

基于 IEEE802.11p 高速车路通信环境研究^{*}

张和生^{1,2}, 张明洋¹, 孙伟¹

(1. 北京交通大学 电气工程学院 北京 100044; 2. 轨道交通控制与安全国家重点实验室 北京 100044)

摘要: 针对基于 IEEE802.11p 构成高速车路通信中安全类消息传输的性能是否满足车路通信需求的问题, 采用符合实际道路特点的 Nakagami 分布描述无线信道衰落, Poisson 分布描述移动车辆发送的数据流, 对单一路边设备与连续移动车辆通信性能进行了仿真。以车辆消息发送间隔、通信车辆数量、车辆行驶速度为变量, 得到 4 种不同接入类消息的车辆数与吞吐量、发包间隔与丢包率、发布间隔与平均时延、车辆速度与投递字节数的关系。结果表明, 不同类型消息在车辆数与吞吐量关系上有一个优化点, 可实现车辆数和吞吐量的最大化; 丢包率和平均时延都会随着车辆数据发送间隔增大而增大。车速增加时, 安全类消息的投递字节数下降且与车速成反比。从仿真结果可以看出, IEEE802.11p 协议能够保证高优先级安全类消息传输服务质量。

关键词: 车路通信; 性能分析; NS-2 仿真; IEEE802.11p 协议; 专用短程通信

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research on vehicle to infrastructure high-speed communication based on IEEE 802.11p

Zhang Hesheng^{1,2}, Zhang Mingyang¹, Sun Wei¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing 100044, China)

Abstract: To test whether the performance of security message transmission meets the requirements of vehicular to infrastructure high speed communication based on IEEE802.11p, the communication between single roadside unit and mobile vehicle flow is simulated using Nakagami and Poisson distributions that accord with actual road characteristics to describe the wireless channel fading and moving vehicular data flow, respectively. The vehicular data sending interval, number of vehicles and vehicular speed are taken as the variables, the relationships between throughput and number of vehicles, data sending interval and packet loss rate, data sending interval and average delay, as well as vehicular speed and number of delivered data bytes for four different access categories of messages are obtained. The results show that, for different access categories of messages, there is an optimal point between the number of vehicles and throughput where both real time transmission and high network capacity are achieved, and maximal number of vehicles and throughput are realized. The packet loss rate and average latency will increase with the increasing of the vehicular data sending interval. The high priority messages can achieve low packet loss rate and low average latency under high vehicular data sending interval. When vehicular speed increases, the number of delivered bytes for security message will decline and is inversely proportional to the vehicle speed. The conclusion from simulation results is that the protocol of IEEE802.11p is able to ensure communication service quality for high priority security messages.

Keywords: V2I communication; performance analysis; NS-2 simulation; IEEE802.11p protocol; DSRC

收稿日期: 2013-01 Received Date: 2013-01

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(61174179, 60874079)、铁道部重点项目(2011Z001-D)、轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题(RCS2009ZT003)、中央高校基本科研业务费专项资金(2011YJS213, 2012YJS113)资助项目

1 引言

交通拥挤、交通事故和交通污染是各国城市交通的三大问题。其中交通事故造成大量人员伤亡,如美国在2009年机动车事故为1 080万件,致死人员达3 590万人。利用通信技术构成车辆驾驶辅助系统是近年来解决交通安全问题的研究热点之一。车辆自组网络(vehicle ad-hoc network, VANET)将运动车辆作为网络节点来创建临时的、开放式、移动无线自组织网络,在运行车辆间(vehicle to vehicular, V2V)和车辆和道路基础设施间(vehicle to infrastructure, V2I)传输各种信息。VANET的应用,不仅可使司机在超视距运行中获得其他车辆的车速、方向、位置等信息和实时路况等一般信息,而且通过车辆间交互安全相关消息,如车辆故障、车辆碰撞、换道预警等,司机可以提前了解车辆和道路的安全状态,减少行车盲点和发生故障的可能性。据美国运输部预计,V2V通信可以解决82%的撞车,可挽救数以千计的生命^[1]。VANET提出后便成为智能交通系统新的研究热点。

