

交通路口场景下基于 802.11p 的车队通信性能分析模型



夏思洋 吴琼 倪渊之 武贵路 李正权

江南大学物联网工程学院 江苏 无锡 214122

(siyangxia@stu.jiangnan.edu.cn)

摘要 编队策略作为无人驾驶的关键技术之一已经受到广泛的研究与实际的测试了。车队经过红绿灯管制的交通路口场景时,会受到红绿灯时间、队内(外)间距、速度和前进方向等参数的影响,此时因为车队通信网络复杂多变,所以难以维持车队行驶稳定性,因此可能会进一步造成车队中采用 802.11p 协议通信的车辆不能在规定的时延限制内接收到完整的重要信息,从而引发道路安全问题。针对此问题,文章考虑 802.11p 中支持 4 种传输优先级的数据接入信道的机制,即增强分布式信道接入(Enhanced Distributed Channel Access, EDCA)机制,提出了一种交通路口场景下无人驾驶车队通信性能分析模型。首先构建交通路口处车辆的通信连通网络,并通过建立无人驾驶车队移动模型获得网络通信性能;然后采用概率母函数的方法将典型的描述 802.11p EDCA 机制的马尔可夫模型转化为 z 域线性模型,针对 4 种接入类别的优先级差异,推导车队通信时延与包传递率(Packet Delivery Ratio, PDR)的分析模型;最后通过迭代方法计算出车队通信时延。仿真结果验证了分析模型的准确性,由实验结果可知,该模型中经过交通路口时的车队通信时延低于 802.11p 协议规定的 100ms 且包传递率均高于 0.95,因此,该模型能够保证车队通信的及时性与完整性。

关键词 无人驾驶;车队通信;802.11pEDCA;交通路口

中图法分类号 TP393

Performance Analysis Model of 802.11p Based Platooning Communication at Traffic Intersection

XIA Si-yang, WU Qiong, NI Yuan-zhi, WU Gui-lu and LI Zheng-quan

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract As one of the key technologies of automated driving, platooning strategy has been extensively studied and tested in practice. When platoons pass through the traffic intersection controlled by traffic light, kinetic parameters such as traffic light time, intra/inter-platoon spacing, speed, and moving direction are severely affected. At this time, since the platooning communication connectivity network is complex and variable, the driving stability of platoons is difficult to maintain, thus resulting in that the vehicles in platoons that communicate through 802.11p protocols cannot receive the complete important information within the specified delay limit, which finally leads to road safety issues. To solve this problem, considering the Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) mechanism of the 802.11p protocol, which supports data of 4 transmission priorities to access channel, a novel communication performance analysis model for automated driving platoons under traffic intersection scenario is proposed. First, we build a connectivity network of vehicular communication at the traffic intersection and obtain the network communication performance through constructing the platoon moving model. Then, the classic Markov model that describes the 802.11p EDCA mechanism is transformed into a z -domain linear model by utilizing the method of probability generating function, and the platooning communication delay and packet delivery ratio (PDR) analysis model is deduced according to the priority differences of the 4 access categories. Finally, iterative method is used to calculate the platooning communication delay. The simulation results verify the accuracy of the analysis model, and it can be found that when passing through the intersection, the communication delay of platoons is lower than the 100ms specified by the 802.11p protocols and the packet delivery ratio is higher than 0.95, which ensures the timeliness and completeness of the platoon communication.

Keywords Automated driving, Platooning communication, 802.11p EDCA, Traffic intersection

到稿日期:2020-07-09 返修日期:2020-10-03 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61701197);无锡市科技发展资金(H20191001)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61701197) and Wuxi Science and Technology Development Fund (H20191001).

通信作者:吴琼(qiongwu@jiangnan.edu.cn)

1 引言

1.1 介绍

近年来,随着道路上的车辆数目急剧增多,市镇公路交通日渐拥堵,交通事故频发,道路安全问题亟需解决。根据世界卫生组织的一份报告,每年约有 125 万人死于交通事故^[1-2]。为缓解交通压力,减少交通事故,越来越多的专家学者将目光集中于无人驾驶技术的研究与开发^[3-6]。

无人驾驶技术融合了人工智能、云计算与雾计算等多种前沿科技^[7-9],在确保道路安全方面极具潜力。编队策略^[10]是实现无人驾驶的关键技术,通过编队策略,多个无人驾驶车辆形成一个车队。一个车队由一辆头车与若干成员车辆组成,头车由人驾驶并且通过控制车队的行驶方向、速度等来控制整个车队的运动。成员车辆均为无人驾驶车辆,并且呈单排形式自动跟随头车。车队中车辆的车间距和行驶速度保持一致,通过这种方式,无人驾驶车队可以增加道路可容纳的车辆数,减少能量损耗,进而缓解交通拥堵压力。

无人驾驶车辆通常配有多种车载传感器^[11](如雷达、测距仪和红外摄像头等)来采集数据。车队中,车辆之间使用支持车载环境通信的 IEEE 802.11p 协议以车间(Vehicle to Vehicle, V2V)通信的方式互相传递传感器收集到的数据^[12],其中,802.11p 协议采用增强分布式信道接入机制来支持具有多种优先级的数据接入信道。车辆及时接收到数据后利用车载计算能力迅速分析数据来判断周围环境的安全性,这样就可以相应地及时做出减速、避让以及停车等动作来避免发生交通事故。为确保信息获取的及时性,IEEE 802.11p^[13]作为专门应用于车载环境的无线通信技术,将安全应用通信的延迟容许范围定为最多不超过 100ms,以保障接收信息后有足够的反应时间。

然而车队在经过红绿灯管制的交通路口时受到红绿灯变化、移动方向变化等影响,车队速度、车队内车辆的车间距(队内间距)和车队间的间距(队外间距)都会发生急剧的变化,导致网络拓扑剧变,通信连通性难以保证。在这种情况下,采用 802.11p EDCA 机制不仅会使得数据传输的及时性与完整性受到影响,还可能造成车队中无人驾驶车辆难以及时做出正确决策,进一步引发交通事故。针对此问题,本文考虑 802.11p EDCA 机制,提出了一种分析交通路口处的车队通信时延的模型。

本文的主要贡献如下:

(1)考虑到交通路口处交通信号灯的周期性变化与车队的多种行动模式包括转向、加速、减速和停车,建立了交通路口处无人驾驶车队的移动模型。

(2)采用概率母函数的方法将典型的描述 802.11p EDCA 机制的马尔可夫模型转换为 z 域线性模型,以推导时延与包传递率的计算公式。利用迭代方法求解车队通信时延。

