

# 认知无线 Mesh 网络中基于概率的贪婪频谱决策技术研究

杨云 章国安 邱恭安

(南通大学电子信息学院 南通 226019)

**摘要** 认知无线电网络传统的频谱决策方法中次用户根据不同的判据选择信道,会引起信道竞争和拥塞。针对认知无线 Mesh 网络中基于概率的频谱决策方法,提出一种贪婪信道选择算法,当发生频谱切换时,其结合改进的抢占优先(PRPR)M/G/1 排队理论为次用户选择最佳的目标信道。数值分析结果表明,该算法能够提高并均衡信道利用率,并且在次用户平均到达率较小的情况下,能进一步减少次用户的平均总传输时间,提高网络性能。

**关键词** 认知无线 Mesh 网络,频谱决策,贪婪算法

中图分类号 TN92 文献标识码 A

## Research of Probability-based Greedy Spectrum Decision in Cognitive Wireless Mesh Networks

YANG Yun ZHANG Guo-an QIU Gong-an

(School of Electronics & Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract** For the traditional spectrum decision methods in cognitive radio networks, the secondary users select their communication channel based on various criteria, which may result in channel contend and congest. Considering probability-based spectrum decision in cognitive wireless mesh networks, a greedy channel selection algorithm was proposed. When spectrum handoff occurs, the proposes algorithm combined with the improved preemptive resume priority (PRP) M/G/1 queuing theory to select optimal target channels for secondary users. Numerical analysis results show that the algorithm can increase and balance the channel utilization. With lower average arrival rate of secondary users, the average overall transmission time of the secondary users has been further reduced and the network performance is enhanced.

**Keywords** Cognitive wireless Mesh networks, Spectrum decision, Greedy algorithm

## 1 引言

认知无线 Mesh 网络(Cognitive Wireless Mesh Networks, CogWMN)是一种基于 Mesh 架构应用认知无线电(CR)技术的无线通信系统<sup>[1,2]</sup>,由授权的 Mesh 主用户(PU)和非授权的 Mesh 次用户(SU)组成。PU 具有绝对的频谱接入权, SU 配有 CR 模块,能够机会式地使用当前处于空闲状态的 PU 的授权频段。CogWMN 具有 CR 的频谱高效性和 WMN 的开放灵活性,能够满足新型网络对开放频谱接入和高效频谱利用的要求。

频谱决策是认知无线网络中的一个关键问题,它能够帮助次用户在候选信道中选择最佳的信道传输业务<sup>[3]</sup>。频谱决策不仅要考虑带宽、延时等因素,还要考虑 PU 行为以及 SU 业务类型。在传统的频谱决策方法<sup>[4-7]</sup>中,所有的次用户都倾向于选择同一条相对较好的信道来传输数据,这必然会引起信道的竞争和拥塞,从而导致信道利用的不均衡。针对这一问题,文献[8]提出了基于概率的频谱决策方法,其能够阻止

过多次用户竞争同一信道。然而,在利用 PRP M/G/1 排队网络理论解决频谱切换导致的服务时间增加问题时,仅仅考虑了次用户停留在被主用户中断的信道上等待信道再次空闲的情况。实际上,当干扰发生时,次用户可以选择在当前信道上等待,也可以切换到其他信道上进行传输。对于延时敏感的业务,我们期望次用户中断引起的延时越小越好。因此,本文在文献[8]的基础上,研究了 CogWMN 中时基于概率的贪婪频谱决策方法,当发生频谱切换时,其利用改进的 PRP M/G/1 排队模型,使用贪婪算法选择目标信道,从而降低次用户的平均总传输时间。

## 2 基于概率的频谱决策算法

### 2.1 系统模型

本文考虑一个由  $M$  个 PU 节点和  $N$  个 SU 节点组成的认知无线 Mesh 网络。频谱被分为  $M$  个相互独立的信道,每个 PU 占用一个授权信道。假设次用户能够准确地感知主用户的行为。在某一时刻,如果次用户检测到当前操作信道空

本文受国家自然科学基金项目(61071086),江苏省高校自然科学基金项目(11KJB510021),南通市科技计划项目(HS2011015),南通大学研究生科技创新计划项目(YK11058)资助。

杨云(1988-),女,硕士生,主要研究方向为认知无线 Mesh 网络, E-mail: 632013447@qq.com; 章国安(1965-),男,博士,教授,主要研究方向为无线通信网络、认知无线 Mesh 网络等, E-mail: gzhang@ntu.edu.cn(通信作者); 邱恭安(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信网络。

闲,那么次用户在该时隙内可以在该信道上传输业务。如果检测为忙,则次用户必须执行频谱切换重新开始未完成的业务传输。次用户可以选择在当前信道等待,或者切换到其它信道。

