





















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.

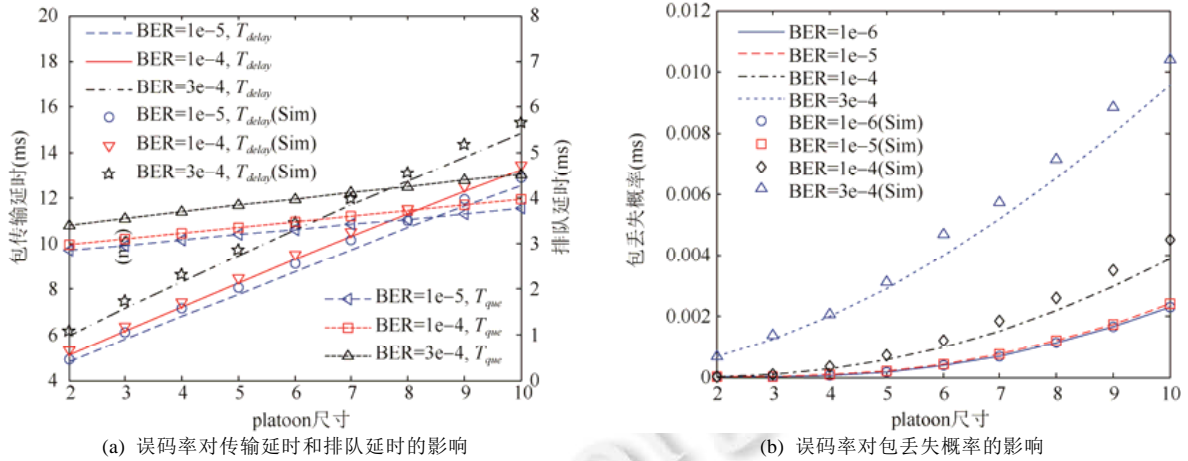


Fig.3 The performance metrics of intra-platoon communication network are affected by BER

图 3 误码率对 platoon 组内通信网络性能的影响

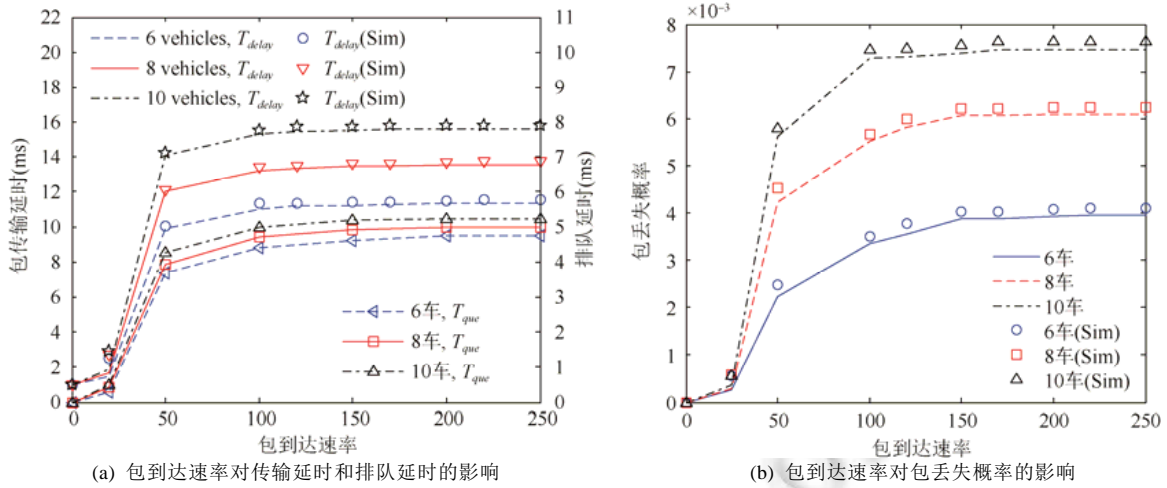


Fig.4 The performance metrics of intra-platoon communication network are affected by packet arrival rates

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.

