

不可靠通信条件下的 CACC 纵向控制仿真分析

王润民^{1,2}, 卢涛^{1,2}, 宋晓鹏³, 张心睿^{1,2}

- (1. 长安大学 交通运输部认定自动驾驶封闭场地测试基地, 陕西 西安 710018;
2. 长安大学 车联网教育部-中国移动联合实验室, 陕西 西安 710064;
3. 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:近年来基于车联网技术实现的协同式自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC)已经成为重要的智能网联汽车应用场景。CACC 系统的有效性依赖于基于车联网通信实现的车辆速度、加速度等信息的实时、可靠交互,然而受各类天气条件及行车环境的影响,理想、可靠的通信环境难以在实际交通场景中实现。因此迫切需要在不可靠通信条件下对 CACC 的适应性进行评估分析,以研究不可靠通信条件对 CACC 模型的影响。针对上述问题,首先围绕测试评估需求,分析了三种典型 CACC 跟驰模型;其次,基于 Veins 平台搭建仿真测试环境,并在选取通信延迟和丢包率为不可靠通信条件的基础上设计了测试方法;最后,在头车速度正弦变化和头车紧急刹车两种应用场景下,仿真测试研究了不可靠通信条件对三种典型 CACC 跟驰模型的影响。仿真结果表明,通信延迟和丢包率都会影响 CACC 的可靠性,当丢包率达到 5% 或时延达到 5 ms 时,对 CACC 队列稳定性有显著影响;从总体上看,Rajamani 控制模型的效果最好,Ploeg 控制模型的效果最差。

关键词:车联网;协同式自适应巡航控制;仿真测试;丢包率;时延

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2021)07-0152-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2021.07.025

Simulation Analysis of Longitudinal Control of CACC under Unreliable Communication

WANG Run-min^{1,2}, LU Tao^{1,2}, SONG Xiao-peng³, ZHANG Xin-rui^{1,2}

- (1. National Closed Field Test Base of Autonomous Driving, Ministry of Transport (Xi'an), Chang'an University, Xi'an 710018, China;
2. China Mobile Joint Laboratory of the Ministry of Education of the Internet of Vehicles, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: In recent years, cooperative adaptive cruise control (CACC) based on V2X technology has become an important application scene of intelligent connected vehicles. The effectiveness of the CACC system depends on real-time and reliable interaction of vehicle speed, acceleration and other information based on vehicle networking communication. However, affected by various weather conditions and driving environment, ideal and reliable communication environment is difficult to be realized in actual traffic scenes. Therefore, it is urgent to evaluate and analyze the adaptability of CACC under unreliable communication conditions, so as to study the influence of unreliable communication conditions on CACC model. To solve the above problems, three typical CACC car-following models are analyzed around test evaluation requirements. Secondly, the simulation test environment is built based on the veins platform, and the test method is designed on the basis of selecting communication delay and packet loss rate as unreliable communication conditions. Finally, in the two application scenarios of the sine change of the leading vehicle speed and the emergency braking of the leading vehicle, the simulation test studies the impact of unreliable communication conditions on three typical CACC car-following models. The simulation shows that both communication delay and packet loss rate can affect the reliability of CACC. When packet loss rate reaches five percent or delay reaches five ms, it has a significant impact on the stability of CACC queue. Generally speaking, among the three control models of Rajamani, S. Santini and Ploeg, Rajamani control model has the best effect, while Ploeg control model has the worst effect.

Key words: V2X; cooperative adaptive cruise control; simulation test; packet loss rate; time delay

收稿日期:2020-08-11

修回日期:2020-12-15

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2020C01057)

作者简介:王润民(1989-),男,工程师,博士研究生在读,研究方向为车联网与智能汽车测试技术、车路协同关键技术及应用。

0 引言

协同式自适应巡航控制是在自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC) 的基础上发展而来的。ACC 主要利用安装在车身上的雷达等传感器测量前车的速度和间距,并根据这些信息控制油门和刹车,以保持和前车的安全距离。

