

## Platoon 架构下 VANETs 车间通信过程及性能分析\*

郭红叶, 赵海, 司帅宗, 彭海霞



(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

通讯作者: 司帅宗, E-mail: sishuaizong@gmail.com

**摘要:** 智能车辆编组 platoon 的稳定运行需要车辆间实时可靠的信息传输来保证. 针对应用专用短程通信 (DSRC) 技术来实现车载自组织网络 (VANETs) 车间通信的 platoon 架构, 提出了一种车间通信网络性能的分析方法, 分别对 platoon 组内智能车辆间通信和多个 platoons 组间通信的过程进行了分析. 该方法采用长度有限的  $M/G/1/K$  排队模型分析数据包到达媒体访问控制 (MAC) 层的排队过程, 得到不同网络负载下缓冲区排队状态的平稳分布; 并且在缓冲区可能处于空闲状态时, 利用 Markov 模型分析方法得到不同车辆位置的车间通信性能. 研究表明: 网络数据流量、信道条件、MAC 层缓冲区排队过程、争用信道退避过程以及 platoon 参数对车间通信的包传输时延和包丢失概率等网络性能有显著影响, 数值分析结果验证了专用短程通信技术下的车间通信具有较小的信息传输时延, 能够满足 platoon 稳定运行的要求.

**关键词:** platoon; 专用短程通信技术;  $M/G/1/K$  排队模型; 传输延时; 包丢失概率

**中图法分类号:** TP393

中文引用格式: 郭红叶, 赵海, 司帅宗, 彭海霞. Platoon 架构下 VANETs 车间通信过程及性能分析. 软件学报, 2019, 30(4): 1121-1135. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5374.htm>

英文引用格式: Guo HY, Zhao H, Si SZ, Peng HX. Analysis of inter vehicles communication process and performance in VANETs based on platoon. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2019, 30(4): 1121-1135 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5374.htm>

### Analysis of Inter Vehicles Communication Process and Performance in VANETs Based on Platoon

GUO Hong-Ye, ZHAO Hai, SI Shuai-Zong, PENG Hai-Xia

(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Stable driving of autonomous vehicles platoon is ensured by reliable real-time information transmission between vehicles. Aiming at the platoon architecture, which uses dedicated short range communication technology (DSRC) in VANETs, an analysis method of vehicle-to-vehicle communication networks performance is proposed. It mainly studies inter autonomous vehicles communication process of intra-platoon and the inter-platoon communication process in multi-platoon marshalling. It uses  $M/G/1/K$  queue model with limited length to analyze the queuing process of packet arriving at media access control layer, which is described through steady distribution of buffer states under different network loads. Subsequently, it derives communication characteristics under different vehicles location through the analysis method of Markov model considering idle state of buffer. Research results show that various factors including the network data flow, channel conditions, MAC layer buffer queuing process, contention channel process, and platoon parameters, have a substantial influence on packet transmission delay and packet loss probability of inter vehicles communication, and the delay of vehicle-to-vehicle communication based on DSRC satisfies string stability demand of platoon.

**Key words:** platoon; dedicated short range communication technology;  $M/G/1/K$  queue model; delay; packet loss probability

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61671142)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61671142)

收稿时间: 2017-01-04; 修改时间: 2017-04-01; 采用时间: 2017-08-23

为了解决高速公路上车流密集以及由之带来的交通拥堵、交通事故多发等问题,有发达国家提出了智能交通系统(intelligent traffic system,简称 ITS)的概念,旨在将信息、通信和控制等技术应用于交通管理,实现车辆的智能驾驶,道路的高效利用.而最初为自动高速公路系统(automated highway systems,简称 AHS)提出的 platoon 车辆编组成为近几年研究的热点.Platoon 架构是由若干智能驾驶车辆按照一定几何队形组成的车队,通过车载雷达等传感器和车间无线通信实现以恒定间距稳定地跟随前方车辆,车队成员通常具有相同目的地,且行驶速度较普通车辆要快,车间间距可以达到很小(几米),故而有效提高了道路容量,而特殊的编组协同驾驶有助于减少空气阻力、节约燃料,提高道路安全性.Platoon 系统稳定运行的关键在于车载智能控制系统对 platoon 中车辆成员的加速/减速和变道等驾驶行为的实时控制,以保证车辆的运动状态误差不沿纵向方向放大,即满足队列稳定性<sup>[1]</sup>.而控制策略的准确实施由车辆间的有效实时通信来保证.车载环境下的通信网络称为车载自组织网络(vehicular Ad Hoc networks,简称 VANETs),包括车车通信(IVC/V2V)和路车通信(RVC/V2I).通信网络采用 DSRC/WAVE 协议架构,即专用短程通信技术(dedicated short range communication,简称 DSRC)和车载环境中的无线接入(wireless access in vehicular environment,简称 WAVE)标准,在物理层和 MAC 层采用适用于高速车载环境的 IEEE 802.11p 协议标准.而 DSRC 采用 IEEE 1609.4 作为对 MAC 层的改进,增加了多信道切换功能<sup>[2]</sup>.

关于车载自组网通信协议和通信技术的研究大多基于普通驾驶车辆,其存在通信距离远、路由困难、通信链路不稳定且网络拓扑高度动态变化的问题<sup>[3]</sup>.大量研究主要是对上述问题进行改进,从而探讨通信节点间的路由算法、MAC 层接入技术以及物理层技术等等<sup>[4-7]</sup>.而将道路上的车辆组成稳定 platoon 编组的形式能够有效地改善 VANETs 通信网络的连通性<sup>[8]</sup>,保证 platoon 中传递信息时效性和可靠性的车间无线通信会显著影响整个车辆编组的协调控制和安全行驶,但是车载环境下不稳定的通信信道、复杂的道路环境和车辆节点的高速运动都会影响信息的有效实时传输,从而将包投递延时、误码、丢包等不确定性引入到 platoon 的控制系统中.所以有必要对 platoon 中车辆之间的通信过程及通信网络性能进行分析,但到目前为止仍然没有较全面的相关理论研究.现有研究 platoon 系统的相关工作对车间通信过程的处理方法大致可以分为以下几类:假定车间通信近似理想,设置通信性能度量典型分布,仅考虑车辆编组中成员通信失败的情况对 platoon 的控制模型和协作管理策略造成的影响或者通过 platoon 控制指标和运行条件评估相应的通信网络性能阈值.

有相当一部分文献都不考虑通信过程的不确定影响,将车间通信设定为理想状态,即假定车载控制系统能够实时、准确地获取到所需的全部信息<sup>[9,10]</sup>.但是车辆间传递信息的丢包现象和延时等通信网络特性对车辆的协调和控制具有非常显著的影响.Ploeg 等人虽然在设计基于不同信息流拓扑的 CACC(cooperative adaptive cruise control)控制器时考虑了通信延时,但是所有车辆的延时都相同且为固定值<sup>[11]</sup>.而实际通信网络的时延等特性是可变的,这种不确定性会对控制因子等产生不同程度的影响,从而破坏 platoon 的队列稳定性<sup>[12]</sup>.很多学者考虑到车辆间不容忽视的通信状况,将呈不同分布的通信参量加入到 platoon 的控制研究中.Guo 等人考虑了 VANETs 网络容量限制和通信数据包的随机丢包概率满足伯努利分布的情况,提出通信网络接入调度和 platoon 控制联合设计的算法<sup>[13]</sup>.Segata 等人同样基于通信信标遭遇伯努利分布随机损失的情形来研究 platoon 车间协调策略<sup>[14]</sup>,但在实际场景下,丢包率是由通信机制和信道状况等共同决定的,并不是随机分布的,而且上述文献均未考虑通信延时.Bernardo 等人提出在 platoon 协调控制问题建模时引入呈随机分段函数的可变通信延时,其下界为 0,上界低于典型 IEEE 802.11p 车载网络的平均端到端延时(数量级为  $10^{-2}$ s)<sup>[15,16]</sup>.但车辆的通信延时不太可能表现为一种规则的分布,而且这种延时无法用来改进通信算法.Amoozadeh 等人在研究基于 VANETs 的 platoon 上层管理协议时,仅讨论了信息更新时间间隔内未接收到信标信息导致通信失败的情况<sup>[17]</sup>.除此之外,更多的文献集中在研究 platoon 控制策略或者运行性能时估计或仿真通信网络性能阈值.Xu 等人在研究信息获取方式和内容对 platoon 避免车辆追尾碰撞安全性的影响时,推导了安全距离下的最大容忍通信延时<sup>[18]</sup>.但是文献中设定的 platoon 车间间距太大,故而导出的通信延时和实际情况相差甚远.Shao 等人在设计 platoon 的 VANETs 网络 MAC 层协议时采用多优先级马尔可夫模型推导了基于连通概率的网络饱和吞吐量<sup>[19]</sup>.但他们并没有对通信延时和丢包率给出相应的分析.Fernandes 等人在车辆间的信息更新算法中,通过网络仿真软件得到典型场景的延时分布<sup>[20]</sup>.虽然能够得到较为准确的通信性能度量的数值,但却没有相应理论上的研

究,也无法从算法上改进车间通信性能.Du 等人基于确定路段间断性多跳数据传输以及车辆运动状态导致的动态交通流,推导了车载环境下通信网络中的数据传输延时<sup>[21]</sup>.但是网络中的车辆并不是 platoon 编组的形式.Jia 等人基于 4-D Markov 模型建模考虑信道条件的 CSMA/CA 退避过程,通过加入数据帧单位块的数量、数据处于发送还是转发状态这两个变量,对 2-D Markov 模型进行了改进,推导了网络饱和吞吐量和传输延时<sup>[22]</sup>.Jia 等人此项工作的不足之处在于假设的通信网络流量是饱和的,且仅研究车辆向路边单元传输信息的上行链路,而没有考虑 platoon 内部车间通信的丢包现象.

