

基于 C-V2X 直连通信的车辆编队行驶性能优化

Driving Performance Optimization of Vehicle Platooning Based on C-V2X Sidelink

付思雨 /FU Siyu, 姜之源 /JIANG Zhiyuan, 张舜卿 /ZHANG Shunqing

(上海大学, 上海 200000)

(Shanghai University, Shanghai 200000, China)



摘要: 研究了蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术使能的车辆编队行驶。针对直连通信 (PC5) 模式 4 通信协议可靠性低的特性, 以权衡包可靠性和最终编队串稳定性能的关系为出发点, 提出了传输间隔优化与平行驾驶 2 种性能优化方案, 并通过城市交通仿真器 (SUMO) 进行了仿真验证。结果证明所提方案均能在基于模式 4 的低可靠性传输下实现编队性能的优化。

关键词: 车辆编队; 模式 4; 包可靠性; 最大间距误差

Abstract: The vehicle platooning technology using cellular vehicle-to-everything (C-V2X) is studied in this paper. For the low reliability of PC5 Mode 4 communication protocol, two performance optimization schemes of transmission interval optimization and parallel driving are proposed based on the relationship between packet reliability and final formation performance. Subsequently, the two schemes are simulated by the traffic simulator——simulation of urban mobility (SUMO). The results show that the proposed schemes can optimize the platooning performance under the low reliability transmission based on Mode 4.

Keywords: vehicle platooning; Mode 4; packet reliability; maximum spacing error

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20200222.1522.006.html>

网络出版日期: 2020-02-23

收稿日期: 2019-12-20

1 智能网联自动驾驶

车辆已经成为人类社会生产、生活的重要工具。近些年, 车辆自动驾驶技术成为学术界、工业界研究的热点: 首先, 自动驾驶技术可以大幅提高交通安全性, 仅考虑现已大规模商用的、采用低等级辅助驾驶的车辆即可将事故发生率降低 60% 以上, 而采用更高等级的自动驾驶将有望进一步大幅提高交通安全性。其次, 自动驾驶可以提高社会效率。这一点可以从 2 个角度理解: 自动驾驶可以提高交通效率; 可以替代人工驾驶员, 提

高社会生产率。

现有的自动驾驶解决方案大部分聚焦在基于单车智能的感知和决策上, 其主要限制因素包括感知能力的局限, 例如雷达探测距离、建筑物和其他车辆遮挡的限制, 摄像头视频、图像认知能力的局限, 以及单车处理非结构化数据 (原始多源异构感知数据) 时计算、通信能力受限等。而车联网技术可以实现智能网联辅助的自动驾驶, 通过车联网在路口的汽车之间建立快速、可靠的通信连接, 形成结构化数据在车辆之间有效交互, 大大降低了车辆自身的感知和处理需求, 同时通

过全局决策可以有效地提高交通效率、降低事故发生率。该技术的一个典型应用场景即高速公路的车辆编队场景。

2 车辆编队控制模型

车辆编队, 即多辆车以一定的车间间距形成稳定的队列行驶。通过减小车辆与车辆之间的距离, 车辆编队技术可以提高道路容量, 同时使每辆车受益于其前车而减少受到的空气阻力, 进而降低燃油消耗^[1]。此前, 瑞典皇家理工学院的学者 A. A. ALAM 等已经通过高速公路实车实验证明, 当 2 辆相同的标准载货车以 80 km/h 的速

度和 25 m 的间距行驶时, 后方跟随车辆所受空气阻力将下降 30 %, 整体的燃油经济将提升 7 %^[2]。而未来提出的车辆编队性能要求队列内车辆能在 100 km/h 的速度下仍然维持 8~25 m 的间距, 同时节省 7%~15 % 的油耗。更大的速度和更小的间距意味着更大的碰撞风险, 由此需要对车辆编队技术进一步提升。