而 CACC 基于车联网的汽车协同自动驾驶控制技术,通过车车之间相互通信传递车辆的速度、位置等信息,并综合多个车辆的信息设计分布式控制器,车辆可以以更小的间距行驶,从而提高通行效率。相对于 ACC 控制技术,CACC 控制技术更加精确,而且抗干扰能力强^[1],因而备受关注。

具备 CACC 功能的车辆可以利用车车通信技术实时获取前车加速度状态,进而通过调节车头间距误差及速度差优化本车加速度输出,有望改善交通流运行质量,并在降低交通能耗、改善交通安全、提高交通效率等方面发挥重要作用^[2-4]。

CACC 跟驰模型的建模已成为交通流理论与智能交通系统的研究热点^[5],但是 CACC 对网络的稳定性有一定要求,构建 CACC 模型时,车联网稳定性应该作为一项重要因素。CACC 系统的有效性依赖于基于车联网通信实现的车辆速度、加速度等信息实时、可靠交互,然而受各类天气条件及行车环境的影响,理想、可靠的通信环境难以在实际交通场景中实现^[6]。因此迫切需要在不可靠通信条件下对 CACC 的适应性进行评估分析,以研究不可靠通信条件对 CACC 模型的影响。

目前对网联汽车队列的纵向控制研究主要集中在 CACC 模型的研究上,并且对于提出的 CACC 模型的有效性验证建立在车联网通信性能极好的情况下,大多未考虑不可靠通信条件下 CACC 模型的有效性。

如文献[7]基于恒定期望车间时距提出了一种 CACC 跟驰模型,但是模型仿真时没有考虑通信延迟和丢包率;文献[8]提出一种基于可变间距的 CACC 跟驰模型,通过改变前车加速度大小对 CACC 模型稳定性进行验证,没有考虑通信性能对 CACC 模型的影响;文献[9]从控制系统特性的角度,考虑了通信性能对 CACC 模型的影响,对 CACC 车辆跟驰行为建模方法进行了仿真研究,但是对与通信条件描述的不够具体。

针对上述问题,文中基于 Veins 仿真平台构建了仿真测试环境,以 IEEE802.11p 协议为 CACC 队列通信协议,以丢包率、时延作为构成不可靠通信条件的因素,对 Rajamani、S. Santini、Ploeg 三种 CACC 模型进行仿真研究,得到不可靠通信条件对三种 CACC 模型稳定性的影响。

1 网联汽车纵向控制模型分析

1.1 Rajamani 控制模型

该模型是 Rajamani 等人^[10]提出的一种 CACC 控制模型,车队中每辆车的加速度由下式给出:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{i_des} = & (1 - C_1) \ddot{x}_{i-1} + C_1 \ddot{x}_l - (2\xi - C_1(\xi + \\ & \sqrt{\xi^2 - 1})) \omega_n \varepsilon_i - \\ & (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \omega_n C_1 (v_i - v_l) - \omega_n^2 \varepsilon_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中, x_i 表示第 i 辆车的位置, v_i 表示第 i 辆车的纵向速度; $\varepsilon_i = x_i - x_{i-1} + L$ 表示第 i 辆车的纵向间距误差, L 表示期望跟驰间距; v_l 表示车队头车的纵向速度; \ddot{x}_l 表示车队头车的纵向加速度; \ddot{x}_i 表示第 i 辆车的纵向加速度; C_1 表示头车状态对后车控制的影响因素,取值范围为 $[0, 1)$; ω_n 表示控制带宽; ξ 表示系统阻尼比。Rajamani 模型综合了纵向和横向控制,主要用于排列自动化车辆的运行。其在纵向控制的设计中处理了非线性车辆动力学,很小的车辆间距情况下的跟车稳定性,从完全静止到高速巡航的所有速度运行,以及在存在通信约束情况下网联车辆的离开和汇入车队。在横向控制系统的设计中处理了仅使用“俯视”传感器系统的高速操作和没有过渡横向位置测量的车道改变。该方法还描述了一种车载监控器的设计,其利用车间通信并协调侧向和纵向控制器的操作,以便车辆进行汇入车队和离开车队的操作,是一种非常有效的 CACC 方法。