## 2.2 频谱决策行为模型

假设主用户和次用户的到达过程都是 Poisson 过程。用  $\lambda_p^{(k)}$  和  $X_p^{(k)}$  表示信道  $k$  上主用户的平均到达率和传输持续时间,  $\lambda_s$  和  $X_s$  表示次用户的平均到达率和传输持续时间。  $X_p^{(k)}$  和  $X_s$  的概率密度函数分别为  $b_p^{(k)}(x)$  和  $b_s(x)$ 。由文献[9]可知,参数  $\lambda_p^{(k)}$ 、 $\lambda_s$ 、 $b_p^{(k)}(x)$  和  $b_s(x)$  是可以估算出来的。本文讨论的频谱决策模型与文献[8]中分析模型类似,如图 1 所示。当次用户到达 CogWMN 系统时,根据最佳概率分配矢量  $P^*$  选择信道进行业务传输。令  $p_k$  表示次用户选择信道  $k$  作为当前操作信道的概率。概率分配矢量  $P=(p_1, p_2, \dots, p_M)$  用来描述整个网络频谱决策的结果。

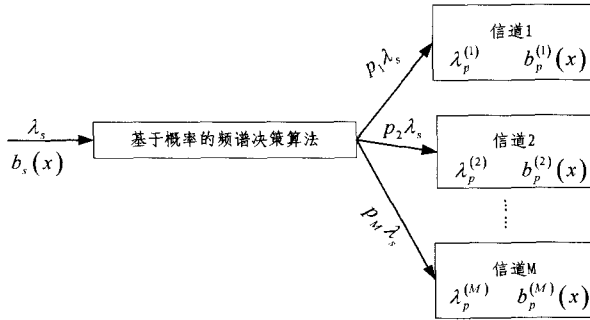


图 1 基于概率的频谱决策模型

以最小化系统的平均总传输时间为目标。由图 1 可知,次用户根据预定义的概率分配矢量选择操作信道。平均总传输时间最小化问题可以表示成带约束条件非线性规划形式:

$$P^* = \arg \min_{\mathbf{p}} E[T(p)] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^M p_k = 1 \quad (2)$$

$$0 \leq p_k \leq 1, \forall k \in \Omega \quad (3)$$

$$\rho^{(k)} = \rho_p^{(k)} + \rho_s^{(k)} = \lambda_p^{(k)} E[X_p^{(k)}] + p_k \lambda_s E[X_s] \leq 1, \quad \forall k \in \Omega \quad (4)$$

式中,  $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$  表示候选信道集;  $\rho^{(k)}$  表示主用户和次用户占用信道  $k$  所产生的信道忙概率,也就是信道利用率;  $\rho_p^{(k)}$  和  $\rho_s^{(k)}$  分别表示主用户和次用户占用信道  $k$  的概率。

## 3 平均总传输时间分析

总传输时间  $T$  定义为从业务请求到达系统直到完成完整的传输所持续的时间。对于低优先权的次用户,其业务请求只有在当前所选信道空闲时才能开始传输,因此总传输时间包括总等待时间  $W$  和总服务时间  $S$ 。利用改进的 PRP M/G/1 排队网络理论描述主用户和次用户的频谱使用行为,进而求出次用户的总传输时间,图 2 是一个两信道情况下改进的 PRP M/G/1 排队网络模型。其中,主用户和次用户分别置于高优先权和低优先权队列。当次用户被主用户中断时,可以选择停留在当前信道,此时未完成的传输将被插在低优先权队列的头部;次用户还可以选择其他信道准备传输,此时未完成的传输将被插在低优先权队列的尾部,这也是与传统

PRP M/G/1 排队网络模型的不同之处。

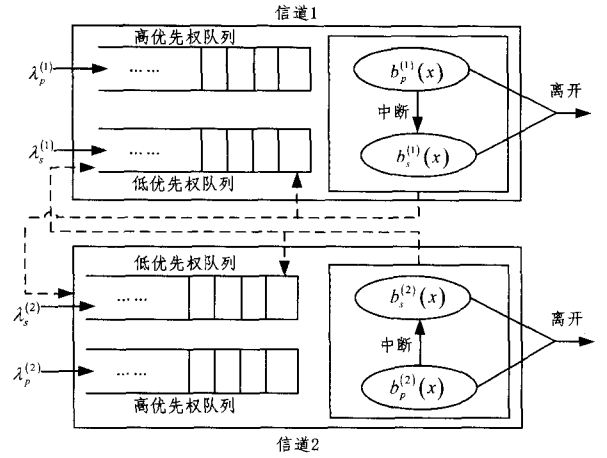


图 2 改进的 PRP M/G/1 排队网络模型

### 3.1 平均总等待时间

总等待时间  $W$  定义为业务到达系统到开始传输所需的时间。根据图 2 和 PRP M/G/1 排队理论<sup>[10]</sup>可知,次用户在信道  $k$  上的等待时间为:

$$W^{(k)} = \frac{E[R^{(k)}]}{(1 - \rho_p^{(k)})(1 - \rho_p^{(k)} - \rho_s^{(k)})} \quad (5)$$