目前对车辆编队的研究主要集中在研究如何确保车队的串稳定性。所谓串稳定性, 即队列内车辆之间的距离误差不会沿着队列传播而放大, 并且所有的误差保持相同的符号以避免碰撞^[3]。确保串稳定性的方法根据对距离误差的定义不同可被分为 2 类: 恒定车头时距法和恒定间距法。在基于恒定时距的方法中, 距离误差被定义为车辆与前车的实际车头时距和目标时距的差值; 为使其逐渐收敛为零且不沿队列传播, 车辆往往只需实时探测与前车的间距即可。这种方法通常不需要来自其他车辆的大量数据, 但其车间间距会随速度变化而变化, 可能会达到一个非常大的值; 因此只能实现较低的道路容量。为了实现更高的容量和更低的燃油消耗, 我们通常选择第 2 种方法, 即以频繁进行车间通信为代价使车辆之间的距离保持恒定。

在恒定间距方法中, 可以根据空间位置和功能, 将队列中的车辆分为头车和成员车。其中成员车的行驶由头车控制, 控制公式 (1)^[4] 所示, 头车通过该公式计算每个成员车应执行的加速度。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{i_des} = & (1 - C_1)\ddot{x}_{i-1} + C_1\ddot{x}_1 - \\ & (2\xi - C_1(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}))\omega_n\dot{\varepsilon}_i - \\ & (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n C_1(V_i - V_1) - \omega_n^2 \varepsilon_i \quad (1) \end{aligned}$$

在公式 (1) 中, $\ddot{x}_{i_des}$ 为第 i 辆车应执行的加速度, $\ddot{x}_{i-1}$ 为第 $i-1$ 辆车的

当前加速度, $\ddot{x}_1$ 为头车的当前加速度, V_i 为第 i 辆车的当前速度, V_1 为头车的当前速度, ε_i 为第 i 辆车与前车 (第 $i-1$ 辆车) 之间的间距误差, 等于当前间距减去 i 车应与其前车保持的目标间距, $\dot{\varepsilon}_i$ 为间距误差的倒数。以上参量均为变量, 以下还有 3 个可调常量, 它们影响等式右边每个参量对 i 车应执行加速度的作用大小, 但不影响最终队列的形成。其中, C_1 表示头车相较于前车对跟随车辆的影响占比, ξ 为阻尼系数, 其临界值为 1, ω_n 表示控制器的带宽。该方法的核心思想即通过让队列中的车辆执行上述公式计算的理想加速度, 使间距误差逐渐收敛为零, 最终确保串稳定性。在公式 (1) 中, 车辆的理想加速度取决于头车和前车的加速度和速度, 这些信息不能直接通过传感器测量, 而需要车辆之间的信息交互; 因此, 在这种恒定间距的方法中, 通信是必不可少的。

3 蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术直连通信

3.1 C-V2X

车用无线通信技术 (V2X) 意为车辆到一切, 其包含 4 种类型的通信: 车到车 (V2V)、车到基础设施 (V2I)、车到网络 (V2N)、车到行人 (V2P), 代表车辆与周围环境中不同实体之间的信息交互。其中, 有关车辆编队的车辆控制方面, 涉及的主要通信类型是 V2V, 用于在成员车和头车之间交互状态信息和控制信息。

用于 V2X 的通信技术主要有 2 种, 一种是专用短程通信 (DSRC) 技术, 一种是 C-V2X 技术。其中 DSRC 采用了电气和电子工程师协会 (IEEE 802.11p 和 IEEE 1609) 等系列标准, C-V2X 目前采用了第三代合作伙伴计划 (3GPP) R14 提出的长

期演进 (LTE) -V2X 标准^[5]。相对于 DSRC, C-V2X 主要有以下几点优势:

(1) 标准可演进。DSRC 所采用的 IEEE 802.11p 标准早在 2010 年已经停止更新了, 而 C-V2X 的系列标准仍在不断演进, 从 LTE 移动宽带业务 (MBB) 到 LTE-V2X, 再到未来的新空口 (NR) -V2X。