(3)通过仿真实验验证模型的合理性,并通过建立的模型来分析车队通信时延与包传递率的性能。

1.2 相关工作

通信技术是无人驾驶研究开发过程中至关重要的一环,如何保证低时延与高传递率始终是当下研究的热点。目前已

有相关文章研究在特定场景下车队通信的性能是否满足协议规定。Peng 等^[14]提出了一种基于 LTE 蜂窝网的多车队场景中的子信道分配方案,以减少传输延迟。Liu 等^[15]综合考虑了车队和单个车辆共存的场景,提出了一种自适应数据传输方案。Feng 等^[16]提出了一种用于交叉路口吞吐量最大化的复合车队轨迹规划策略方案。该策略中,吞吐量最大化的问题创新性地被转变为如何在绿灯持续时间范围内最小化车辆到达时间的问题。Peng 等^[17]提出了一种基于分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)的多车队通信的概率性能分析方法,该方法综合考虑了数据包碰撞概率、数据包传输时延、数据包丢弃概率和网络吞吐量。然而上述研究均未考虑到车辆在经过交通路口时网络拓扑剧变对时延等通信性能造成的影响。

目前尚未有研究分析在车辆经过交通路口时车队通信的性能水平,因此有必要建立一种分析模型来分析交通路口处的车队通信性能。鉴于以上研究现状,针对交通路口处车队通信连通性复杂多变的特点,本文考虑 802.11p EDCA 机制,提出了一种交通路口处的车队通信性能的分析模型。

2 系统场景

本节首先描述交通路口处多车队移动场景,然后简要介绍该场景中车辆采用 802.11p EDCA 机制传输数据的过程。

2.1 场景描述

场景如图 1 所示,系统中共有 P 个车队,车辆总数目为 M ,每个车队平均由 m_v 辆车组成。以该十字路口的中心为原点建立坐标系。假设每辆车的信号收发器都安装在车头位置,那么在某一时刻一个车辆信号收发器的位置就可以被看作该车辆的位置,这样网络中每个车辆都可以被看作一个质点。此外,设定每辆车的监听范围(Carrier sensing range)均为 R_c 。

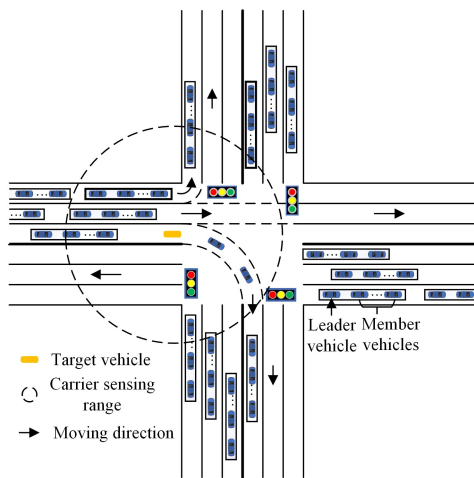


图 1 交通路口处多车队移动场景

Fig. 1 Multiple platoons at an intersection

车队中的车辆采用 802.11p 协议传输周围车辆的速度、位置等运动信息以使得网络中的车辆能够评估周围环境,进而保证车队的队形保持稳定。当车队接近交通路口时,车队行驶所在的车道对应不同的前进方向(Moving direction),如左转、直行或右转。车队的头车(Leader vehicle)需要根据当

前交通灯的状态以及自身车队所在的位置和速度判断所在车队是否能够在绿灯规定的时间内通过该路口,进而进一步决定是否通过该路口还是减速。当交通灯是红色时,头车应减速并停车至停止线前;当交通灯为绿色时,头车需要判断在剩余绿灯时间内该车队最后一辆车以最大加速度加速至最大速度能否越过停止线。若能,则表明车队能完整通过,头车将根据目的地实时调整前进方向来通过交通路口;若不能,则表明车队无法完整通过,头车应立刻减速并停车至停止线前。成员车辆(member vehicle)根据智能驾驶车辆跟随模型(Intelligent Driving car-following Model, IDM)^[18]计算与前车的速度差和车间距,自适应调整自身速度和加速度来跟随前一车辆。

若有多车队进入交通路口,由于不同车道交通灯的状态不同,则各车队会通过加速或减速的方式采取转弯、直行或停车的不同行为。当同一车道上存在多个车队时,各车队相互独立。当车队外间距过小时,为保障道路安全,后一车队的头车依据 IDM 模型跟随前一车队的末车,直至队外间距恢复安全距离。因此多个车队的队内间距和队外间距会随时间变化而剧烈变化,进而导致网络拓扑剧烈变化。如图 1 所示,目标车辆(Target vehicle)在经过交通路口时,其监听范围内的车辆变化明显,这会导致暴露终端与隐藏终端数目变化明显,进一步导致车辆采用 802.11p 协议发送数据发生碰撞的概率急剧变化,因此车队通信的性能会受到影响。

2.2 IEEE 802.11p EDCA 机制

为保证不同服务类型的服务质量(Quality of Service, QoS),IEEE 802.11p 协议采用 EDCA 机制为每个信道定义了 4 种接入类别(Access Categories, ACs),分别对应不同的传输优先级^[13]。这 4 种接入类别的优先级从高到低分别为背景流、尽力而为流、视频流和语音流,即:

- (1) AC0: 背景流(Background traffic);
- (2) AC1: 尽力而为流(Best effort traffic);
- (3) AC2: 视频流(Video traffic);
- (4) AC3: 语音流(Voice traffic)。

每个 AC 都有一个独立的传输队列,为区别不同 AC 的优先级,EDCA 机制为每个 AC 分配了不同的竞争参数,包括最小竞争窗口 CW_{min} 、最大竞争窗口 CW_{max} 和仲裁帧间间隔(Arbitration Inter-Frame Space, AIFS)。其中, AIFS 也表示为获得传输机会必须等待的信道空闲时间,其值由仲裁帧间间隔数(Arbitration Inter-Frame Space Number, AIFSN)确定。表 1 列出了相关竞争参数的信息。

表 1 EDCA 竞争参数

Table 1 EDCA contention parameters

AC	CW_{min}	CW_{max}	AIFSN
3	15	1023	9
2	7	15	6
1	3	7	3
0	3	3	2

协议规定 AC_m 的竞争窗口大小的限制如下:

$$CW_{max}^m = 2^{M_m} (CW_{min}^m + 1) - 1 \quad (1)$$

其中, M_m 定义为 AC_m 队列的最大退避阶数。

AIFSN 与 AIFS 的关系可表示为:

$$AIFS_m = AIFSN_m \times \delta + SIFS \quad (2)$$

其中, SIFS(Short Inter Frame Space)表示短帧间间隔, δ 表示一个时隙。为了便于计算,定义 A_m 为 AC_m 队列相比 AC_0 监测信道空闲所必须等待的额外时隙数,即:

$$A_m = AIFSN_m - AIFSN_0 \quad (3)$$

本文采用 802.11p EDCA 广播机制来传输数据包,具体传输过程如图 2 所示。一旦某一站点内的 AC_m 队列有包要进行发送,则初始化退避过程。 AC_m 队列的退避计数器在 $[0, W_{m,0} - 1]$ 中随机取值,即:

$$W_{m,j} = \begin{cases} 2^j (CW_{min}^m + 1), & j \in [0, M_m] \\ 2^{M_m} (CW_{min}^m + 1), & j \in (M_m, M'_m] \end{cases} \quad (4)$$

