

认知无线网络信道选择机制^①

薛伟, 刘张超

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

摘要: 认知无线网络通过动态频谱接入来提高无线频谱资源利用率, 而节点目标信道选择的优劣直接决定了频谱接入性能的好坏. 本文首先综合考虑信道增益和空闲时间两种因素, 设计以实现最大化系统容量的目标信道选择机制, 然后引入信道热度概念, 提出一种多属性决策信道选择机制. 仿真结果表明, 多属性决策信道选择机制在系统吞吐量和频谱利用率性能上都有明显的提高.

关键词: 认知无线网络; 动态频谱接入; 目标信道选择; 信道热度; 多属性决策

Channel Selection Mechanism in Cognitive Radio Networks

XUE Wei, LIU Zhang-Chao

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To improve the utilization of wireless spectrum resource, the dynamic spectrum access is used in the cognitive radio network. However, the advantages and disadvantages of Node target channel selection directly determine the spectrum access performance. Firstly, by comprehensively considering the two factors of the channel gain and spare time, this paper designs a channel selection mechanism so as to realize the goal of maximizing the system throughput. Then this paper introduces the concept of channel heat and puts forward a channel selection mechanism based on multiple attribute decision. The simulation results indicate that channel selection mechanism based on multiple attribute decision apparently improves the system throughput and spectrum utilization performance.

Key words: cognitive radio network; the dynamic spectrum access; target channel selection; channel heat; multiple attribute decision

随着无线通信技术的快速发展, 迅速增长的无线通信业务需求以及现有静态无线频谱资源的管理、分配和使用制度使得有限的频谱资源更加稀缺, 各频段间频谱使用率不平衡且平均频谱使用率低下等问题出现^[1,2]. 认知无线电作为一种智能的频谱共享技术, 采用“见缝插针”的方式使用授权频谱, 认知用户自动感知频谱资源空洞, 在授权用户享有频谱使用的最高权限的情况下, 采用有效的动态接入机制租赁授权空闲频谱进行信息传输. 它实现了不同网络间的频谱共享和任何时间、任何地点的高可靠通信以及对频谱资源的有效利用, 很大程度上解决了当前频谱资源面临的问题.

认知无线电技术应用于无线通信网络中形成了认知无线网络 CRN(Cognitive Radio Network)^[3]. 它存在两种用户: 授权用户 PU(Primary User)和认知用户 SU(Secondary User), PU 出现的随机性以及频谱资源的最高优先权使得认知无线网络的可用频谱动态变化, 网络中 SU 需要采用有效的动态接入方法, 才能保证业务质量并避免对 PU 带来有害干扰^[4]. 而 SU 动态接入过程中目标信道选择的优劣将直接决定频谱接入性能的好坏, 因此, 在 CRN 中设计有效的目标信道选择机制是保障网络性能的重要任务之一. 目前已存在很多针对用户接入网络时目标信道选择机制的研究. 如 Amjad Ali 在估计信道空闲时间和占用时间的基础

^① 基金项目:国家自然科学基金(61374047)

收稿时间:2015-12-06;收到修改稿时间:2016-01-21 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005296]