(2) 技术领先。C-V2X 目前已实现了 DSRC 的 2 倍覆盖范围, 1.4 倍交通容量, 0.8 倍延迟和 1.6 倍可靠性。

(3) 商业更优。C-V2X 可实现更低的芯片成本 (例如, 芯片同时支持 MBB 和 D2D) 和更丰富的应用生态 (借助于蜂窝网络)。

在 LTE-V2X 中, 有 2 种通信接口: 一种是短距离直连通信接口——PC5, 适用于待通信设备间距较近的情况; 另一种是终端和基站之间的通信接口——Uu, 主要适用于网络通信, 即设备间距较远的情况。PC5 接口又提供了 2 种资源分配方法: 模式 3 为集中式资源分配, 用户设备 (UE) 从基站 (eNodeB) 请求传输资源, 随后 eNodeB 采用半持续、动态的调度方法分配资源; 模式 4 为分布式资源分配, 不涉及蜂窝基础设施, 用户设备 (UE) 自主进行资源选择^[6]。在实际的车辆直接通信中, 从延迟和开销的角度来看, 分布式资源分配通常比集中式资源分配更有利。与分布式资源分配相比, 集中式资源分配除了覆盖范围有限外, 还需要额外的基站与车辆之间的交互, 这可能会导致更多的延迟和开销。此外, 如果连接到基站的车辆速度较大, 则可能需要频繁的切换。基于这些原因, 在车辆编队的 V2V 通信中, 采用了与基站无关的 PC5 模式 4 技术。

3.2 直连通信模式 4

模式 4 采用了半持续传输 (SPT)

机制进行资源选择,该机制定义了一种资源重选计数器,当每个 UE 开始发送数据时均会被分配一个计数器,计数器的初始值根据 3GPP 规定应从 [5, 15] 中随机抽取。随着 UE 每发送一次数据,计数器的值会逐渐递减。在此期间 UE 会保持选择同一个资源进行发送,直到该值减为零,则触发重选,即 UE 可以重新选择一个资源并重置计数器。因为模式 4 不具有 IEEE 802.11p 中的冲突避免机制,为减少资源冲突,模式 4 中定义了一个 1 000 ms 的感知窗口。每当 UE 要选择资源时,都会打开如图 1 所示的资源选择窗口。此时,感知窗口会为其提供前 1 000 ms 的资源选择历史,结合 SPT 机制,可以帮助 UE 判断哪些资源可能会被其他 UE 占用。从图 1 还可以看出,模式 4 中信道可以被划分成多个子信道并行传输数据。这也是其相对于 IEEE 802.11p 的优势,而具体子信道的划分数目取决于数据的大小和物理层采用的调制编码方式。除了对信道进行划分外,资源选择窗口的时间长度也可以划分成多个传输时间间隔 (TTI)。根据协议规定,划分数目应取值于 [20, 100] 之间,每个 TTI 长度应取值 1 ms^[7]。

基于传输特性,模式 4 的可靠性将远远低于集中式分配方案,其原因有 2 个:(1) 模式 4 仅基于感知并且是半持续的,一旦发生数据包冲突,相关车辆由于半双工效应将无法意识

到冲突,直到进入重新选择之前半持续特性将会导致连续的冲突,并且发送端将一直无法意识。(2) 尽管在半持续调度方案中的重选过程可以避免持续性数据包冲突,但其也可能以一定的概率导致额外的冲突。

显然,模式 4 的这种低可靠性很难满足超可靠低时延通信 (URLLC) 的要求——时延低至 2 ms,可靠性高达 99.999 %。目前实现的 URLLC 通常以牺牲宝贵的时间/频率/空间资源为代价来降低延迟,提高可靠性,其实现往往基于总资源数高度理想化的假设。对于实际的车辆编队场景,多辆车共享一段有限的时、频资源,URLLC 几乎难以实现。由此,基于模式 4 传输的车辆编队似乎永远达不到 URLLC,这是否等价于车辆编队的性能会长时间难以提升呢?另外,假设实现了 URLLC,是否就意味着性能达到最优了呢?