1.2 S. Santini 控制模型

该模型是 S. Santini 等人^[11]提出的一种 CACC 控制模型,车队中每辆车的速度由下式给出:

$$\begin{aligned} u_i = & -b[v_i(t) - v_0] - \frac{1}{\Delta_i} \sum_{j=0}^N k_{ij} a_{ij} [r_i(t) - \\ & r_j(t - \tau_{ij}(t)) - \tau_{ij}(t) v_0 - h_{ij} v_0 - d_{ij}^s] \end{aligned} \quad (2)$$

其中, k_{ij} 和 b 是控制增益, $v_i(t)$ 是第 i 辆车的纵向速度, v_0 是头车的纵向速度, $\tau_{ij}(t)$ 和 $v_{j0}(t)$ 分别是当信息从其相邻车辆 j 和头车分别发送到车辆 i 时 (信息 $\tau_{ij}(t) \neq \tau_{ji}(t)$) 不可避免的时变通信延迟, h_{ij} 是车辆 i 与 j 之间的车头时距, d_{ij}^s 是车辆 i 与车辆在静止状态下的车距。S. Santini 控制模型是一种基于一致性的车辆队列控制方法,可以根据实际的网络状态重新配置控制拓扑结构。该模型控制器不要求车辆配备雷达,并且会自动补偿因网络延迟而造成的过时信息。其将实现一致性算法的代理网络的通信延迟和拓扑结构纳入设计中,因此这也成为设计的关键。

1.3 Ploeg 控制模型

本模型是 Ploeg 等人^[12]提出的一种 CACC 控制模型,车队中每辆车的加速度由下式给出:

$$\dot{u}_i = -\frac{1}{h}u_i + \frac{1}{h}(k_p e_{1,i} + k_d e_{2,i} + k_{dd} e_{3,i}) + \frac{1}{h}u_{i-1} \quad (3)$$

其中, u_i 是第 i 辆车的速度, h 是车辆 i 与前车的车头时距且 $h > 0$; $e_{1,i}$ 是车辆 i 与前车的纵向间距误差, $\dot{e}_{3,i} = e_{2,i} = e_{1,i}$; k_p 、 k_d 、 k_{dd} 是间距误差的相关系数, 其中 $k_p, k_d > 0$, $k_{dd} > -1$ 。Ploeg 模型通过减少车辆间的间隔实现交通效率的提高。其通过控制车辆队列的稳定性, 可以将车时距降低到 1 秒一下, 进而大幅提高道路的吞吐量, 降低重型车辆的燃料消耗和排放量。

2 仿真平台搭建及测试方案设计

2.1 仿真环境构建及参数设置

Veins 耦合了 OMNeT++ 和 SUMO, 其中前者为网络仿真器, 后者为交通仿真器, 是一种典型的车联网仿真平台^[12]。该文对 Veins 仿真平台进行参数设置, 作为评估 CACC 模型的仿真测试平台。Veins 基本交通参数设置如表 1 所示, 形成的仿真界面如图 1 所示。

表 1 交通基本参数设置

| 参数 | 数值 |
|-----------------------------|-----|
| 车辆数量 | 8 |
| 车道数量 | 1 |
| 头车运动模式 | 2 |
| 持续仿真时间/s | 60 |
| 数据包大小/bytes | 200 |
| 头车初始速度/(km/h) | 100 |
| 头车速度正弦变化时振幅/(km/h) | 10 |
| 头车速度正弦变化频率/Hz | 0.2 |
| 头车刹车减速度/(m/s ²) | -8 |



图 1 CACC 仿真界面

在 OMNet++ 中实现车辆通信的仿真, 车联网通信协议采用 802.11p, 是主流车联网通信协议之一^[13], 其具体参数如表 2 所示。

表 2 IEEE 802.11p 协议基本参数

| 参数 | 数值 |
|--------------------|---------|
| 最大功率/mW | 20 |
| 传输频率 F/Hz | 5.890e9 |
| 介质访问控制层发射功率/mW | 20 |
| 介质访问控制层 BPS /Mbps | 19 |
| 物理层 BPS /mW | 11 |
| 灵敏度/dBm | -90 |
| Thermal Noise /dBm | -110 |
| 信标优先级 | 3 |
| 数据优先级 | 2 |
| 最大退避时间/s | 0.005 |