上提出一种目标信道选择算法^[5]; Zheng S 针对 PU 信道空闲时间间隔服从指数分布的情况提出按照信道平均空闲时间递减顺序对目标信道进行访问的机制^[6]; AHMED E 等综合考虑信道质量和 PU 活动性两方面因素提出有助于选择最佳的信道进行传输业务、降低切换概率的机制^[7]; 基于先应式频谱切换的目标选择算法^[8]; 张国斌等人针对 PU 出现服从泊松过程提出综合信道增益和空闲时间因素的目标信道选择机制^[9]等, 这类机制依据某些属性对信道进行评估排序, 对性能最佳信道尝试接入. 它们一定程度上解决了目标信道的选择问题, 但是都存在着同一空闲信道被多个认知用户选中, 拥塞概率和切换延迟随着 SU 量迅速增大的问题. 也有一些通过采用分级的方法来改善信道选择过程中碰撞和减少延时的机制, 如覃华忠等人基于频谱质量和次用户的业务差异性对可用频谱进行分类, 提出了基于分级的频谱切换机制^[10]; 潘春雨等人提出基于对用户分级和信道分级的目标信道选择机制^[11]等. 还有些机制提出了更加精细的信道评估方法(文献[12]、[13]、[14])但这些方法存在较高的计算复杂度问题. 针对以上现象, 本文从影响信道通信速率、通信时延、通信碰撞率等的主要因素出发, 提出一种综合考虑信道增益, 历史空闲时间和信道热度三种因素的多参数决策的目标信道选择机制. 该机制能有效减少多选一的目标信道上拥塞概率和通信中信道切换次数且具有低计算复杂度, 仿真结果表明, 该机制具有较好的系统吞吐量和频谱利用率性能.

1 系统模型

本文研究的整个系统模型如图 1 所示.

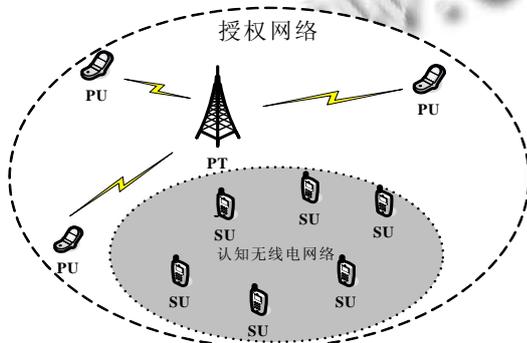


图 1 分布式认知无线网络系统模型

整个系统由基站 PT 和授权用户 PU 组成的授权

网络以及 SU 组成的分布式认知无线网络组成. 在系统中, 用 N 表示 PU 数目, 用 M 表示 SU 数目, 授权网络与 CRN 之间相互独立没有信息的交互, PU 间以及各个 SU 间的出现都相互独立. 每个 PU 独占一个信道资源进行通信, 因此整个系统的总信道资源数为 N , M 个 SU 与 N 个 PU 共享 N 个信道资源进行数据传输. 认知用户位于授权网络基站的覆盖范围内, 在一个区内的认知用户能够感知的可用空闲信道相同, 通过感知获得授权信道状态, 当信道处于空闲状态时, 认知用户根据一定的原则选择信道接入进行信息传输. 系统信道占用模型如图 2 所示.

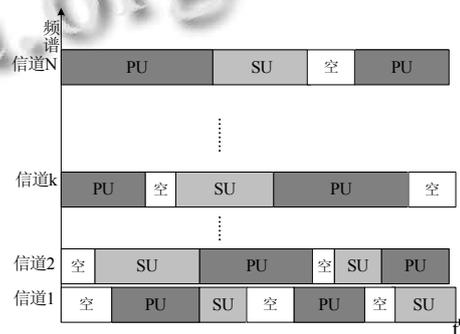


图 2 系统信道占用模型

通信过程中, CRN 中的认知用户已通过同步机制同步, SU 间通过公共控制信道进行控制信息侦听及公共信息的交互. 每个 SU 节点在本地维护两张链表: 信道状态链表(ChanLink)和节点链表(StateLink)如图 3 和图 4 所示.

| Node ID | TC | Addr | IsBusy | Whenfree |
|---------|----|------|--------|----------|
|---------|----|------|--------|----------|

图 3 StateLink 的主要内容

其中 Node ID:用户节点的标识码; TC:用户选择的目标信道; Addr:用户节点的物理地址; IsBusy:用户节点状态指示. 当为 1 时表示节点当前忙于数据收发, 为 0 时表示当前用户节点空闲; WhenFree:节点忙碌时间值. 节点将在 WhenFree 后置于空闲状态.

| ChannelID | State | Counter | NAV | T _{average} | ChannelGain |
|-----------|-------|---------|-----|----------------------|-------------|
|-----------|-------|---------|-----|----------------------|-------------|