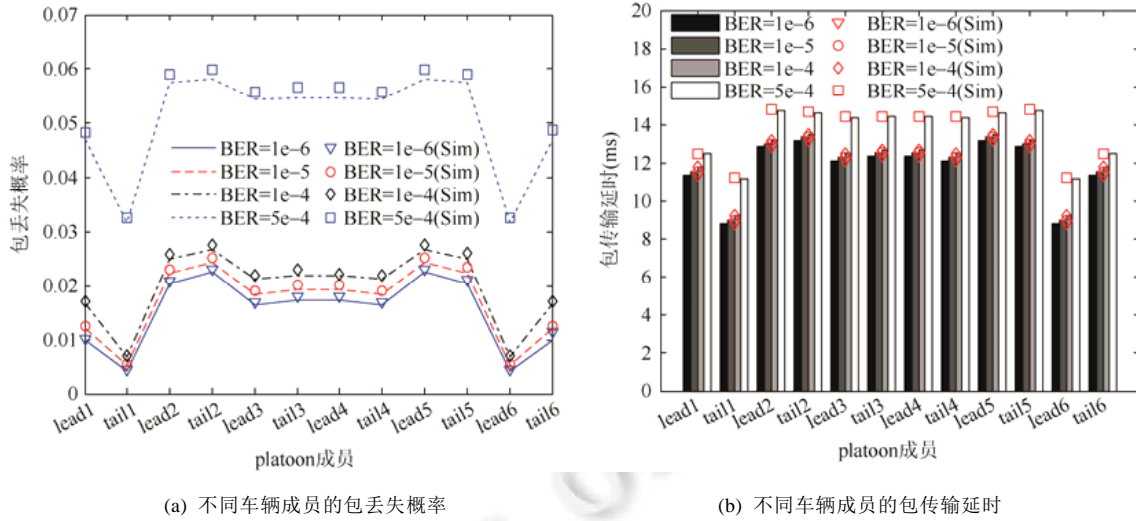


Fig.5 The performance metrics of inter-platoon communication under different channel conditions  
图 5 不同信道条件下 platoons 组间通信的性能度量

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.

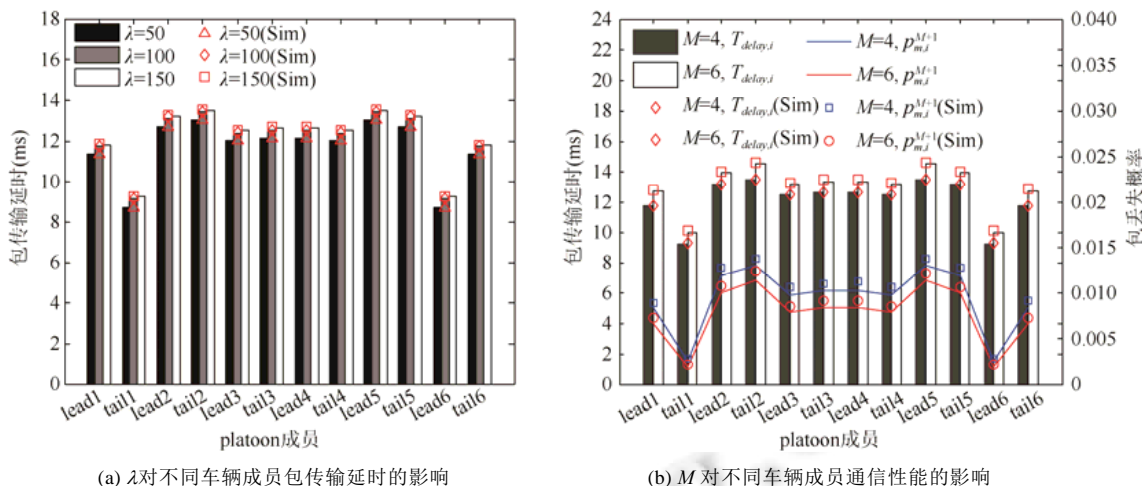


Fig.6 The performance metrics of inter-platoon communication are affected by  $\lambda$  and  $M$

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

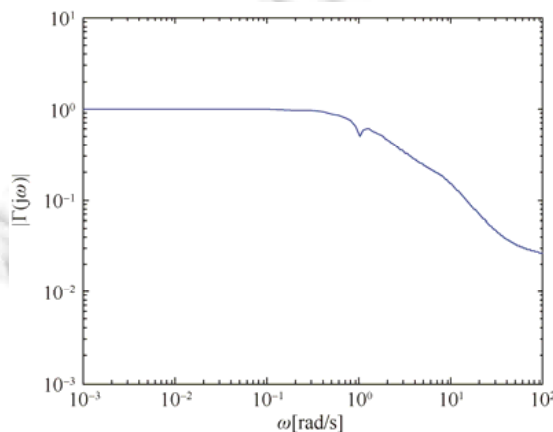


Fig.7 The frequency response amplitude of platoon acceleration error transfer function under 0.146s communication delay

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。接下来的工作会进一步研究包含中继车辆的 platoons 编组多跳通信模型,同时对车车间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.