



车载自组织网络中基于竞争的时分多址 MAC 协议

张本宏¹, 吴浩浩¹, 俞磊²

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230601; 2. 安徽中医药大学 医药信息工程学院, 合肥 230012)

摘要: 车辆的高速移动及网络拓扑变化频繁等特性,使得可靠的介质访问控制(MAC)协议仍难满足车载自组织网络的低延迟和高吞吐量的要求。提出一种基于竞争的时分多址 MAC 协议,将道路按照通信半径分段,周期性地为每个路段的车辆组织通信,每个通信周期根据功能分为静态段和动态段两部分,静态段使用时分复用的方式进行通信,动态段用于新接入的车辆竞争静态段中的发送时隙。仿真实验结果表明,与DTMAC协议相比,该协议能够提高数据传输的吞吐量,降低车辆之间发生冲突的概率,减少新加入车辆发送数据的等待时延。

关键词: 车载自组织网络;介质访问控制协议;分布式调度;通信竞争;时隙分配

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 张本宏, 吴浩浩, 俞磊. 车载自组织网络中基于竞争的时分多址 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2021, 47(5): 154-159.

英文引用格式: ZHANG Benhong, WU Haohao, YU Lei. Contention-based time division multiple access MAC protocol in vehicular ad hoc networks[J]. Computer Engineering, 2021, 47(5): 154-159.

Contention-based Time Division Multiple Access MAC Protocol in Vehicular Ad Hoc Networks

ZHANG Benhong¹, WU Haohao¹, YU Lei²

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China;

2. School of Medical Information Technology, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China)

[Abstract] The high speed of vehicle movement and fast change of network topology make it a challenge to design a reliable Medium Access Control(MAC) protocol to meet the low latency and high throughput requirements of Vehicular Ad Hoc Networks(VANETs). This paper proposes a contention-based Time Division Multiple Access(TDMA) MAC protocol. First, the road is segmented according to the communication radius of vehicles, and then the vehicles in each segment are organized to communicate in a periodic manner. Functionally, each communication period is divided into the static segment and dynamic segment. The former is used for communication by time division multiplexing, and the latter is used for competing for time slots of transmission in the static segment to newly added vehicles. Simulation results show that compared with the DTMAC protocol, this protocol can significantly improve the data transmission throughput, decrease the probability of collision between vehicles, and reduce the waiting time of data sent by newly added vehicles.

[Key words] Vehicular Ad Hoc Networks(VANETs); Medium Access Control(MAC) protocol; distributed scheduling; communication contention; time slot allocation

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0057280

0 概述

智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)是将先进的信息技术、通信技术、传感技术以及计算机技术等有效地综合运用于整个交通运输管理体系,在缓解交通阻塞、减少交通事故中发挥着日益突出的作用,成为当前研究热点之一。而车载自组织网络(Vehicular Ad

Hoc Networks, VANETs)作为 ITS 的信息承载平台,更是受到了人们的广泛关注。车载自组织网络是由装载在车上的车载单元(On-Board Unit, OBU)、路边的通信基础设施等组成的自组织无线多跳网络。在车载自组织网络中,车辆需要周期性地交换状态信息以及安全信息等,但是车辆行驶时车速过快、网络拓扑变化频繁和无中心等特性^[1]造成了车联网中车与车之间(Vehicle

基金项目: 国家自然科学基金(61701005);安徽省科技重大专项(201903a05020049)。

作者简介: 张本宏(1972—),男,副教授,主研方向为车联网、无线传感器网络、边缘计算;吴浩浩,硕士研究生;俞磊(通信作者),副教授。

收稿日期: 2020-01-21 **修回日期:** 2020-04-17 **E-mail:** 1354505811@qq.com

to Vehicle, V2V)和车辆与路边单元之间(Vehicle to Roadside Unit, V2R)数据传输的不可靠。因此,可靠有效的介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议是人们研究的重点。

