



CVANET 中基于 POMDP 模型的频谱接入算法 *

张雪飞, 章国安, 季彦呈

(南通大学电子信息学院 南通 226019)

摘要: 针对认知车载 Ad Hoc 网络(CVANET)信道的动态特性,以部分可观测马尔科夫决策过程(POMDP)为模型对认知车辆用户的频谱感知和频谱接入过程进行研究,提出基于 POMDP 模型的分布式机会频谱接入算法,并通过贪心算法降低 POMDP 算法计算量,最后通过仿真研究影响认知车辆用户吞吐量的主要因素,并验证算法的可行性。仿真分析结果表明,认知车辆用户通过本算法接入吞吐量得到有效提高,降低了交通中广播风暴的可能,并且降低了计算量。

关键词: 认知车载网; 认知无线电; 部分可观测马尔科夫决策过程; 频谱接入; 贪心算法

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.09.016

Spectrum Access Algorithm Based on POMDP Model in CVANET

Zhang Xuefei, Zhang Guoan, Ji Yancheng

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

Abstract: For the dynamic features of cognitive vehicular Ad Hoc network (CVANET) channel state, a study on spectrum sensing and access of cognitive vehicle users was presented, which was based on framework of partially observable Markov decision process (POMDP). Then, a decentralized opportunity spectrum access based on POMDP model was proposed. Because there is a huge computational complexity, the greedy algorithm was sought. Finally, the influence factors of cognitive vehicle user throughput through the simulation were studied, and the feasibility of the algorithm was verified. The simulation results show that cognitive vehicle user's access throughput is effectively improved by this algorithm which avoid the happening of broadcast storm and also simplify the calculation.

Key words: cognitive vehicular network, cognitive radio, partially observable Markov decision process, spectrum access, greedy algorithm

1 引言

认知无线电允许授权和未经授权的用户之间共享频谱资源,通过未经授权的用户(次用户)向当前用户(主用户)借用未使用的授权频谱实现,同时保护主用户的权利。近年来认知无线电(cognitive radio, CR)技术备受研究界的关注,因为它能够根据终端用户的请求,实现按需频谱利用。认知车载 Ad Hoc 网络(CVANET)是 CR 技术中一个

有前景的发展应用领域,因为在车载网络中,基于车间通信的一些新的服务和应用对带宽和时延有严格的要求,这在固定的频谱分配策略中是无法保障的。

认知车载网络在安全信息传播以及娱乐应用方面有很大的发展潜力。在美国,5.9 GHz 频段的 75 MHz 频谱分配给专用短程通信(dedicated short range communication, DSRC)用于智能交通系统(ITS)。在欧洲,5.9 GHz 频段仅分配了 30 MHz。在日本,700 MHz 频段分配了接近 10 MHz^[1]。

* 国家自然科学基金资助项目(No.61371113),交通运输部应用基础研究基金资助项目(No.2013-319-825-110)



随着车辆通信变得无处不在并且新应用日益普及,对带宽的需求大大增加,最终造成频谱短缺。基于这种现状,本文研究了认知车载网络的动态频谱接入问题。

本文以频谱感知无差错情况下的认知车载设备为研究对象,提出基于部分可观测马尔科夫决策过程(partially observable Markov decision process, POMDP)模型的机会频谱接入算法,并通过贪心算法降低 POMDP 算法计算量^[2],最后通过仿真研究影响认知车辆用户吞吐量的主要因素,并证明算法的可行性。

2 系统模型

2.1 主用户网络模型

假设所有的主用户以同步时隙的方式工作,系统各个信道采用频分复用的方式(如 OFDM 系统)工作且认知网络系统已经跟踪上了复用时钟。系统中主用户频段由 N 个独立同分布的子信道组成,每个信道划分成不同的时隙,每一个时隙的长为 t_0 ,第 i 个子信道的带宽为 $B_i(i=0,1,\dots,N)$ 。每个信道的工作过程可以看作一个离散 Markov 过程,其状态转移如图 1 所示,其中, p_{01} 、 p_{10} 表示信道状态转移概率,每个信道都有两个工作状态 $s_i(t) \in \{0,1\}$: 0 表示占用,1 表示空闲。假设在 T 个观察时隙内主用户的频谱使用统计特性保持不变^[3]。