式中,  $E[R^{(k)}] = \frac{1}{2} \lambda_p E[(X_p^{(k)})^2] + \frac{1}{2} p_k \lambda_s E[(X_s)^2]$  表示当前信道上主用户和次用户的平均剩余服务时间。

因此,平均总等待时间可表示为:

$$E[W] = \sum_{k=1}^M p_k W^{(k)} \quad (6)$$

### 3.2 平均总服务时间

总服务时间  $S$  定义为业务开始传输到完成整个传输所需的时间。由图 2 可知,总服务时间为包括业务本身在无干扰条件下传输所需要的时间和频谱切换的时间以及频谱切换后的等待时间:

$$S^{(k)} = E[X_s] + E[N^{(k)}] E[H] \quad (7)$$

式中,  $E[N^{(k)}] = \lambda_p E[X_p]$  表示次用户服务期间到达的主用户数,即平均干扰数。  $E[H]$  表示主用户对次用户一次干扰所产生的延时,即频谱切换发生时刻到再次开始传输时刻之间的持续时间。

因此,平均总服务时间可表示为:

$$E[S] = \sum_{k=1}^M p_k S^{(k)} \quad (8)$$

### 3.3 贪婪频谱切换算法

为降低计算复杂度,利用次优的贪婪算法选择频谱切换的目标信道,以减少总服务时间。由文献[11]可知,  $Y_p^{(k)} = \frac{E[X_p^{(k)}]}{1 - \lambda_p^{(k)} E[X_p^{(k)}]}$  表示信道  $k$  上被主用户占用的时段,即发生一次频谱切换时次用户在原信道停留等待的时间。由前面的分析可知,次用户选择切换到其他信道所用的时间为  $W_s^{(l)} + \tau$ , ( $l \neq k, l \in \Omega$ )。当发生频谱切换时,次用户选择使切换延时最小的目标信道。假设次用户在当前信道 1 上的传输被主用户中断,比较  $Y_p^{(1)}$  和  $W_s^{(l)} + \tau$ , ( $l \neq 1, l \in \Omega$ ),更新当前使用的信道号,当发生频谱切换时,重复上述操作。图 3 所示为 3 个可用信道情况下,贪婪算法所决定的可能的频谱切换方案。

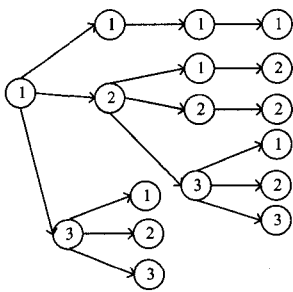


图3 贪婪切换算法

#### 4 数值分析结果

假设主用户和次用户的传输时间服从指数分布,且具有相同优先权的用户在排队网络中遵从先到先服务(FCFS)原则。主用户具有抢占优先权。

给定一个具有4个授权信道的 CogWMN 系统:  $(\lambda_p^{(1)}, \lambda_p^{(2)}, \lambda_p^{(3)}, \lambda_p^{(4)}) = (0.3, 0.3, 0.4, 0.4)$ ,  $(E[X_p^{(1)}], E[X_p^{(2)}], E[X_p^{(3)}], E[X_p^{(4)}]) = (1.2, 1.4, 1.2, 1.4)$ 。使用 active-set 方法<sup>[12]</sup>求解非线性规划问题。对于文献[8]中提出的基于概率的频谱决策方法,图4和图5分别给出了次用户平均到达率  $\lambda_s$  对最优概率分配矢量和授权信道利用率的影响。从图4可以看出,当  $\lambda_s = 0.1$  时,所有的次用户都偏好于选择信道1传输。业务,因为信道1的业务量最少。随着  $\lambda_s$  的增加,部分次用户开始选择其他信道进行传输以平衡各信道上的业务负载。例如,当  $\lambda_s = 0.9$  时,最优的概率分配矢量为  $(0.4035, 0.2932, 0.2247, 0.0786)$ 。很显然,信道1被选择用来传输业务的概率还是最大的。从图5可以看出,当  $\lambda_s = 0$  时,信道1的利用率最低;然而,当  $\lambda_s \geq 0.5$  时,信道1的利用率最高,这是因为大多数的次用户倾向于选择信道1传输业务,图4给出的概率分配情况正好说明了这一点。