上述多数工作对于 platoon 交通流场景下的车间通信模型和网络性能的处理方法太过理想或考虑不够全面,而且鲜有文献专门对 platoon 架构下车辆间的通信过程以及通信延时和丢包概率等通信性能进行理论研究,定量地推导 platoon 编组中车辆间传递信息的通信不确定性度量指标.从而从车辆的有效通信角度入手,通过控制协同策略和通信机制来减弱不稳定通信对 platoon 构建和运行的影响,提高 platoon 架构的安全性和稳定性.针对现有研究工作中的缺陷,本文提出一种 platoon 架构下智能车辆间通信的网络性能分析方法,其中,车间通信依靠专用短程通信(DSRC)技术实现,且在分析数据包传输过程时,除了争用信道的退避阶段外,还分析了数据包在 MAC 层缓冲区的排队过程以及两者间的联系.本文的通信模型设定缓冲区长度有限,信道存在干扰误码现象,且可能没有数据包到达网络,故而所研究的车间通信更接近实际的车载环境.文中分别对 platoon 组内车间通信和多个 platoons 组间通信进行了分析,并且在后者的分析中区分了处于车队不同位置处的车辆特性.最终得到 platoon 编组关键参数及通信网络相关参数对数据包传输总延时和包丢失概率等通信性能度量的影响,同时验证了 DSRC 技术支持的车间通信的端到端延时可以满足 platoon 编组干扰不放大的队列稳定性需求.

本文第 1 节介绍 platoon 智能车辆编组系统的组成及成员车辆间的通信机制.第 2 节给出 platoon 组内车间通信过程及性能分析方法.第 3 节给出 platoons 组间通信过程及性能分析方法.第 4 节对提出的分析方法进行数值仿真及可行性验证.第 5 节是本文的总结.

## 1 Platoon 智能车辆编组系统

### 1.1 Platoon 系统结构

Platoon 中担任不同角色的车辆在队列的组建和运行过程中负责不同的功能.Platoon 系统结构如图 1 所示,其中,领导车辆(leader vehicle)是整个 platoon 的管理者,主要负责:存储和管理 platoon 配置信息,比如成员目的地信息、platoon ID、platoon 成员数量等;为其他车辆传递控制信息并且收集成员车辆的状态信息;协调编组中车辆的动态加入或退出、platoon 编组的分离和融合等操作.跟随车辆(follower vehicle)负责向领导车辆发送加入、退出和变道请求,得到确认信标后即可完成相应操作;在车载控制系统的协调下保持以期望间距和速度跟随前方车辆.而且跟随车辆可以在到达目的地或者完成信息获取后随时离开,而不会影响整个 platoon 的正常运行.队尾车辆(tail vehicle)主要负责道路上不同 platoon 编组之间的信息传输,即和下一个 platoon 智能车队的领导车辆通信.在道路上行驶的其他车辆分为普通车辆和 free agent,后者一般具有成为 platoon 成员的必要设备,比如车载协同控制器,可以在感知到合适的 platoon 编组靠近时,向该车队领导车辆发送请求,加入该车队.

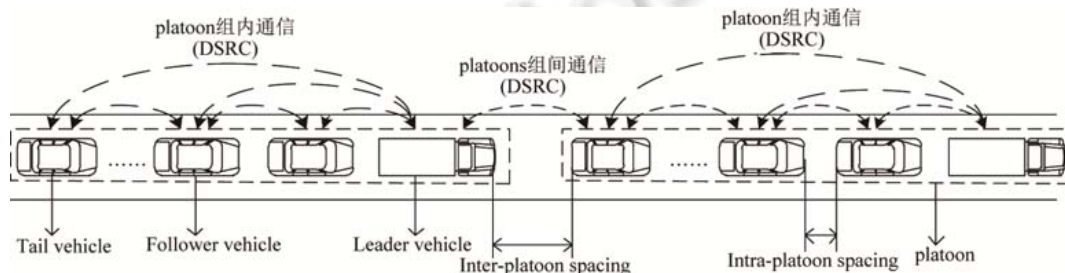


Fig.1 The system structure of platoon

图 1 Platoon 系统结构

Platoon 系统的参数包括 platoon 组内车间距(intra-platoon spacing)、platoon 组间间距(inter-platoon spacing)和 platoon 成员数量(platoon size)<sup>[23]</sup>. Intra-platoon spacing 由车载自适应控制系统设定,其最小值应保证车辆不发生碰撞,最大值低于通信网络限定的信息有效投递范围,保证编组内部的连通性. Inter-platoon spacing 是两个相邻 platoons 之间的距离,一般由前方队列中的队尾车辆和后方队列中的领导车辆界定,该值应能保证当后一个 platoon 编组感知到前方 platoon 的减速或车辆变道等事件后,有足够的时间调整自身状态,避免发生碰撞. Platoon 的队列稳定性要求干扰沿着车辆队列传播时是衰减的,所以设置间距时不仅要考虑道路上的车辆容量,还要不违背 platoon 系统对干扰的鲁棒性. Platoon 成员数量随着车辆动态加入或退出而不断发生变化,其上界是保证组内单跳通信连通性和队列稳定性的最低要求.

Platoon 系统中的车辆之间通过无线通信传递速度、加速度以及驾驶行为等信息,将其输入到车载自适应控制系统后,通过控制协调算法得到当前车辆期望的加速度,从而控制车辆的加/减速维持和前方车辆的期望间距和期望的速度. 下面是针对车辆控制增益和间距参数相同的均匀 platoon 的线性增益控制算法<sup>[13]</sup>:

$$u_i(t) = k_e(t)[q_{i-1}(t) - q_i(t) - hv_i(t)] + k_v(t)[v_{i-1}(t) - v_i(t)] + k_a(t) \cdot [a_{i-1}(t) - a_i(t)] + k_{v_0}(t)[v_0(t) - v_i(t)] + k_{a_0}(t)[a_0(t) - a_i(t)] \quad (1)$$

其中, $i$  是车辆的编号,若 platoon 中车辆数量为  $n$ ,则  $i \in [0, n-1]$ ,领导车辆编号为 0;  $u_i(t)$  是车辆控制器的输出期望加速度,  $k_e(t)$  是车辆间距误差控制增益,  $h$  是间距控制策略设定的车间恒定时间间距;  $v_{i-1}(t)$ 、 $a_{i-1}(t)$ 、 $k_v(t)$  和  $k_a(t)$  分别表示当前车和前方相邻车的速度差、加速度差以及相应的控制增益;  $v_0(t)$ 、 $a_0(t)$ 、 $k_{v_0}(t)$  和  $k_{a_0}(t)$  分别表示当前车和领导车辆的加速度差、速度差以及控制增益.  $v_{i-1}(t)$ 、 $a_{i-1}(t)$ 、 $v_0(t)$  和  $a_0(t)$  即为车间无线通信传输的实时信息.

## 1.2 Platoon 通信机制

车载自组织网络采用专用短程通信(DSRC)技术支持车辆间通信以及车辆与路边基站之间的通信,该技术工作在 5.9GHz 频段,包括 1 个控制信道(CCH)和 7 个服务信道(SCH),带宽均为 10Hz. 控制信道传递安全信息和控制信息,其他非安全信息或者娱乐信息在服务信道中传输,DSRC 技术的高数据速率和 100m~1000m 的传输范围等特性适合 platoon 架构中车辆的信息传播和共享. 道路上多个 platoons 之间的通信过程包括 platoon 内部成员间的通信和不同 platoons 组间的通信. 前者一般通过单跳实现,通信站点为 platoon 内部所有成员车辆;而后者可以通过单跳或者多跳实现,由每个 platoon 的领导车辆和队尾车辆负责信息传递. 两种通信的信息交换在不同服务信道上实现,这种信道的协调和标定在控制信道时隙广播给成员车辆.

本文主要研究 platoon 编组架构下基于 IEEE 802.11p 协议的车间通信网络传输延时和包丢失概率等 MAC 层性能. 将通信过程分为缓冲队列的排队阶段和争用信道资源的传输阶段. 接入机制采用 RTS/CTS(request to send/clear to send)握手机制,有效减少了阻塞间隔. MAC 层服务的基础是分布式协调功能(DCF)接入方式,DCF 基于冲突避免的载波检测多路访问(carrier sense multiple access with collision avoidance,简称 CSMA/CA)机制,使用二进制指数退避算法避免冲突. 发送数据包前先确定信道空闲并持续 DIFS 时间再发送,若信道忙,则从  $[0 \sim CW_i]$  中选择随机退避时间等待信道空闲,其中,  $CW_i = 2^i CW_{\min}$ ,  $CW_i$  代表竞争窗口值,与传输失败次数和退避阶数有关,  $i$  是退避阶数. 当达到最大退避次数时,数据传输成功或者达到最大重传限制都将回到  $CW_{\min}$ ,退避计数器在每个信道空闲时隙都会减 1,若信道忙,则计数器停止计数. 当退避计数器值减为 0 时,开始发送数据.

## 2 Platoon 组内车间通信

本节对 platoon 编组内部的车间通信过程及通信性能进行分析,参与通信的车辆为 platoon 组内所有成员车辆,每辆车的通信性能相同.