MAC协议通常分为基于竞争方式和基于非竞争方式^[2]。竞争方式在车辆密度较大时引起的冲突难以满足安全应用的时延要求,而在非竞争方式中,根据通信资源的分配方式又分为集中式和分布式两种。在集中式方式中,通常会借助路边单元(Road Side Unit, RSU)来进行通信资源分配,以减低冲突的产生,提高通信效率。根据不同服务质量(Quality of Service, QoS)的要求,研究人员提出了不同的方法。文献[3]提出的基于无干扰图 TDMA 调度(IG-TDMA)协议,通过收集其通信范围内的车辆信息并基于车辆位置和预设的无干扰阈值构建无干扰图,再使用通信链路选择算法决定节点发送的时隙。文献[4]将通信帧分为时间帧管理周期(TMP)、自由传输周期(FTP)和竞争周期(CP)。在 TMP 期间,RSU 估算和预测其通信范围内的车辆数,自适应地确定 FTP 和 CP 的时间。文献[5]提出一种 QoS 感知集中式混合 MAC(QCHMAC)协议,将访问时间分为预留周期(RP)和传输周期(TP),在 RP 内,新加入的车辆根据其优先级由 RSU 分配 TP 内的时隙,而在 TP 内由 RP 内预留成功的车辆进行通信。文献[6]提出基于捕获感知的 TDMA MAC(CT-MAC)协议,RSU 根据其通信范围内竞争车辆的估计数,优化每一个通信帧的长度。文献[7]提出了碰撞预测 TDMA MAC(CPTM)协议,RSU 根据预测即将到来的时隙中的合并冲突,适当地调整车辆的时隙分配,再根据车辆密度比率为不同方向的车辆重新分配时隙。文献[8]提出一种考虑实际环境条件的 TDMA MAC(VCAR-MAC)协议,在控制信道上,RSU 可以根据实际环境快速识别覆盖范围内的车辆数,确定车辆竞争的最佳时隙数以最小化碰撞的概率。文献[9]提出的多信道 MAC(RMM)协议,借助 RSU 的协调使得车辆在控制信道上对服务信道进行预约,实现了服务信道无竞争的传输。

上述方法需要在路旁安置大量的 RSU 来进行通信协调,一方面加大了开销,另一方面由于车辆的高速移动的特性,导致车辆与 RSU 之间频繁切换,还可能提高冲突发生的概率,因此,许多研究开始关注于分布式方式 MAC 协议。文献[10]提出一种自适应 Ad Hoc(A-ADHOC)协议,各个节点根据车辆密度调整每一帧的时隙数。文献[11]提出的 VeMAC 协议通过在控制信道上提供的广播服务,为在相反方向移动的车辆和 RSU 分配不相交的时隙集以减少传输冲突。文献[12]提出的移动性感知的 TDMA MAC(MoMAC)协议,则在考虑到车辆移动性的情况下,根据基础道路拓扑和车道分布为车辆分配时隙。文献[13]则在 VeMAC 协议基础上,提出无冲突预留的 MAC(CFR)协议,该协议根据当前的交通流量动态

地调整每个方向和速度级别的时隙数。文献[14-15]提出一种基于博弈论的 TDMA MAC 协议。文献[16]提出基于自适应帧结构的分布式多通道 MAC 协议,将控制信道分为基于 TDMA 的广播周期和基于退避机制的协商周期,车辆可以在广播周期内定期广播消息,而协商周期内则是车辆之间协商使用服务信道的权利。文献[17]提出一种将 TDMA 和 SDMA(Space Division Multiple Access)相结合的改进分布式自适应时分多址分配机制(MDATS)。文献[18]提出的适用于时隙共享的 MAC(ASTSMAC)协议,允许在彼此通信范围内的车辆共享同一时隙。文献[19]提出一种基于位置的分布式 DTMAC 协议,将道路分成若干段,时隙在区域之间重复使用,使得不同相邻区域中的车辆可以同时访问信道而不发生冲突。针对 DTMAC 中存在的问题即每辆车包含的 ID 字段(IDF)与每一帧的时隙数相同从而导致大量的开销,文献[20]提出了 CTMAC(Cooperative TDMA MAC)协议,通过共享邻居车辆感测到的时隙状态信息,有效减少了数据的负载。