4 传输优化设计方案

本文中,我们设计的优化机制的实现目标分为 2 个层次:第 1 层通过对传输机制的优化实现最终编队性能的提升;第 2 层通过观察优化前后数据包可靠性的变化,得出包可靠性与实际性能的关系。

4.1 传输间隔优化

本文中,我们设计的传输间隔优化方案主要针对的优化目标是合作感

知信息 (CAM) 的传输周期。车辆编队过程中产生的合作信息主要有 2 种:一种是成员车的状态信息,包含其当前的速度以及与前车的间距信息;一种是头车的控制信息,包含每辆车应执行的理想加速度。我们对这 2 种信息的传输周期取值进行了优化,预得出了性能最优时的对应值。

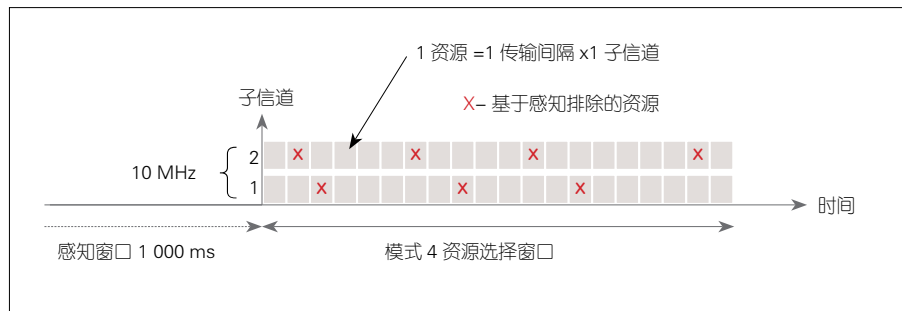
4.2 平行驾驶

每辆成员车均需要定期广播状态信息,状态数据包占了编队过程中总数据包的很大比重;因此,我们提出了一种平行驾驶机制来减少该类包的数量。该机制的核心思想即把成员车的运动模型同步到头车,以便头车预测成员车的运动状态,从而减少成员车需要广播的状态包。通过以下人类交流的示例,我们可以简单地理解该机制。

假设爱丽丝和鲍勃住在不同的城市,鲍勃每天都给爱丽丝写一封信,告诉她那天鲍勃所在的城市是否下雨(这是典型的状态更新设置,采用了固定的更新间隔——一天)。进一步假设鲍勃所在的城市很少下雨,并且他很快发现这一特点,然后与爱丽丝交流并定义了一个模型,该模型规定只要没有信,就没有雨,这样使得状态更新更加地有效(从发送更少的信的角度出发)。显然,这个模型是一个基于时间序列的预测模型,模型输出为“不下雨”,状态为“是否下雨”。将其映射到平行驾驶机制中,对应的状态即为当前车辆状态,对应的模型输出即如公式 (2) 所示。

$$\begin{bmatrix} model_{11} & model_{12} & model_{13} \\ model_{21} & model_{22} & model_{23} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_l \\ v_l \\ a_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,模型矩阵 Model 是车辆的运动模型, s_l , v_l 是车辆的上一时刻状态(与前车的间距、速度), a_{des} 是车辆从上



▲图 1 蜂窝车用无线通信技术模式 4 资源选择窗口

一时刻到当前时刻执行的加速度（假设车辆在短时间内匀速）， s_2 和 v_2 为模型的输出结果，也即车辆的当前状态的预测值。该机制的具体运行过程主要如下：

（1）成员车定期（ T_1 ）将自身的前一段时间内的驾驶数据代入上述模型中，迭代训练出运动模型矩阵 Model，然后广播给头车；

（2）成员车定期（ T_2 ）检测模型的预测结果与实测值的差值，若高于给定阈值则发送状态更正信息（该阈值可根据信道状态和编队性能实时调整）；

（3）头车定期（ T_3 ）利用模型进行状态信息预测（若收到状态更正信息，则用更正值代替预测值，并且下一次预测取此更正值作为输入），并据此计算每辆成员车的理想加速度，然后广播给成员车。