### 2.1 组内通信的退避过程

本文所研究的通信过程的无线信道是非理想的,即在信道中传输的数据包可能出现误码,且车辆站点并不总是有数据包发送,此时网络处于非饱和流量状态,这里用通信系统处于空闲状态来表示这种情况. 当缓冲队列

为空且没有新的数据包到达时,系统进入空闲等待状态,等到需要发送数据时,再开始竞争信道资源.车辆在通信过程中数据包传输失败可能是因为网络中多辆车同时发送信息出现信道阻塞,也可能是不稳定的无线信道受到干扰导致了误码.假设最大重传次数为  $M$ ,最大退避阶数为  $M'$ ,若数据包重新发送次数达到  $M+1$  次时仍然传输失败,则认为数据包丢失.设车载环境中的信道比特误码率为  $p_{error}$ ,传输一帧数据的总比特数包括物理层和 MAC 层头部信息、有效数据长度以及握手机制的数据开销等.故传输数据帧出错的概率可以计算为

$$\left. \begin{aligned} L &= H_{phy} + H_{mac} + l + RTS + ACK + CTS \\ p_e &= 1 - (1 - p_{error})^L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在二维 Markov 过程  $\{s(t), b(t)\}$  中加入系统空闲的情况,其中  $s(t)$  和  $b(t)$  代表在时隙  $t$  内退避状态和退避计数器取值的随机变量.车辆在任何一个时隙由于发生误码和信道阻塞数据包传递失败的概率  $p_m$  以及发送数据包的概率  $p$  可推导为

$$\left. \begin{aligned} p_p &= 1 - [1 - (1 - q_{em})p]^{N-1} \\ p_m &= p_p \cdot p_e + p_p(1 - p_e) + p_e(1 - p_p) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$p^{-1} = \begin{cases} \frac{CW_{min}(1 - p_m)[1 - (2p_m)^{M+1}] + (1 - 2p_m)(1 - p_m^{M+1})}{2(1 - 2p_m)(1 - p_m^{M+1})} + \frac{q_{em}(1 - p_m)}{p_{na}(1 - p_m^{M+1})}, & M \leq M' \\ \frac{CW_{min}(1 - p_m)[1 - (2p_m)^{M+1}] + 2^{M'} p_m CW_{min}(1 - 2p_m)(p_m^{M'} - p_m^M)}{2(1 - 2p_m)(1 - p_m^{M+1})} + \frac{q_{em}(1 - p_m)}{p_{na}(1 - p_m^{M+1})} + \frac{1}{2}, & M > M' \end{cases} \quad (4)$$

其中  $p_p$  代表某一时隙超过一辆车发送信息使得信道发生阻塞的概率,  $N$  是 platoon 成员数量.  $p_{na}$  是新数据包的到达概率,  $q_{em}$  代表 MAC 层缓冲队列为空的概率,即车辆没有数据包发送的可能性大小.

## 2.2 组内通信 MAC 层排队过程

Platoon 编组中的车辆向其他成员传递信息进入 MAC 层时,多个数据包首先在缓存队列中排队等待,到达队列头部时再侦听信道获取通信资源的使用权.而由于实际情况中车辆传输数据包的时刻和数量是无法预知的,可以将该行为看作是随机事件,故由概率性可知,车辆节点在某时刻发送数据包的次数服从参数为  $\lambda$  的泊松分布,  $\lambda$  表示单位时间内到达的数据包个数.数据包在排队系统中满足先进先出的原则,即先到达的先被服务.排队过程用  $M/G/1/K$  模型来近似<sup>[24,25]</sup>,排队队列的长度有限,当缓存队列满队时,无法继续接收数据包.排队系统在某时刻的状态表示为信道被占用时缓存队列中的数据包数目,设定 MAC 层的缓存队列存放数据包的上限为  $K$ .为了得到排队系统的稳定状态概率,需要先计算 MAC 层的服务时间分布,数据包服务时间表示为从排队结束争用信道资源开始到传输成功或者达到最大重传次数为止的时间<sup>[26]</sup>,一般设定为空闲时隙  $\tau$  的整数倍.假设取不同倍数的概率分布为  $p_{st}^T$ ,其中  $T$  表示倍数,且  $T \in [0, T_m]$ ,则最大服务时间表示为  $T_m \tau$ .用一维变量  $X(t)$  来描述排队系统的状态,  $X(t)$  是在完成排队的数据包离开时,排队系统中剩余的数据包个数,缓存队列在第  $j$  个数据包离开排队系统时刻之前所处状态的分布可以用无记忆的嵌入式马尔可夫链建模.故而在一个服务时间内有  $k$  个数据包到达的概率表示为

$$a_k = \sum_{T=0}^{T_m} p_{st}^T \frac{(\lambda T \tau)^k}{k!} e^{-\lambda T \tau} \quad (5)$$

假设没有数据包到达时  $p_{st}^T$  为 0,则通信车辆在某时隙有新数据包到达的概率导出为  $p_{na} = 1 - e^{-\lambda T_{idle}}$ .  $T_{idle}$  表示当前车辆在通信网络中的其他车辆传输数据包过程中处于空闲状态的平均时间长度,计算公式如下:

$$\begin{aligned} T_{idle} &= \tau [1 - (1 - q_{em})p]^{N-1} + T_c \{ [(1 - q_{em})p]^{N-1} - (N-1)(1 - q_{em}) \cdot \\ &\quad p [1 - (1 - q_{em})p]^{N-2} \} + T_e p_e (N-1)(1 - q_{em}) p [1 - (1 - q_{em})p]^{N-2} + \\ &\quad T_s (1 - p_e) \cdot (N-1)(1 - q_{em}) p [1 - (1 - q_{em})p]^{N-2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $T_s$ 、 $T_e$  分别表示数据包发送成功所需要的时间和由于信道误码传输失败所经历的时间,可以表示为  $T_s = T_e = DIFS + RTS + SIFS + CTS + SIFS + H_{phy} + H_{mac} + l + SIFS + ACK$ ,而  $T_c$  表示与其他车辆的数据包发生冲突时

占用通信资源的时间,表示为  $T_c = DIFS + RTS + SIFS + CTS$ .

处于排队等待状态的剩余数据包数量  $X(t)$ 的排队系统稳态概率分布可推导为

$$p_k^{que} = \begin{cases} p_0^{que} a_k + \sum_{i=1}^{k+1} p_i^{que} a_{k-i+1}, & k = 0, 1, \dots, k-1 \\ p_0^{que} \left(1 - \sum_{l=0}^{K-1} a_l\right) + \sum_{i=1}^K p_i^{que} \left(1 - \sum_{l=i-1}^{K-1} a_{l-i+1}\right), & k = K \end{cases} \quad (7)$$

根据  $M/G/1/K$  排队模型可以得到缓存队列为空的概率,即车辆在某个时隙没有数据包发送的概率为  $q_{em} = p_0^{que} / (p_0^{que} + \lambda \overline{T}_{sv})$ . 其中,  $\lambda \overline{T}_{sv}$  是信道被占用的概率,  $\overline{T}_{sv}$  是通信过程的 MAC 层服务时间分布的均值.

车辆数据包在 MAC 层缓冲区排队结束后,进入发送阶段,将 MAC 层对数据包的处理过程称为服务系统,系统输入设为概率 1.若数据包侦听到信道忙,则进行指数退避,产生退避延时,该过程结束后,数据包以概率  $p_p$  再次侦听到信道忙,进入冲突退避过程,也可能由于帧错误需要重新发送,概率为  $p_m - p_p$ ,上述过程直到达到重传限制结束传输或者检测到信道空闲成功传输数据,其概率为  $1 - p_m$ .将每个行为都看作是服务系统的子系统,其在时域产生的延时  $t$  在  $z$  域用  $z^t$  传递函数来表示.数据包的整个服务系统即为多个子系统的级联,也是多个延时量的叠加,系统的输出即为相应概率取值下的延时因子  $z^t$  叠加的结果.各项的概率系数为数据包传输过程中不同服务时间对应的概率分布  $p_{st}^T$ .由上述分析得出,服务系统可看作是线性系统,系统的传递函数即为包服务时间概率分布的生成函数,记为  $H(z)$ ,可以得到其表达如式(8)所示.图 2 所示为服务系统的框图.

