

Platoon 模式下车载自组织网络性能分析与研究

赵海, 雷凯茹, 司帅宗, 许子文

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: Platoon 的性能可以通过车载自组织网络和协同自适应巡航控制系统得到进一步的提升. 提出了一种适用于大规模 platoon 与自由车辆协同运动的管理协议和管理策略. 通过设计适用于 platoon 的车辆移动模型, 并应用于 SUMO 交通仿真软件中, 对车辆场景进行了仿真. 同时设计适用于大规模 platoon 和自由运动车辆的通信分簇协议, 利用网络仿真软件 NS2 对通信性能进行分析, 结果证明 platoon 改善和提升了道路性能和通信性能.

关 键 词: Platoon; 智能驾驶模型; 车载自组织网络; 分簇算法; SUMO; NS2

中图分类号: TP 273⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)05-0634-05

Performance Analysis and Study of Vehicular Ad Hoc Networks on Platoon

ZHAO Hai, LEI Kai-ru, SI Shuai-zong, XU Zi-wen

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LEI Kai-ru, E-mail: leikairu@163.com.cn)

Abstract: Performance of platoon can be improved by vehicular ad hoc networks and cooperative adaptive cruise control system. A platoon management protocol and a platoon management strategy were proposed which could be applied to platoon vehicles and free vehicles in large scales. A vehicle mobility model which was simulated by SUMO for platoon scenes was designed. Meanwhile, a clustering protocol was designed which was simulated by NS2 for analyzing communication performance in large scales of platoon vehicles and free vehicles. The results prove that platoon can improve performance of road capacity and communication for vehicular Ad Hoc networks.

Key words: platoon; intelligent drive model (IDM); vehicular ad hoc networks; clustering protocol; SUMO; NS2

随着城市现代化进程的加快, 车辆数量增加, 而道路资源有限引起了交通拥堵、交通安全、环境污染等一系列问题. 近年来, 随着车载自组织网络 (vehicular ad hoc networks, VANETs)^[1-3] 和协同自适应巡航控制 (cooperative adaptive cruise control, CACC)^[4] 系统技术的快速发展, 解决交通拥堵的一个有效交通管理策略 platoon 被提出. Platoon 主要用于自动化高速公路系统 (automated highway system, AHS), 它利用无线通信和车辆控制技术, 使部分车辆利用 CACC 技术自主/半自主地形成车辆的 platoon 形式. 即在高速公路交

通中, 车辆被组织成近距离跟随车辆组模型. Platoon 最广泛的研究配置形式为汽车列队, 一组连续的车辆形成一个 platoon, platoon 内各车辆由 CACC 控制, 以保持相同的速度和相对于普通高速公路安全距离更小的车间距离在高速公路上行驶. 其中每一个 platoon 有一个首车, 所有 platoon 的车辆成员统一跟随首车自动化地进行转向、制动和加速等操作.

Platoon 是提高交通效率和安全性的一个有效途径, 来自美国交通运输部的一份报告表明, 高速公路上的 platoon 形式可以使道路车辆容量提

高 70%^[5]. 同时由于空气减阻, 实现节能减排, platoon 也被看作是一个解决环保驾驶策略的有效方案. 从通信性能的角度来看, 车辆以一个相对稳定的 platoon 移动不仅可以提高安全信息的传送效率^[6], 同时也可以将自己的多媒体信息分享给同一个 platoon 内的其他车辆以实现共享数据. 因此, 更多的数据可以存储在 platoon 中, 提高数据可用性并减少数据访问延迟.

为了对 platoon 在道路性能和通信性能方面进行研究与分析, 本文设计了适用于 platoon 的交通移动模型, 并利用交通仿真软件 SUMO 进行仿真. 同时设计了适用于 platoon 与自由车辆 free 的分簇算法对网络进行构建, 并利用网络仿真软件 NS2 (network simulator, version 2) 对不同场景进行通信性能的分析, 进而讨论不同比例的 platoon 和 free 在道路容量和通信方面的性能.