图 4 ChanLink 的主要内容

其中 ChannelID:信道资源标识码; State:信道状态信息, 共 Pu, Data, Free 三种状态形式; Counter:各信道被选择

的次数; NAV: 表示各信道被预约使用的时值; Taverage: 各信道单位时间的历史平均空闲时长; ChannelGain: 各信道对当前 SU 的信道增益值。

SU 节点通过周期性的频谱感知或控制信道的信息交互动态进行两个链表的维护。当用户选定目标信道后, 更新本地链表并通过公共控制信道广播通知其他用户其选择的目标信道。接收到消息的用户更新本地 ChanLink 中 Counter 等相关参数。

2 目标信道选择机制

本节首先综合考虑信道历史空闲时间和增益两因素, 设计了以整个 CRN 吞吐量最大化为目标函数的目标信道选择机制, 实现用户具有高传输速率、低通信时延的信道选择目的, 然后在此基础上, 考虑信道选择中的拥塞问题和复杂度问题, 引入信道热度参数, 提出了一种低复杂度的多属性决策信道选择机制。

2.1 基于最大化网络吞吐量的信道选择机制

网络吞吐量作为衡量通信网络的重要性能指标, 它以网络中用户量以及用户成功传输的数据量来计算。主要由信道通信速率、用户量以及用户有效的通信时间等参数共同决定。

然而在 CRN 中, 由于各个 SU 间存在差异性, 各 SU 在不同信道上表现出的信道增益各不相同, 以致在不同信道上的通信速率也将存在差异性。假设每个信道带宽为 B , 信道噪声方差为 σ^2 , SU 在信道上的发射功率为 P , 用 K_{nm} 表示认知用户 m 在信道 n 上的信道增益, 则用户 m 在信道 n 上的通信速率 R_{nm} 的数学期望可通过信道增益 K_{nm} 用(2.1)式表示^[15]。

$$E[R_{nm}] = E[B \log_2(1 + \frac{PK_{nm}}{\sigma^2})] = B \log_2(1 + \frac{PE[K_{nm}]}{\sigma^2}) \quad (1)$$

另外, 在系统中, PU 对信道资源具有优先使用权, 当 PU 接入信道时 SU 必须退出当前通信信道。由于 PU 间的出现相互独立, 因而对 SU 而言各信道的可用空闲时间也将各异, 选择具有合适历史空闲时间的空闲信道不但可以充分利用信道资源, 还能减少通信中信道切换次数, 从而降低通信时延, 提高有效通信时间。SU 的信道状态链表中记录了通过感知获得的信道资源历史平均空闲时间 T_{Ann} 。

从以上可以看出信道增益、信道历史空闲时间直接影响着信道通信速率以及用户有效通信时长。因此在目标信道选择中必须综合考虑信道增益与信道空闲

时间两个因素才能使系统吞吐量最大化。定义参数 a_{nm} 表示认知用户 m 在信道 n 的接入概率, 则 m 每次连接能够完成的业务数据量 D_m 的数学期望可以表示为

$$E[D_m] = \sum_{n=1}^N T_{Ann} a_{nm} B \log_2(1 + \frac{PE[K_{nm}]}{\sigma^2}) \quad (2)$$

由于每个 SU 的出现是独立的, 因而系统吞吐量 C 可以通过式(2.3)计算。

$$E[C] = \sum_{m=1}^M E[D_m] = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T_{Ann} a_{nm} B \log_2(1 + \frac{PE[K_{nm}]}{\sigma^2}) \quad (3)$$

因此综合考虑信道增益和信道空闲时长的网络吞吐量最大化目标信道选择算法的最优化问题可以表示如下:

$$\begin{aligned} & \text{MAX} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T_{Ann} a_{nm} B \log_2(1 + \frac{PE[K_{nm}]}{\sigma^2}) \right) \\ & \sum_{n=1}^N a_{nm} = 1; 0 < a_{nm} < 1, n=1, 2, \dots, N; m=1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (4)$$