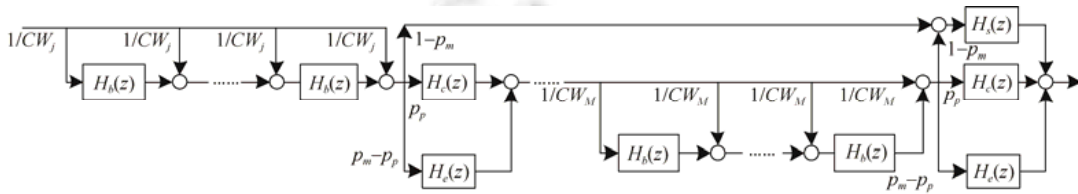


Fig.2 MAC service time linear system diagram

图 2 MAC 层服务时间线性系统框图

$$H(z) = [p_p H_c(z) + (p_m - p_p) H_e(z)]^{M+1} \prod_{j=0}^M \frac{1}{CW_j} \sum_{k=0}^{CW_j-1} H_b^k(z) + (1 - p_m) \cdot H_s(z) \sum_{i=0}^M \left\{ [p_p H_c(z) + (p_m - p_p) H_e(z)]^i \prod_{j=0}^i \frac{1}{CW_j} \sum_{k=0}^{CW_j-1} H_b^k(z) \right\} \quad (8)$$

$H_c(z)$ 表示数据包发送过程中产生冲突导致传输失败的时间分布传递函数,表示为  $H_c(z) = z^{T_c}$ ;  $H_s(z)$ 是数据包传输成功的时间分布传递函数,  $H_e(z)$ 是数据包由于信道误码造成传输失败的时间分布传递函数,表示为  $H_e(z) = H_s(z) = z^{T_s}$ ;  $H_b(z)$ 是竞争信道的退避过程所占用时间分布的传递函数,在本文场景条件下计算为

$$H_b(z) = [1 - (1 - q_{em}) p]^{N-1} z^\tau + [1 - (1 - q_{em}) p]^{N-2} (N-1) (1 - q_{em}) p z^{T_s} + \{1 - [1 - (1 - q_{em}) p]^{N-1} - [1 - (1 - q_{em}) p]^{N-2} (N-1) (1 - q_{em}) p\} z^{T_c} \quad (9)$$

公式中的  $z^\tau$  项系数表示信道处于空闲时隙的概率;  $z^{T_s}$  项系数表示其他  $N-1$  辆车中某一辆成功传输数据包的概率;  $z^{T_c}$  项系数表示多辆车发送数据包导致信道冲突的概率.退避机制随机地在竞争窗口中选择初值,若检测到信道空闲,则计数器减 1,每次侦听到的信道可能处于空闲状态,也可能发生多个数据包冲突或者出现传输误码的现象,所以退避时间为单个时隙、发生冲突消耗的时间和成功传输数据包的时间三者的概率平均.在概率生成函数中,取  $[0 \sim CW_j]$  的平均值作为计数器初值,其中,  $0 \leq j \leq M$ .

由数据包传输过程中 MAC 层的服务时间分布概率表示的概率生成函数为  $H(z) = \sum_{T=0}^{T_m} p_{st}^T \cdot z^{T_c}$ , 结合上述传递函数方法的式(8)和式(9),可以得到离散概率  $p_{st}^T$ .

### 2.3 Platoon 组内车间通信性能度量

基于上述 platoon 组内车间通信过程的分析,下面给出通信过程的数据包丢失概率和通信延时等网络性能指标.数据包整个传输过程中的延时包括缓冲队列中的排队延时和竞争接入信道的退避延时.本文忽略了数据包在无线信道中的传输时延,也就是车辆成功竞争到资源后发送数据包到达接收方的时间不予考虑.其中,排队的延时由非满队情况下的队列平均长度与包到达速率的比值得到.

$$T_{que} = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} i \cdot \frac{p_i^{que}}{\lambda T_{sv} + p_0^{que}} + K \left( 1 - \frac{1}{\lambda T_{sv} + p_0^{que}} \right)}{\lambda / (\lambda T_{sv} + p_0^{que})} = K \frac{\lambda T_{sv} + p_0^{que} - 1}{\lambda} + \sum_{i=0}^{K-1} i \cdot \frac{p_i^{que}}{\lambda} \quad (10)$$

$$\text{其中, } \overline{T_{sv}} = \left. \frac{dH(z)}{dz} \right|_{z=1} = \sum_{T=0}^{T_m} p_{st}^T \cdot T\tau.$$

在成功传输情况下,数据包竞争信道的退避过程产生的延时为平均时隙长度乘以退避过程中可能占用的时隙个数,表达如下:

$$T = \left[ \sum_{k=0}^M \frac{1}{1 - p_m^{M+1}} (p_m^k - p_m^k p_m^{M+1-k}) \frac{2^k CW_{min} + 1}{2} \right] \cdot Tslot, \quad (11)$$

$$Tslot = \tau [1 - (1 - q_{em})p]^N + T_c \{1 - [1 - (1 - q_{em})p]^N - N(1 - q_{em})p \cdot [1 - (1 - q_{em})p]^{N-1}\} + T_e p_{error} N(1 - q_{em})p [1 - (1 - q_{em})p]^{N-1} + T_s (1 - p_{error}) N(1 - q_{em})p [1 - (1 - q_{em})p]^{N-1}$$

则 platoon 中车辆之间传递信息的总传输延时为  $T_{delay} = T + T_{que}$ ; 数据包投递过程失败的概率表示为  $P = p_m^{M+1}$ .

为了得到车辆站点间通信的延时和数据包丢失概率等性能度量指标,首先假设通信节点始终有数据包发送,即缓冲区空闲概率  $q_{em}$  为 0,联立式(2)~式(4)及式(6),计算每辆车发送数据包的概率  $p$  以及由于信道误码或者竞争冲突导致数据包发送失败的概率  $p_m$ ; 然后利用 MAC 层服务时间概率分布生成函数  $H(z)$ , 得到离散概率  $p_{st}^T$ , 将其代入式(5),结合迭代方程(7)求得排队系统稳态概率分布  $p_k^{que}$ , 进而得到空闲概率  $q_{em}$ , 若其大于  $10^{-6}$  (设定的容限值), 则更新  $p$  和  $p_m$  为缓冲区可能为空情况下的概率, 最后联立式(10)、式(11)计算排队延时、退避延时等性能指标, 同时可获得包丢失概率及传输延时; 若  $q_{em} \leq 10^{-6}$ , 则说明当前网络负载条件下, 缓冲区空闲的可能性很小, 则不更新概率  $p$  和概率  $p_m$ , 得到通信网络接近饱和和状态的性能度量.

## 3 Platoons 组间通信

本文在分析了 platoon 内部通信的基础上,进一步对 platoons 组间通信过程进行了研究.假设总共有  $m$  个 platoons 驾驶车队,由于车辆的通信范围有限,前方 platoon 编组中的车辆想要给后方 platoon 中的车辆传递信息,需要进行多跳中继. Platoons 组间通信模型中作为通信站点的车辆是每个驾驶车队的领导车辆 leader 和队尾车辆 tail, 而由于参与通信的车辆角色和位置不同,所以组间通信更为复杂.这里只研究多个 platoons 组间的单跳通信.所以通信网络中共有  $2m$  辆通信车辆,即 leader1,tail1,leader2,tail2,...,leader6,tail6, 而且参与通信的 tail 车辆只能与相邻的下一个编组中的 leader 车辆直接传递消息,同一 platoon 编组内部的 leader 车辆和 tail 车辆可以直接通信,位于 platoons 架构中间位置的 platoon leader 车辆和 tail 车辆可以与前方 platoon 的 tail 车辆以及跟随 platoon 的 leader 车辆通信.下面给出多个 platoons 组间通信情形下的通信过程及性能分析.

### 3.1 组间通信的退避过程

在组间通信中,车辆的通信特性不仅与其在 platoon 中的成员类型有关,而且与所在 platoon 编组相邻的 platoons 的数量有关.参与 platoons 组间通信的  $2m$  辆车,无论是领导车辆 leader 还是队尾车辆 tail,它们作为通信站点的地位相同,所以形成的通信网络中第  $i$  辆车和第  $2m+1-i$  辆车的特性相似<sup>[23]</sup>.考虑缓存队列可能为空的情况,在某一给定时隙中,当前车辆发送的数据包与其他相关通信车辆发生冲突的概率如式(12)所示.

$$\begin{cases} p_{p,1} = p_{p,2m} = 1 - [1 - (1 - q_{em})p_2][1 - (1 - q_{em})p_3] \\ p_{p,2} = p_{p,2m-1} = 1 - 0.5[1 - (1 - q_{em})p_1] - 0.5[1 - (1 - q_{em})p_3][1 - (1 - q_{em})p_4] \\ p_{p,3} = p_{p,2m-2} = 1 - 0.5[1 - (1 - q_{em})p_2][1 - (1 - q_{em})p_1] - 0.5[1 - (1 - q_{em})p_4] \cdot [1 - (1 - q_{em})p_5] \\ \vdots \\ p_{p,i} = p_{p,2m+1-i} = 1 - 0.5[1 - (1 - q_{em})p_{i-1}][1 - (1 - q_{em})p_{i-2}] - 0.5[1 - (1 - q_{em})p_{i+1}][1 - (1 - q_{em})p_{i+2}] \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $i=1,2,3,\dots,2m-1,2m$ ,表示通信车辆的位置编号.那么数据包一次传输失败的概率为

$$p_{m,i} = p_{p,i} \cdot p_e + p_{p,i}(1 - p_e) + p_e(1 - p_{p,i}) \quad (13)$$

根据 MAC 层数据包传输的信道竞争、指数退避过程的 Markov 模型以及上述概率性计算,可以得到 platoons 组间通信架构中不同通信车辆在某个时隙发送数据包的概率  $p_i$  为

$$p_i^{-1} = \begin{cases} \frac{CW_{\min}(1 - p_{m,i})[1 - (2p_{m,i})^{M+1}] + (1 - 2p_{m,i})(1 - p_{m,i}^{M+1})}{2(1 - 2p_{m,i})(1 - p_{m,i}^{M+1})} + \frac{q_{em}(1 - p_{m,i})}{p_{na}(1 - p_{m,i}^{M+1})}, & M \leq M' \\ \frac{CW_{\min}(1 - p_{m,i})[1 - (2p_{m,i})^{M+1}] + 2^{M'} p_{m,i} CW_{\min}(1 - 2p_{m,i})(p_{m,i}^{M'} - p_{m,i}^M)}{2(1 - 2p_{m,i})(1 - p_{m,i}^{M+1})} + \frac{q_{em}(1 - p_{m,i})}{p_{na}(1 - p_{m,i}^{M+1})} + \frac{1}{2}, & M > M' \end{cases} \quad (14)$$

### 3.2 组间通信 MAC 层排队过程

Platoons 组间通信车辆的数据包在发送之前,仍需在缓冲队列中进行排队.仍然用  $M/G/1/K$  排队模型来建模 MAC 层缓冲区的排队过程,则参与通信的所有 platoons 领导车辆和队尾车辆的排队系统分析与 platoon 组内车辆通信模型相似,区别在于 platoon 组内通信模型中的所有成员车辆在通信网络中是对等的,通信性能相同,排队行为也没有区别.但是,由于 platoons 组间通信的关键车辆只可以与相邻的通信站点传递信息,所以通信特性与车辆的空间位置有关,从而针对特定通信车辆的排队行为也有所差异.