其中, $W_{m,j}$ 表示 AC_m 在第 j ($j=0, 1, 2, \dots, M'_m$) 次重传时的竞争窗口大小, M'_m 为最大重传限制。若信道被监测到空闲持续了一个时隙(Slot time) δ , 则退避计数器立刻减 1; 若监测到信道忙碌(Busy Medium), 则退避计数器进入冻结状态直到监测到信道在 $AIFS_m$ 时间内均处于空闲状态。当退避计数器减至 0 时, AC_m 队列开始尝试发送包。如果该站点内没有优先级高于 AC_m 的队列同时发送包, 那么该包成功传输, 且退避计数器重设为 $[0, W_{m,0} - 1]$ 中的随机值; 否则发生碰撞, 此时数据包开始进入重传过程, 重传次数加 1, 退避计数器在 $[0, W_{m,1} - 1]$ 中随机取值。需要特别注意的是, 当同一个站点内有多 AC 同时传输数据包时, 只有最高优先级的 AC_m 会传输成功, 其他队列均进行重传。本文中, 规定 $M'_m = M_m + L_m$ 为最大重传限制, 其中, L_m 表示当退避阶数达到 M_m 后的重传次数限制。当重传次数超过 M'_m 时, 该数据包则会被丢弃, 不再进行发送尝试。

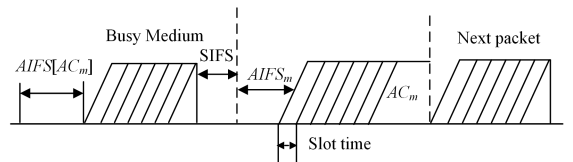


图 2 EDCA 机制下的传输过程

Fig. 2 Transmission process of EDCA mechanism

3 网络连通性能

本节首先对交通路口场景下车队的通信连通网络进行建模, 然后通过建立交通信号灯控制下的不同车道上的多车队移动模型来计算车辆的实时位置, 以进一步获得网络连通性能。

3.1 通信连通网络

在图 1 所示的场景中, 以该十字路口的中心为原点建立平面直角坐标系, 水平方向为 x 轴, 向右行驶的 3 条车道上的车辆的初速度方向均为 x 轴正方向; 垂直方向为 y 轴, 向上行驶的 3 条车道上的车辆的初速度方向为 y 轴正方向。考虑系统中共有 M 辆车组成 P 个车队, 且第 k 个车队 P_k 有 n_k 辆车。坐标系中, 若第 k 个车队的第 i 台车辆在 t 时刻的位置可表示为 $(x_{k,i}(t), y_{k,i}(t))$, 则该系统下的通信连通网络可表示为一个 $M \times M$ 的矩阵 $\mathbf{H}(t)$, 即:

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} h_{11,11}(t) & \cdots & h_{11,k_i}(t) & \cdots & h_{11,P_{m_v}}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{k_i,11}(t) & \cdots & h_{k_i,q_l}(t) & \cdots & h_{k_i,P_{m_v}}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{P_{m_v},11}(t) & \cdots & h_{P_{m_v},k_i}(t) & \cdots & h_{P_{m_v},P_{m_v}}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$h_{k_i,q_l}(t) = \begin{cases} 1, & \sqrt{[x_{k,i}(t) - x_{q,l}(t)]^2 + [y_{k,i}(t) - y_{q,l}(t)]^2} \leq R_{cs} \\ 0, & \sqrt{[x_{k,i}(t) - x_{q,l}(t)]^2 + [y_{k,i}(t) - y_{q,l}(t)]^2} > R_{cs} \end{cases} \quad (6)$$

由上述公式可知, $h_{k_i,q_l}(t) = 1$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 和 $V_{q,l}$ 之间的距离不超过通信范围 R_{cs} , 即车辆 $V_{k,i}$ 和 $V_{q,l}$ 可以互相通信。特别地, 当 $k=q, i=l$ 时, 表明该车可与自己通信, 且 $h_{k_i,q_l}(t) = 1$ 。相反, $h_{k_i,q_l}(t) = 0$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 和 $V_{q,l}$ 之间的距离超过通信范围 R_{cs} , 相互之间不可通信。因此, 当 $V_{k,i}$ 作为目标车辆时, 其通信范围内的车辆数 $N_{cs}^{k,i}(t)$ 可表示为:

$$N_{cs}^{k,i}(t) = \sum_{q=1}^P \sum_{l=1}^{m_q} h_{k_i,q_l}(t) \quad (7)$$

由式(5)~式(7)可知, 如果要得知网络连通性能, 就需要计算每个车辆在每个时刻的位置, 因此下文将进一步计算车辆的实时位置。

3.2 车辆实时位置

如图 1 所示, 不同时刻交通灯下在不同车道上的车队车辆具有不同的运动模式。头车根据交通灯的状况和所在位置选择前进方向并判断加速度是否改变以及如何变化, 成员车辆采用经典 IDM 跟随模型跟随头车移动。

以目标车辆 $V_{k,i}$ 为例, 当目标车辆 $V_{k,i}$ 在初始时刻 t_0 改变加速度时, 其他车辆通过 V2V 通信的方式获得车辆 $V_{k,i}$ 的初始位置 $(x_{k,i}(t_0), y_{k,i}(t_0))$ 与初始速度 $v_{k,i}(t_0)$ 。车辆 $V_{k,i}$ 的速度与移动距离每隔一段很短的时间间隔 Δt 就重新计算一次, 假设时间间隔 Δt 内车辆的运动符合匀变速运动, 则有:

$$v_{k,i}(t) = v_{k,i}(t - \Delta t) + a_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t \quad (8)$$

$$S_{k,i}(t) = S_{k,i}(t - \Delta t) + v_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t + \frac{1}{2}a_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t^2 \quad (9)$$

其中, $v_{k,i}(t)$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 在 t 时刻的速度, $a_{k,i}(t)$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 在 t 时刻的加速度, $S_{k,i}(t)$ 表示到 t 时刻为止 $V_{k,i}$ 所行驶的路程。因此若要获得每个 t 时刻任意车辆 $V_{k,i}$ 的位置 $(x_{k,i}(t), y_{k,i}(t))$, 则需要知道在 $t - \Delta t$ 时刻该车的加速度。

接下来, 如图 1 所示, 以向右行驶的 3 条车道上的车队为例, 分别建立信号灯为红灯时和信号灯为绿灯时在左转、直行、右转车道上的车队的运动模型, 并计算出车辆实时位置。初始化随机分布车队在交通路口处的位置, 标记车辆 $V_{k,i}$ 的初始位置为 $(x_{k,i}(t_0), y_{k,i}(t_0))$, 且有 $S_{k,i}(t_0) = x_{k,i}(t_0)$ 。当左转和右转车道上的车辆未越过停止线时, x 轴方向位置变化而 y 轴不变; 当车辆在交通路口中心区域转弯时, x 轴和 y 轴方向位置随前进方向的变化而变化; 当车辆驶入目标车道后, x 轴方向位置不变而 y 轴方向位置实时变化。直行车道上的