2.2 测试方法设计

2.2.1 不可靠通信条件分析

在 CACC 系统运行中, 多种因素都会对其稳定性造成影响, 其中不可靠通信条件对 CACC 的稳定性及有效性造成影响。该文选取两个构成不可靠通信条件的影响因素: 延迟和丢包率^[14-16], 通过仿真 CACC 模型在不同延迟和丢包率下的运行情况对其进行测试分析。

(1) 延迟 (delay, DE), 延迟是数据包从源车辆正确传输到目标车辆所需要的时间, 其平均值为平均延迟。在车联网环境下车辆跟驰速度快且跟驰间距小, 这就要求车辆之间的通信延迟必须保持在极低的范围以内, 因此这个指标对于 CACC 安全稳定具有特别重要的意义。

(2) 丢包率 (packet loss rate, PLR), PLR 为目标节点丢失的数据包与源节点应用层发送的数据包的比值关系, 即丢失数据包的统计度量, 主要体现了车联网的两个主要特性: 网络可靠性、网络拥塞/通信状况。

2.2.2 测试方案设计

本研究在跟驰行驶和紧急刹车两种场景下, 通过仿真改变延迟和丢包率对三种不同的 CACC 控制模型的性能表现进行测试。在跟驰场景下, 头车车速正弦变化, 初始车速为 100 km/h、振幅为 10 km/h、频率为 0.2 Hz, 后 7 辆车利用 CACC 控制模型跟随于头车, 设置所有车辆相互之间发送车辆信息的丢包率为 5%, 仿真时间持续 60 s, 记录 8 辆车的速度信息; 再将丢包率分别提升至 10%、40%, 重复仿真并记录所有车的速度信息; 最后设置丢包率为 0, 所有车辆相互之间发送车辆信息的延迟为 5 ms, 仿真时间持续 60 s, 记录所有车的速度信息, 再将延迟提升至 10 ms、100 ms, 重复仿真并记录所有车的速度信息。

在紧急刹车场景下, 头车初始速度为 100 km/h, 5 s 后开始以 -8 m/s^2 的加速度减速, 后 7 辆车基于设定的 CACC 控制模型跟随头车, 设置所有车辆相互之间发送车辆信息的丢包率为 5%, 仿真时间持续 60 s, 记录 8 辆车的速度信息; 再将丢包率提升至 10%、40%, 重复仿真并记录所有车的速度信息; 然后设置丢包率为 0, 所有车辆相互之间发送车辆信息的延迟为 5 ms, 仿真时间持续 60 s, 记录所有车的速度信息; 最后将延迟提升至 10 ms、100 ms, 重复仿真并记录所有车的速度信息。由于速度可以直观体现出队列中每辆车的状态变化, 所以用速度作为指标用来研究丢包和延迟对 CACC 纵向控制仿真的影响。