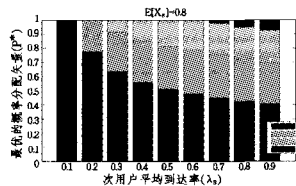


图4 最优概率分配矢量

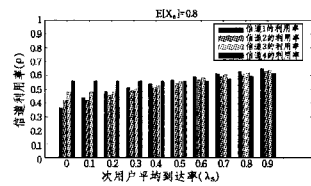


图5 信道利用率

考虑一个两信道的 CogWMN 系统,且信道具有相同的业务特性:  $\lambda_p = 0.3$ ,  $E[X_p] = 1$ ,  $E[X_s] = 0.8$ ,  $\tau = 0.1$ 。图6比较了3种不同频谱决策算法的平均总传输时间。这里随机信道选择表示等概率地选择其中一个作为操作信道。从图6可以看出,当  $0.1 \leq \lambda_s \leq 0.5$  时,基于概率的贪婪频谱决策算法的平均总传输时间最小;而当  $0.5 \leq \lambda_s \leq 0.9$  时,所提方法与文献[8]得到相同的传输时间,并且小于随机决策方法,这是因为此时贪婪算法总是选择在当前信道等待,与文献[8]所使用的决策方法相同。因此,当  $\lambda_s$  较小时,基于概率的贪婪频谱决策算法的平均总传输时间总是最小的,性能相对最优。在  $E[X_p] = 0.3$ ,  $E[X_s] = 0.6$ ,  $\tau = 0.1$  的条件下,图7给出了在不同主用户平均到达率  $\lambda_p$  时,  $\lambda_s$  对所提算法的平均总传输时间的影响。从图7可以看出,  $\lambda_p$  越大,平均总传输时间越大,因为  $\lambda_p$  的增大导致了信道切换次数的增多。

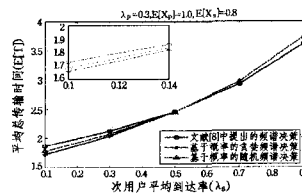


图6 平均总传输时间的比较

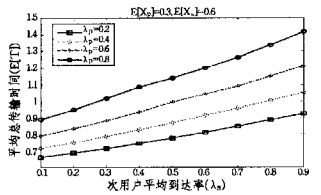


图7 基于概率的贪婪频谱决策算法

**结束语** 在认知无线 Mesh 网络环境下,以最小化次用户的平均总传输时间为目标,利用非线性规划给出了在次用户不改变信道情况下的最佳概率分配矢量,解决了传统频谱决策算法中信道竞争和利用不均衡的问题。在此基础上,本文提出了一种基于概率的贪婪频谱决策算法,该算法不仅考虑了 PU 行为和 SU 业务类型,而且结合 PRP M/G/1 排队模型和贪婪算法分析了频谱切换对次用户服务时间的影响。数值分析结果表明,该算法有效地减小了次用户的平均总传输时间,提高了网络性能。

#### 参考文献

- [1] Chen Tao, Zhang Hong-gang, Matinmikko M, et al. CogMesh: Cognitive wireless mesh networks [C] // IEEE GLOBECOM Workshops, 2008; 1-6
- [2] 顾金媛,章国安,包志华. 认知无线 Mesh 网络联合多径路由和信道分配策略[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 45-48
- [3] Wang Li-chun, Wang Chung-wei. Load-balancing spectrum decision for cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2011, 29(4): 757-769
- [4] Kim H, Shin K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 533-545
- [5] Chun H A C, Wei D S L, Kuo C-C J. A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2007; 105-110
- [6] Zhao Q, Tong L, SWAMI A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3): 589-600
- [7] Zhu Ping, Li Jing-long, Wang Xu-fa. A new channel parameter for cognitive radio[C] // CrownCom, 2007; 482-486
- [8] Wang Chung-wei, Wang Li-chun, Adachi F. Modeling and analysis of multi-User spectrum selection schemes in cognitive radio networks[C] // IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009; 828-832
- [9] Li Xiu-kui, Zekavat S A. Traffic pattern prediction and performance investigation for cognitive radio systems [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008; 894-899
- [10] Ng C-H, Soong B-H. Queuing modeling fundamentals with applications in communication networks[M]. John Wiley and Sons Inc, 2008
- [11] Wang Chung-wei, Wang Li-chun. Modeling and analysis for proactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks[C] // IEEE International Conference on Communications, 2009; 1-6
- [12] Bartlett R A, Wachter A, Biegler T. Active set vs. Interior point strategies for model predictive control[C] // Proceedings of American Control Conference, 2000; 4229-4233