车辆因为始终沿 x 轴正方向做水平运动, 因此 y 轴方向位置不变而 x 轴方向位置实时变化。设置初始速度 $v_{k,i}(t_0)$ 为一个合适的速度 v_e 。根据 IDM 模型, 初始化队内间距为 s_e , 且有:

$$s_e = \frac{s_0 + v_e T_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{v_0}\right)^4}} \quad (10)$$

其中, s_0 表示最小车间距, v_0 表示道路允许的最大速度, T_0 表示最小车头时距。同时设 s_e 为该系统下的车间安全距离。

当交通灯为红灯时, 车道上的所有车队在直线上做减速直线运动, 减速至停在停止线前。当交通灯为绿灯时, 头车首先判断在剩余绿灯时间内, 若头车以最大加速度 $a_{k,1}(t) = a$ 加速至道路限制的最大速度 v_0 行驶, 该车队的所有车辆是否都能越过停止线。若都能越过停止线, 则车队的头车在通过停止线前做匀加速直线运动直至道路限制的最大速度, 通过停止线后, 出于安全考虑, 左转和右转车道上车队的头车以合适的加速度 b 匀减速至 v_e , 并在中心区域作四分之一圆周运动, 到达目标车道后做直线运动; 直行车道上的车队在通过停止线后头车以合适的加速度减速至 v_e 并保持直行。若不能都越过停止线, 则车道上的所有车队的头车作减速直线运动, 减速直至停在停止线前。成员车辆则根据 IDM 模型实时调整自身速度和加速度跟随前一车辆行驶。

3.2.1 红灯时间内的车辆位置

当 t 时刻的信号灯为红灯时, 该车道上所有车队进行减速直线运动。以车队 P_k 为例, 车队 P_k 的头车 $V_{k,1}$ 从当前位置减速至停在停止线前, 此时头车的加速度表示如下:

$$a_{k,1}(t) = -\frac{v_{k,1}(t)^2}{2(x_b - x_{k,1}(t))} \quad (11)$$

其中, x_b 表示当前车道的停止线的横坐标。

成员车辆根据 IDM 跟随模型移动, 其加速度可表示为:

$$a_{k,i}(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_{k,i}(t)}{v_0}\right)^4 - \left(\frac{S_{k,i}(t)}{\Delta S_{k,i}(t)}\right)^2 \right] \quad (12)$$

其中,

$$S_{k,i}(t) = s_0 + v_{k,i}(t)T_0 + \frac{v_{k,i}(t)\Delta v_{k,i}(t)}{2\sqrt{ab}} \quad (13)$$

由式(12)、式(13)可知, $\Delta S_{k,i}(t)$ 表示车队内间距, $\Delta v_{k,i}(t)$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 与前车 $V_{k,i-1}$ 之间的速度差, $S_{k,i}(t)$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 与前车 $V_{k,i-1}$ 之间的理想间距, a 和 b 分别表示 IDM 模型中规定的所有车辆统一的最大加速度与相应的减速度。

需要注意的是, 当该车道上存在多个车队时, 从后面一个车队 P_{k+1} 开始, 这些头车的移动也要遵循 IDM 跟随模型。当队外间距大于 s_e 时, 车队之间互相独立; 当队外间距小于 s_e 时, 根据 IDM 模型, 头车跟随前一个车队的最后一辆车 V_{k,n_k} 进行减速运动, 直至队外间距恢复至安全距离 s_e 。

当车辆未越过停止线时, 因为所做运动为直线运动, 行驶的路程 $S_{k,i}(t)$ 即为该车所在位置 $x_{k,i}(t)$, 所以车辆位置可表示为:

$$\begin{cases} \theta_{k,i}(t) = 0 \\ x_{k,i}(t) = x_{k,i}(t - \Delta t) + v_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t + \frac{1}{2}a_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t^2 \\ y_{k,i}(t) = y_{k,i}(t - \Delta t) \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\theta_{k,i}(t)$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 的前进方向与水平线的夹角。

3.2.2 绿灯时间内的车辆位置

当信号灯为绿灯时,不同车道上的车队有不同的行为模式。头车需根据当前 t 时刻所在位置做出 $[t, t + \Delta t]$ 时间内的行为决策。因为 $[t, t + \Delta t]$ 是一段极小的时间间隔,在此段时间内车辆的移动可以被看成匀变速直线运动,所以成员车辆在任意 t 时刻都可以根据 IDM 模型跟随头车移动。

(1) 左转车道

1) 转弯前

左转前,头车在通过停止线之前进行判断:在剩余绿灯时间内,若头车以最大加速度 $a_{k,1}(t) = a$ 加速至道路限制的最大速度,成员车辆根据 IDM 模型跟随头车,该车队的车是否都能越过停止线。

若头车判断在剩余绿灯时间内,车队中的车辆不能全部越过停止线,则头车执行 3.3 节所述减速操作,此时头车的加速度可由式(11)表示。成员车辆根据 IDM 移动模型(如式(12)所示)跟随头车。

若头车判断在剩余绿灯时间内,车队中的全部车辆都能越过停止线,则当车辆未越过停止线时,车辆位置如式(14)所示;当车辆越过停止线后,执行以下转弯操作。

2) 转弯中

当开始进行左转时,出于安全考虑,头车的速度应恢复至 v_e 。若其速度大于 v_e ,头车以 b 的加速度减速至 v_e 后匀速运动;若其速度小于 v_e ,头车以 a 的加速度加速至 v_e 后匀速运动。尽管 IDM 移动模型只适用于直线运动,但在本文中 Δt 为极小的时间间隔,在 Δt 内车辆的移动可以被看作直线运动,因此在转弯时,成员车辆也可根据 IDM 模型跟随头车移动。此时行驶的路程 $S_{k,i}(t) - S_{k,i}(t - \Delta t)$ 可以看作弧长。根据公式弧长 = 半径 \times 圆心角,此时车辆位置表示为:

$$\begin{cases} \theta_{k,i}(t) = \theta_{k,i}(t - \Delta t) + \frac{S_{k,i}(t) - S_{k,i}(t - \Delta t)}{R_l} \\ x_{k,i}(t) = x_b + R_l \sin(\theta_{k,i}(t)) \\ y_{k,i}(t) = y_b' + R_l - R_l \cos(\theta_{k,i}(t)) \end{cases} \quad (15)$$

其中, R_l 表示左转半径, (x_b, y_b') 表示该左转车道上的停止线位置。

3) 转弯后

当车辆到达目标车道上的停止线 (x_e, y_e) 后,车队沿当前车道直线运动,头车的速度应恢复至 v_e 。若其速度大于 v_e ,头车以 b 的加速度减速至 v_e 后匀速运动;若其速度小于 v_e ,头车以 a 的加速度加速至 v_e 后匀速运动。此时车辆位置表示为:

$$\begin{cases} \theta_{k,i}(t) = \pi/2 \\ x_{k,i}(t) = x_{k,i}(t - \Delta t) \\ y_{k,i}(t) = y_{k,i}(t - \Delta t) + v_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t + \frac{1}{2}a_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t^2 \end{cases} \quad (16)$$