5 仿真实验

5.1 场景与参数设置

我们模拟了一条双向四车道的高速公路，长度为 1 500 m，并在其上放置了 6 个队列，它们在稳态下（即队列形成后）在高速公路上彼此靠近行驶。其中每个队列包含 8 辆车（7 辆为成员车），车身长度均为 5 m。我们仅考虑纵向驱动控制，即车辆沿直线行驶。队列内车辆间的目标间距是预先设定的，我们取实际间距与目标间距的最大偏离值（最大间距误差）作为性能指标，以评估队列的串稳稳定性。

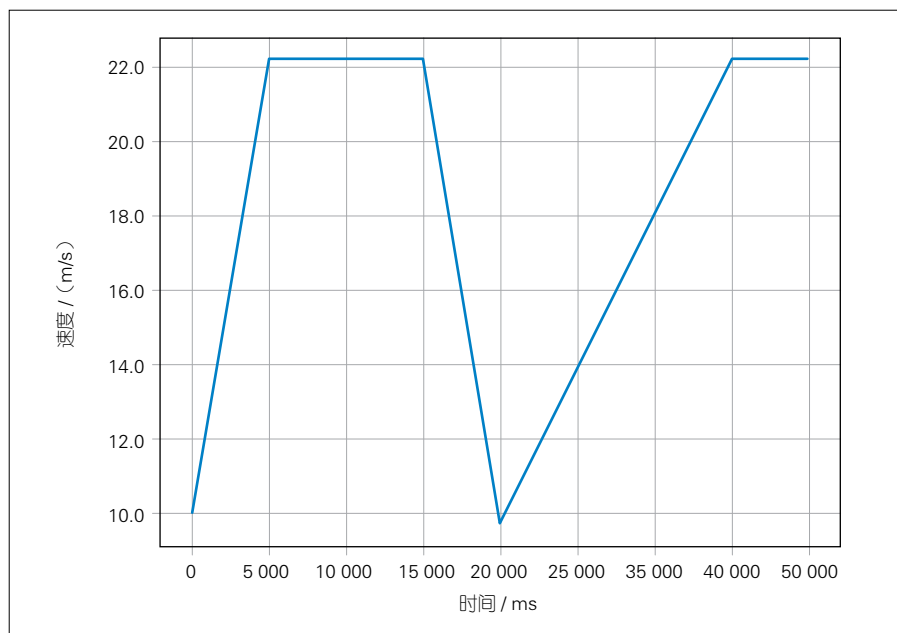
在每个队列中，头车均自由驾驶，而成员车均由头车根据控制算法和无线信号进行控制，以和前车保持目标间距。头车的速度配置如图 2，在第 0 s，头车以 10 m/s 的速度进入路网，然后在 5 s 内加速到 22.2 m/s；从第 15 s 开始，头车在 5 s 内减速至 9.7 m/s，然后在 15 s 内加速至 22.2 m/s；此后，