各国国家对VANET进行了研究^[2]。美国早期实施车辆安全通信(vehicle safety communication, VSC)和车辆设施整合(vehicle infrastructure integration, VII)项目,目前发展为Intellidrive,目的是提供更安全、能相互交互和舒适的旅行环境。欧洲实施了车路协同系统(cooperative vehicle infrastructure systems, CVIS)、SafeSpot(Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety)、COOPERS(Cooperative systems for intelligent road safety)以及Car-TALK、I-WAY等十几个以实现V2V和V2I通信的项目。日本也实施了AHS(advanced cruise assistance highway systems)和ASV(advanced safety vehicle)等项目。在这些项目中利用了很多通信方式,如蜂窝、通用分组无线服务技术(general packet radio service, GPRS)、全球微波互联接入(worldwide interoperability for microwave access, WiMAX)和专用短程通信技术(dedicated short-range communication, DSRC)等。其中DSRC被认为是V2V和V2I通信中最有前景的无线通信方式^[3]。

但在VANET应用中,由于车辆高速移动(最大相对速度可达240 km/h(以120 km/h计)),造成无线电波的多普勒效应、多径效应,致使无线信道质量不稳定;同时快速移动性致使网络拓扑变化较快。而安全相关消息传输实时性要求高,通常要求在100 ms以内完成传输,是时间苛求系统。因此需要对DSRC通信的物理层和数据链路层进行分析。

DSRC物理层(PHY)和媒体访问控制(media access control, MAC)采用IEEE802.11p WAVE(wireless access for vehicle environment 车辆环境无线访问)。其物理层采

用正交频分复用(orthogonal frequency division multiple-xing, OFDM)技术以提高抗干扰能力^[4]。在5.9 GHz波段划分了7个10 MHz带宽通道,最大传输速率为27 Mbps。MAC层采用支持服务质量(quality of service, QoS)的增强型分布式信道访问(enhanced distributed channel access, EDCA)。支持8种不同用户优先级(user priority, UP)消息的接入,8种消息被映射为4种接入类(access category, AC)。每个车辆作为一个节点,不同优先级消息分别进入相应的AC0到AC3队列。

由于IEEE802.11p于2010年7月成为IEEE标准,目前还没有与此标准一致的实际产品,DSRC的研究主要通过理论分析和仿真实验。已经有很多研究来分析相关的通信性能,如文献[5-6]对IEEE802.11 DCF机制性能进行了分析和评价;文献[7-9]利用马尔科夫过程对IEEE802.11e EDCA协议进行建模和分析;文献[11-13]利用仿真方法得到IEEE802.11p通信性能。尽管现有研究结果对分析DSRC性能分析和仿真有参考意义,但不能直接应用,其原因是:

1) IEEE802.11p的MAC采用源自分布式协调功能(distributed coordination function, DCF)并加入QoS的EDCA。其中修改了很多参数以适应车辆通信环境,故文献[5-9]的DCF和IEEE802.11e的结果不能直接应用于车路通信中;

2) 现有研究没有考虑到节点移动对无线信道的影响,真实车辆运动与信道衰减关系会影响理想条件下理论分析结果的正确性^[14],故文献[10-12]的仿真结果需要加入适应交通环境的无线信道模型;

3) 现有对IEEE802.11p的仿真没有对消息优先级进行分类,且仿真中的固定速率流(constant bit rate, CBR)描述与实际车辆移动中产生的数据流不一致,采用Poisson分布描述更能接近实际情况^[14-16]。

以上这些问题使现有研究结果不能直接应用于DSRC的研究和开发中。DSRC不仅可用于电子收费等常规应用,更主要通过V2V和V2I通信传输安全类消息,而安全类消息传输有时间上界,是时间苛求系统,车辆速度、车辆数、每辆车发送的消息数等因素的变化,以及信道的特点会造成通信失败,因此迫切需要对其通信性能进行仿真研究。