1 Platoon 体系结构

图 1 显示了 platoon 的一般体系结构. 研究中, 车辆均具有 CACC 能力, 并且车与车能够通过 VANET 的通信进行信息共享和协同驾驶. 在此体系结构中, 根据空间位置和功能, 每一个车辆都拥有一个独特 id 号. Platoon 的成员可分为 3 个角色, 即领导车、成员车、尾车. 功能分别如下:

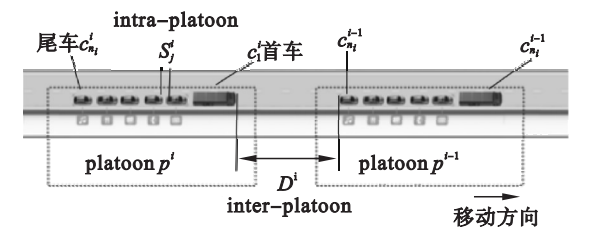


图 1 Platoon 实例和参数

Fig. 1 Example of platoon and platoon parameters

- 1) 领导车 leader: 为了便于领导, 通常会将 platoon 首车设置为领导者, 负责创建和管理 platoon. 例如, 确定并定期广播 platoon - id, 决定车辆是否可以加入或者离开, 然后分配车辆角色, 并确定 platoon 是否应拆分或合并.
- 2) 尾车 tail: 定位在 platoon 的尾部, 负责与下一个 platoon 的 leader 进行通信.
- 3) 成员车 member: platoon 内除了首车和尾车的其他车辆. 这些车辆可以接收来自其他车辆发送的信息并分享信息, 这些车辆会遵守特定的行驶规则.

为了便于后续研究, 本文统称 tail 和 member 车辆为 follower, 此外, 对于不具备 CACC 能力的

车辆统称为 free. 为了对 platoon 进一步讨论, 定义 intra - platoon 为 platoon 内相邻车辆之间的距离, inter - platoon 为前一个 platoon 的尾车与下一个 platoon 首车之间的距离. 基于这些参数定义, platoon 的参数设置如表 1 所示: p_i 表示第 i 个 platoon, c_j^i 是 p_i 的第 j 辆车, s_j^i 表示第 c_j^i 车和 c_{j-1}^i 车的间距, D^i 表示第 i 个 platoon p_i 与第 $i - 1$ 个 platoon p_{i-1} 的间距.

为了便于进一步讨论, 重要的符号总结在表 1 中, 其中变量已按字母顺序排序.

表 1 Platoon 参数设置
Table 1 Platoon parameters setting

变量	变量含义
a	最大加速度
a_j^i	车 c_j^i 的加速度
b	最大减速度
D^{des}	inter - platoon 的期望值
D^i	inter - platoon p^i 与 p^{i-1} 的距离
L_0	车辆长度
L^i	platoon p^i 的长度
n^i	platoon p^i 的车辆个数
s_j^i	intra - platoon c_{j-1}^i 与 c_j^i 的距离
R_i	最大通信半径
v_0	车的最大速度
v_j^i	车 c_j^i 的速度
x_j^i	车 c_j^i 的位置

2 Platoon 管理系统

Platoon 管理系统分为 platoon 管理协议和 platoon 管理策略^[7]. Platoon 管理协议负责车辆间的通信, platoon 管理策略决定了 platoon 中成员角色以及在设计目标中的作用. 本文针对 platoon 管理协议和管理策略进行了如图 2 所示的设计.

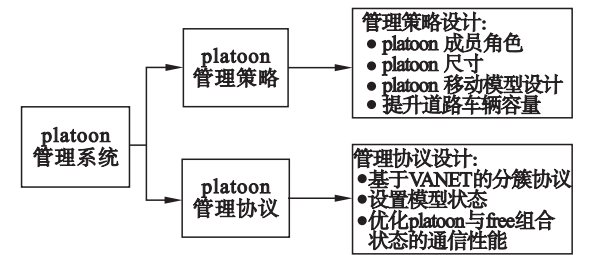


图 2 Platoon 管理策略和 platoon 管理协议示意图

Fig. 2 Explanatory views of platoon management strategy and platoon management protocol

2.1 Platoon 管理策略

本文主要从交通移动模型设计上对 platoon 管理策略进行实现. 为了确保研究结果的准确性

与可信度,车辆仿真通常采用车辆移动模型来生成接近真实的车辆移动拓扑文件,本文采用了 SUMO 提供的车辆移动模型对车辆进行仿真.但是,由于 SUMO 本身未提供适用于 platoon 车辆的移动模型,为了实现道路上能够使 platoon 与 free 车辆的同时存在,本文在使用已有模型的基础上建立了适用于 platoon 的车辆移动模型.

2.1.1 IDM 模型

对于 free 车辆类型的仿真,本文采用了 SUMO 提供的智能跟随模型 IDM 模型 (intelligent driver model)^[8-9] 和默认车道变化模型 LC2013^[10] 实现对车辆纵向与横向控制.为了实现车辆跟随模型,车辆实际数值积分值^[11] 可以表示为

$$v_j(t + \Delta t) = v_j(t) + a_j(t) \Delta t, \quad (1)$$

$$x_j(t + \Delta t) = x_j(t) + v_j(t) \Delta t + \frac{1}{2} a_j(t) \Delta t^2. \quad (2)$$

其中: x_j 是 c_j 的坐标; Δt 是更新时间间隔.因为研究的车辆均具备 CACC 装置,所以这些操作都是自动化完成的,通常更新时间 Δt 设置为 100 ms.