3 仿真结果及分析

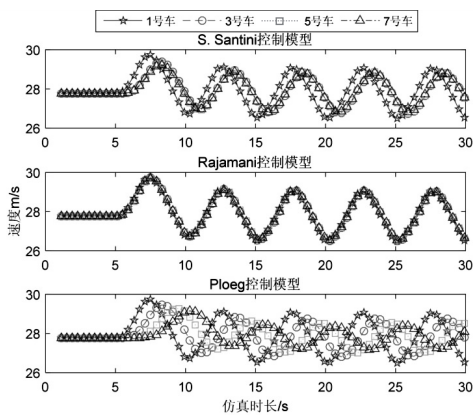
为了保证输出结果的可视化效果, 实验中选取 8

辆车中的头车(1号车)、3号车、5号车、7号车来分析丢包和延迟对三种 CACC 控制模型造成的影响。

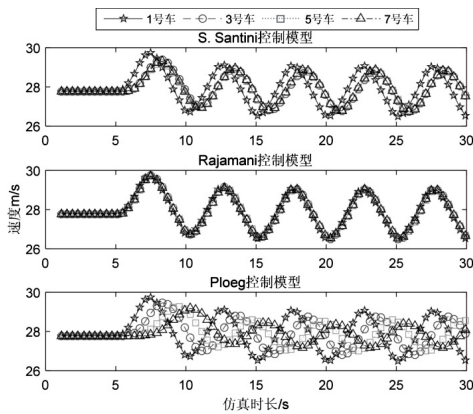
3.1 丢包率对 CACC 控制性能的影响

3.1.1 头车速度正弦变化场景

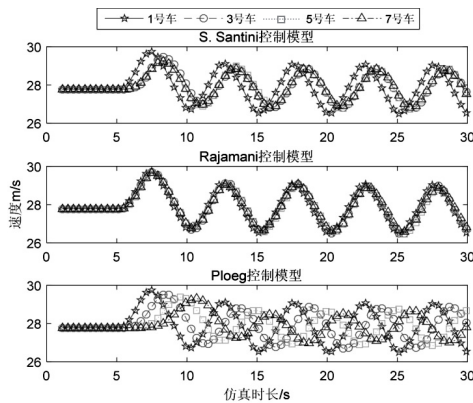
由图2(a)、(b)、(c)可看出,在丢包率相同的情况下,Rajamani 控制模型跟驰效果最好,后车和前车速度几乎保持同步变化。而 Ploeg 控制模型跟驰效果最差,后车车速滞后于前车车速变化,并且速度大小也不能与前车车速保持一致,每一辆车的最大速度都小于前一辆车。S. Santini 控制模型后车车速也相对滞后于前车车速变化,且车速小于头车,但除头车外后车车速能基本保持一致。



(a) 丢包率 5%



(b) 丢包率 10%



(c) 丢包率 40%

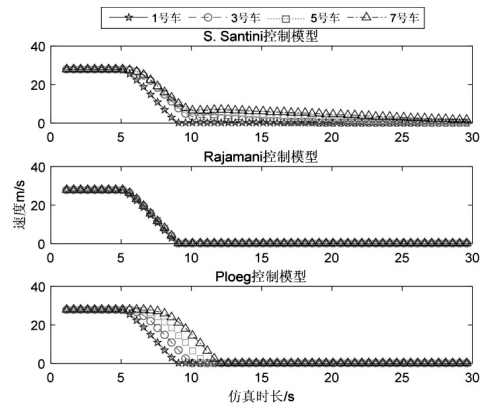
图2 丢包下头车车速正弦变化时1、3、5、7号车速度

横向对比图2(a)、(b)、(c)可看出,随着丢包率增大,三种模型中跟驰车辆的速度变化都会滞后。

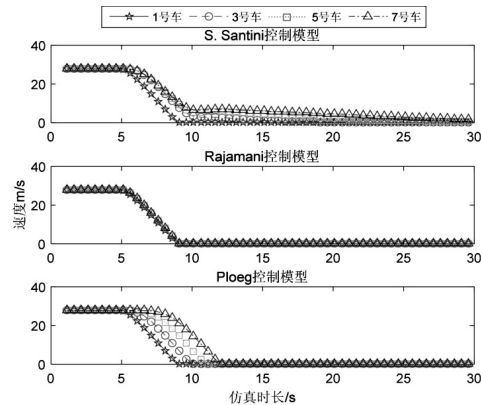
Rajamani 控制模型和 S. Santini 控制模型速度滞后量相对较小,在 40% 丢包率情况下的速度变化比 10% 丢包率情况速度变化滞后 0.5 s 左右,Ploeg 控制模型的滞后量较大,在 40% 丢包率情况下的速度变化比 10% 丢包率速度变化滞后 1 s 左右,且跟驰车辆速度最大值增加约 0.2 m/s。由此可以看出,当头车速度正弦变化时,三种控制模型都会被丢包率影响,丢包率越大,跟驰车辆车速变化越迟,其中 Rajamani 控制模型受丢包率影响最小,Ploeg 控制模型受丢包率影响最大。

