体使用情况 , 是衡量系统优劣的重要指标。

授权用户信道利用率 z_{PU} 定义为单位时隙系统中某个信道为授权用户提供传输服务的概率。即在系统所能提供的数据信道总数中 , 被授权用户使用的数据信道的比例。该指标是用来刻画授权用户对信道的占用情况 , 其表达式为

$$z_{PU} = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^{2M-i-j} (i+j) \pi_{i,j,k}}{2M}$$

系统信道利用率 z 定义为单位时隙内某个数据信道用于数据传输的概率。即在系统所能提供的数据信道总数、授权用户和认知用户所占用的数据信道的比例。可以使用该指标统计数据信道的总体使用情况 , 其表达式为

$$z = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^{2M-i-j} (i+j+k) \pi_{i,j,k}}{2M}$$

4.2 认知用户阻塞率

所谓阻塞事件是指由于认知用户申请信道失败而需重新进入退避过程的事件。系统发生阻塞事件的原因有 2 个。

1) 一次退避结束后 , 认知用户未能感知到有新的 C 类信道存在。

2) 一次退避过程结束后 , 认知用户虽然感知到了 C 类信道 , 但由于在认知用户间发生了冲突 , 导致控制中心拒绝了部分认知用户的信道接入请求。

令 $g(m)$ 表示某数据分组结束传输并离开信道时 , 系统中 PU1、PU2 和认知用户数据分组个数分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 的条件下 , 系统出现阻塞时的各类新数据分组的到达过程。将单位时隙内系统发生阻塞事件的概率定义为系统阻塞率 d 。则系统阻塞率 d 可表示为

$$d = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^{2M-i-j} \sum_{l_1=0}^i \sum_{l_2=0}^j \sum_{l_3=0}^k \sum_{m=0}^2 \binom{i}{l_1} \binom{j}{l_2} \binom{k}{l_3} (m_1^l \bar{m}_1^{i-l} m_2^l \bar{m}_2^{j-l} m_3^l \bar{m}_3^{k-l} g(m) \pi_{i,j,k})$$

其中 , m ($0 \leq m \leq 2$) 表示当前时隙内新到达的授权用户数据分组的数量。

接下来讨论系统发生阻塞时最少要到达的认知用户数据分组的数量。

1) 令 c_1 表示 $m = 0$ 时最少要到达的认知用户数据分组数量 , 可得

$$c_1 = 2M - i + l_1$$

2) 对于 $m = 1$, 最少要到达系统的认知用户数据分组的数量分为 2 种情况分析。

若有新授权用户数据分组到达信道组 G1 , 则有

$$c_2 = 2M - \min(M, i - l_1 + 1) - j + l_2 -$$

$$\min(2M - \min(M, i - l_1 + 1) - j + l_2, k - l_3) + 1$$

若有新授权用户数据分组到达信道组 G2，则有

$$c_3 = 2M - \min(M, j - l_2 + 1) - i + l_1 - \min(2M - \min(M, j - l_2 + 1) - i + l_1, k - l_3) + 1$$

3) 当 $m = 2$ 时，记最少要到达的认知用户数据分组的个数为 c_4 ，则有

$$c_4 = 2M - \min(M, i - l_1 + 1) - \min(M, j - l_2 + 1) - \min(2M - \min(M, i - l_1 + 1) - \min(M, j - l_2 + 1), k - l_3) + 1$$

综合上述的分析结果，可得 $g(m)$ 的表达式为

$$g(m) = \begin{cases} \sum_{x=c_1}^N \bar{l}_1 \bar{l}_2 \binom{N}{x} l_3^x \bar{l}_3^{N-x}, & m=0 \\ \sum_{x=c_2}^N l_1 \bar{l}_2 \binom{N}{x} l_3^x \bar{l}_3^{N-x} + \sum_{x=c_3}^N \bar{l}_1 l_2 \binom{N}{x} l_3^x \bar{l}_3^{N-x}, & m=1 \\ \sum_{x=c_4}^N l_1 l_2 \binom{N}{x} l_3^x \bar{l}_3^{N-x}, & m=2 \end{cases}$$

认知用户阻塞率 d_{su} 定义为一个认知用户退避结束且被阻塞的概率。 d_{su} 的表达式为

$$d_{su} = 1 - (1 - d)^{\frac{1}{Nl_3}}$$

4.3 数据丢失率

数据丢失率 b 定义为在信道组 G1 或 G2 没有空闲信道情况下，系统在单位时隙内发生认知用户数据分组传输被授权用户中断，且该认知用户数据分组被丢弃的概率。显然，数据丢失率 b 可以衡量系统对认知用户的服务质量。 b 可以表示为

$$b = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^{2M-i-j} h(i, j, k) \pi_{i,j,k}$$