针对IEEE802.11p协议安全类消息的通信性能,采用符合实际道路特点的Nakagami模型描述无线信道衰落,采用Poisson分布描述移动车辆发送的数据流,对单一路侧设备条件下的连续移动车辆的V2I通信性能进行了仿真,选择车辆的消息发送间隔、通信车辆数量、车辆行驶速度为变量,分析4种优先级消息的平均时延、丢包率和吞吐量。采用Nakagami模型和Poisson分布使仿真过程更加接近真实环境,提高了仿真结果的可信性。仿

真结果对在实际道路中应用 IEEE802.11p 传输安全消息提供基础,为 DSRC 在实际道路应用提供了基础仿真数据。

2 仿真环境与问题描述

2.1 仿真环境

VANET 由安装在车辆上的车载设备(on board unit , OBU)、安装在道路上的路侧设备(road side unit ,RSU) 和 DSRC 通信协议构成,应用示意如图1所示。

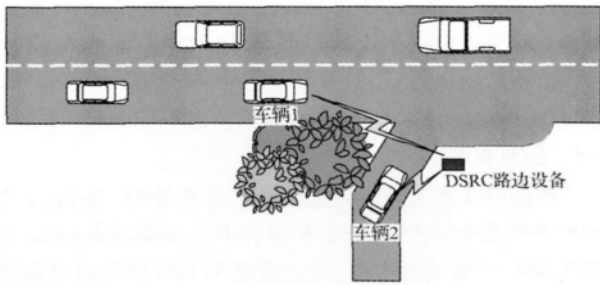


图1 VANET应用示意图

Fig.1 Schematic diagram for application of VANET

路侧设备通过 DSRC 与附近车辆进行通信,车辆间也通过 DSRC 交互信息。通过安全类消息的交互,避免因障碍物阻挡未发现车辆1而造成的可能碰撞。图1所示应用是目前交通系统中涉及安全的典型 V2I 应用,如果在其中还考虑其他车辆 OBU 与 RSU 通信,可以将图1的实际应用示意图变化为图2所示仿真环境图,即单一路侧设备条件下连续移动车辆流的 V2I 通信。该场景在 V2V 和 V2I 通信中具有典型意义,将其参数变化可以覆盖大多数 VANET 通信场景。

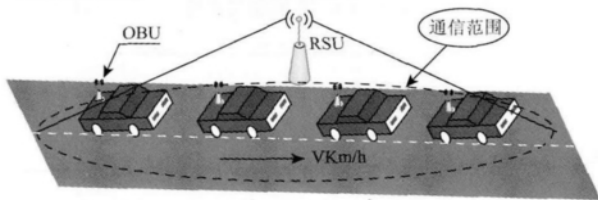


图2 仿真场景

Fig.2 Scenario of simulation

2.2 仿真问题描述

由于安全消息传输具有优先级,而且消息传输必须满足一定的时间上界,连续车流与单一路侧设备的通信中,连续车流的数量、速度,以及每个移动车辆发送数据包的数量都会影响安全类消息的丢包率、时延,以及网络吞吐量等网络性能。图2仿真场景中移动车辆发送数据并不恒定,车路通信信道并非理想,车辆速度和数量等参

数的变化会致使安全消息传输不能满足时间的约束。因此需要利用接近实际的信道模型、发送数据包模型,并结合参数的变化来测试消息传输的可靠性。由于目前没有符合 IEEE802.11p 协议的通信产品进行实际测试,仿真是了解连续车流与单一路侧设备通信性能的主要工具。