IDM 模型表示为

$$S_j^*(t) = s_0 + v_j(t) T_0 + \frac{v_j(t) \nabla v_j(t)}{2 \sqrt{ab}}, \quad (3)$$

$$a_j(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_j(t)}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{S_j^*(t)}{S_j(t)} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

其中: s_0 和 v_0 分别表示最小车间距离和最大车速; $S_j^*(t)$ 表示期望车间距离,其他参数参见表 1.

2.1.2 Platoon 模型

在 platoon 车辆移动模型设计中,由于实际道路不同车道具备限速,设定每个 platoon 始终处于该车道的平衡点,即考虑车辆纵向控制,不考虑横向控制.基于 platoon 管理策略需求的参数设计如下:

1) intra-platoon 间距. 根据式(3)和式(4)得出 intra-platoon 计算公式为

$$S_j(t) = \frac{s_0 + v_j(t) T_0 + \frac{v_j(t) \nabla v_j(t)}{2 \sqrt{ab}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_j(t)}{v_0} \right)^4 - \frac{a_j(t)}{a}}}. \quad (5)$$

由于本文设计的实验中 platoon 始终处于 platoon 的平衡点 e 处,即 $\Delta v_j(t) = 0, a_j(t) = 0, v_j(t) = v_e$ 时, intra-platoon 距离表示为

$$s_e(t) = \frac{s_0 + v_e T_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{v_0} \right)^4}}. \quad (6)$$

2) platoon 尺寸. 为了保证 platoon 内任意两

辆车通信距离保持在一跳范围内, platoon 拥有车辆个数最大值 m_{\max} 应满足 $m_{\max} L_0 + (m_{\max} - 1) s_e \leq R_T$, 其中 L_0 表示车辆长度, R_T 是车间通信最大半径, 因此得出:

$$m_{\max} \leq \frac{R_T + s_e}{L_0 + s_e}. \quad (7)$$

2.2 Platoon 管理协议

本文主要对车辆间相互交换信息的通信方式 (vehicle to vehicle, V2V) 进行研究, 其中 MAC 层采用了适用于 V2V 通信的 IEEE802.11p 协议, 网络层主要采用了基于 VANET 最大连接度分簇算法进行设计^[11], 从而实现 platoon 和 free 车辆的通信. 分簇算法设计如下:

1) 定义节点 id. Platoon 车辆 id 定义为 $p_i - j$, 其中 p_i 表示第 i 个 platoon, j 表示该 platoon 的第 j 辆车. free 车辆 id 定义为 v_1, v_2, \dots, v_n .

2) 初始化车道. 设置每个 platoon 为一个簇, 其中 $j = 0$ 的点为该 platoon 的簇首 (cluster head), 并将状态更新为 CH, platoon 内其他车辆为簇成员节点 (cluster member), 状态更新为 CM. 所有 free 车辆均为孤立节点 (isolated node), 初始状态设置 IN.

3) free 车辆分簇. 遍历所有状态为 IN 的节点, 比较所有孤立节点车辆的度值 k , 选出度值最大的车辆 v_i 为簇首并更新为 CH, 然后将 v_i 通信半径内的车辆设定为簇成员并更新为 CM, 重复这个过程, 直到网络中不存在状态为 IN 的车辆为止.

4) 簇的维护. 由于本文设定 platoon 内车辆处于平衡点状态, 并不会出现进车和出车的情况, 所以 platoon 车辆的状态不会发生改变. 对于 free 车辆, 当一个 CM 脱离了它 CH 的通信范围, 它的状态更新为 IN, 同时寻找其通信半径范围内的其他 CH 并请求加入, 加入新的簇后状态更新为 CM, 如果其通信半径内不存在其他 CH, 则该车辆自己独立成簇, 状态更新为 CH.

3 实 验

3.1 道路性能分析

根据文献[7], 道路容量的增大可以通过减小车辆的 intra-platoon 距离. 文献[12]提供的道路容量公式为

$$C = v \frac{n}{nL_0 + (n-1)S + D}. \quad (8)$$

式中: S 表示 intra-platoon 间距离; D 表示 inter-platoon 间距离; v 表示车辆稳定状态运行速度; n

表示每个 platoon 内车的数量. 为了探究 platoon 对道路容量性能的提升能力, 本文将从 platoon 不同尺寸和不同车速的综合角度对道路性能进行讨论.