本文提出一种具有竞争和时分复用特点的基于竞争的时分多址协议(Contention-based TDMA MAC protocol, CTDMAC)。将道路按照通信半径分成若干段,每段道路对应帧的一部分,而每部分又分为静态段和动态段,在同一路段的车辆,在静态段使用时分复用的方式进行通信,新进入的车辆在动态段以竞争的方式确定发送时隙,该协议采用分布式方式,具有较大的灵活性。

1 系统模型和问题描述

1.1 系统模型

本文系统研究的场景是高速公路。每辆车都有唯一编号,由于车辆是在高速公路上行驶,在一个较短的时间内,可假设车辆的速度恒定。车辆都装有 GPS 装置,每辆车通过 GPS 获得自己的行驶方向、行驶速度和地理位置等,车辆之间同步使用 GPS 接收器提供的 1PPS 信号,每辆车通过安装在车上的 OBU 进行短距离的广播。对于车辆之间的无线通信采用圆盘模型,即两辆车能进行通信当且仅当两辆车之间的欧氏距离小于通信半径。

1.2 问题描述

在车联网中,存在合并冲突和访问冲突^[1]两种冲突。一方面,不在两跳通信范围内使用相同时隙发送数据的车辆由于车辆的移动变成两跳邻居,会发生合并冲突。另一方面,当处在相同两跳通信范围内的车辆试图占用一个时隙时会发生访问冲突。为了能够更好地以分布式方式分配时隙,减少冲突的发生,在下一帧中车辆 v 需要知道邻居节点的信息,其中包括车辆 v 可以使用时隙集合 $A(v)$ 和车辆 v 一跳邻居车辆的集合 $N(v)$ 。

2 CTDMAC 协议

本文将道路分成固定的区域,每个区域的长度为车辆通信的半径,区域用 $x_i(i=1, 2, \dots, \theta)$ 表示,如图1所示。

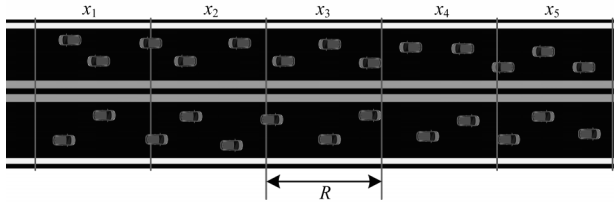


图1 道路分段

Fig.1 Road segmentation

在时间轴上,每一帧分成3个时隙组,分别用 S_1 、 S_2 、 S_3 表示,每个时隙组分别对应高速公路上的各个道路段,如图2所示。

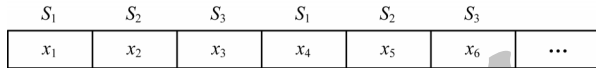


图2 时隙集与道路的对应关系

Fig.2 Correspondence between time slot set and road

时隙组和道路段根据下面的规则进行映射:

- 1) 如果 $i \% 3 == 1$, 则 x_i 和 S_1 相关联。
- 2) 如果 $i \% 3 == 2$, 则 x_i 和 S_2 相关联。
- 3) 如果 $i \% 3 == 0$, 则 x_i 和 S_3 相关联。

采用上述方式,可以保证相邻道路段之间发送数据时不会发生冲突。

2.1 协议帧格式

帧信息结构如图3所示,每个帧包括3个时隙组,每组时隙包括动态段和静态段。动态段由长度较小的竞争时隙组成,用于新加入的车辆竞争静态段中的空闲时隙。静态段由长度相对较大的发送时隙组成,用于交换时隙占用信息和车辆信息。