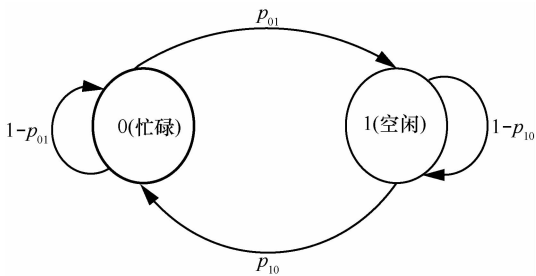


图 1 授权网络信道状态转移

用 p_0 表示一个信道在某个时隙忙碌的概率, p_1 表示一个信道在某个时隙空闲的概率,通过概率论知识可以得到:

$$p_1 = (1-p_1)p_{01} + p_1(1-p_{10}) \quad (1)$$

整理移项可得一个信道在某个时隙内可用的概率为:

$$p_1 = \frac{p_{01}}{p_{01} + p_{10}} \quad (2)$$

同理可得一个信道在某时隙内忙碌的概率为:

$$p_0 = \frac{p_{10}}{p_{01} + p_{10}} \quad (3)$$

假设总共观测 T 个时隙,主用户网络信道的使用状况如图 2 所示。

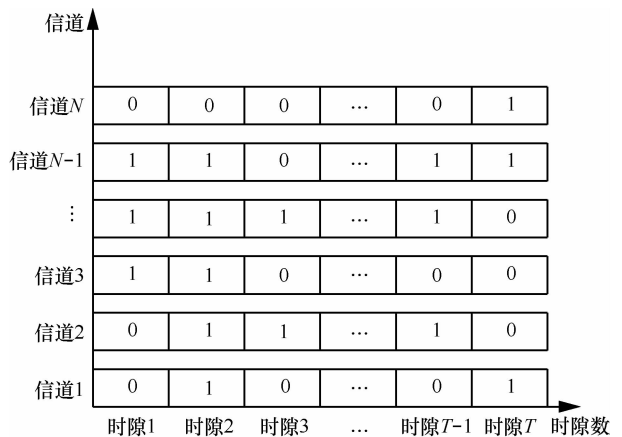


图 2 授权网络信道使用状况

假设认知车辆用户在如图 2 所示的 N 条信道中寻找频谱机会,认知车辆用户会在每一个时隙感知信道状态,然后根据感知结果接入符合条件的信道^[4]。由于硬件水平和能耗的限制,假设认知车辆用户在每个时隙选择进行频谱感知的信道数为 $N_1(N_1 < N)$,选择进行频谱接入的信道数为 $N_2(N_2 \leq N_1)$ 。

2.2 认知车辆用户时隙结构

如图 3 所示,在每个时隙的开头,当认知车辆用户有数据需要传输时,首先对该信道进行感知,感知结束后,再根据感知结果选择是否接入^[5]。在限制对主用户干扰的前提下,认知车辆用户充分利用感知历史及主用户占用信道的统计信息,最大化自身的吞吐量。为了避免误检导致认知车辆用户同主用户发生碰撞,认知车辆用户需设计一个应答(acknowledgement, ACK)信号计数器。当认知车辆用户进行数据传输时,如果接收端返回给发射端一个 ACK 信号,表示数据传输成功;如果 ACK 信号没有在认知车辆用户传输数据时被返回,那么认知车辆用户必须放弃数据传输,从而避免与主用户碰撞。



图 3 认知车辆用户时隙结构

3 基于 POMDP 模型的频谱接入算法

3.1 频谱感知统计量

在一个认知车载网络中,使用部分可观测马尔科夫决策过程作为模型是因为信道状态对于认知车载用户只是

部分可知的。假设某认知车载网络中有 N 条信道,为了准确感知主用户的频谱使用状态,引入置信向量 $\Lambda(t)=[\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_M(t)]$ 。其中 $\lambda_i(t)$ 表示在时隙 t 内,认知车辆用户根据网络历史的观察和当前部分信道的观测结果得到的信道状态处于 i 的条件概率,其中 i 的取值范围是 $1 \sim M$,而 $M=2^N$ 。