(2) 直行车道

与 3.2.2 节所述左转车道类似,头车在越过停止线前需要判断在剩余绿灯时间内,若头车以最大加速度加速至道路限制的最大速度,该车队的车是否都能越过停止线。不同的是在越过停止线后,因为车辆发生直行行为,前进方向

$\theta_{k,i}(t)$ 不会发生变化,所以直行车道上的车辆位置不管是直行前、直行中还是直行后,均可表示为式(14)。

(3) 右转车道

1) 转弯前

与 3.4.1 节所述移动模式一致,车辆位置可表示为式(14)。

2) 转弯中

与 3.4.1 节类似,区别在于转弯半径不同以及前进方向相反。因此车辆位置可表示为:

$$\begin{cases} \theta_{k,i}(t) = \theta_{k,i}(t - \Delta t) - \frac{S_{k,i}(t) - S_{k,i}(t - \Delta t)}{R_r} \\ x_{k,i}(t) = x_b - R_r \sin(\theta_{k,i}(t)) \\ y_{k,i}(t) = y_b'' - R_r + R_r \cos(\theta_{k,i}(t)) \end{cases} \quad (17)$$

其中, R_r 表示右转半径, (x_b, y_b'') 表示该右转车道上的停止线位置。

3) 转弯后

当车辆到达目标车道上的停止线后,车队沿当前车道直线运动,此时车辆位置表示为:

$$\begin{cases} \theta_{k,i}(t) = -\pi/2 \\ x_{k,i}(t) = x_{k,i}(t - \Delta t) \\ y_{k,i}(t) = y_{k,i}(t - \Delta t) + v_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t + \frac{1}{2}a_{k,i}(t - \Delta t)\Delta t^2 \end{cases} \quad (18)$$

利用上述公式,可以根据目标车辆的初始位置 $(x_{k,i}(t_0), y_{k,i}(t_0))$ 计算出任意车辆在任意时刻的位置。将位置代入式(5)一式(7)中就可以知道任一时刻的网络连通性能。

4 时延分析模型

本节将根据上一节得到的网络连通性能进一步分析目标车辆的通信性能。

本节将 MAC 层的服务过程转换到 z 域进行建模,以推导时延与包传递率的计算方法。因为物理层对数据传输时延的影响远小于媒介控制层(Medium Access Control, MAC)对其的影响,所以本文和文献[19]一样考虑理想信道,即数据包的丢失都是由 MAC 层造成的。因此本文只考虑 802.11p MAC 层的服务过程,即 802.11p EDCA 机制,也就是数据包传输时延为 MAC 层的服务时间,其由退避时间与传输时间两部分组成。MAC 层服务时间 $\frac{1}{\mu_{k,i,m}(t)}$ 可表示为:

$$\frac{1}{\mu_{k,i,m}(t)} = \frac{\rho_{k,i,m}(t)}{\lambda_{k,i,m}(t)}, m=0,1,2,3 \quad (19)$$

其中, $\mu_{k,i,m}(t)$ 表示车辆 $V_{k,i}$ 中 AC_m 队列的服务率, $\rho_{k,i,m}(t)$ 表示该车 AC_m 队列非空的概率。设数据包以 $\lambda_{k,i,m}(t)$ 的速率到达 MAC 层中的 AC_m 队列,且 $\lambda_{k,i,m}(t)$ 服从泊松分布^[20]。那么有包到达 AC_m 队列的概率 $p_a^{k,i,m}(t)$ 可以表示为:

$$p_a^{k,i,m}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda_{k,i,m}\delta)^n}{n!} e^{-\lambda_{k,i,m}\delta} = 1 - e^{-\lambda_{k,i,m}\delta} \quad (20)$$

本文采用文献[20-21]中的概率母函数(Probability Generating Function, PGF)方法将典型的时域中用来描述 802.11pEDCA 机制的马尔可夫模型转换到 z 域中,以进一步求解 MAC 层服务时间的 PGF $P_a^{k,i,m}(z)$,即:

$$P_{st}^{k,i,m}(z) = \begin{cases} B_0^{k,i,m}(z) T_v(z), & m=0 \\ (1-p_v^{k,i,m}(t)) T_v(z) \sum_{n=0}^{M_m'} [(p_v^{k,i,m}(t))^n] \prod_{j=0}^n \\ B_j^{k,i,m}(z) + (p_v^{k,i,m}(t))^{M_m'+1} \prod_{j=0}^{M_m'} B_j^{k,i,m}(z), & m=1,2,3 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $p_v^{k,i,m}(t)$ 表示发生站点内部碰撞的概率, $T_v(z)$ 表示传输时间的 PGF, $B_j^{k,i,m}(z)$ 表示站点中的 AC_m 队列的退避计数器在重传次数为 j 时退避到 0 的时间的 PGF。 $T_v(z)$ 和 $B_j^{k,i,m}(z)$ 的计算过程如下。

1) 传输时间的 PGF $T_v(z) = z^{T_v}$, 其中, T_v 表示时域中的传输时间, 即:

$$T_v = \frac{PHY_H}{R_b} + \frac{MAC_H + E[P]}{R_d} + \gamma \quad (22)$$

其中, PHY_H 和 MAC_H 分别表示物理层与 MAC 层的头部长度; R_b 和 R_d 分别表示信道的基本速率与数据速率; γ 表示传播时延; $E[P]$ 表示数据包的大小。

2) 退避时间的 PGF $B_j^{k,i,m}(z)$ 可以表示为:

$$B_j^{k,i,m}(z) = \begin{cases} \frac{1}{W_{0,0}} \sum_{n=0}^{W_{0,0}-1} [H_{k,i,m}(z)]^n, & m=0 \\ \frac{1}{W_{m,j}} \sum_{n=0}^{W_{m,j}-1} [H_{k,i,m}(z)]^n, & m=1,2,3, j \in [0, M_m-1] \\ \frac{1}{W_{m,M_m}} \sum_{n=0}^{W_{m,M_m}-1} [H_{k,i,m}(z)]^n, & m=1,2,3, j \in [M_m, M_m'] \end{cases} \quad (23)$$