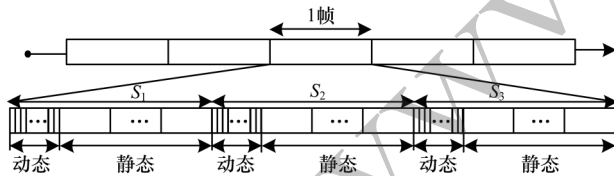


图3 帧信息结构

Fig.3 Frame information structure

动态段的数据包结构如图4所示,其中, V_id 表示车辆号, ts 表示车辆在静态段内想要占用的静态段发送时隙。



图4 竞争时隙数据包结构

Fig.4 Contention time slot data package structure

静态段数据包结构如图5所示。

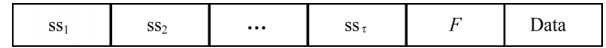


图5 发送时隙数据包结构

Fig.5 Transmission time slot data package structure

在图5中, ss_j 表示时隙 j 的状态,分别是冲突、空闲或被占用的车辆ID, F 表示在区域 x_i 中,占用当前时隙的车辆在下一帧开始时是否驶离当前区域,其值为二值变量,含义为:

$$F = \begin{cases} 0, & \text{车辆在下一帧停留在当前区域} \\ 1, & \text{车辆将在下一帧离开当前区域} \end{cases} \quad (1)$$

当车辆成功占用一个时隙后,将一直使用此时隙直到其离开该区域。如果一辆车成功占用一个时隙,无论它是否需要在服务信道上传输数据,都需要在该时隙内发送时隙占用信息和标志 F 信息。

2.2 CTDMAC 协议机制

当一辆车启动时,需要尽快得到一个发送时隙发送其数据。任何车辆 v 进入到一个新的区域 x_i 时,为防止它抢占其他车辆已经成功占用的时隙,需要在静态段内侦听邻居车辆发送的数据,来收集其他邻居车辆的信息。通过侦听,车辆 v 得到 x_i 内对应的可用时隙集合 $A(v)$ 。侦听结束后,所有新加入的车辆开始通过动态段内的竞争时隙竞争静态段内的发送时隙。

算法1 竞争时隙过程

1. 确定车辆所在区域,通过侦听得到可用时隙集 $A(v)$
2. if $A(v) \neq \{\emptyset\}$ then
3. 随机选择一个竞争时隙 s 发送数据包;
4. $ss_j = ID_v$;
5. if 其他车辆指示成功收到 s 发送的数据包 then
6. 车辆 v 在发送时隙 j 发送数据;
7. if 其他车辆接收到车辆 v 的数据 then
8. Successful = 1;
9. else
10. Successful = 0;
11. $ss_j = 0$
12. end if
13. end if
14. if Successful == 0 then
15. 更新 $A(v)$
16. 随机在 $A(v)$ 中占用一个发送时隙 k
17. if 其他车辆接收到车辆 v 的数据 then
18. Successful = 1;
19. else
20. Successful = 0;
21. $ss_k = 0$;
22. end if
23. end if
24. end if

算法1所示为新加入车辆竞争静态时隙过程的伪代码。车辆 v 在其所对应的动态段内随机选取一个竞争时隙 s 发送数据包,并将静态段内的发送时隙

j 的状态变为占用。新加入的车辆在动态段发送的数据包将会被已经分配好时隙的车辆侦听到。因此, v 车辆在动态段内发送的预留请求是否成功, 将会由这些车辆发送给车辆 v 。若其他车辆发送的数据包中含有车辆 v 的预留请求信息, 则车辆 v 将会在时隙 j 发送数据, 否则, 车辆 v 将释放发送时隙 j 。

在动态段内尚未预留成功的车辆将会在静态段内重新随机占用空闲发送时隙。如果在 x_i 内只有车辆 v 发送预留时隙请求, 则不会发生冲突。此时, 车辆 v 的所有邻居节点 $u \in N(v)$ 都将其添加到自己的邻居节点中, 并记录时隙被其占用。当有多辆车同时发送预留时隙请求时, 则发生冲突。车辆 v 将会继续发送请求, 直到其成功预留一个时隙。