其中，

$$h(i, j, k) = \begin{cases} i \bar{m}_1^{i-1} \bar{m}_2^j \bar{m}_3^k l_1 l_2 + \bar{m}_1^i \bar{m}_2^j \bar{m}_3^k l_2, & i+j+k=2M \text{ \& } i=M \text{ \& } j < M \\ j \bar{m}_1^i \bar{m}_2^{j-1} \bar{m}_3^k l_1 l_2 + \bar{m}_1^i \bar{m}_2^j \bar{m}_3^k l_1, & i+j+k=2M \text{ \& } i < M \text{ \& } j=M \\ \bar{m}_1^{i-1} \bar{m}_2^{j-1} \bar{m}_3^{k-1} l_1 l_2 (i \bar{m}_1 \bar{m}_2 \bar{m}_3 + j \bar{m}_1 \bar{m}_2 \bar{m}_3 + k \bar{m}_1 \bar{m}_2 \bar{m}_3) + \bar{m}_1^i \bar{m}_2^j \bar{m}_3^k (1 - \bar{l}_1 \bar{l}_2), & i+j+k=2M \text{ \& } i < M \text{ \& } j < M \\ \bar{m}_1^i \bar{m}_2^j \bar{m}_3^k l_1 l_2, & i+j+k=2M-1 \text{ \& } i < M \text{ \& } j < M \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

认知用户数据丢失率 b_{su} 定义为一个认知用户数据分组在传输过程中被授权用户中断且被系统丢弃的概率。系统数据丢失率 b 与认知用户数据丢失率 b_{su} 满足如下约束关系

$$b_{su} = 1 - (1 - b)^{\frac{1}{N_{su}}}$$

其中， N_{su} 为系统中认知用户数据分组的数量。

$$N_{su} = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^{2M-i-j} k \pi_{i,j,k}$$

4.4 平均延迟

认知用户数据分组的平均延迟 W_{su} 定义为从进入退避过程的时刻开始直到成功接入信道的时刻为止的时间间隔。令 E 表示一个成功传输的认知用户的数据分组平均经历的退避过程的次数，则 E 表示为

$$E = \frac{1}{1 - d_{su}}$$

利用 Little 公式，进一步给出认知用户数据分组的平均延迟 W_{su} 的表达式为

$$W_{su} = \frac{E}{l_{su}} = \frac{1}{l_{su} (1 - d)^{\frac{1}{Nl_3}}}$$

5 系统实验

为了验证本文所提出的带有组间切换机制的混合式信道分配策略的合理性与有效性，基于理论分析结果进行数值实验，基于工作原理进行仿真实验。针对不同的系统退避参数及信道组容量，对系统的性能进行定量分析。实验过程中的系统参数设置如下。

PU1 的到达率 $l_1=0.1$ ；PU1 的服务率 $m_1=0.25$ ；PU2 的到达率 $l_2=0.2$ ；PU2 的服务率 $m_2=0.45$ ；SU 的服务率 $m_3=0.35$ ；系统中认知用户个数 $N=20$ ；仿真时间为 200 000 个时隙。

基于不同的信道组容量，图 1 给出了系统退避参数对信道利用率影响。

图 1 的实验结果表明，对于确定的系统退避参数，随着信道组容量的增加，信道利用率呈下降趋势。而对于确定的信道组容量，随着退避参数的增大，系统信道利用率则呈现出上升的态势，且逐渐趋近于 1。这种变化趋势是可以事先估计的。