其中, $H_{k,i,m}(z)$ 表示退避计数器减 1 的时间的 PGF。如图 3

$$\omega_{k,i,m} = \begin{cases} \left[\frac{W_{0,0}+1}{2(1-p_b^{k,i,m}(t))} + \frac{1-p_{k,i,m}(t)}{p_b^{k,i,m}(t)} \right]^{-1}, & m=0 \\ \frac{1-(p_v^{k,i,m}(t))^{M_m'+1}}{1-p_v^{k,i,m}(t)} \left[\frac{1-(p_v^{k,i,m}(t))^{M_m'+1}}{1-p_v^{k,i,m}(t)} + \frac{W_{m,0}-1}{2(1-p_b^{k,i,m}(t))} + \frac{W_{m,0} p_v^{k,i,m}(t) [1-(2p_v^{k,i,m}(t))^{M_m}]}{(1-p_b^{k,i,m}(t))(1-2p_v^{k,i,m}(t))} \right] + \\ \left[\frac{1-p_{k,i,m}(t)}{p_b^{k,i,m}(t)} + \frac{2^{M_m-1} W_{m,0} (p_v^{k,i,m}(t))^{M_m'+1} (1-(p_v^{k,i,m}(t))^{M_m-M_m})}{(1-p_b^{k,i,m}(t))(1-p_v^{k,i,m}(t))} \right]^{-1}, & m=1,2,3 \end{cases} \quad (26)$$

外部传输概率 $\tau_{k,i,m}(t)$ 可定义为当站点 $V_{k,i}$ 的 AC_m 队列传输时没有高于 AC_m 优先级的队列同时传输的概率。因此, $\tau_{k,i,m}(t)$ 可表示为:

$$\tau_{k,i,m}(t) = \begin{cases} \omega_{k,i,m}(t), & m=0 \\ \omega_{k,i,m} \prod_{n=0}^{m-1} (1-\omega_{k,i,n}(t)), & m=1,2,3 \end{cases} \quad (27)$$

因为 802.11p EDCA 机制规定一个站点存在 4 个 AC 队列, 所以对于目标车辆 $V_{k,i}$, 其 t 时刻的传输概率可表示为:

$$\tau_{k,i}(t) = \sum_{m=0}^3 \tau_{k,i,m}(t) \quad (28)$$

$p_v^{k,i,m}(t)$ 定义为一个站点内除了 AC_m 队列, 还有其他优先级高于 AC_m 的队列同时发送数据包的概率, 由此可知:

$$p_v^{k,i,m}(t) = \begin{cases} 0, & m=0 \\ 1 - \prod_{n=0}^{m-1} (1-\omega_{k,i,n}(t)), & m=1,2,3 \end{cases} \quad (29)$$

$p_b^{k,i,m}(t)$ 定义为直到信道在 $AIFS_m$ 持续时间内被监测到空闲状态为止, 信道始终处于忙碌状态的概率, 由此可知:

所示, $H_{k,i,m}(z)$ 由退避冻结时间 $F_m(z)$ 和信道空闲时退避计数器减 1 所需的时间 δ 组成。如 2.2 节所述 802.11p EDCA 机制下的退避过程, 一旦监测到信道被当前站点内的高优先级队列占用, 就会启动退避冻结, 并且持续 $T_v + AIFS_m$ 时间。因此 $F_m(z)$ 可表示为:

$$F_m(z) = z^{T_v + AIFS_m} \quad (24)$$

如图 3 所示, $p_b^{k,i,m}(t)$ 表示退避冻结的概率。

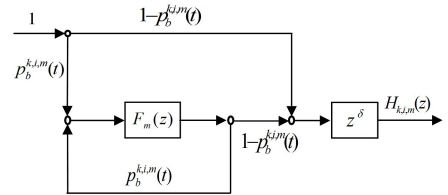


图 3 退避计数器减 1 的 z 域模型

Fig. 3 z-domain model for backoff counter decreasing 1

当经过一次退避冻结后, 产生 $p_b^{k,i,m}(t)$ 的概率出现连续退避冻结的情况, 此时退避冻结时间 $F_m(z)$ 会无限叠加。为精确计算该时间, 本文利用梅森公式求解 $H_{k,i,m}(z)$, 可得:

$$H_{k,i,m}(z) = \frac{1}{1-p_b^{k,i,m}(t) F_m(z)} \times \{ (1-p_b^{k,i,m}(t)) z^\delta [1 - p_b^{k,i,m}(t) F_m(z)] + p_b^{k,i,m}(t) F_m(z) (1-p_b^{k,i,m}(t)) z^\delta \} \\ = \frac{(1-p_b^{k,i,m}(t)) z^\delta}{1-p_b^{k,i,m}(t) F_m(z)} \quad (25)$$

由上述公式可知, 要计算 MAC 层服务时间, 必须先计算出 $p_v^{k,i,m}(t)$ 和 $p_b^{k,i,m}(t)$ 。因此, 首先定义内部传输概率 $\omega_{k,i,m}(t)$ 和外部传输概率 $\tau_{k,i,m}(t)$ 。根据文献[21]描述的马尔可夫过程, 内部传输概率 $\omega_{k,i,m}(t)$ 可定义为 $V_{k,i}$ 该站点内 AC_m 队列退避计数器退避到 0 的概率, 即:

$$p_b^{k,i,m}(t) = 1 - [(1-\tau_{k,i}(t))^{N_{cs}^{k,i}} - 1] \prod_{n=0, n \neq m}^3 (1 - \omega_{k,i,n}(t))^{A_m+1} \quad (30)$$

其中, $N_{cs}^{k,i}$ 表示目标车辆 $V_{k,i}$ 通信范围内的车辆数, 首先可通过第 3 节中所述车队移动模型来确定车辆位置, 然后根据式(7)计算得出。

将上述推导得出的 $p_v^{k,i,m}(t)$ 与 $p_b^{k,i,m}(t)$ 代入式(21), 可以得到 z 域中的 MAC 层服务时间的 PGF, 再对该 z 域模型进行如下反变换, 就能计算出时域中的服务时间 $\frac{1}{\mu_{k,i,m}(t)}$, 即:

$$\frac{1}{\mu_{k,i,m}(t)} = \left. \frac{dP_{st}^{k,i,m}(z)}{dz} \right|_{z=1} \quad (31)$$

其方差 σ^2 可表示为:

$$\sigma^2(t) = \left[\frac{d^2 P_{st}^{k,i,m}(z)}{dz^2} + \frac{dP_{st}^{k,i,m}(z)}{dz} - \left(\frac{dP_{st}^{k,i,m}(z)}{dz} \right)^2 \right] \Big|_{z=1} \quad (32)$$

求解 802.11p EDCA 机制下 MAC 层服务时间的过程可

归纳为迭代方法,具体步骤如下。

步骤 1 在(0,1)范围内随机赋予 $\rho_{k,i,m}(t)$ 初始值。

步骤 2 根据式(29)、式(30)计算出 $p_v^{k,i,m}(t)$ 与 $p_b^{k,i,m}(t)$ 。

步骤 3 根据式(31)计算出 MAC 层服务时间 $\frac{1}{\mu_{k,i,m}(t)}$,

将其反代入式(19),获得 $\rho_{k,i,m}(t)$ 的一个新的值。

步骤 4 计算 $\rho_{k,i,m}(t)$ 的初始值与新的值之间的绝对误差,并与预设误差界限 ϵ 进行比较。若绝对误差小于 ϵ ,则说明获得了正确的 $\rho_{k,i,m}(t)$ 值,迭代结束。若绝对误差大于 ϵ ,将 $\rho_{k,i,m}(t)$ 的新值作为初始值,并重复步骤 1—步骤 3 直到绝对误差小于 ϵ 。