为了在下一帧能得到更多的可用时隙, 减少访问冲突发生的次数, 车辆在离开当前区域之前, 将标志 F 设置为 1, 以指示在下一帧释放占用的时隙。

3 访问冲突分析

假设道路的长度为 L , 在道路段 x_i 内有 m 辆新加入的车辆, 动态段内竞争时隙的个数为 n , 则在动态段内成功发送的概率为:

$$p_{\text{res}} = \frac{A_n^m}{n^m} \quad (2)$$

在静态段内成功占用发送时隙的概率为:

$$p_{\text{succ}} = \frac{A_n^m}{n^m} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i - \beta_i - N_{\text{scheduled}}} \right) \quad (3)$$

其中, $N_{\text{scheduled}}$ 表示上一帧中已经被分配好时隙的车辆个数, α_i, β_i 分别表示道路段 x_i 对应的第一个发送时隙和最后一个发送时隙, 则在动态段内成功竞争时隙的车辆数 Succ_{ip} 为:

$$\text{Succ}_{ip} = m \cdot \frac{A_n^m}{n^m} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i - \beta_i - N_{\text{scheduled}}} \right) \quad (4)$$

则未成功占用时隙的车辆数为:

$$\text{Unsucc}_{ip} = m - m \cdot \frac{A_n^m}{n^m} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i - \beta_i - N_{\text{scheduled}}} \right) \quad (5)$$

在动态段内没成功占用时隙的车辆将会在静态段内再次占用时隙, 则此时其可用时隙为:

$$N_{\text{re_slot}} = \alpha_i - \beta_i - N_{\text{scheduled}} - m \cdot \frac{A_n^m}{n^m} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i - \beta_i - N_{\text{scheduled}}} \right) \quad (6)$$

因此:

$$p_{ij} = \frac{A_{N_{\text{re_slot}}}^{\text{Succ}_{ip}}}{N_{\text{re_slot}}^{\text{Succ}_{ip}}} \quad (7)$$

其中, p_{ij} 表示车辆在道路段 x_i 内一辆车成功占用发送时隙 j 概率。

$$P_{\text{total-ac}} = 1 - P_{\text{no-ac}} \quad (8)$$

$$P_{\text{no-ac}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{naci}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=\alpha_i}^{\beta_i} p_{ij} \cdot \prod_{k=2}^{A_i} (1 - p_{ij}) \quad (9)$$

其中, $P_{\text{total-ac}}$ 表示总的访问冲突的概率, $P_{\text{no-ac}}$ 表示车辆没有发生冲突的概率, 则各个道路段平均发生冲突的概率为:

$$P_{\text{aver-ac}} = \frac{1}{\theta} \cdot P_{\text{total-ac}} \quad (10)$$

4 仿真结果与分析

本文使用 MATLAB 作为仿真工具对所提出的协议进行仿真验证, 基于以下 4 个方面对仿真结果进行评估:

- 1) 新加入车辆成功预留时隙的速度, 表征为访问延迟。
- 2) 访问冲突率, 每个时隙每个区域的平均访问冲突数。
- 3) 数据包丢失率, 未成功发送的信息总数与总的发送信息数的比值。
- 4) 系统吞吐量, 成功占用时隙的车辆总数与可用时隙总数的比值。

本文使用车辆密度作为衡量道路车辆多少的度量单位^[17], 其值为 $\frac{M \times R}{L \times T_s}$, 其中, M 为车辆总数, R 为车辆通信半径, L 为道路长度, T_s 为当前道路段内的发送时隙数。