位置编号为  $i(i \in [1, 2m])$  的通信车辆在某数据包服务时间内有  $k$  个数据包到达的概率  $a_{k,i}$ 、不同车辆的包服务时间离散概率分布  $p_{st,i}^T$ 、排队系统中剩余数据包数量的平稳概率分布  $p_{k,i}^{que}$  以及缓冲区为空的概率  $q_{em,i}$  的分析方法同第 2.2 节.但是,值得注意的是,公式中的各参量比如发包概率和冲突概率都是针对不同位置的车辆而言的.不同车辆传输数据包时 MAC 层服务时间分布的概率生成函数如式(15)所示.联立  $H_i(z) = \sum_{T=0}^{T_m} p_{st,i}^T \cdot z^{T\tau}$  即可得到不同车辆对应的离散概率分布  $p_{st,i}^T$ .

$$\begin{aligned} H_i(z) &= [p_{p,i} H_c(z) + (p_{m,i} - p_{p,i}) H_e(z)]^{M+1} \prod_{\zeta=0}^M \frac{1}{CW_{\zeta}} \sum_{k=0}^{CW_{\zeta}-1} H_{b,i}^k(z) + (1 - p_{m,i}) \cdot \\ & H_s(z) \sum_{\xi=0}^M \left\{ [p_{p,i} H_c(z) + (p_{m,i} - p_{p,i}) H_e(z)]^{\xi} \prod_{j=0}^{\xi} \frac{1}{CW_j} \sum_{k=0}^{CW_j-1} H_{b,i}^k(z) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

显著差异在于 platoons 组间通信的退避过程时间概率生成函数与车辆通信范围内的其他车辆有关,且在同一时隙内,当前车辆通信范围之外的数据包投递不会对该车造成影响.若检测到信道非空闲,则可能是争用同一信道资源的其他多辆车发送数据产生了冲突,也可能是仅有一辆车传输数据包到达接收车辆. Platoons 组间通信的每个车辆站点检测到信道成功传输通信覆盖范围内某车辆数据包的概率为

$$\begin{cases} p_{s,1} = p_{s,2m} = (1 - q_{em})p_2[1 - (1 - q_{em})p_3] + (1 - q_{em})p_3[1 - (1 - q_{em})p_2] \\ p_{s,2} = p_{s,2m-1} = (1 - q_{em})p_1[1 - (1 - q_{em})p_3][1 - (1 - q_{em})p_4] + (1 - q_{em})p_3[1 - (1 - q_{em})p_1][1 - (1 - q_{em})p_4] + (1 - q_{em})p_4[1 - (1 - q_{em})p_1] \cdot [1 - (1 - q_{em})p_3] \\ \vdots \\ p_{s,i} = p_{s,2m+1-i} = (1 - q_{em})p_{i-1}[1 - (1 - q_{em})p_{i-2}][1 - (1 - q_{em})p_{i+1}][1 - (1 - q_{em})p_{i+2}] + \\ (1 - q_{em})p_{i-2}[1 - (1 - q_{em})p_{i-1}][1 - (1 - q_{em})p_{i+1}][1 - (1 - q_{em})p_{i+2}] + \\ (1 - q_{em})p_{i+1}[1 - (1 - q_{em})p_{i-2}][1 - (1 - q_{em})p_{i-1}][1 - (1 - q_{em})p_{i+2}] + \\ (1 - q_{em})p_{i+2}[1 - (1 - q_{em})p_{i-2}][1 - (1 - q_{em})p_{i+1}][1 - (1 - q_{em})p_{i-1}] \end{cases} \quad (16)$$



由此重写退避过程的延时概率生成函数为

$$H_{b,i}(z) = (1 - p_{p,i}) \cdot z^\tau + p_{s,i} \cdot z^{T_s} + (p_{p,i} - p_{s,i}) \cdot z^{T_c} \tag{17}$$

### 3.3 Platoons 组间通信性能度量

Platoons 组间通信过程比组内单跳通信更为复杂,涉及到的通信车辆为不同 platoon 编组内的成员.参与通信的每辆 platoon leader 车辆和 tail 车辆的排队延时有如下计算公式:

$$T_{que,i} = \frac{\sum_{j=1}^{K-1} j \cdot \frac{p_{j,i}^{que}}{\lambda T_{sv,i} + p_{0,i}^{que}} + K \left( 1 - \frac{1}{\lambda T_{sv,i} + p_{0,i}^{que}} \right)}{\lambda / (\lambda T_{sv,i} + p_{0,i}^{que})} = K \frac{\lambda T_{sv,i} + p_{0,i}^{que} - 1}{\lambda} + \sum_{j=1}^{K-1} j \cdot \frac{p_{j,i}^{que}}{\lambda} \tag{18}$$

其中,第  $i$  辆车的服务时间平均值为  $T_{sv,i} = \left. \frac{dH_i(z)}{dz} \right|_{z=1} = \sum_{T=0}^{T_m} p_{st,i}^T \cdot T\tau$ .

由于车辆的空间位置不同,所以同时争用相同信道资源的周围车辆不同.从而由于信道忙而进入退避过程产生的延时也应该对不同的车辆分别计算.通信网络中和车辆  $i$  争用同一信道资源的其他车辆中仅有一辆车成功投递数据包的概率  $p_{c,i}$  和某时段有车辆发送数据包的概率  $p_{t,i}$  的表示如下:

$$\begin{cases} p_{c,1} = p_{c,2m} = \frac{1}{p'_1} [p_1(1-p_2)(1-p_3) + p_2(1-p_1)(1-p_3) + p_3(1-p_1)(1-p_2)] \\ p_{c,2} = p_{c,2m-1} = \frac{1}{p'_2} [p_1(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4) + p_2(1-p_1)(1-p_3)(1-p_4) + \\ \quad p_3(1-p_1)(1-p_2)(1-p_4) + p_4(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)] \\ \vdots \\ p_{c,i} = p_{c,2m+1-i} = \frac{1}{p'_i} [p_{i-2}(1-p_{i-1})(1-p_i)(1-p_{i+1})(1-p_{i+2}) + p_{i-1}(1-p_{i-2})(1-p_i) \cdot \\ \quad (1-p_{i+1})(1-p_{i+2}) + p_i(1-p_{i-1})(1-p_{i-2})(1-p_{i+1})(1-p_{i+2}) + \\ \quad p_{i+1}(1-p_{i-1})(1-p_{i-2})(1-p_i)(1-p_{i+2}) + p_{i+2}(1-p_{i-2})(1-p_{i-1})(1-p_i)(1-p_{i+1})] \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} p_{t,1} = p_{t,2m} = 1 - [1 - (1 - q_{em})p_2][1 - (1 - q_{em})p_3][1 - (1 - q_{em})p_1] \\ p_{t,2} = p_{t,2m-1} = 1 - [1 - (1 - q_{em})p_2][1 - (1 - q_{em})p_3][1 - (1 - q_{em})p_1][1 - (1 - q_{em})p_4] \\ \vdots \\ p_{t,i} = p_{t,2m+1-i} = 1 - [1 - (1 - q_{em})p_{i-1}][1 - (1 - q_{em})p_{i-2}][1 - (1 - q_{em})p_i][1 - (1 - q_{em}) \cdot p_{i+1}][1 - (1 - q_{em})p_{i+2}] \end{cases} \tag{20}$$

Platoons 组间通信的车辆发送数据包时争用信道的退避延时为

$$T_i = \left[ \sum_{k=0}^M \frac{1}{1-p_{m,i}^{M+1}} (p_{m,i}^k - p_{m,i}^k p_{m,i}^{M+1-k}) \cdot \frac{2^k CW_{\min} + 1}{2} \right]. \tag{21}$$

$$[\tau(1 - p_{t,i}) + T_c \cdot (1 - p_{c,i})p_{t,i} + T_e \cdot p_e \cdot p_{t,i} \cdot p_{c,i} + T_s \cdot (1 - p_e) \cdot p_{t,i} \cdot p_{c,i}]$$

可以得到从前端 platoon 发出的数据包经过多跳传输到达尾部 platoon 所经历的延时为

$$T_d = \sum_{i=1}^{2m} T_{delay,i} = \sum_{i=1}^{2m} (T_i + T_{que,i}) \tag{22}$$

而在前端 platoon 和尾部 platoon 之间多跳通信的数据包丢失概率可以计算为

$$p'_m = 1 - \prod_{i=1}^{2m} (1 - p_{m,i}^{M+1}) \tag{23}$$

Platoons 组间通信过程的网络性能度量计算流程与 platoon 组内车间通信过程的流程相似,先假设缓冲区空闲概率  $q_{em,i}=0$ ,联立式(12)~式(14)求得车辆发送数据包的概率  $p_i$  和数据包发送失败的概率  $p_{m,i}$ ;然后结合式(15)~式(17)计算离散概率  $p_{st,i}^T$ ,再利用排队模型的稳态分布  $p_{k,i}^{que}$ ,得到空闲概率  $q_{em,i}$ .同样地,若  $q_{em,i}>10^{-6}$ ,则更新概率  $p_i$  和概率  $p_{m,i}$ ,最后结合概率  $p_{t,i}$ 、 $p_{c,i}$ ,利用式(18)~式(23)计算不同通信范围的车辆的数据包传输延时、包

丢失概率等性能指标;若  $q_{em,i} \leq 10^{-6}$ , 则不更新概率  $p_i$  和概率  $p_{m,i}$ , 得到近似饱和状态的通信网络各性能指标.