认知车辆用户在时隙的频谱感知阶段选择信道集合 $A_1(|A_1| \leq N_1)$ 进行检测^[6],选择信道集合 $A_2(|A_2| \leq N_2)$ 进行接入,用 $\{A_1(t), A_2(t)\}$ 表示频谱感知后的最优接入方案。在一个时隙 t 内,规定置信向量 $\Lambda(t)$ 是 $\{A_1(t), A_2(t)\}$ 的充分统计量。那么基于部分可观测马尔科夫决策过程,每一个时隙 t 内,认知车辆用户需要获得能实现 $\Lambda(t)$ 到 $\{A_1(t), A_2(t)\}$ 映射的策略,即:

$$\pi(t)=[\pi_1(t), \dots, \pi_T(t)] \quad (4)$$

其中 $\pi_0: \Lambda(t) \in [0, 1]^M \rightarrow \{A_1(t_0), A_2(t_0)\}$ 。向量 π 是一个状态连续时间离散马尔科夫决策过程。

3.2 最优接入算法

在频谱感知阶段,认知车辆用户会选择空闲概率最大的信道进行检测,若检测到信道处于空闲状态,认知车辆用户会对该信道进行接入;若感知信道被主用户占用,则认知车辆用户不可以接入。根据香农定理,认知车辆用户 u 接入信道 n 的收益为 $b_{u,n}$ 可以表示为:

$$b_{u,n} = B_n \cdot \lg \left[1 + K_{eu} \cdot \frac{P_{u,n} \cdot |H_{u,n}|^2}{B_n \cdot \sigma_0^2} \right] \quad (5)$$

其中, $P_{u,n}$ 指次用户 u 在信道 n 上的发射功率, σ_0^2 表示单位带宽上的噪声功率, $|H_{u,n}|$ 表示认知车辆用户 u 在信道 n 上的信道增益, K_{eu} 是一个常数,表征认知车辆用户 u 对误比特率的要求。在瑞利信道下:

$$K_{eu} = -\frac{1.5}{\ln(5 \cdot P_{BER})} \quad (6)$$

其中, P_{BER} 是认知车辆用户 u 的误比特率^[7]。

用 $C_{j,n}$ 表示每个时隙内,认知车辆用户接入空闲信道时的吞吐量,如下:

$$C_{j,n} = S_n(t) \cdot b_{j,n} = S_n(t) \cdot B_n \lg \left[1 + K_{eu} \cdot \frac{P_{u,n} \cdot |H_{u,n}|^2}{B_n \cdot \sigma_0^2} \right] \quad (7)$$

其中, $S_n(t)$ 表示在时隙 t 内信道 n 的状态且 $S_n(t) \in \{0, 1\}$ 。

如果求出了每个时隙内认知车辆用户进行信道接入而获得的吞吐量,那么,最优接入算法就是接入空闲概率最大的信道,从而获得最大的总吞吐量期望值。最优信道

接入策略 π^* 可以表示为:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E_{\pi} \left[\sum_{t=1}^T C_{j,n}(t) | \Lambda(1) \right] \quad (8)$$

其中, $\Lambda(1)$ 表示初始置信向量。基于 POMDP 模型的频谱接入算法其实就是根据每个时隙 $\Lambda(t)$ 的更新做出决策。

假设当前置信向量为 $\Lambda(t)$,用 $V_i(\Lambda(t))$ 表示从时隙 t 开始到剩下所有时隙次用户接入信道累积的最大吞吐量期望^[8]。 $V_i(\Lambda(t))$ 包括两个部分:第一部分是时隙 t 的瞬时吞吐量 $\Theta_{j,n} C_{j,n}$;第二部分是从时隙 $t+1$ 开始到剩下所有时隙系统累积的最大吞吐量 $V_{t+1}(\Lambda(t+1))$ 。