在本文的仿真中, 一帧的时间为 100 ms, 其中, 包含静态段内 99 个时长 1 ms 的发送时隙和动态段内时长 100 个 0.01 ms 的竞争时隙。S₁、S₂ 分别使用 33 个发送时隙和 33 个竞争时隙, 剩下的一个竞争时隙不使用。所有车辆的消息都是周期性的, 车辆密度变化范围为 0.1~0.9, 实验中使用的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

| 参数 | 参数值 |
|----------------------------|---------|
| 道路长度/m | 1 200 |
| 每个方向道路条数 | 2 |
| 平均速度/(km·h ⁻¹) | 120 |
| 速度方差/(km·h ⁻¹) | 30 |
| 通信半径/m | 200 |
| 帧的长度/ms | 100 |
| 发送时隙帧数 | 99 |
| 发送时隙长度/ms | 1 |
| 竞争时隙帧数 | 100 |
| 竞争时隙长度/ms | 0.01 |
| 仿真时间/min | 1 |
| 车辆密度范围 | 0.1~0.9 |

4.1 新加入车辆成功预留时隙的速度

本文比较了在不同可用时隙个数和新加入车辆的情况下的预留速度,结果如图6所示。其中, N 为可用时隙的个数, K 为竞争时隙的车辆数, n 为帧的个数,实线表示CTDMAC的结果,虚线表示DTMAC的结果。

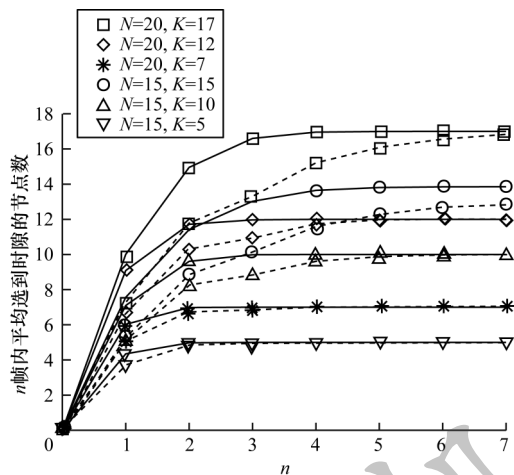


图6 n 帧内时隙的平均节点数

Fig.6 Average number of time slots in n frames

从图6可以看出,当参与竞争时隙的车辆数与可用时隙数相差过大时(如 $K=5$, $N=15$ 或者 $K=7$, $N=20$),两种协议之间的差异并不大。但是当参与竞争时隙的车辆数与可用时隙数相差较小时(如 $K=15$, $N=15$ 或者 $K=17$, $N=20$),因在每一组发送时隙之前加入了用于协商的竞争时隙,CTDMAC在新加入车辆预留速度上表现了很好的性能,其预留发送时隙的时间减少了3个帧。当车辆密度较大时,产生冲突的车辆数将会增多,冲突率将会变大,而在DTMAC中没有竞争时隙机制,故CTDMAC可以更快地使新加入的车辆得到时隙,更加适合车辆密度较大的情况。

4.2 访问冲突率

图7所示为两种调度方案在不同车辆密度下的访问冲突概率。CTDMAC的访问冲突率远小于DTMAC的访问冲突率,特别是当车辆密度大于0.5时。当车流量达到0.9时,CTDMAC的访问冲突率是3.222%,但是,DTMAC的访问冲突率达到了9.595%,大约减少了1/3。上述结果表明,CTDMAC减少访问冲突率明显优于DTMAC。因为CTDMAC在每一个时隙组前增加了动态段供新加入的车辆竞争空闲时隙,所以在静态段内产生的冲突明显减少。