#### 4 实验分析与讨论

对上述提出的 platoon 组内车间通信过程和 platoons 组间通信过程的网络性能分析方法进行数值仿真, 并采用 NS2 网络仿真软件进行对比实验. 车载环境下通信网络的负载流量表示为  $R_b = N\lambda l$ , 其中,  $N$  是通信网络中的车辆数目, 在 platoon 组内车间通信模型中,  $N$  代表智能车辆总数, 在多个 platoons 组间通信模型中,  $N$  代表所有 platoon 的 leader 车辆和 tail 车辆总数;  $\lambda$  是单位时间车辆需要传输的数据包个数, 称作包到达速率;  $l$  为数据包长度, 单位是比特. 假设车辆节点的通信范围为 150m, platoon 内部稳定车辆间距为 6m, platoon 组间间距为 40m, 车长 5m, 车辆稳定运动速度为 30m/s. 本文设定 MAC 层的最大服务时间  $T_m$  为 5 000 个时隙, 系统空闲时隙为 20 $\mu$ s, 故可表示的最大时间值为 100ms. 指数退避过程中的最小竞争窗口尺寸设置为 32, 最大退避阶数为 4. 其他参数设置见表 1.

Table 1 Simulation parameter setting

表 1 仿真参数设置

参数	取值	参数	取值
数据包长度	3 072(bits)	RTS 分组	160+192(bits)
空闲时隙 $\delta$	20( $\mu$ s)	CTS 分组	112+192(bits)
MAC 头长度	224(bits)	DIFS 时隙	50( $\mu$ s)
PHY 头长度	192(bits)	SIFS 时隙	10( $\mu$ s)
ACK 分组	112+192(bits)	数据传输速率	6(Mbps)

通过输入 platoon 编组车辆成员数量、通信网络各关键参数, 利用 platoon 组内车辆间通信过程和 platoons 组间通信过程的网络性能指标的计算方法可以得到以下数值结果, 并将其与仿真软件得到的结果进行对比.

图 3(a)和 3(b)分别是 platoon 组内车间通信的排队等待延时、数据包传输总延时和包丢失概率在不同信道条件下随编组内成员数量变化的数值和仿真结果. 观察到两者曲线基本一致. 同时可以看到, 数据包在缓存队列中的排队延时虽然随着成员数量的增多呈上升趋势, 但是幅度很小, 而包传输总延时随着车辆数量的增加明显上升. 这是由于, 通信延时主要由排队等待延时和竞争信道的退避延时组成, 其中排队延时由 MAC 层服务时间概率分布和排队长度决定, 而平均排队长度在车辆数量增加幅度不太大时变化并不明显, 且车辆站点数量是通过冲突概率的增大间接影响排队延时的, 但是接入信道的退避延时和参与竞争资源的通信站点数量直接相关. 同时在图 3(a)观察到: 信道误码率越高, 数据包传输失败的可能性越大, MAC 层平均服务时间越长, 从而排队延时迅速增加, 传输延时也相应增大. 图 3(b)表明, 信道条件对数据包丢失概率的影响非常显著, 传输信道误码率越高, 包丢失概率随 platoon 尺寸的变化趋势越陡峭. 对一个由 8 辆车组成的 platoon 智能车辆队列, 当误码率是  $10^{-6}$  时, 达到最大重传次数数据被丢弃造成的包丢失概率约为 0.11%, 此时, 传输一帧数据出错的概率为  $7.41 \times 10^{-6}$ ; 但当信道误码率高达  $3 \times 10^{-4}$  时, 包丢失概率达到了 0.65%. 数据包冲突概率是影响包丢失概率的另一个因素, 冲突概率被邻居车辆站点传输数据包的总数所影响, 故而 platoon 组内的成员数量越多, 导致数据包传输过程中由于和其他车辆发送数据包产生冲突的概率越大, 包传输失败的可能性越高.

图 4(a)和图 4(b)分别呈现了当车辆编组成员是 6 辆车、8 辆车和 10 辆车的情形下, 排队等待延时、包传输总延时和包丢失概率随数据包到达速率  $\lambda$  的变化趋势. 在仿真软件中设置发送数据包间隔为均值是  $1/\lambda$  的指数分布, 得到泊松分布的网络负载, 进而获取不同包到达速率时的网络性能. 设定排队系统的缓冲队列长度为 50, 也就是最大可容纳的数据包数量, 信道误码率固定为  $10^{-4}$ . 数据包到达速率即单位时间(1s)内车辆需要传输的数据包个数, 在数据包长度一定时, 该值和通信车辆的数量共同决定了车载通信网络的数据流量负载. 由图 4(a)可知: 随着包到达速率的增加, 开始排队延时和包传输总延时明显增加, 但当  $\lambda$  超过 150 时, 两者都逐渐趋于平缓, 最终到达上限, 此时通信网络近似达到负载饱和状态, 而  $\lambda=150$  之后的数据包传输总延时主要取决于车辆数目, 和图 3 一样的理由, 排队等待延时受车辆数目的影响不大. 由图 4(b)得到: 随着包到达速率的增大, 数据包到达概率  $p_{na}$  增大, 需要传输的数据包数量增加, 通信车辆间发送的数据包更容易产生冲突, 从而包丢失概率增大, 而当网

络达到饱和时趋于不变,此时冲突概率取决于车辆数目.在 $\lambda=150$ 且误码率为 $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $3 \times 10^{-4}$ 时,得到的8车 platoon 组内通信延时数值约为 11.30ms、12.75ms、13.44ms.仿真结果约为 11.506ms、13.079ms、13.810ms.

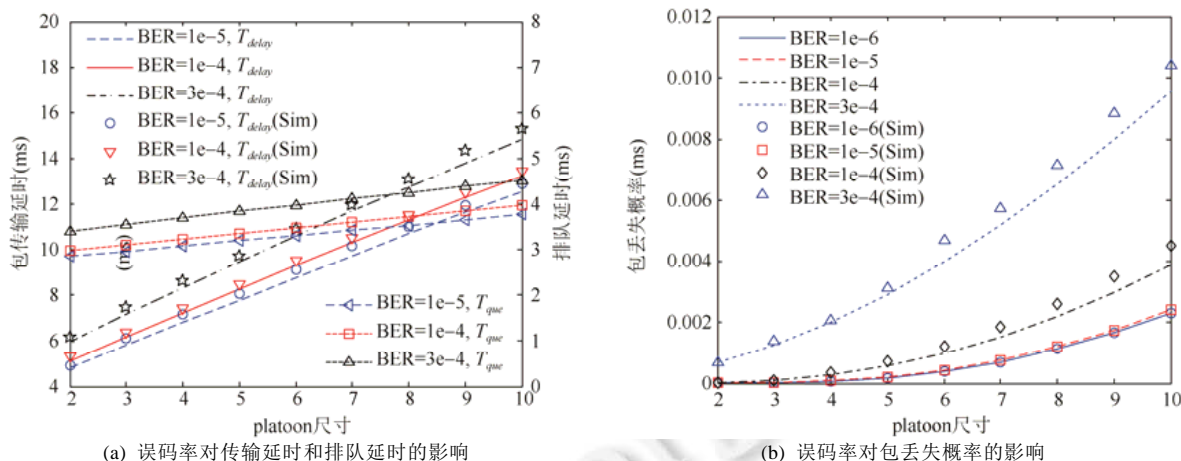


Fig.3 The performance metrics of intra-platoon communication network are affected by BER

图 3 误码率对 platoon 组内通信网络性能的影响

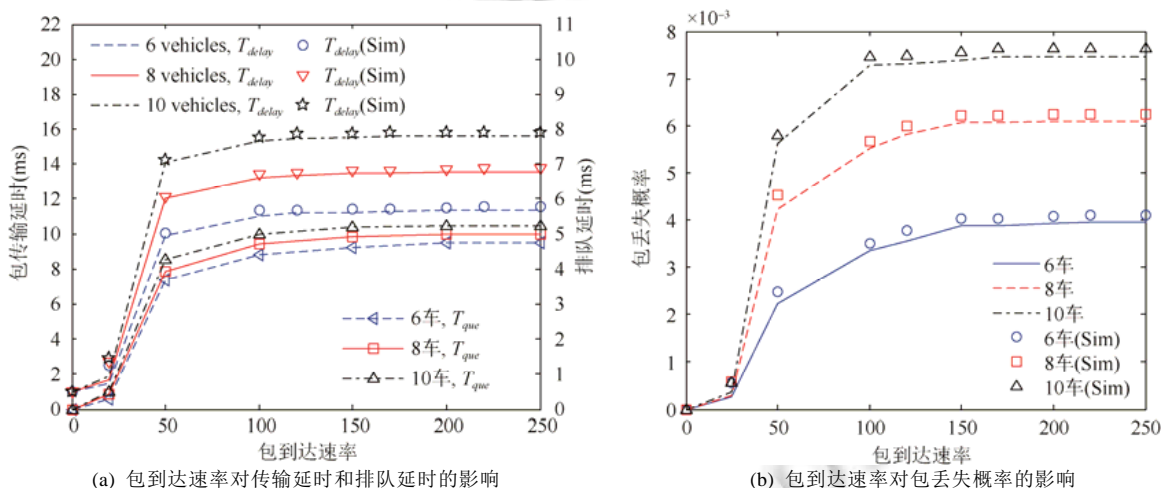


Fig.4 The performance metrics of intra-platoon communication network are affected by packet arrival rates