$$\begin{aligned} V_i(\Lambda(t)) &= \max_{n=1, \dots, N} E[V_i(\Lambda(t))] \\ &= \max_{n=1, \dots, N} E \left\{ \sum_{i=1}^M \lambda_i \sum_{j=1}^M p_{i,j} \sum_{\theta=0}^1 Pr[\Theta_{j,n} = \theta] \right. \\ &\quad \left. (\theta C_{j,n} + V_{t+1}(\Lambda(t+1))) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中置信向量的更新是依据贝叶斯计算式与全概率计算式进行的,表示如下:

$$\lambda_j(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i(t) p_{i,j} Pr[\Theta_{j,n} = \theta]}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \lambda_i(t) p_{i,j} Pr[\Theta_{j,n} = \theta]} \quad (10)$$

3.3 贪心接入算法

在时隙 t 的频谱感知阶段,使用 $p_n(t)$ 表示信道 n 的可用概率,在满足所有信道相互独立的条件下,最优感知与接入策略的置信向量可表示为 $\Omega(t)=[p_1(t), \dots, p_N(t)]$,因此使用贪心算法来简化感知和接入算法。

在时隙 t 的频谱感知阶段,认知车辆用户 u 通过感知信道 n 所能够得到的香农容量为:

$$C = (p_n(t)(1-p_{10}) + (1-p_n(t))p_{01})b_n \quad (11)$$

其中, b_n 就是前文提到的 $b_{u,n}$, $p_n(t)(1-p_{10}) + (1-p_n(t))p_{01}$ 表示时隙 t 信道 n 可用的概率。最优的信道选择策略为:

$$a_*(t) = \arg \max_{n=1, \dots, N} ((p_n(t)(1-p_{10}) + (1-p_n(t))p_{01})b_n) \quad (12)$$

置信向量的更新如下:

$$\Omega(t+1)=[p_1(t+1), \dots, p_N(t+1)] \quad (13)$$

$$p_n(t+1) = \begin{cases} 1, & a_*(t) = n, \Theta_{a_*(t)} = 1 \\ 0, & a_*(t) = n, \Theta_{a_*(t)} = 0 \\ p_n(t)(1-p_{10}) + (1-p_n(t))p_{01}, & a_*(t) \neq n \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,每个时隙的最后,对于所有监听到的信道,会依据感知策略的 $a_*(t)$ 和对应的感知结果 $\Theta_{a_*(t)}$ 更新置信向量,而对于未被监听到的信道,会依据马尔科夫过程更新置信向量。



采用贪心算法, 认知车辆用户从第 t 个时隙开始到剩下所有时隙接入信道能够获得的最大累积收益用 $W_t(\Omega(t))$ 表示为:

$$\begin{aligned} W_t(\Omega(t)) &= (p_{a_*}(t)(1-p_{10}) + (1-p_{a_*}(t))p_{01})b_{a_*} + \\ &\sum_{\theta=0}^1 Pr[\Theta_{a_*} = \theta | \Omega, a_*] W_{t+1}(\Omega(t+1)) \\ &= (p_{a_*}(t)(1-p_{10}) + (1-p_{a_*}(t))p_{01})b_{a_*} + \\ &[p_{a_*}(t)(1-p_{10}) + (1-p_{a_*}(t))p_{01}]W_{t+1}(\Omega(t+1)) + \\ &[p_{a_*}(t)p_{10} + (1-p_{a_*}(t))(1-p_{01})]W_{t+1}(\Omega(t+1)) \end{aligned} \quad (15)$$

在实际应用时, 迭代过程为:

$$W_{t+1}(\Omega(t+1)) = W_t(\Omega(t)) + (p_{a_*}(t)(1-p_{10}) + (1-p_{a_*}(t))p_{01})b_{a_*} \quad (16)$$

即:

$$W_{t+1}(\Omega(t+1)) = W_t(\Omega(t)) + \Theta_{a_*} b_{a_*} \quad (17)$$

3.4 仿真及结果分析

下面对上述算法进行仿真, 使用归一化带宽进行仿真, 并与传统的随机接入算法进行了比较。算法仿真流程如下。

(1) 初始化 $N, b_{a_*}, p_{01}, p_{10}$ 以及置信向量 $\Lambda(1) = \frac{p_{01}}{p_{01}+p_{10}}$ 。