以上最优化选择机制通过控制用户在各信道上的接入概率从而使系统容量最大化, 使得系统在信道速率和中断概率双重影响下进行最优的数据信道选择。

2.2 多属性决策信道选择机制

在认知用户选择信道进行接入时, 同一个空闲信道可能被过多的 SU 选作目标信道进行数据传输, 这将造成该信道数据传输相对较密集, 传输竞争加剧, 碰撞及退避增多, 传输质量下降现象。相反, 某些空闲信道可能被 SU 选择相对较少, 甚至一直处于闲置状态, 这些欠载信道富余的传输能力却被浪费掉。因此在 CRN 的目标信道选择机制中合理地考虑信道的过欠载因素具有非常重要的意义。

为了衡量信道的负载量, 本文提出信道热度(HT , Hot Temperature)和平均热度(AHT , Average HT)两个信道参数, 定义如下:

$$HT = \frac{k}{M_c} \quad (5)$$

$$AHT = \frac{1}{N_c} \quad (6)$$

其中, k 为选择当前空闲信道的用户数目, 用本地信道状态链表中 Counter 记录。 M_c 为当前需要进行信息传输的认知用户数, N_c 为当前空闲信道数。当信道出现

$$HT > AHT \quad (7)$$

则称该信道过热, 此时该信道可能已被很多认知用户选作为目标传输信道。在认知用户进行目标信道选择

时应适当避免对这种信道进行选择接入,以免传输过程中过多的碰撞及退避造成传输延时增大,系统吞吐量下降。

将以上信道的负载量衡量策略引入到目标信道选择机制中,结合上节提出的基于最大化网络吞吐量的信道选择机制,本文将提出一种综合信道空闲时间、增益、信道热度三种因素的目标信道选择机制。通过(4)式可以看出基于最大化网络吞吐量的信道选择机制的基本思想是尽量选择信道历史平均空闲时间长、增益高的信道进行数据传输,而(7)式表明尽可能选择被作为目标信道数目少的信道进行接入。基于以上思想设计这种综合考虑三种因素的多参数决策目标信道选择机制。它同样考虑信道增益和历史平均空闲时长,但不进行接入概率的控制;考虑信道的热度问题,但在进行信道热度的判断,当认知用户到来时通过相关性能参数进行信道选择接入。设计性能参数 ψ_{nm} 表示认知用户 m 在信道 n 上的信道历史平均空闲时间与增益的乘积比上作为目标信道数目,由(8)式给出:

$$\psi_{nm} = \frac{T_{Ann} \cdot K_{nm}}{k+1} \quad (8)$$

在多参数决策目标信道选择机制中,认知用户 m 到来时选择 ψ_{nm} 最大的信道 n 接入,从而使得被选信道具有信道增益高、空闲时间长且信道热度低的特点。

3 仿真结果及分析

下面在多认知用户无检测错误的前提下,通过MATLAB对本文提出的目标信道选择机制进行仿真,并从网络吞吐量、认知用户信道占用率、频谱资源利用率、认知用户通信中断率主要性能方面与随机分配信道的接入机制RSS(Random Sensing Sequence Scheme)进行对比分析。

系统具体仿真参数设置如下:系统中每个子载波的带宽 B 设为1/32MHz,系统授权用户数为16。系统功率归一化后,各子信道的功率 P 为 $16^{-1/2}$ mW。AWGN功率谱密度 N_0 为-80db-W/Hz,信道环境为瑞利衰落信道,信道增益 K_{nm} 在均值为1的瑞利分布下随机生成。则每个信道的信噪比为 $SNR = \frac{P \cdot K_{nm}}{B \cdot N_0}$ 。信道历史平均空闲时长取0.5~10slot的随机值。时隙总数为slot=21,实验次数为1000次,取平均值得出各个性能参数。认知用户的到来是随机的。