3 仿真模型与参数

建立合理的仿真模型要首先了解 IEEE802.11p 消息竞争机制,在此基础上构建模型,设置仿真参数。

3.1 IEEE802.11p 介质接入与消息竞争

IEEE802.11p 的 EDCA 采用 CSMA/CA 协议,每个节点有4个接入类型 $AC[i]$ $i=0,1,2,3$ 。其主要参数为仲裁帧间间隔(arbitration inter frame spacing, AIFS),仲裁帧间间隔数量(AIFS number, AIFSN),最大最小竞争窗口(contention window, CW)

$$AIFS[AC_i] = SIFS + AIFSN[AC_i] \times Slot_time \quad (1)$$

式中: $SIFS$ (short inter frame spacing) 与 $Slot_time$ 是物理层参数,对于所有 AC 都相同; AIFSN 和最大最小 CW 与 AC 相关,如表1所示。

表1 IEEE 802.11p EDCA 参数值

Table 1 The EDCA parameters of IEEE 802.11p

AC	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN
AC[3]	aCW _{min}	aCW _{max}	9
AC[2]	aCW _{min}	aCW _{max}	6
AC[1]	$(aCW_{min} + 1) / 2 - 1$	aCW _{min}	3
AC[0]	$(aCW_{min} + 1) / 4 - 1$	$(aCW_{min} + 1) / 2 - 1$	2

当节点内 $AC[i]$ $i=0,1,2,3$ 有消息发送时,检测信道空闲超过相应的 AIFS 时,节点判定信道为空闲状态,随后发送消息。当消息发生冲突或收到 ACK 时退避计数器在 $[0, CW]$ 中随机选择一个值作为其初始值,进入退避阶段(back-off),如图3所示。退避时间结束时,如果信道空闲,则发送消息。如仍未发送成功放弃此消息发送, CW 的初始值设定为 CW_{min}。CW 加倍方式为 $(newCW = oldCW \times 2 + 1)$,直至达到 CW_{max}。

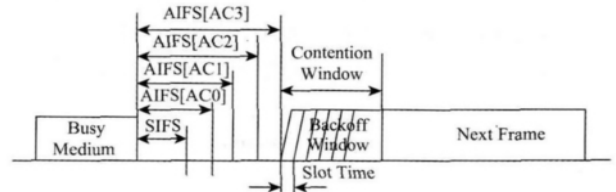


图3 EDCA 媒体接入机制

Fig.3 Media access mechanism of EDCA

消息冲突分为内部冲突和外部冲突2种情况。内部冲突为节点内4种AC队列消息的冲突,4种AC的消息

采用 DCF 竞争信道,当发生冲突时,虚拟调度器选择高优先级消息发送。外部冲突为不同节点间消息的冲突,一旦发生冲突,各节点的消息都需重新发送,与消息优先级无关。高优先级消息的 CW_{min} 、 CW_{max} 、 $AIFS$ 值都小于低优先级消息,故高优先级消息接入信道的机会较大,保证高优先级消息的实时性。

3.2 信道模型

研究表明 Nakagami 信道衰落传播模型更适合于车载环境^[13],通过模型中参数的设置可以仿真信道的无衰落、中等衰落或者显著衰落。利用 Nakagami 信道衰落模型对无线信道建模,当接收节点距离发送节点 x ,接收功率 P 服从 Gamma 分布:

$$P(x) = \left(\frac{m}{\Omega(x)} \right)^m \frac{x^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp \left[-\frac{mx}{\Omega(x)} \right] \quad x \geq 0 \quad (2)$$

式中: m 为 Nakagami 衰落参数, m 越大表示快速衰减的概率越小。 $\Omega(x)$ 为当发送者与接收者距离 x 时,接收者收到的平均功率。 m 和 $\Omega(x)$ 为 Nakagami 信道模型的两个重要参数。参数 m 值影响仿真的可靠性,其值和 OBU 与 RSU 之间距离 d 相关。在本文的仿真中,当 d 发生变化时,动态设定 m 的值,如表 2 所示。