(2) 根据贪心接入算法选择最优信道, 具体的贪心接入算法如下:

① 产生随机值 $uniformRV = rand(T+1, N)$, 用于更新信道状态;

② 由随机值与初始置信向量比较得出当前信道状态: $s(t) = (uniformRV(1, :)) < p_{01}$;

③ 由式 $\Lambda(t+1) = p_{a_*}(t)(1-p_{10}) + (1-p_{a_*}(t))p_{01}$ 计算下一个状态的置信向量;

④ 由式 (12) 选择当前最优的接入信道;

⑤ 由式 (14) 更新置信向量;

⑥ 由式 (18) 更新下一个时隙的信道状态:

$$\begin{aligned} s(t+1) &= s(t) \times (uniformRV(t+1, :)) < (1-p_{10}) \cdots + \\ &(1-s(t) \times (uniformRV(t+1, :)) < p_{01}) \end{aligned} \quad (18)$$

(3) 计算认知车载网络每秒的吞吐量。

图 4 和图 5 分别表示的是信道转移概率较低时认知车辆用户的接入吞吐量和信道转移概率较高时认知车辆用户的接入吞吐量。可以看出, 信道数为 4 的两条曲线明显高于信道数为 2 的两条曲线, 说明信道数量是影响认知车辆用户接入吞吐量的主要因素, 比较两图中信道数都为

2 或 4 的曲线可以看出, 在信道数相同的情况下, 信道转移概率越小 (信道状态越空闲), 认知车辆用户接入吞吐量越大, 而即使在信道转移概率较高 (信道状态为较繁忙) 的情况下, 本算法仍能使认知车辆用户获得较大的接入吞吐量。

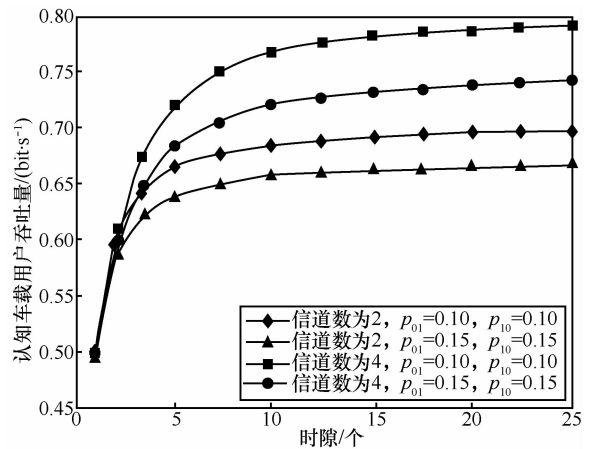


图 4 信道转移概率较低时认知车辆用户接入吞吐量

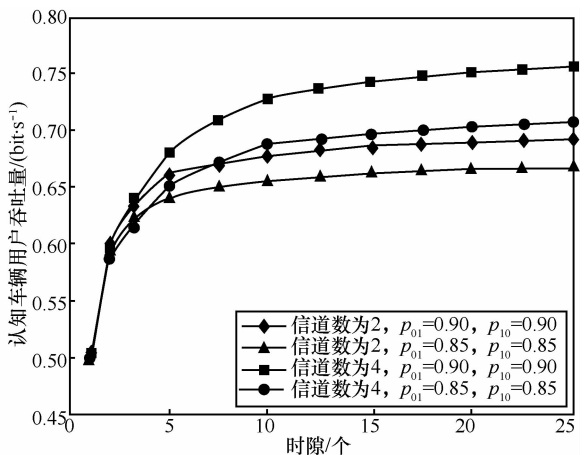


图 5 信道转移概率较高时认知车辆用户接入吞吐量

图 6 是两种不同条件下, 本文算法与传统随机接入算法的对比, 两种条件下的信道数都为 3, 条件 1 中为了使信道较为空闲, 令 $p_{01}=[0.1, 0.2, 0.15]$, $p_{10}=[0.15, 0.15, 0.1]$, 而条件 2 中为了使信道较为繁忙, 令 $p_{01}=[0.75, 0.85, 0.9]$, $p_{10}=[0.9, 0.75, 0.85]$ 。由图可以看出, 本文算法性能明显优于传统随机接入算法, 认知车辆用户获得更高的接入吞吐量。