图 4 包到达速率对 platoon 组内通信网络性能的影响

为了对 platoons 组间通信性能进行分析,将 platoon 数量设置为 6,那么参与通信的车辆为 leader1,tail1, leader2,tail2,...,leader6,tail6.图 5(a)和图 5(b)分别是 platoons 组间通信的每个车辆站点在不同信道误码率条件下的包传输总延时以及包丢失概率的数值和仿真结果.考虑到通信半径的限制,只有位置相邻的车辆才可以直接传递数据.图 5(a)表明,随着信道误码率的增大,每辆车的数据包被丢弃的概率都显著增大.相同的传输信道条件下,车辆 tail1 和 leader6 的丢包率最低,两端的车辆反而更容易丢包.这是因为,首尾端的车辆只能与其通信范围内相邻的 tail1 和 leader6 车辆传递数据,所以发送数据包的冲突概率较高.而 tail1 和 leader6 车辆将数据包发送给 leader1 和 tail6 时,不存在具有相同接收者的其他车辆站点的隐藏终端问题,所以冲突概率较其他车辆要低.同理,由于接入信道的退避时延和发包的失败概率正相关,并且当前车辆的冲突概率还被隐藏终端的发包概率所影响,若隐藏终端在某个时隙内发送数据包的可能性很小,那么当前通信车辆更容易将数据包传输到目的

车辆,所以车辆 leader1、tail1 以及 leader6、tail6 与其他靠近中间位置的车辆相比,包传输总延时较低,tail1 和 leader6 的数据包成功传输的延时最低.

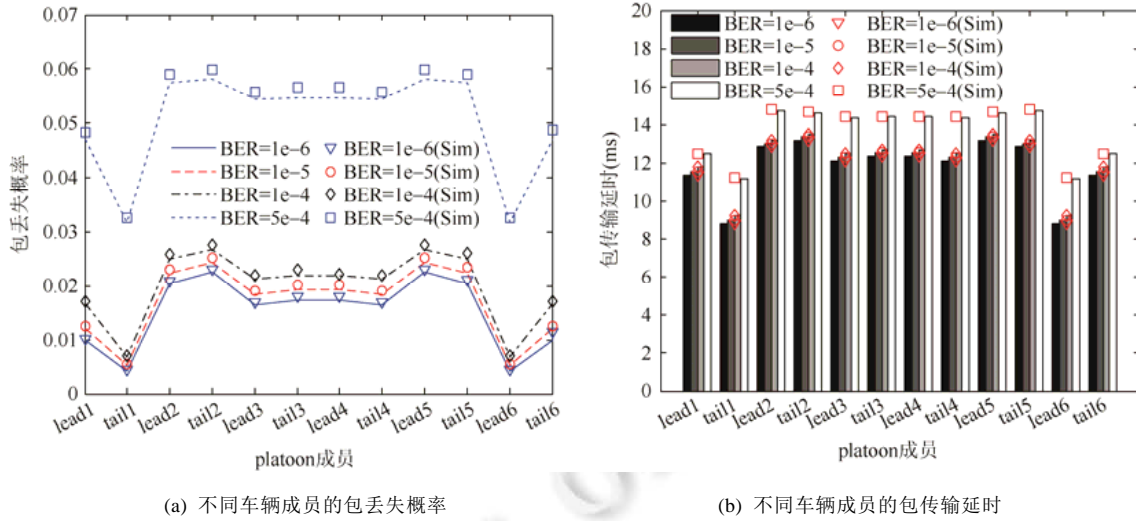


Fig.5 The performance metrics of inter-platoon communication under different channel conditions  
图 5 不同信道条件下 platoons 组间通信的性能度量

图 6(a)表明,在 platoons 组间通信架构中,当数据包到达速率发生变化时传输数据总延时的变化.随着包到达速率的增大,等待发送的数据包增多,平均排队长度变长,缓冲区排队等待时间增加,而且随着网络流量的增加,接入信道的检测和退避行为更加频繁,故而通信延时增加,但当网络流量达到饱和后,延时的上升幅度减小.通过对比不同车辆的包传输延时,可以发现车辆 leader2,tail2,leader5,tail5 的延时比中间车辆略长,因为这些车辆更倾向于作为数据传递的中继节点,发送数据包更频繁,而越靠近中心的车辆越可能是数据包的目的车辆.图 6(b)对比了最大重传次数和退避阶数不同数值关系下的包传输延时和包丢失概率.若重传次数大于退避阶数,当退避机制到达最大退避阶数时,数据包再次发送失败,通信机制仍会在最大退避状态下重新传输数据,所以,数据包成功传输的概率更高,丢失概率更低,MAC 服务时间分布随着冲突概率的减小逐渐向短时间区域集中,缓冲区排队时延下降,但是此时数据包的传输总延时反而会随着重传次数而增加,当  $M=4$  时,12 辆参与 platoons 组间通信的车辆中 tail2 和 leader5 的数据包传输延时最大,约为 13.02ms,排队等待延时约为 6.27ms,但当  $M=6$  时,tail2 车辆和 leader5 车辆的延时约为 14.53ms,相应的排队时延为 6.03ms.

设定最大退避次数和最大重传次数都为 4,数据包到达速率为 150 包每秒,信道误码率为  $10^{-4}$ ,platoon 内部成员为 8 辆车,其他参数保持不变,得到 6 个 platoon 组成的车辆编组队列中尾端 platoon 车辆接收来自首端 platoon 通信车辆发送的数据包需要经历的通信延时约为 0.146s.为了验证分析得到的传输数据包时延是否能够满足 platoon 的队列稳定性,将最大延时量带入基于前车信息的 platoon 线性控制模型中<sup>[9]</sup>.将公式(1)中的  $k_v(t),k_{v0}(t),k_{a0}(t)$ 增益函数都设为 0,利用求 Hinf 控制器的基于线性矩阵不等式的方法对增益函数  $k_c(t)$ 和  $k_a(t)$ 的拉氏变换函数进行求解,并且对期望加速度做拉氏变换,得到如下由加速度误差表示的队列稳定性传递函数:

$$\Gamma(s) = \frac{u_i(s)}{u_{i-1}(s)} = \frac{1}{hs+1} \cdot \frac{K_c(s)[e^{-\phi s}/s^2(\tau s+1)] + K_a(s)e^{-\theta s}}{1 + K_c(s) \cdot [e^{-\phi s}/s^2(\tau s+1)]} \quad (24)$$

其中, $h$  是 platoon 中车间恒定时间间隔, $\theta$ 是通信延时, $\phi$ 是车载制动装置的滞后量.设定  $h=1s, \phi=0.2s, \theta=0.146s$ ,可得传递函数的频率响应幅度曲线如图 7 所示.可以看到,传递函数频率响应的幅度始终小于 1,即表示 platoon 智能车辆编队的加速度误差沿着 platoon 中车辆传播的幅度是衰减的,保证了行驶队列的稳定性.

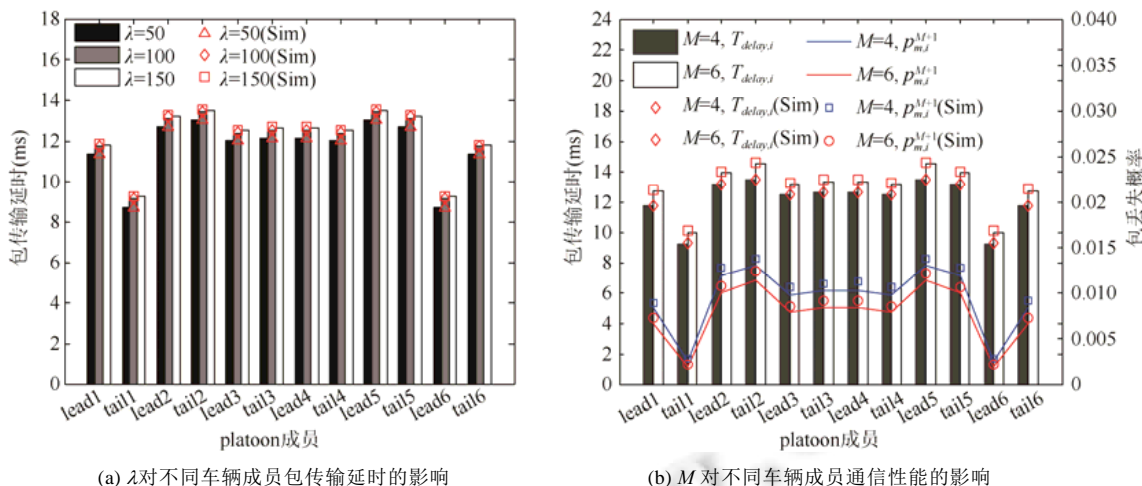


Fig.6 The performance metrics of inter-platoon communication are affected by  $\lambda$  and  $M$