步骤 5 根据式(32)计算 MAC 层服务时间的方差。

为保证信息能在时延容忍范围内被完整接收,802.11p 协议对于包传递率同样具有严格的要求。本文中,PDR 具体的计算方法如下:

$$\begin{aligned} PDR_{k,i,m} &= \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \sum_m \tau_{k,i,m}) \frac{(N_{cs}^{k,i} - 1)^n}{n!} e^{-(N_{cs}^{k,i} - 1)} \\ &= e^{-(N_{cs}^{k,i} - 1) \sum_m \tau_{k,i,m}} \end{aligned} \quad (33)$$

5 实验结果与分析

5.1 实验环境

利用提出的 MAC 层服务时间(时延)计算模型,分析交通路口处基于 802.11p EDCA 的车队通信时延性能。首先如图 1 所示,在十字路口处铺设纵横各 6 条双向车道,并在交通路口范围内利用均匀分布函数随机分布所有车队。每个方向上的 3 条车道分别对应左转、直行和右转车道,并且规定同一车道上的所有车队的目的地一致,即不存在变道或转向情况。根据实际情况设每条道路宽 3.5m。以左转车道上的第一个车队的头车 $V_{1,1}$ 作为目标车辆进行跟踪观察。车队通信相关参数均根据 IEEE 802.11p 标准规定^[17,22]设置,包括将 $[CW_{min}^0, CW_{min}^1, CW_{min}^2, CW_{min}^3]$ 设置为 $[3, 3, 7, 15]$, $[CW_{max}^0, CW_{max}^1, CW_{max}^2, CW_{max}^3]$ 设置为 $[3, 7, 15, 1023]$ 。根据实际情况设置包到达率 $[\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$ 分别为 $[5, 10, 15, 20]$ pkts/s。其余实验所需参数如表 2 所列。

表 2 实验参数设置

Table 2 Experimental Parameter Setting

Parameter	Value	Parameter	Value
$a/(m/s^2)$	2	$b/(m/s^2)$	3
$v_0/(mile/h)$	50	$v_e/(mile/h)$	25
$T_0/(s/Veh)$	1.5	s_0/m	3
P	24	m_v	3
L_0/m	3	T_G/s	30
R_l/m	7.75	R_r/m	18.25
$\Delta t/m$	0.1	$\delta/\mu s$	13
$\gamma/\mu s$	1	$E[P]/bits$	200
$R_d/Mbps$	3	$R_b/Mbps$	1
$PHY_H/bits$	48	$MAC_H/bits$	112
$SIFS/\mu s$	32	L_m	1

5.2 实验结果及分析

图 4 给出了目标车辆 $V_{1,1}$ 通信范围内的车辆数 N_{cs} 随时间的变化过程。设初始时刻 $t_0=0$,此时为对应车道的红灯转绿灯的时刻,蓝红黄 3 条线分别对应左转、直行和右转车道。由图 4 可知,不管绿灯状态下允许通行的是左转、直行还是右

转车道上的车队,目标车辆 $V_{1,1}$ 通信范围内的车辆数 $N_{cs}^{1,1}$ 都呈先增加后不变再减少最后恒定的趋势。这是因为在初始阶段所有车队包括 $V_{1,1}$ 都向着交通路口的中心方向前进,导致 $V_{1,1}$ 通信范围内的车辆密度增大,可通信车辆数增多。然后,因为车载传感器覆盖范围足够大,所以当所有车辆都进入其通信范围后,车辆数会在一定时间内保持不变。接着随时间推移,绿灯状态下的车队开始通过交通路口并驶离,而其余车队受红灯影响减速并停在所在车道的停止线前,导致 $N_{cs}^{1,1}$ 减少。最后当这些车队全部驶离交通路口后,在其他车道的车队驶离该路口前, $N_{cs}^{1,1}$ 会保持一段时间的恒定状态。

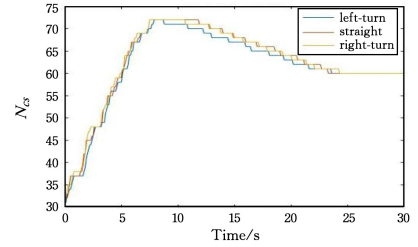
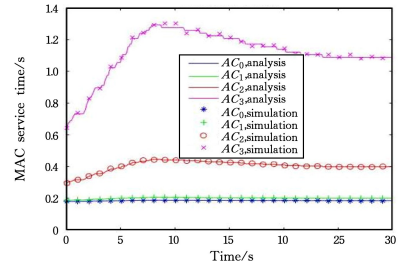
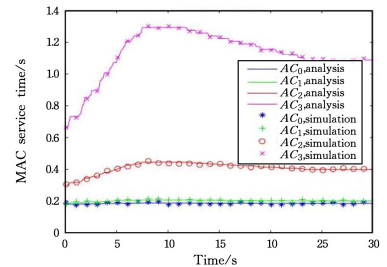


图 4 目标车辆 $V_{1,1}$ 通信范围内的车辆数(电子版为彩色)
Fig. 4 Number of vehicles in communication range of tagged vehicle $V_{1,1}$

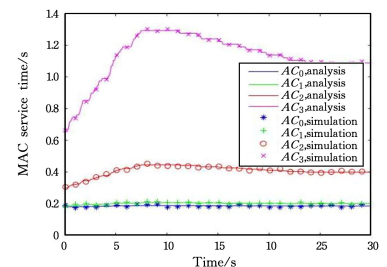
图 5(a)—图 5(c)给出了左转、直行和右转车道对应的信号灯为绿灯,其他车道为红灯时 MAC 层服务时间(时延)随时间的变化情况。



(a) 左转弯道



(b) 直行车道



(c) 右转弯道

图 5 MAC 层服务时间

Fig. 5 MAC service time

由图 5(a)—图 5(c)可知,时延的变化趋势分别对应如图

4 所示的 $N_{cs}^{1,1}$ 的变化情况。当 $N_{cs}^{1,1}$ 增加时,传输数据发生碰撞的概率随之增大,退避冻结发生的概率也有明显提升,进而导致时延增加,反之导致时延降低。此外, AC_m 的优先级越低,其时延越大。这是因为 IEEE 802.11p 协议规定优先级越低,其竞争窗口越大,退避所需平均时间越多,从而导致了时延增加。由图 5 可知,经过交通路口时的车队通信时延均低于协议规定的 100 ms,这说明在交通路口时车队采用 802.11p 协议能够保证通信的及时性与可靠性。