首先仿真分析目标信道选择机制的系统吞吐量特

性。由图5可以看出由于多属性决策信道选择机制与基于最大化网络吞吐量的信道选择机制都综合考虑信道增益和空闲时间两种因素,在信道选择过程中,都以实现最大化系统容量为目的地进行接入,系统吞吐量明显高于随机分配信道的接入机制,而多属性决策信道选择机制又通过信道热度的分析,减少了用户间的传输竞争,避免了网络中的信道过载及欠载现象,在系统吞吐量上相对于基于最大化网络吞吐量的信道选择机制又有了提高。因此说明,多属性决策信道选择机制在改善系统吞吐量性能方面更具有优势。

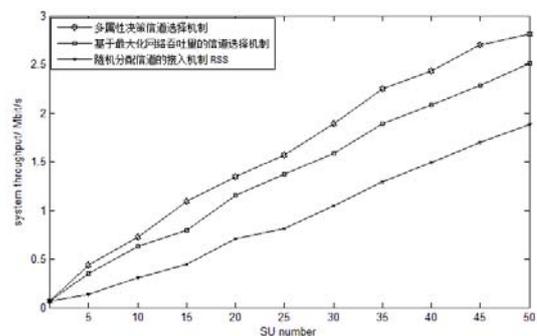


图5 系统容量仿真图

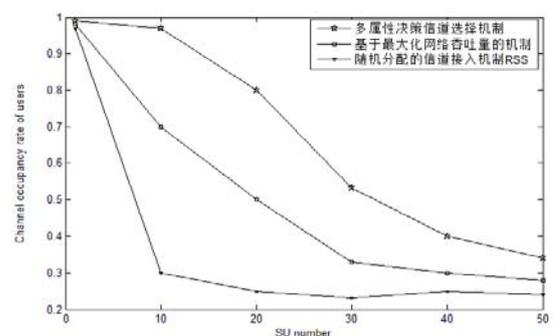


图6 认知用户信道占用率

定义认知用户信道占用率为网络中认知用户通信占用的空闲信道总数与通信认知用户总数的比值。其次,针对认知用户信道占用率进行仿真,结果如图6所示。很明显,本文提出的多属性决策信道选择机制通过引入信道热度参数,可以有效的避免信道的欠载和过载、用户选择拥塞现象,从而提升了用户信道占用率。

再次针对各目标信道选择机制在频谱资源利用率性能上进行仿真分析。在 $M=16$ 的情况下,信道资源利用率如图7所示。从图中可以看出,基于最大化网络吞吐量的信道选择机制与RSS接入机的信道资源利

用率都低于多属性决策信道选择机制。这主要是由于在后者机制中考虑了网络负载平衡,一定程度上避免信道欠载造成的资源浪费和过载形成的通信碰撞现象,使各空闲信道数据传输能力充分被利用。

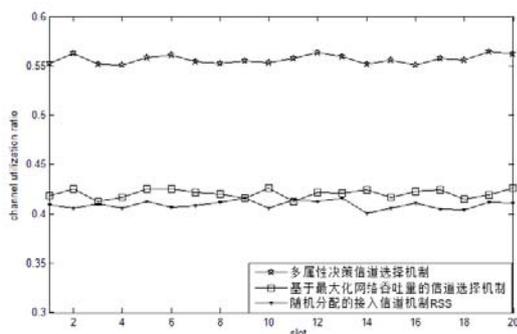


图 7 频谱资源利用率

最后,针对各机制在认知用户通信中断率(由于主用户的出现,认知用户在数据传输过程中必须中断当前传输,造成通信中断事件,将数据传输中断次数与系统总数据传输次数的比值作为通信中断率)性能上进行仿真分析。进行时隙总数为 slot=21 的 1000 次仿真,然后取均值得出结果如表 1 所示。

表 1 认知用户通信中断率

| 信道选择机制 | 认知用户通信中断率 |
|-----------------|-----------------------|
| 多属性决策信道选择机制 | 2.00×10^{-2} |
| 基于最大网络吞吐量的选择机制 | 1.95×10^{-2} |
| 随机分布的信道接入机制 RSS | 3.50×10^{-2} |