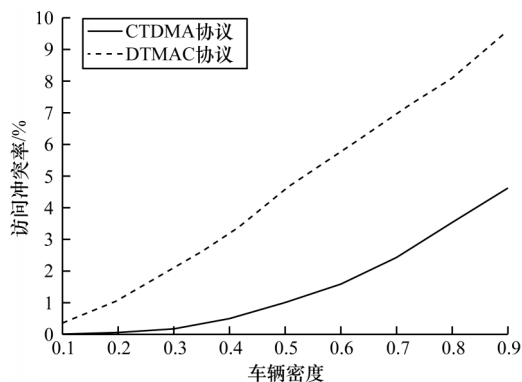


图7 不同车辆密度下访问冲突的概率

Fig.7 Probability of access conflicts under different vehicle densities

4.3 数据包丢失率

图8所示为不同车辆密度下两种不同的调度数据包丢失率。仿真结果显示,CTDMAC在相同的车流量密度下数据包的丢失率明显比DTMAC小。在相同的车辆密度下,两种调度需要发送的数据包总量是相同的,因为CTDMAC在每一个时隙组前加入了可以使加入的车辆竞争发送时隙的动态段,而且本文增加了车辆是否离开当前区域的判定,减少了对总数据包的错误计算,故CTDMAC的数据包丢失率比DTMAC小。

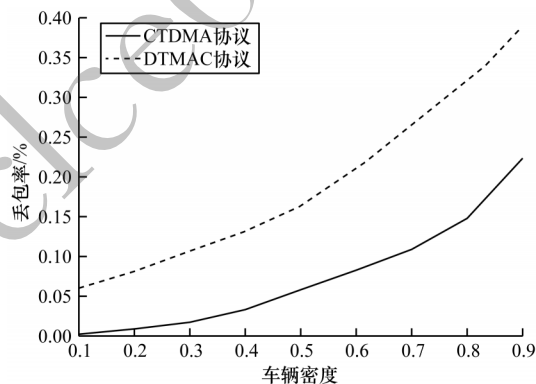


图8 不同车流量下数据包丢失率

Fig.8 Data packet loss rate under different vehicle densities

4.4 系统吞吐量

图9所示为不同车辆密度下两种调度方案的系统吞吐量。随着车辆密度的增加,两种调度方案的系统吞吐量都是增加的,这是因为在一个帧中,随着车辆密度的增加,成功占用时隙的车辆数也在增加。从图9可以看出,由于在每一组时隙之前加入了动态段用于新加入的车辆竞争发送时隙,CTDMAC的系统吞吐量优于DTMAC,而且两者之间的差异变得越来越大。当车辆密度达到0.8时,DTMAC的系统吞吐量只有0.527,而CTDMAC的系统吞吐量达到了0.693。

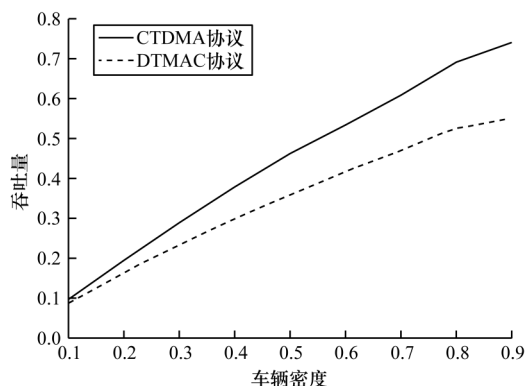


图9 不同车流量下的系统吞吐量

Fig.9 System throughput under different vehicle densities

5 结束语

本文提出一种基于竞争的时分多址协议。该协议将通信帧分为动态段和静态段,新加入的车辆在动态段中竞争静态段内的发送时隙,而在静态段内发送数据。仿真结果表明,当车辆密度较大时,CTDMAC能够明显降低访问冲突及网络的丢包率,增加系统的吞吐量。本文只考虑控制信道而没有考虑服务信道,后续将继续研究MAC协议,进一步提高信道资源的利用率,避免车辆数据发生冲突。