图 6  $\lambda$  和  $M$  对 platoons 组间通信性能度量的影响

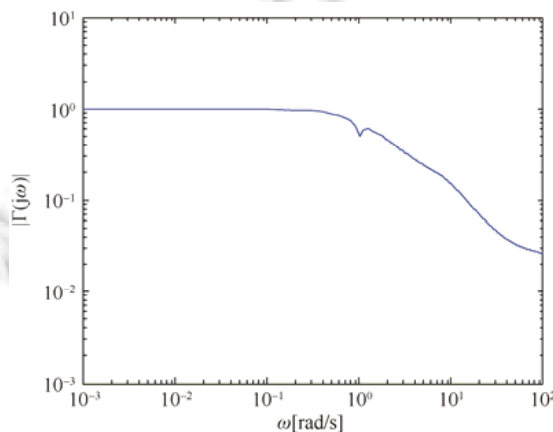


Fig.7 The frequency response amplitude of platoon acceleration error transfer function under 0.146s communication delay

图 7 通信延时为 0.146s 时的 platoon 加速度误差传递函数的频响幅度

### 5 总结

本文基于 IEEE 802.11p 协议对 platoon 智能车辆编组的 DSRC 车间通信网络性能进行了分析,通过对 DCF 争用信道退避机制和 MAC 层缓冲区排队模型的概率性分析和推导得到 platoon 组内智能车辆间通信过程和多个 platoons 组间通信过程的理论分析模型.研究了不同信道比特误码率、网络数据流量负载、退避机制参数以及排队模型对于车间通信的数据包传输延时和数据包传输失败的概率的影响.并且,比较了理论数值结果和仿真实验结果,证明了研究方法对 platoon 场景下车间通信网络性能评估的准确性和可行性.最后,通过将分析模型得到的延时带入到一种 platoon 控制模型的加速度误差传递函数中,验证了得到的最大延时量可以保证 platoon 车辆编组的稳定运行.通过分析仿真结果可以得出如下结论:(1) platoon 组内或 platoons 组间车辆站点间通信的数据包传输总延时主要由 MAC 层缓冲区的排队等待时延和争用信道的退避时延组成,其中排队时延由 MAC 层服务时间概率分布和平均排队长度决定,受数据包到达速率影响较大,退避时延主要取决于网络数据流量未饱和时的包到达速率和车辆站点数量;(2) 数据包丢失概率在信道误码率一定时,受通信车辆数量和包到

达概率的影响较大;(3) 对于 platoons 组间通信模型,首端和尾端 platoon 相邻编组中的车辆较其他位置车辆的数据包冲突概率要小得多,故而包丢失概率更小,传输延时也更低,而靠近中间位置的 platoon 中车辆的数据包传输延时相对较高。

通过上述研究可以得到:platoon 中成员车辆数量应该适当地加以选择,既要考虑道路容量,又不能超出 leader 车辆的通信范围,而且成员过多会导致通信延时和包丢失概率过大,影响信息的有效投递。当 VANETs 通信网络中车辆间信息传输较频繁时,可以通过限制同时接入网络的车辆站点数量,减小重传次数和最大退避阶数,以提高通信的时效性。接下来的工作将进一步研究包含中继车辆的 platoons 编组多跳通信模型,同时对车间接动态通信模型如何影响 platoon 的控制算法进行探讨。

## References:

- [1] Xiao L, Gao F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2011,12(4):1184–1194. [doi: 10.1109/TITS.2011.2143407]
- [2] IEEE standard for wireless access in vehicular environments (WAVE)—multi-channel operation. 2011. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5712767>
- [3] Wang Q, Leng S, Fu H, Zhang Y. An IEEE 802.11p-based multichannel MAC scheme with channel coordination for vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2012,13(2):449–458. [doi: 10.1109/TITS.2011.2171951]
- [4] Ma CM. Research on VANETs data transmission and intelligent safe driving in urban environment [Ph.D. Thesis]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [5] Wu ZH, Hu P. Analysis on VANET routing protocol. *Journal of Communications*, 2015,36(Z1):75–84 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015284]
- [6] Sadatpour V, Fathy M, Yousefi S, Rahmani AM, Cho ES, Choi MK. Scheduling algorithm for beacon safety message dissemination in vehicular ad-hoc networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Communication and Networking*. Berlin: Springer-Verlag, 2009,56: 133–140. [doi: 10.1007/978-3-642-10844-0\_17]
- [7] Abdelgader AMS, Wu L. The physical layer of the IEEE 802.11p WAVE communication standard: The specifications and challenges. In: *Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2014.
- [8] Han C, Dianati M, Tafazolli R, Kernchen R, Shen X. Analytical study of the IEEE 802.11p MAC sublayer in vehicular networks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2012,13(2):873–886. [doi: 10.1109/TITS.2012.2183366]
- [9] Shao C, Leng S, Zhang Y, Vinel A, Jonsson M. Analysis of connectivity probability in platoon-based vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conf. IEEE*, 2015. 706–711. [doi: 10.1109/IWCMC.2014.6906442]
- [10] Ploeg J, Shukla DP, Wouw NVD, Nijmeijer H. Controller synthesis for string stability of vehicle platoons. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2014,15(2):854–865. [doi: 10.1109/TITS.2013.2291493]
- [11] Jia D, Lu K, Wang J. A disturbance-adaptive design for VANET-enabled vehicle platoon. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2014,63(2):527–539. [doi: 10.1109/TVT.2013.2280721]
- [12] Liu X, Goldsmith A, Mahal SS, Hedrick JK. Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons. In: *Proc. of the Intelligent Transportation Systems. IEEE*, 2001. 625–630. [doi: 10.1109/ITSC.2001.948732]
- [13] Guo G, Wen S. Communication scheduling and control of a platoon of vehicles in VANETs. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2015,17(6):1–13. [doi: 10.1109/TITS.2015.2505407]
- [14] Segata M, Bloessl B, Joerer S, Dressler F, Cigno RL. Supporting platooning maneuvers through IVC: An initial protocol analysis for the JOIN maneuver. In: *Proc. of the 11th Annual Conf. on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*. Obergurgl, 2014. 130–137. [doi: 10.1109/WONS.2014.6814733]
- [15] Bernardo MD, Salvi A, Santini S. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2015,16(1):102–112. [doi: 10.1109/TITS.2014.2328439]

- [16] Bernardo MD, Falcone P, Salvi A, Santini S. Design, analysis, and experimental validation of a distributed protocol for platooning in the presence of time-varying heterogeneous delays. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2016,24(2):413–427. [doi: 10.1109/TCST.2015.2437336]
- [17] Amoozadeh M, Deng H, Chuah CN, Zhang HM, Ghosal D. Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET. *Vehicular Communications*, 2015,2(2):110–123. [doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.vehcom.2015.03.004]
- [18] Xu L, Wang LY, Yin G, Zhang H. Communication information structures and contents for enhanced safety of highway vehicle platoons. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2014,63:4206–4220. [doi: 10.1109/TVT.2014.2311384]
- [19] Shao C, Leng S, Fan B, Zhang Y, Vinel A, Jonsson M. Connectivity-aware medium access control in platoon-based vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. IEEE, 2015. 3305–3310. [doi: 10.1109/ICC.2015.7248834]
- [20] Fernandes P, Nunes U. Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2012,13(1):91–106. [doi: 10.1109/TITS.2011.2179936]
- [21] Du L, Dao H. Information dissemination delay in vehicle-to-vehicle communication networks in a traffic stream. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2015,16(1):66–80. [doi: 10.1109/TITS.2014.2326331]
- [22] Jia DY, Zhang R, Lu KJ, Wang JP, Bi ZQ, Lei JS. Improving the uplink performance of drive-thru internet via platoon-based cooperative retransmission. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2014,63(9):4536–4545. [doi: 10.1109/TVT.2014.2315741]
- [23] Peng H, Li D, Abboud K, Zhou HB, Zhao H, Zhuang WH, Shen XM. Performance analysis of IEEE 802.11p DCF for multiplatooning communications with autonomous vehicles. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2016. 1. [doi: 10.1109/TVT.2016.2571696]
- [24] Zheng Y, Lu K, Wu D, Fang Y. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in imperfect channels. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2006,55(5):1648–1656. [doi: 10.1109/TVT.2006.878606]
- [25] Bai X, Mao YM. Performance investigation of IEEE 802.11e EDCA based on the  $M/G/1/K$  queue model. *Journal of Electronics and Information*, 2008,30(7):1610–1614 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.01926]
- [26] Zhai H, Kwon Y, Fang Y. Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2004,4(8):917–931. [doi: 10.1002/wcm.263]

#### 附中文参考文献:

- [4] 马春梅.城市环境 VANETs 数据传输及智能安全行驶研究[博士学位论文].成都:电子科技大学,2015.
- [5] 吴振华,胡鹏.VANET 中路由协议分析.通信学报,2015,36(Z1):75–84. [doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015284]
- [25] 白翔,毛玉明.基于  $M/G/1/K$  排队模型的 IEEE 802.11e EDCA 性能研究.电子与信息学报,2008,30(7):1610–1614. [doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.01926]



郭红叶(1993—),女,内蒙古乌兰察布人,硕士,主要研究领域为车载自组织网络.



司帅宗(1987—),男,博士生,主要研究领域为车载自组织网络.



赵海(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为普适计算与嵌入式系统,电子、通信与自动控制技术,信息融合,计算机技术,复杂网络分析.



彭海霞(1988—),女,博士生,主要研究领域为车载自组织网络.