从表 1 中可以看出多属性决策信道选择机制和基于最大网络吞吐量的选择机制相对于随机分布的信道接入机制 RSS 能明显降低网络认知用户通信中断率,提高网络通信可靠性。这主要归功于前两个机制中引入了历史平均空闲时间因素,一定程度上保证所选信道能够提供满足用户通信需求的空闲时间。

4 结语

认知无线网络中,认知用户采用“见缝插针”的方式选择授权系统空闲信道进行动态接入,在通信过程中,用户目标信道的选择机制对系统容量有着重要影响。本文首先从决定网络吞吐量参数的主要因素出发,综合考虑信道增益和空闲时间两种因素,设计了基于最大化系统容量的目标信道选择机制,实现用户具有高传输速率、低通信时延的信道选择目的,而后

为了避免信道出现过载及欠载现象,减少用户间的传输竞争以及进一步提高系统吞吐量,引入信道热度概念,提出一种低复杂度的多属性决策信道选择机制。仿真结果表明,综合信道空闲时间、信道增益、信道热度三种因素的多参数决策目标信道选择机制在系统吞吐量和频谱资源利用率性能上都有明显的提高,具有更好的实用特性。下一步将针对多小区网络环境中的信道接入机制进行研究。

参考文献

- Haldar KL, Ghosh C, Agrawal DP. Dynamic spectrum access and network selection in heterogeneous cognitive wireless networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2013, 9(4): 484-497.
- Okada M, Hatanaka M, Kagawa K. Realization of secure ambient wireless network system based on spatially distributed ciphering function. *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2013, 96(11): 2182-2184.
- 王金龙,吴启晖,龚玉萍.认知无线网络.北京:机械工业出版社,2010.
- Ma LC, Min Y, Pei QQ. A dynamic intrusion detection mechanism based on smart agents in distributed cognitive radio networks. *Genetic and Evolutionary Computing*. Springer International Publishing, 2014: 283-290.
- Ali A, Sakhare M, Hwang K, Suh DY. A novel channel indexing-based channel selection algorithm for cognitive radio networks. 2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC). Korea. 2013: 682-687.
- Zheng S, Yang X, Chen S. Target channel sequence selection scheme for proactive-decision spectrum handoff. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(12): 1332-1334.
- Ahmed E, Liu J, Shiraz M. Fuzzy-based spectrum handoff and channel selection for cognitive radio networks. *Proc. International Conference on Computer Control, Information and Its Applications*. IEEE Press, 2013: 23-28.
- Pham C, Tran NH, Do CT. Spectrum handoff model based on hidden markov model in cognitive radio networks. *Proc. of the 28th International Conference on Information Networking*. IEEE Press, 2014: 406-411.
- 张国斌.认知无线电系统基于信道选择的动态接入方法研

- 究.南京邮电大学学报,2014,4(32): 99–103.
- 10 Qin HZ, Xian YJ, Xu CB. Study of spectrum handover based on grading in cognitive radio systems. *Computer Engineering and Applications*, 2011,47(18): 118–121.
- 11 潘春雨,闫坤,张向利.认知无线电频谱切换的高效信道选择机制.计算机工程与应用,2015,47(27):158–162.
- 12 Wu Q, Xian YJ, Xu CB, et al. Study on handover channel selection in cognitive radio based on multiattribute making decision. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(27): 158–160.
- 13 朱星宇,周怀北,黄俊园.认知无线网络中基于信道感知排序的频谱切换.电信科学,2013,5(4):51–56.
- 14 Wang SX, Guo WQ, Kadir A. Cognitive radio network channel selection algorithm based on dynamic spectrum game binding mechanism. *Application Research of Computers*, 2015, 9(32): 2733–2737.
- 15 Wang P, Zhong X, Xiao L. A general power allocation algorithm in OFDM-based cognitive radio system. *Proc. IEEE ICC*. Dresden, Germany: IEEE Press, 2009: 1–5.