表 2 d 与 m 对应关系

Table 2 Corresponding relation between d and m

d/m	m 值
0 ~ 200	1.5
200 ~ 1 000	0.75

利用 Friis 自由空间模型和双径地面反射模型分别估算短距离和中长距离的平均功率 $\Omega(x)$:

$$\begin{cases} \Omega(x) = \frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times x^2 \times L} & x \leq x_0 \\ \Omega(x) = \frac{P_t \times G_t \times G_r \times h_t^2 \times h_r^2}{x^4 \times L} & x > x_0 \\ x_0 = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_t 为发送信号功率, G_t 和 G_r 分别发送方和接收方天线增益, L ($L \geq 1$) 为系统损耗, h_t 和 h_r 分别为发送天线高度和接收天线高度, λ 为波长, x_0 为界限距离^[15]。

当 $x \leq x_0$ 时,假定为一种理想化的传播模型,发送方和接收方之间为一条无障碍的直线路径,即采用弗里斯自由空间模型估算 $\Omega(x)$;当 $x > x_0$,传播路径包括直线传播路径和地面反射路径,即采用双径地面反射模型估算 $\Omega(x)$ 。

3.3 通信流量模型

设 $N(t)$ 为 $[0, t)$ 时间内节点发送的数据包个数,且满足以下特点:

- 1) 零初值性: $N(0) = 0$ 。
- 2) 独立增量性: 在任意不相重叠的时间间隔内发送

数据包个数相互独立。

3) 时齐性: 在 $[a, t)$ 时间内发送数据包个数只与时间间隔长度 $t - a$ 有关,与时间起点无关。

4) 普通性: 在足够小的时间间隔内最多只有一个数据包发送。

因此, $N(t)$ 服从参数 λ 的泊松过程:

$$P\{N(t) - N(a) = m\} = \frac{(\lambda(t-a))^m}{m!} e^{-\lambda(t-a)} \quad (4)$$

式中: λ 为通信中数据包的发生率,即单位时间内平均产生的数据包个数。数据包相继产生的时间间隔服从参数为 λ 的负指数分布,指数分布均值为 $1/\lambda$ 。在本文仿真中,利用 NS-2 产生指数随机数作为发包时间间隔,则数据产生服从泊松过程,这样符合车辆运行过程中的实际情况。

3.4 仿真参数

根据图 2 所示仿真场景设置仿真参数,路边设备 RSU 天线为全向天线,发射功率为 P_t 。车载设备 OBU 全部在 RSU 的通信范围内(通过设定 P_t) N 辆车沿道路直线行驶,从距离 RSU 1 000 m 处出发,速度设定为固定值 V 。RSU 以 2 s 为周期广播信标, OBU 收到信标后确定已进入通信范围。OBU 向 RSU 发送 4 种优先级的消息,4 种优先级消息服从 $\lambda_i, i=0, 1, 2, 3$ 数据包/秒的泊松分布,离开通信范围后停止发送,参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	值	参数	值
场景大小	40 m × 1 000 m	节点移动模型	定点移动
信道类型	WirelessChannel	信道模型	Nakagami
RSU 天线高度	6 m	OBU 天线高度	1.5 m
天线类型	全向天线	频率	5.9 GHz
发送功率	2.818 38 W	接收门限	0.068 8 E-10 W
MAC 层协议	802.11 p	链路层类型	LL
SIFS	32 μ s	Slot_time	13 μ s

4 仿真结果及其分析

利用 NS-2(2.34 版本) 仿真软件建立通信模型模拟。该版本中未包含 IEEE802.11p EDCA 机制仿真模块。将软件中的 IEEE802.11e 模块修改为 IEEE802.11p EDCA 仿真模块并进行仿真。

4.1 车辆数对安全类消息吞吐量影响仿真及分析

参与通信的车辆数对 4 种优先级消息吞吐量的影响关系可利用表 2 所示仿真参数进行仿真。将每辆车发送消息的发送间隔设置为 0.04 s,每辆车速度设定为 25 m/s,车辆数 N 为 1~50,步长为 1。记录通信过程中 4 种优先级消息的吞吐量,仿真结果如图 4 所示。