头车一直保持匀速直到仿真结束（第 40 s）。仿真步长为 1 ms。

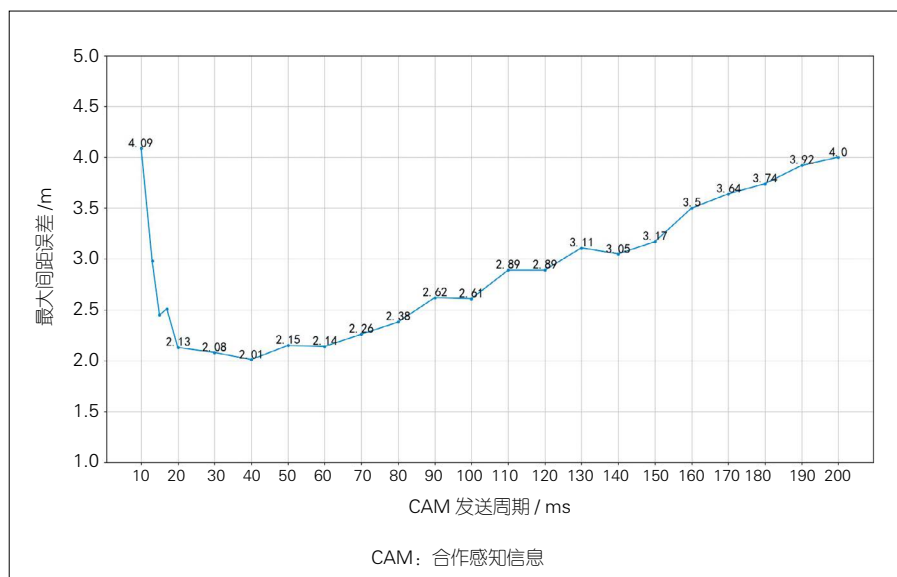
5.2 仿真结果

方案 1 的仿真结果如图 3 所示，其纵坐标为最大间距误差，该值越大说明车辆在行驶过程中的间距偏离目标值越远，队列越不稳定，即编队的性能越差。其横坐标为 CAM 的传输周期，该值越大说明状态和控制信息的

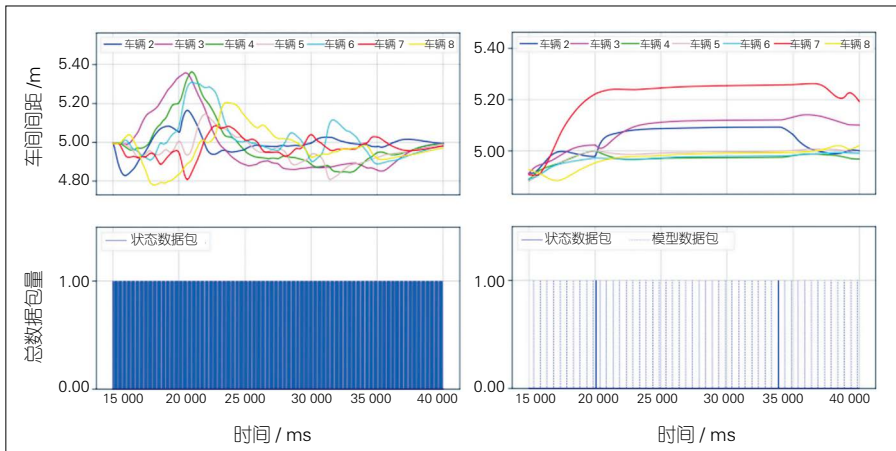
传输间隔越长，即头车和成员车获取的信息是更早以前产生的（在没有收到新的信息前它们只能利用上一次接收到的信息进行计算和控制），即信息延迟越大；反之其值越小，则说明数据包传输越频繁，即数据包的总量越多，冲突也随之增加，从而可靠性降低。从结果图 3 来看，当 CAM 周期取值 40 ms 时，最大间距误差取最小值 2.01 m，对应编队性能最佳。而从



▲ 图 2 头车的速度配置



▲ 图 3 最大间距误差随 CAM 周期的变化图



▲图4引入平行驾驶机制前后的数据包数量和编队性能对比

URLLC 的角度来看,对应的最佳点应该在 CAM 周期取值 200 ms 时,即数据包可靠性最高时。由此可见,在考虑信息延迟的情况下,实际车辆编队的性能与包可靠性并不成正相关,在选取传输间隔时应在可靠和延迟两者之间进行权衡。