3.1.2 头车紧急刹车场景

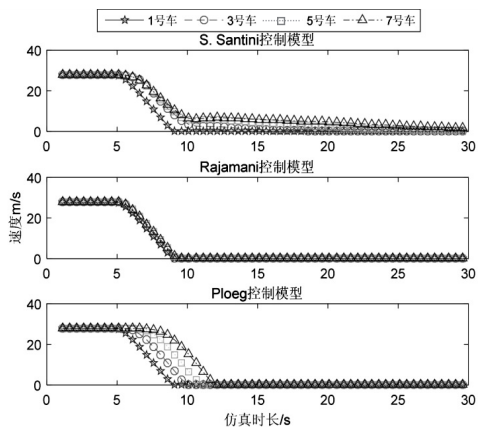
丢包对 CACC 控制模型紧急刹车情况下的影响基于图3所示的结果分析,由图3可知,当头车紧急刹车时,S. Santini 控制模型中除头车外所有跟驰车辆过 1 s 左右开始减速,并且速度开始快速下降,降到大约 7 m/s 时速度下降变缓;Ploeg 控制模型中每辆车比前车迟大约 1 s 开始减速,所有车辆速度均匀下降,大约 4 s 车速下降为 0 m/s;Rajamani 控制模型中所有车几乎同时开始刹车,并且车辆减速度几乎一致,车速在 5 s 内匀减速至 0 m/s。通过对比图3(a)、(b)、(c)可知,随着丢包率增大,三种模型中跟驰车辆开始减速的时间都略微推迟 0.1 s 左右,受到丢包率影响区别不大。