图 3 显示了不同车速时的道路容量随 platoon 尺寸的变化情况. 其中设置 $L_0 = 5\text{ m}$, 车间距离 $s = 30\text{ m}$, 车速分别为 60, 90 和 120 km/h. 其中 $n = 1$ 时, 车间安全距离以实际高速公路为参考, 即反应距离在 0.25 ~ 1.2 s 之间时响应速度对应的安全距离. 图 3 表示不同车速对道路容量的影响, 从图中可以看出, 当车辆形成 platoon 后, 道路容量会随着 platoon 内车的数量、车速发生显著提高. 从实验结果可以看出 platoon 内车辆小于

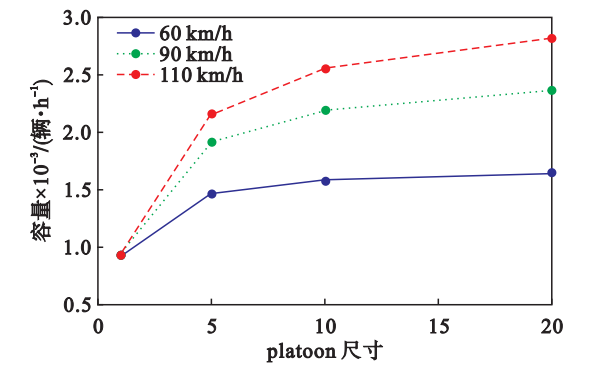


图 3 Platoon 尺寸对道路容量的影响
Fig. 3 Effect of platoon size on road capacity

10 时, 道路容量会快速增长, 大于 10 时逐渐趋于平缓. 为了保证所有车辆在 leader 通信范围内, 图 4 仿真了 platoon 尺寸为 10 时, 道路容量随车速的变化情况, 从实验结果可以看出, 道路容量与车

速增长成正比. 因此 platoon 的小间距和高速特性可以提升道路容量.

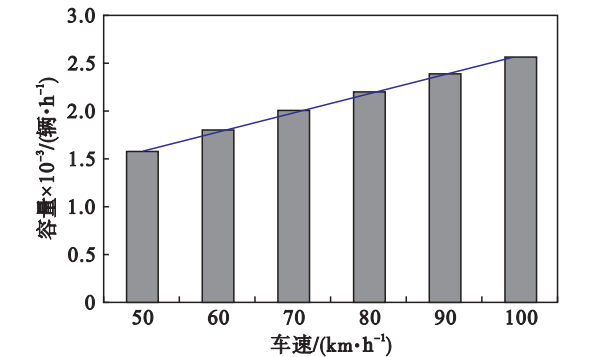


图 4 道路容量与车速的关系
Fig. 4 Effect of vehicle speed on road capacity

3.2 通信性能分析

为了讨论 platoon 对于通信性能的提升, 实验讨论了不同 platoon 车辆比例对丢包率和吞吐量通信性能的影响. 仿真实验设计如下: 仿真进行了 5 组实验, 每组 free 与 platoon 的比例不同, free 车辆数量比例分别为 0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%.

交通层仿真场景设计如下: ①采用三条车道的高速公路, 每条车道分别限速为 60, 90 和 110 km/h. ②free 与 platoon 的车辆采用随机发车方式. ③仿真车辆总数为 100 辆. ④每个 platoon 中包含 5 辆车. 仿真场景如图 5 所示: 其中 [1] 和 [2] 分别代表不同车道的 platoon 车辆, [0] 代表 free 车辆. 然后利用 NS2 对不同 platoon 比例的场

景进行通信性能仿真, 其中参数设置见表 2.

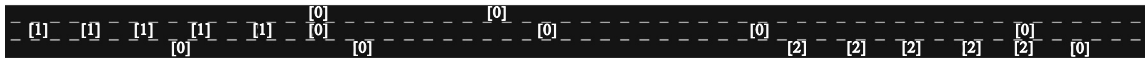


图 5 Platoon 与 free 车辆的道路仿真场景
Fig. 5 Simulation scene of platoon vehicles and free vehicle

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameters setting

参数	参数值
数据包大小/Byte	512
时隙大小/ μs	13
系统带宽/($\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$)	2
CWMin	15
CWMax	1 023
最大重传次数	7
通信半径/m	300
簇内最大车辆数目	15

图 6 表示不同 free 车辆比例对于丢包率的影响. 从实验结果看出, 当 free 比例小, platoon 比例大时, 由于道路拓扑结构稳定, 前期簇首与簇成员的连接不会发生巨大变化, 因此丢包率的值较为稳定. 但随着 free 车辆比例的不断增加, 道路车辆的拓扑变化加剧, 导致簇首不断发生变化, 并且簇首与簇成员的连接也随之改变, 从而导致丢包率随之变大.