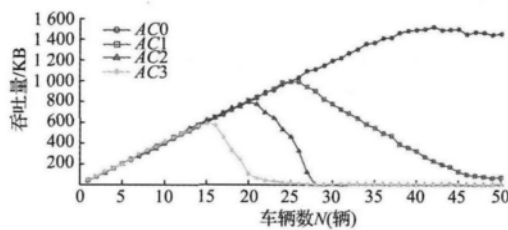


图4 不同优先级消息的车辆数与吞吐量关系

Fig. 4 The relationship between throughput and number of vehicles for the messages of different access categories

从仿真结果中可以看出,当通信车辆数 N 分别增加到 15、20、27 时, $AC3$ 、 $AC2$ 、 $AC1$ 消息吞吐量下降, $AC0$ 消息吞吐量与通信车辆数成线性关系增加。当 N 增加到 40 时, $AC0$ 消息吞吐量不再增加,且当 N 再增加,吞吐量轻微减小,达到饱和。

仿真结果表明,通信车辆数开始增加时,较高优先级并非全部占用信道,但随着车辆数增加造成网络负载较大,导致低优先级消息无法发送,信道资源被高优先级消息全部占用。故此,IEEE802.11p 协议在通信车辆数大时,优先保证高优先级消息的吞吐量,但较低优先级的消息 QoS 明显降低。

4.2 车辆发包间隔对丢包率和时延影响仿真及分析

车辆发送数据的不同间隔对 4 种优先级消息的丢包率和平均时延影响的仿真实验参数为:通信车辆数 20 辆,车辆速度 30 m/s。不断增加 4 种优先级消息发包频率即减小指数分布平均值,直到最高优先级消息明显丢包,分别计算 4 种优先级消息丢包率与平均时延,结果如图 5 和图 6 所示。

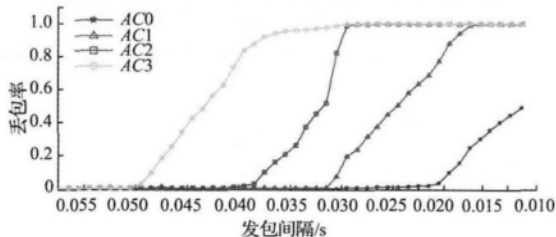


图5 不同优先级消息的发包间隔与丢包率关系

Fig. 5 The relationship between data sending interval and packet loss rate for the messages of different access categories

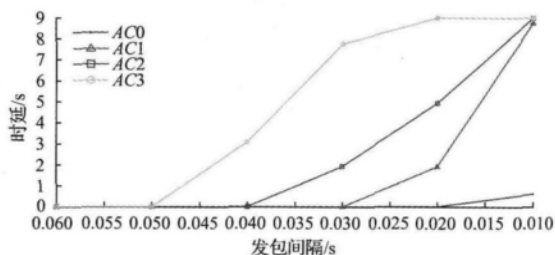


图6 不同优先级消息的发包间隔与平均时延关系

Fig. 6 The relationship between data sending interval and average delay for the messages of different access categories

图 5 可以看出在同时减小 4 种优先级消息发送数据间隔时,4 种优先级消息由低到高依次出现丢包现象,发包间隔分别为 0.047 5 s、0.037 5 s、0.029 0 s、0.017 5 s 时消息的丢包率开始明显增加。图 7 可以看出 4 种优先级消息由低到高在发包间隔分别为 0.05 s、0.04 s、0.03 s、0.02 s 时平均时延开始明显增加。

仿真结果表明:同一优先级消息随着发包间隔的减小,首先出现平均时延增加现象,随后出现丢包。说明随着发包间隔减少,消息冲突增加,导致节点重传此消息直至达到规定的重传最大次数,从而一段时间内出现平均时延明显增加而丢包率未增加现象。同时可看出在网络负载较大情况下 IEEE802.11p 协议优先保证较高优先级消息的实时性。