方案 2 的仿真结果如图 4 所示,该图截取了第 15 s 到第 40 s 的数据包数量和车间间距随时间的相应变化,其中预设的目标间距为 5 m。数据包的类型包括状态更新/更正数据包和模型更新数据包,其中模型数据包的更新周期设置为 500 ms(实验测得该取值对应性能较佳)。从图 4 中可以看出,加入平行驾驶机制后,状态数据包的发送频率大幅降低,总的包可靠性也随之提升,对应的最大间距误差也从 0.24 m 下降到了 0.07 m,即性能也大幅提升。此时,由于减少包的数量只影响了包的可靠性(通过模型预测弥补了包减少带来的信息延迟增加),编队的性能与包可靠性成正相关。

6 结束语

针对车辆编队所采用的 PC5 模式 4 通信协议的可靠性低的特点,本文中我们提出了 2 种方案来弥补可靠性的不足,进而对车辆编队性能进行优

化。传输间隔优化方案验证了一味提高可靠性并不一定能得到最优性能的观点,通过权衡信息延迟和可靠之间的关系,获得了最佳的编队性能和对应的传输间隔取值。同时,该方案也减轻了对包可靠性的要求。平行驾驶方案减少了数据包的总数量,通过模型预测避免了信息延迟的增加,获得了性能的提升。

对基于 C-V2X 的车联网系统的提升,未来可以多从应用系统性能出发,而不局限于某一通信过程或单一参数的优化。在考虑通过增加可靠性来优化性能时,可以附加一些包含时延在内的其他约束。

参考文献

- [1] VALERIO T, BART B, KARL H. Cooperative Look-Ahead Control for Fuel-Efficient and Safe Heavy-Duty Vehicle Platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 12–28. DOI: 10.1109/TCST.2016.2542044
- [2] ALAM A A, GATTAMIA, JOHANSSON K H. An Experimental Study on the Fuel Reduction Potential of Heavy Duty Vehicle Platooning[C]//13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. USA: IEEE, 2010:306–311. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625054
- [3] ALAN A, GAETAN G, PHILIPPE M. The Flatbed Platoon Towing Model for Safe and Dense

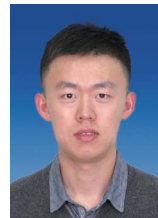
Platooning on Highways[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2015, 15(1): 58–68. DOI: 10.1109/MITS.2014.2328670

- [4] PEDRO F, URBANO N. Platooning of Autonomous Vehicles with Inter vehicle Communications in SUMO Traffic Simulator[C]// International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems. USA: IEEE, 2010: 1313–1318. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625277
- [5] 王小村,裴斌,孙靖. C-V2X 技术现状与性能对比[J]. 信息通信技术与政策, 2019, (5): 55–58. DOI: 10.3969/j.issn.1008–9217.2019.05.016
- [6] 魏珏,王庆扬. C-V2X 蜂窝车联网标准分析与发展现状[J]. 移动通信, 2018, 42(10): 9–12. DOI: 10.3969/j.issn.1006–1010.2018.10.002
- [7] VLADIMIR V, KRZYSZTOF B, PATRICK M. 3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle Communications in Highway Platooning Scenarios[J]. Ad Hoc Network, 2018, 74(5): 17–29. DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.03.004

作者简介



付思雨, 上海大学在读硕士研究生; 主要研究领域为车联网通信技术。



姜之源, 上海大学教授; 主要研究领域为车联网、实时控制系统和大规模多天线系统; 先后主持和参与国家自然科学基金、国家重点研发计划项目 10 余项; 已发表论文 60 余篇, 其中 IEEE 顶级期刊论文 20 余篇。



张舜卿, 上海大学教授; 拥有 10 余年的无线通信前沿研究经验, 主要研究领域为 5G/5G+ 移动通信系统、绿色无线通信、下一代 WiFi 网络、异构计算技术等; 曾主持或参与国家“863”计划和“973”计划 A 类项目等国家级研究项目, 并担任过多项校企联合研究项目的负责人和骨干成员; 发表论文 60 余篇, 拥有美国及中国授权专利 50 余项, 其中拥有第一发明人身份的专利超过 20 项。