图 7 表示不同 free 车辆比例对于吞吐量的影响. 在实验设置带宽相同的情况下, 由实验结果可以看出, free 比例越小, platoon 比例越大时, 网络利用效率更高, 吞吐量更大. 由于随着 free 的增加, 网络拓扑结构以及簇分布变化加剧, 吞吐量也

会随着不断降低.

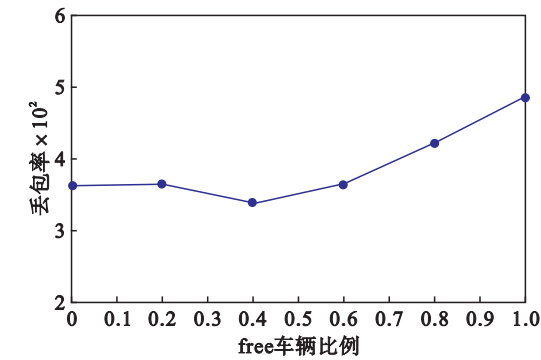


图 6 Free 车辆的比例对丢包率的影响
Fig. 6 Effect of free vehicle percentage on packet loss rate

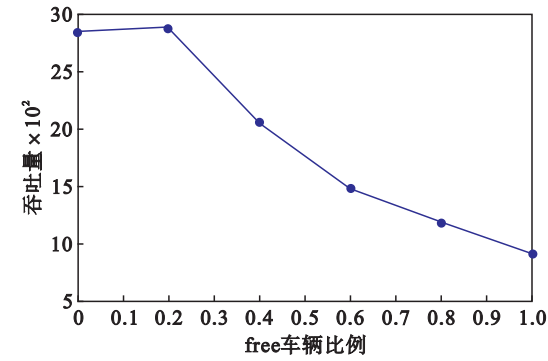


图 7 Free 车辆的比例对吞吐量的影响
Fig. 7 Effect of free vehicle percentage on throughput

4 结 语

本文设计了适用于 platoon 的交通仿真模型和 platoon 与 free 的分簇通信协议,并应用于 SUMO 和 NS2 中进行道路与通信仿真.结果表明,车辆形成 platoon 模式能够使车载自组织网络在道路容量和通信性能方面均得到提升.

参考文献:

[1] Acarman T,Liu Y,Ozguner U. Intelligent cruise control stop and go with and without communication [C]// American Control Conference. New York,2006:6.

[2] Bai F,Krishnamachari B. Exploiting the wisdom of the crowd: localized, distributed information-centric VANETs (topics in automotive networking) [J]. *Communications Magazine IEEE*,2010,48(5):138 – 146.

[3] Taleb T,Benslimane A,Letaief K B. Toward an effective risk-conscious and collaborative vehicular collision avoidance system [J]. *Vehicular Technology IEEE*, 2010, 59 (3): 1474 – 1486.

[4] Jiang Y,Li S,Shamo D E. A platoon-based traffic signal timing algorithm for major-minor intersection types [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, 40 (7):543 – 562.

[5] Hall R, Chin C. Vehicle sorting for platoon formation: impacts on highway entry and throughput [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2005, 13 (2): 405 – 420.

[6] Jia D,Lu K,Wang J. On the network connectivity of platoon-based vehicular cyber-physical systems [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014,40(1):215 – 230.

[7] Jia D,Lu K,Wang J. A disturbance-adaptive design for VANET-enabled vehicle platoon [J]. *Vehicular Technology IEEE*,2014,63(2):527 – 539.

[8] Ge H X,Dai S Q,Dong L Y, et al. Stabilization effect of traffic flow in an extended car-following model based on an intelligent transportation system application [J]. *Physical Review E;Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*,2005, 70(6):066134.

[9] Krajzewicz D, Erdmann J, Behrisch M, et al. Recent Development and applications of SUMO-simulation of urban mobility [J]. *International Journal on Advances in Systems & Measurements*,2012(3/4):128 – 138.

[10] Kesting A,Treiber M. How reaction time, update time, and adaptation time influence the stability of traffic flow [J]. *Computer-Aided Civil & Infrastructure Engineering*,2008,23 (2):125 – 137.

[11] Peng H,Li D,Abboud K,et al. Performance analysis of IEEE 802. 11p DCF for inter-platoon communications with autonomous vehicles [J]// *IEEE Transaction on Vehicular Technology*,2017,66(3):2485 – 2498.

[12] Varaiya P. Smart cars on smart roads: problems of control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*,1993,38(2): 195 – 207.