(a) 丢包率 5%



(b) 丢包率 10%



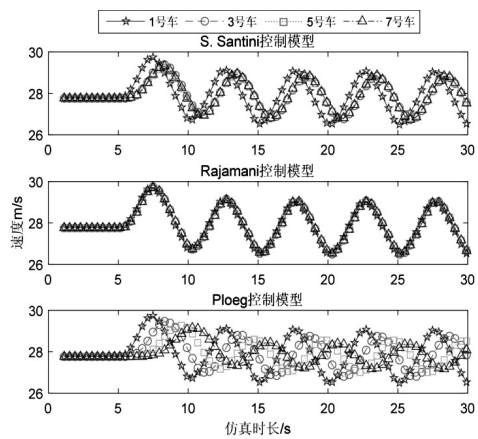
(c) 丢包率 40%

图 3 丢包下头车紧急刹车时 1、3、5、7 号车速度

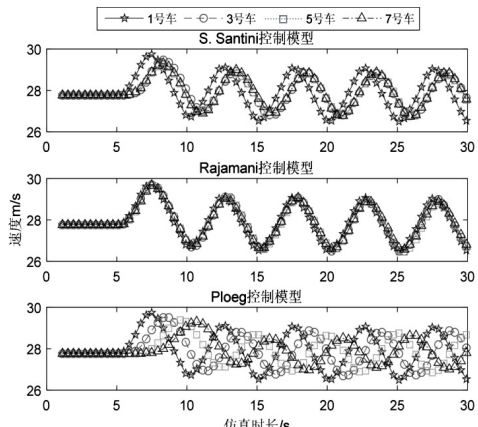
3.2 时延对 CACC 控制性能的影响

3.2.1 头车速度正弦变化场景

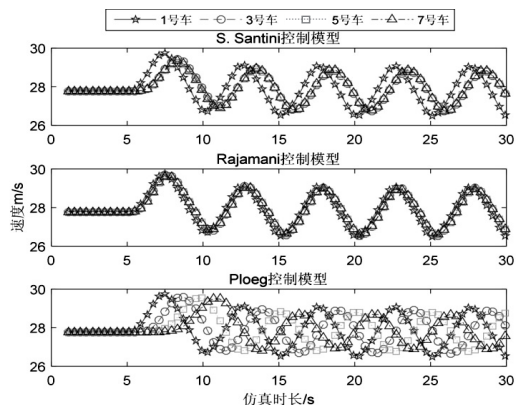
图 4 是通信延迟条件下头车车速正弦变化时车辆速度曲线图。由图 4 可知,通信延迟相同的情况下,Ploeg 控制模型跟驰车辆车速变化明显落后于前车车速变化,Rajamani 控制模型跟驰车辆速度变化与头车几乎相同,S. Santini 控制模型跟驰车辆速度变化落后于头车,但是除头车外其余所有车辆速度变化几乎相同。对比图 4(a)、(b)、(c)可知,通信延迟越大,跟驰车辆速度变化越不灵敏。



(a) 通信延迟 5 ms



(b) 通信延迟 10 ms

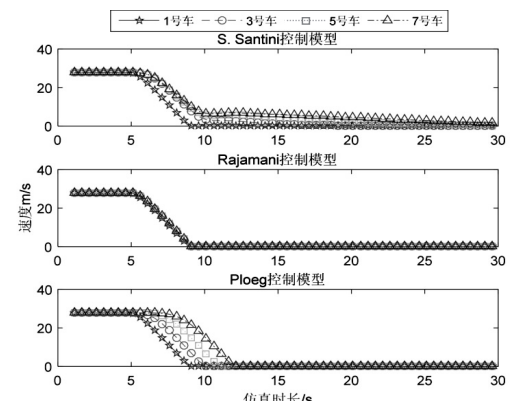


(c) 通信延迟 100 ms

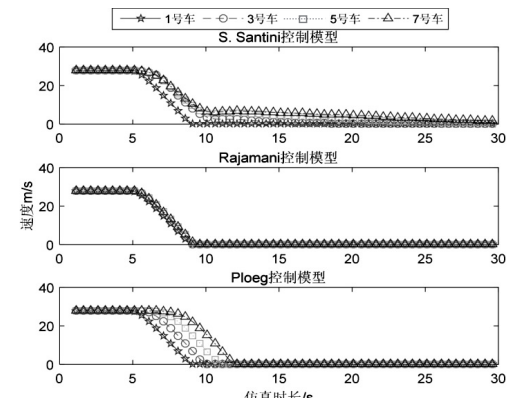
图 4 延迟下头车车速正弦变化时 1、3、5、7 号车速度总的来看,在头车速度正弦变化场景下,Ploeg 控制模型更容易受到通信的延迟影响,Rajamani 控制模型更稳定。

3.2.2 头车紧急刹车场景

头部紧急刹车的情况下不同通信条件车辆速度随时间变化的曲线图如图 5 所示。从图中可以看出,在通信延迟相同的情况下,Rajamani 控制模型跟驰车辆速度变化延时较小,而 S. Santini 控制模型和 Ploeg 控制模型跟驰车辆速度变化都有较明显的延时,其中 Ploeg 控制模型延时最大。横向对比图 5(a)、(b)、(c)可以看出,随着通信延迟的增大,跟驰车辆的速度变化延迟也会增大。