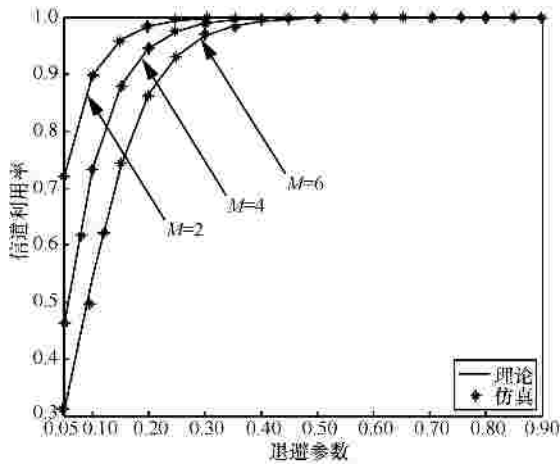


图 1 信道利用率随系统退避参数的变化

基于不同的信道组容量，图 2 给出了系统退避参数对认知用户阻塞率的影响。

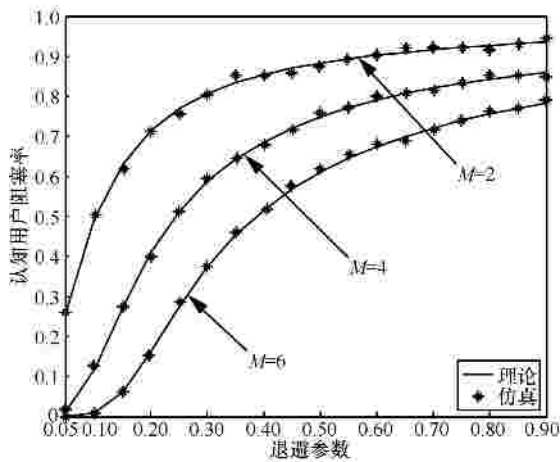


图 2 认知用户阻塞率随系统退避参数的变化

图 2 的实验结果表明，对于固定大小的信道组容量，系统退避参数越大，其退避时间就越短。当某认知用户试图接入信道时，发生信道冲突的可能性提高，因此，认知用户阻塞率呈现出上升的变化趋势。对于确定的系统退避参数，随着信道组容量的增加，认知用户在退避过程结束时，能够顺利获得 C 类信道的概率也会随之变大，因此，认知用户阻塞率呈现出下降趋势。

基于不同信道组容量，图 3 比较了有无组间切换机制的信道分配策略的系统性能，并给出了认知用户数据丢失率随系统退避参数的变化趋势。

由图 3 可以看出，在带有切换机制的信道分配策略中，认知用户的数据丢失率有所降低，这是因为当处于某一个信道组(信道组 G1 或信道组 G2)中的认知用户被授权用户抢占信道后，将从另外一个

信道组中选择新的 C 类信道。对于确定的信道组容量，随着系统退避参数的增大，单位时隙内能够接入系统的认知用户数据分组也随之增加，被授权用户抢占信道的可能性增加，认知用户数据丢失率因此呈现出上升的趋势。对于一定的退避参数，当信道组容量 M 增加时，控制中心直接为新到达的授权用户分配空闲信道的可能性增大，而认知用户所占信道被授权用户抢占的概率下降，认知用户数据丢失率则呈现出下降的变化趋势。

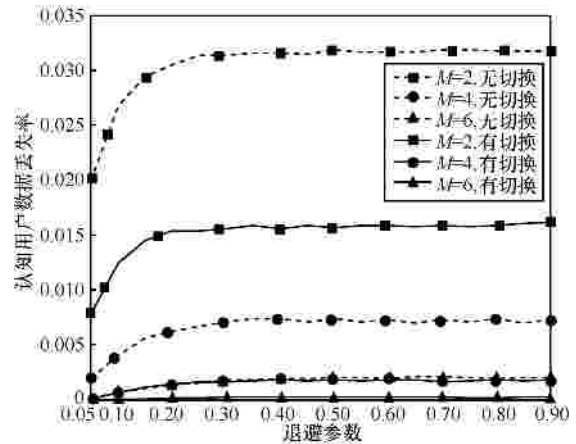


图 3 有无切换下认知用户数据丢失率的比较

针对不同的信道组容量，图 4 给出了系统退避参数对认知用户数据分组平均延迟的影响。

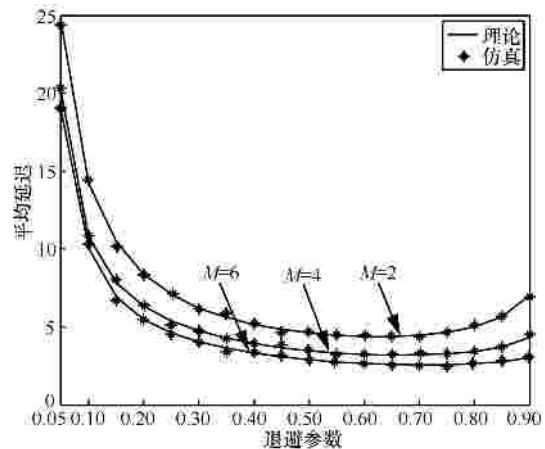


图 4 平均延迟随系统退避参数的变化

图 4 表明，过大的系统退避参数会缩短退避过程的平均时间，导致认知用户申请信道的次数过于频繁，最终使信道冲突的概率增大，退避次数增多。而过小的系统退避参数又会增加退避过程的平均时间，造成平均响应时间增大；所以，系统退避参数存在一个最优区间，使认知用户数据分组的平均