4.3 车速速度对投递字节数影响仿真及其分析

路边设备通信范围固定情况下,车辆移动速度直接影响车辆与路边设备的通信时间,进而影响两者交互的信息量。不同网络负载和车速对安全类消息的通信数据量影响的仿真参数为:车辆数 N 为 20,车速为 10 ~ 150 m/s,步长为 10 m/s,分别在网络负载不同的情况下进行实验。网络负载重时,发包间隔取 0.01 s;网络负载轻时,发包间隔取 0.05 s。计算 $AC0$ 消息投递字节数,仿真结果如图 7 所示。

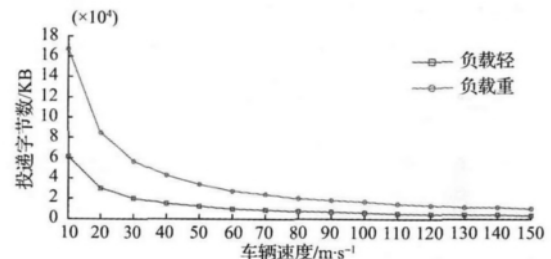


图7 不同负载下车速与投递字节数关系

Fig. 7 The relationship between vehicular speed and number of delivered bytes under different loads

图中结果表明网络负载相同情况下,车速增加时,安全类消息的投递字节数下降,且投递字节数与车辆速度成反比。两种负载强度下,车速越大,投递字节数相差越小。因此网络负载轻时,安全类消息的投递字节数能够得到有效保证。

4.4 小结

综合以上仿真结果可以看出,通信车辆数、车辆消息发送间隔、车辆速度对吞吐量、消息平均时延和丢包率、投递字节数的影响表现在:

车辆数与吞吐量的关系对每一类 AC 消息有一个优化点,在实际应用中利用此优化点实现实时传输数据的

同时提高网络容量。丢包率和平均时延都会随着车辆数发送间隔增大而增大,但优先级高的消息能够在较大发信间隔下实现低丢包率和低平均时延。车速增加时,安全类消息的投递字节数下降。车辆在 120 km/h 以下,速度增加,投递字节数减少,当速度增加到大于 120 km/h 以上时,对投机字节数变化不大。

5 结 论

利用 Nakagami 分布的信道衰落模型与泊松数据流描述发送数据流,能够获得接近真实交通条件下的 V2V、V2I 通信性能。在本文的仿真可以看出,不同接入类型的消息,在参数变化时,其网络性能出现不同的变化,IEEE802.11p MAC 层保证了较高优先级的消息在车辆数增加时,吞吐量也同步增大;车辆发信间隔增加时,能够保持低丢包率和低平均时延;但车速增加时,投递字节数都在减少。本文的仿真结果可以直接应用于分析 V2V 和 V2I 通信性能,也可以对 DSRC 高层协议分析和设计提供支撑。

下一步研究和开发工作可以从以下几方面开展:

1) 目前没有与 IEEE 802.11p 协议一致的产品,下一步可以首先在 FPGA 中实现协议,继而开发相应产品进行实际测试。

2) 在 DSRC 研究方面,可以利用本文结论对 V2V 组网性能进行分析,继而分析动态网络拓扑控制问题,RSU 的部署优化问题。

3) 在 OBU 和 RSU 开发方面,可以利用本文仿真结果修改其设计方案,实现在适应实际需求条件下提高产品的性能价格比。

参考文献

- [1] GEORGIO K, ONUR A, EYLEM E, et al. Vehicular networking: a survey and tutorial on requirements, architecture, challenges, standard and solutions [J]. IEEE communications survey & tutorial 2011, 13(4): 584-616.
- [2] KENNEY J B. Dedicated short range communication standards in the United States. Proceedings of IEEE. 2011, 99(7): 1162-1182.
- [3] MORGAN Y L. Notes on DSRC&WAVE standards suite: its architecture, design and characteristics. IEEE communications survey & tutorial. 2010, 12(4): 504-518.
- [4] 陈朝阳, 邢海涛, 杨光松, 等. 非参数似然率独立分量分析算法的 OFDM 系统载波频偏盲估计 [J]. 仪器仪表学报 2011, 32(9): 1967-1972.
CHEN ZH Y, XING H T, YANG G S, et al. Blind estimation of OFDM system carrier frequency offset using independent component analysis algorithm with nonparametric likelihood ratio [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2011, 32(9): 1967-1972.
- [5] 张本宏, 陆阳, 吴其林. 有限负载下 IEEE802.11DCF 机制时延分析 [J]. 电子测量与仪器学报 2011, 25(2): 176-180.
ZHANG B H, LU Y, WU Q L. Delay analysis for IEEE 802.11 DCF mechanism in finite load [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2011, 25(2): 176-180.
- [6] BIANCHI G, TINNIRELLO I. Analysis of priority mechanisms based on differentiated inter frame spacing in CS-MA-CA [C]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2003: 1401-1405.
- [7] 毛建兵, 毛玉明, 冷鹏, 等. 支持 QoS 的 IEEE 802.11 EDCA 性能研究 [J]. 软件学报 2010, 21(4): 750-770.
MAO J B, MAO Y M, LENG P, et al. Research of the QoS-Supporting IEEE 802.11 EDCA performance [J]. Journal of Software 2010, 21(4): 750-770.
- [8] HUI J, DEVETSIKIOTIS M. A unified model for the performance analysis of IEEE 802.11e EDCA [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(9): 1498-1510.
- [9] GALLARDO J R, CRUZ S C, MAKRAKIS D, et al. Analysis of the EDCA access mechanism for an IEEE 802.11e-compatible wireless LAN [C]. IEEE Symposium on Computers and Communication 2008: 891-898.
- [10] GALLARDO J R, MAKRAKIS D, MOUFTAH H T. Performance analysis of the EDCA medium access mechanism over the control channel of an IEEE 802.11p WAVE vehicular network [C]. IEEE International Conference on Communications 2009: 1-6.
- [11] MURRAY T, MURRAY T, COJOCARI M, et al. Measuring the performance of IEEE 802.11p Using ns-2 Simulator for Vehicular Networks [C]. Electro/ Information Technology 2008: 498-503.
- [12] GUKHOOL S B, CHERKAOUI S. IEEE 802.11p modeling in NS-2 [C]. Local Computer Networks, 2008: 622-626.
- [13] YACOB M D, BAUTISTA J E V, REZENDE GEUDES L G. On higher order statistics of the nakagami distribution [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(3): 790-793.
- [14] EISENLOHR F S, MORENO M T, MITTAG J, et al. Simulation platform for inter-vehicle communications and analysis of periodic information exchange [C]. Wireless on Demand Network Systems and Services 2007: 50-58.
- [15] VLEESCHAUWER D D, BUCHLI M J C, MOFFAERT A V, et al. End-to-end queuing delay assessment in multi-service ip networks [J]. Journal of Statistical Computation

and Simulation 2002 72(10):803-824.

- [16] LI L Y, LI CH L, YUAN P Y, Performance evaluation and simulations of routing protocols in ad hoc networks [J]. Computer Communications 2007 30(8):1890-1898.

作者简介



张和生(通讯作者),1992年和1995年于北方交通大学获得学士和硕士学位,2006年于清华大学获得博士学位,现为北京交通大学教授,博士生导师。研究领域为传感器网络与传感器融合、现场总线与控制网络。

E-mail: hszhang@bjtu.edu.cn

Zhang Hesheng(Corresponding author) received B. Sc. and M. Sc. degrees both from Northern Jiaotong University in 1992

and 1995 respectively and received Ph. D. degree from Tsinghua University in 2006. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Beijing Jiaotong University. His research interest includes sensor network and sensor fusion, field bus and control network.



张明洋,2010年于太原理工大学获得学士学位,现为北京交通大学在读硕士研究生,主要研究方向为车路通信性能分析与评价。

E-mail: 10121795@bjtu.edu.cn

Zhang Mingyang received B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2010. Now he is an M. Sc. candidate in Beijing Jiaotong University. His research interest is performance analysis and evaluation of road vehicle communication.