图 6(a)~图 6(c)分别给出了左转、直行和右转车道对应的信号灯为绿灯,其他车道为红灯时,包传递率随时间的变化情况。

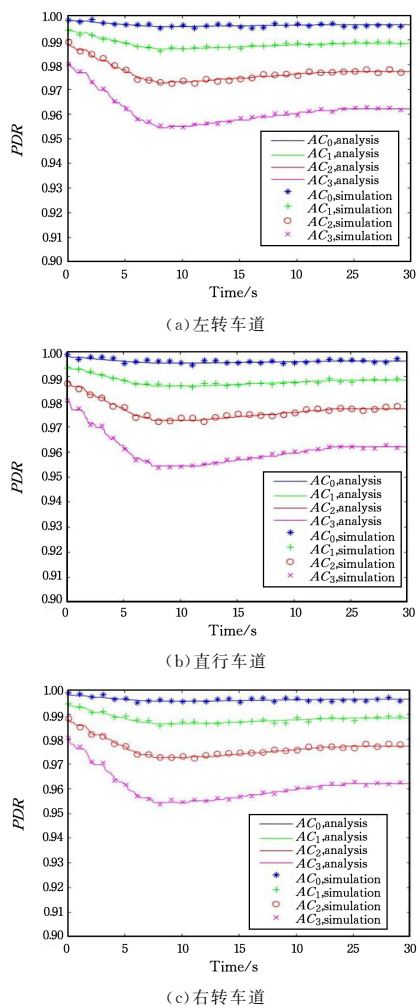


图 6 包传递率

Fig. 6 Packet Delivery Ratio

由图 6(a)~图 6(c)可知,包传递率的变化趋势分别对应如图 4 所示的 $N_{cs}^{1,1}$ 的变化情况。当 $N_{cs}^{1,1}$ 增加时,传输数据发生碰撞的概率随之增大,从而导致包传递率降低。当 $N_{cs}^{1,1}$ 减少时,传输数据发生碰撞的概率随之降低,包传递率增加。此外, AC_m 的优先级越高,其包传递率越高。这是因为 IEEE 802.11p 协议规定优先级越小,其竞争窗口越小,传输概率越大,且低优先级的队列只有当高优先级队列没有包需要发送时才能发送,因此 AC_m 的优先级越高,其包传递率越高。由图 6 可知,即使在目标车辆通信范围内车辆数目最大时,所有传输队列的包传递率也高于 0.95,保证了在交通路口时车队采用 802.11p 协议数据传输的完整性。

结束语 本文针对交通路口处车队通信网络复杂多变的情况,提出了一种基于 802.11p EDCA 机制的车队通信性能分析模型。首先构建交通路口处车辆的通信连通网络,并通过建立无人驾驶车队移动模型获得网络通信性能。然后采用概率母函数的方法将典型的描述 802.11p EDCA 机制的马尔可夫模型转化为 z 域线性模型,针对 4 种接入类别的优先级差异,推导车队通信时延与包传递率的分析模型。仿真结果验证了分析模型的准确性,并且发现经过交通路口时的车队通信时延低于 802.11p 协议规定的 100ms 且包传递率均高于 0.95,该模型能够保证车队通信的及时性与完整性。

参考文献

- [1] MEI J, ZHENG K, ZHAO L, et al. Joint Radio Resource Allocation and Control for Vehicle Platooning in LTE-V2V Network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12):12218-12230.
- [2] WANG R, WU J, YAN J. Resource Allocation for D2D-Enabled Communications in Vehicle Platooning [J]. IEEE Access, 2018, 6:50526-50537.
- [3] MARZBANI H, KHAYYAM H, CHING N T, et al. Autonomous Vehicles: Autodriver Algorithm and Vehicle Dynamics [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3201-3211.
- [4] CHAE H, YI K. Virtual Target-Based Overtaking Decision, Motion Planning, and Control of Autonomous Vehicles [J]. IEEE Access, 2020, 8:51363-51376.
- [5] HYUNG J K, JI H Y. Takeover Requests in Simulated Partially Autonomous Vehicles Considering Human Factors [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2017, 47(5): 735-740.
- [6] LIU B B, LIU W W, MAO X G, et al. Correctness Verification of Rules for Unmanned Vehicles' Decision System [J]. Computer Science, 2017, 44(4): 72-74, 113.
- [7] OKUYAMA T, GONSALVES T, UPADHAY J. Autonomous Driving System based on Deep Q Learning [C] // 2018 International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS). 2018:201-205.
- [8] XU W, ZHOU H, CHENG N, et al. Internet of vehicles in big data era [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(1):19-35.
- [9] WU Q, LIU H, WANG R, et al. Delay Sensitive Task Offloading in the 802.11p Based Vehicular Fog Computing Systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1):773-785.
- [10] LIU Y, ZONG C, ZHANG D. Lateral control system for vehicle platoon considering vehicle dynamic characteristics [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(9):1356-1364.
- [11] KIM H J, YANG J H. Takeover Requests in Simulated Partially Autonomous Vehicles Considering Human Factors [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2017, 47(5): 735-740.
- [12] NI Y, HE J, CAI L, et al. Data Uploading in Hybrid V2V/V2I Vehicular Networks: Modeling and Cooperative Strategy [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4602-4614.

- [13] HAN C, DIANATI M, TAFAZOLLI R, et al. Analytical Study of the IEEE 802. 11p MAC Sublayer in Vehicular Networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(2): 873-886.
- [14] PENG H, LI D, YE Q, et al. Resource Allocation for Cellular-based Inter-Vehicle Communications in Autonomous Multiplatoons[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 11249-11263.
- [15] LIU B, JIA D, LU K, et al. A Joint Control Communication Design for Reliable Vehicle Platooning in Hybrid Traffic[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9394-9409.
- [16] FENG Y, HE D, GUAN Y. Composite Platoon Trajectory Planning Strategy for Intersection Throughput Maximization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6305-6319.
- [17] PENG H, LI D, ABBOUD K, et al. Performance Analysis of IEEE 802. 11p DCF for Multiplatooning Communications With Autonomous Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2485-2498.
- [18] JIA D, LU K, WANG J. A Disturbance-Adaptive Design for VANET Enabled Vehicle Platoon[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2): 527-539.
- [19] BIANCHI G. Performance Analysis of the IEEE 802. 11 Distributed Coordination Function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.
- [20] YAO Y, RAO L, LIU X. Performance and Reliability Analysis of IEEE 802. 11p Safety Communication in a Highway Environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(9): 4198-4212.
- [21] XU K, TIPPER D, QIAN Y, et al. Time-Dependent Performance Analysis of IEEE 802. 11p Vehicular Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 5637-5651.
- [22] ZHENG J, WU Q. Performance Modeling and Analysis of the IEEE802. 11p EDCA Mechanism for VANET[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology 2016, 65(4): 2673-2689.



XIA Si-yang, born in 1996, postgraduate. His main research interests include VANETs and communication protocols in autonomous driving.



WU Qiong, born in 1986, Ph.D, associate professor, master supervisor. His main research interests include autonomous driving communication technology and so on.