延迟最小。

从图 2~图 4 中的实验数据可以看出,系统仿真结果与理论分析结果吻合,进一步验证了系统中模型建立过程与模型解析过程的正确性。同时,实验结果还揭示出,在本文所提出的新的信道分配策略中,不同的性能指标之间呈现出一定的折衷关系。基于此,综合考虑不同网络性能指标对系统成本的影响程度,将阻塞率权值设为 f_1 , 数据丢失率权值设为 f_2 , 平均延迟权值设为 f_3 , 从经济学角度出发,构建系统成本函数如下:

$$F(I_3) = f_1 d_{su} + f_2 b_{su} + f_3 W_{su}$$

图 5 针对 $f_1 = 20$, $f_2 = 65$ 和 $f_3 = 15$, 给出了系统成本随系统退避参数的变化趋势。

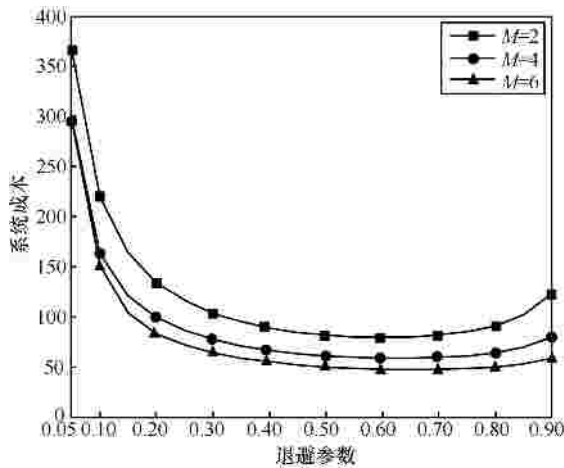


图 5 系统退避参数对系统成本的影响

通过分析实验数据可知,对于较大的退避参数值,退避参数越大,系统成本越大;对于较小的退避参数值,退避参数越大,系统成本越小。因此,针对不同的信道组容量,均存在一个最低的系统成本及最优的退避参数。在本文的实验环境中,当信道组容量分别为 $M = 2$ 、 $M = 4$ 和 $M = 6$ 时,对应的最优退避参数值为 0.60、0.55 和 0.70。

6 结束语

本文基于两组授权信道,综合考虑分布式与集中式信道分配方式,提出了一种新的带有组间切换机制的混合式信道分配策略。通过建立一个三维 Markov 链模型,给出了混合式信道分配策略下系统性能指标的表达式。通过数值及仿真实验,定量分析了不同网络参数对系统性能的影响。实验结果验证了本文所提出的认知无线网络混合式信道分配策略有效性,并揭

示了不同性能指标间存在的折衷关系。通过构建成本函数,给出系统退避参数的优化设置方案。

本文的研究成果可以进一步推广到具有多组授权信道的认知无线网络中,为频谱资源分配的研究奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] MCHENRY M. Spectrum White Space Measurements[R]. New America Foundation Broadband Form, 2003.
- [2] 杨威, 管东林, 逯东辉等. 面向认知无线网络能量高效协作感知的在线节点选择算法[J]. 通信学报, 2012, 33(7): 103-110.
YANG W, GUAN D L, LU D H, et al. Online energy-efficient node selection algorithm for cooperative sensing in cognitive radio networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(7): 103-110.
- [3] 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.
GUO C L, FENG C Y, ZENG Z M. Cognitive Radio Network Technologies and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [4] BAE Y H, ALFA A S, CHOI B D. Performance analysis of modified IEEE 802.11-based cognitive radio networks[J]. Communications Letters, 2010, 14(10): 975-977.
- [5] SHIANG H P, SCHAAR M. Queuing-based dynamic channel selection for heterogeneous multimedia applications over cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10(5): 896-909.
- [6] HOANG A T, WONG D T C, LIANG Y C. Design and analysis for an 802.11-based cognitive radio network[A]. Wireless Communications and Networking Conference[C]. Budapest, Hungary, 2009. 1-6.
- [7] 朱艺华, 徐晖, 彭静. IEEE 802.11 无线网络的两步指数退避算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2578-2580.
ZHU Y H, XU H, PENG J. Two-step backoff algorithm for IEEE 802.11 based wireless networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(11): 2578-2580.
- [8] KAUR P, KHOSLA A, UDDIN M. Markovian queuing model for dynamic spectrum allocation in centralized architecture for cognitive radios[J]. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 2011, 3(1): 96-101.
- [9] WANG B, ZHAO D M, CAI J. Joint connection admission control and packet scheduling in a cognitive radio network with spectrum underlay[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11): 3852-3863.
- [10] KIM K. T-preemptive priority queue and its application to the analysis of an opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(7): 1394-1401.
- [11] TUMULURU V K, WANG P, NIYATO D. A novel spectrum scheduling scheme for multi-channel cognitive radio network and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1849-1858.

(下转第 32 页)