4 结束语

本文以频谱感知无差错情况下的认知车载设备为研究对象, 提出基于 POMDP 模型的机会频谱接入算法, 并通过贪心算法降低 POMDP 算法计算量, 最后通过仿真研究

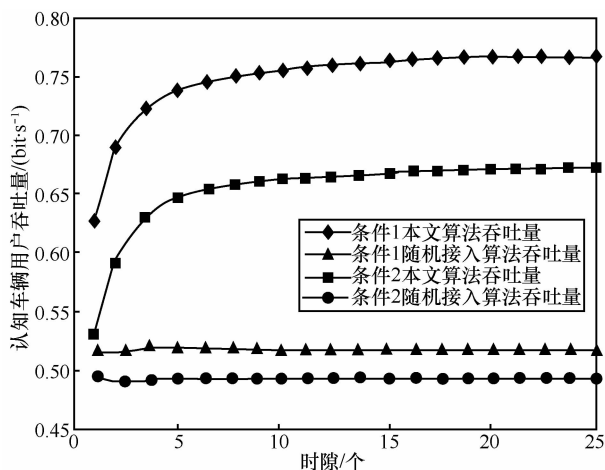


图6 本文算法与随机接入算法对比

影响认知车辆用户吞吐量的主要因素,并验证算法的可行性,仿真分析结果表明认知车辆用户通过本算法接入吞吐量得到有效提高,降低了交通中广播风暴的可能,并且降低了计算量。

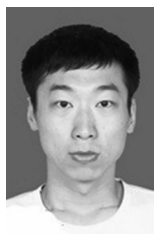
参考文献

- 1 常促宇. 车载自组网的现状与发展. 通信学报, 2007, 28(11): 116~126
- 2 Kae W C, Hossain E. Opportunistic access to spectrum holes between packet bursts: a learning-based approach. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10 (8): 2497~2509
- 3 Wang C X, Hong X M, Ge X H, et al. Cooperative MIMO channel models: a survey. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(2):80~87
- 4 Hossain M J, Dewan M A, Chao O. Maximizing the effective lifetime of mobile Ad Hoc networks. IEICE Trans on Communications, 2010, 91(9): 2818~2827
- 5 王昭然, 谢显中, 赵鼎新. 车载自组织网络关键技术. 电信科

学, 2011, 27(1):44~51

- 6 Song Y, Xie J. A proactive spectrum handoff framework for cognitive radio Ad Hoc networks without common control channel. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(7): 1127~1139
- 7 王艺, 邓佳佳, 林毅. 适用于车联网应用的移动通信网络. 电信科学, 2012, 28(6): 1~6
- 8 Kawadia V, Kumar P R. Principles and protocols for power control in wireless Ad Hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1):76~88

[作者简介]



张雪飞,男,南通大学电子信息学院硕士生,主要研究方向为 Ad Hoc 网络。



章国安,男,南通大学电子信息学院教授、博士生导师,主要研究方向为移动通信。



季彦呈,男,博士,南通大学电子信息学院讲师,主要研究方向为协作通信。

(收稿日期:2014-06-28)

·简讯·

2014年7月份通信业经济运行情况

7月份,我国3家基础电信企业通信业务整体发展基本稳定。

电信业务收入同比增速回落明显。7月,3家基础电信企业电信业务总量完成1 513.1亿元,同比增长14.6%;电信业务收入完成968.0亿元,按可比口径测算,同比增长4.6%。1-7月,电信业务总量突破1万亿元,完成10 132.1亿

元,同比增长15.0%;电信业务收入累计完成6 925.4亿元,按可比口径测算同比增长6.6%,比1-6月同比增长回落0.5个百分点。

1-7月,西部地区电信业务收入增速继续保持领先,但增速回落幅度最大。东、中、西部地区电信业务收入同比分别增长2%、3.4%、4.1%,比上年同期增速分别回落4.7、5.9、7.9个百分点。

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)