(a) 通信延迟 5 ms



(b) 通信延迟 10 ms

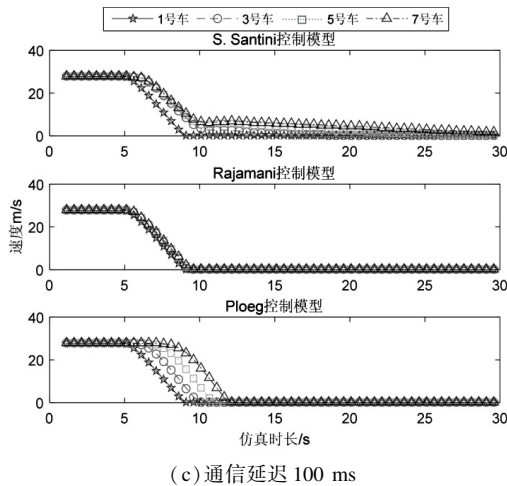


图5 延迟下头车紧急刹车时1、3、5、7号车速度

总的来看,在头车紧急刹车场景下,Rajamani 控制模型相对更加稳定,而 Ploeg 控制模型更容易受到通信的延迟影响。

4 结束语

基于 Veins 仿真平台,分别测试了丢包率和时延对 S. Santini、Rajamani 和 Ploeg 三种典型 CACC 模型控制性能的影响。针对头车速度正弦变化和头车紧急刹车两种情况分别测试了丢包率为 5%、10% 和 40% 下的车辆速度变化,测试结果表明:头车速度正弦变化时,Rajamani 控制模型受丢包率影响最小,Ploeg 控制模型受丢包率影响最大;头车紧急刹车时,三种模型中跟驰车辆开始减速的时间都略微推迟 0.1 s 左右,但受到丢包率影响区别不大。针对头车速度正弦变化和头车紧急刹车两种情况分别测试了延迟 5 ms、10 ms 和 100 ms 下的车辆速度变化,测试结果表明头车速度正弦变化时,Ploeg 控制模型效果最差,最好的是 Rajamani 控制模型;头车紧急刹车与头车速度正弦变化测试场景下的测试结果类似,Rajamani 控制模型表现最稳定,Ploeg 控制模型稳定性最差,但三种控制模型跟驰车辆的速度变化延迟都会随着通信延迟的增大而增大。

参考文献:

[1] DARBHA S, KONDURI S, PAGILLA P R. Benefits of V2V communication for autonomous and connected vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(5): 1954–1963.

[2] 张蕊, 严新平, 吴超仲. 车路协同环境下车辆自适应巡航控制研究[C]//中国智能交通协会. 第六届中国智能交通年会暨第七届国际节能与新能源汽车创新发展论坛优秀论文集(上册)——智能交通. 北京, 中国: 中国智能交通协会, 2011: 182–191.

[3] XU Qing, SENGUPTA R. Simulation, analysis, and compar-

son of ACC and CACC in highway merging control[C]//IEEE IV2003 intelligent vehicles symposium. proceedings (Cat. No. 03TH8683). Columbus, OH, USA, 2003: 237–242.

[4] AREM B V, DRIEL C J G V, VISSER R. The impacts of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2007, 7(4): 429–436.

[5] 秦严严, 王昊, 王炜, 等. 自适应巡航控制车辆跟驰模型综述[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 121–130.

[6] 张心睿, 赵祥模, 王润民, 等. 基于封闭测试场的 DSRC 与 LTE-V 通信性能测试研究[J]. 汽车技术, 2020(9): 14–20.

[7] SHLADOVER S, SU D, LU X Y. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2324: 63–70.

[8] 翟志强, 许进亮, 袁皓, 等. 自适应巡航系统车辆跟驰控制策略仿真[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 885–891.

[9] JIA D, NGODU D. Enhanced cooperative car-following traffic model with the combination of V2V and V2I communication[J]. Transportation Research Part B, 2016, 90: 172–191.

[10] RAJAMANI R, TAN H S, LAW B K, et al. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(4): 695–708.

[11] SANTINI S, SALVI A, VALENTE A S, et al. A consensus-based approach for platooning with inter-vehicular communications[C]//IEEE conference on computer communications (INFOCOM). Hong Kong, China: IEEE, 2015: 1158–1166.

[12] PLOEG J, SCHEEPERS B T M, VAN NUNEN E, et al. Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control[C]//14th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC). Washington, DC: IEEE, 2011: 260–265.

[13] LI Y J. An overview of the DSRC/WAVE technology[C]//Quality, re-liability, security and robustness in heterogeneous networks. Houston, TX, USA: Springer, 2012: 544–558.

[14] BOTTA A, PESCAPÈ A, VENTRE G. Quality of service statistics over heterogeneous networks: analysis and applications[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 191(3): 1075–1088.

[15] NAUS G J L, VUGTS P R A, PLOEG J, et al. String-stable CACC design and experimental validation: a frequency-domain approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9): 4268–4279.

[16] SHEIKHOLESLAM S, DESOER C A. Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: a system level study[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1993, 42(4): 546–554.