参考文献

- [1] HADDED M, MUHLETHALER P, LAOUITI A, et al. TDMA-based MAC protocols for vehicular ad hoc networks: a survey, qualitative analysis, and open research issues [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2461-2492.
- [2] HE Peng, YAN Baoping, LI Zhi, et al. CM-MAC: a cluster-based multi-channel MAC protocol for VANET [J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(3): 502-510. (in Chinese)
何鹏, 阎保平, 李志, 等. CM-MAC: 一种基于分簇的多信道车载网MAC协议[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(3): 502-510.
- [3] ZHU Yanyan, ZHANG Rongqing, CHENG Xiang, et al. An interference-free graph based TDMA scheduling protocol for vehicular ad-hoc networks [C]//Proceedings of the 85th IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 135-149.
- [4] CAO S, LEE V C. A novel adaptive TDMA-based MAC protocol for VANETs [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 22(3): 614-627.
- [5] BOULILA N, HADDED M, LAOUITI A, et al. QCH-MAC: a QoS-aware centralized hybrid mac protocol for vehicular ad hoc networks [C]//Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 359-372.
- [6] WANG Yang, SHI Jianghong, CHEN Lingyu, et al. A novel capture-aware TDMA-based MAC protocol for safety messages broadcast in vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 116542-116554.
- [7] LIN Lizhao, HU Binjie, WEI Zongheng, et al. A collision-predicted TDMA MAC protocol in centralized vehicular

network [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communication Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 568-579.

- [8] CAO S, LEE V C. A novel coordinated medium access control scheme for vehicular ad hoc networks in multi-channel environment [J]. IEEE Access, 2019, 7: 84333-84348.
- [9] SONG Caixia, TAN Guozhen, DING Nan, et al. Application oriented cross-layer multi-channel MAC protocol for VANET [J]. Journal on Communications, 2016, 37(5): 95-105. (in Chinese)
宋彩霞, 谭国真, 丁男, 等. 面向应用的车载自组织网络跨层多信道MAC协议[J]. 通信学报, 2016, 37(5): 95-105.
- [10] LIU J, REN F Y, MIAO L M, et al. A-ADHOC: an adaptive real-time distributed MAC protocol for vehicular ad hoc networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(5): 576-585.
- [11] OMAR H A, ZHUANG W, LI L. VeMAC: a TDMA-based MAC protocol for reliable broadcast in VANETs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 12(9): 1724-1736.
- [12] LYU F, ZHU H, ZHOU H, et al. MoMAC: mobility-aware and collision-avoidance MAC for safety applications in VANETs [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10590-10602.
- [13] ZOU Rui, LIU Zishan, ZHANG Lin, et al. A near collision free reservation based MAC protocol for VANETs [C]//Proceedings of 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 523-539.
- [14] ZHANG Tianjiao, ZHU Qi. Game-based TDMA MAC protocol for vehicular network [J]. Journal of Communications and Networks, 2017, 19(3): 209-217.
- [15] LI Shujing, LIU Yanheng, WANG Jian, et al. TCGMAC: a TDMA-based MAC protocol with collision alleviation based on slot declaration and game theory in VANETs [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2019, 30(2): 1525-1537.
- [16] LIN Zhiping, TANG Yuliang. Distributed multi-channel MAC protocol for VANET: an adaptive frame structure scheme [J]. IEEE Access, 2019, 7: 12868-12878.
- [17] WANG Mengxue, XU Zhexin, WU Yi, et al. Modified distributed adaptive TDMA scheduling mechanism for VANET [J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(9): 130-136. (in Chinese)
王梦雪, 徐哲鑫, 吴怡, 等. 改进的VANET分布式自适应时分多址分配机制[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(9): 130-136.
- [18] LI Shujing, LIU Yanheng, WANG Jian. ASTSMAC: application suitable time-slot sharing MAC protocol for vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 118077-118087.
- [19] HADDED M, LAOUITI A, MUHLETHALER P, et al. An infrastructure-free slot assignment algorithm for reliable broadcast of periodic messages in vehicular ad hoc networks [C]//Proceedings of the 84th IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 235-248.
- [20] YOON Y H, KO Y B. CTMAC: a cooperative TDMA MAC in vehicular ad hoc networks [C]//Proceedings of 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1538-1543.