

# 一种结合雾计算的车辆通信网络 碰撞避免 TDMA MAC 协议

刘冰艺<sup>1</sup>, 秦 静<sup>1</sup>, 熊盛武<sup>1</sup>, 邓东晓<sup>1</sup>, 吴黎兵<sup>2</sup>, 程传奇<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学计算机科学与技术学院, 湖北武汉 430070; 2. 武汉大学国家网络安全学院, 湖北武汉 430000)

**摘 要:** 智能交通系统的产生和发展对车辆通信的介质访问控制 (Medium Access Control, MAC) 协议提出了更高的要求. 被广泛使用的基于信道竞争的载波侦听多路访问 (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) 协议存在不确定时延问题, 基于时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 的 MAC 协议可以有效解决该问题. 然而, TDMA 协议仍然存在数据传输碰撞. 为了解决数据传输碰撞问题, 本文提出一个结合雾计算的通信框架, 在此基础上提出一种集中式 TDMA MAC 协议. 该协议利用雾计算的低时延优势, 计算和协同功能预测即将发生的数据传输碰撞, 通过调度时隙以减少数据传输碰撞. 实验结果显示, 该方法有效减少了数据传输碰撞, 提高了信道资源利用率.

**关键词:** 智能交通系统; TDMA; MAC; 雾计算; 数据传输碰撞避免

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)05-0843-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20201020

## A Fog-Assisted TDMA MAC for Collision Avoidance in VCNs

LIU Bing-yi<sup>1</sup>, QIN Jing<sup>1</sup>, XIONG Sheng-wu<sup>1</sup>, DENG Dong-xiao<sup>1</sup>, WU Li-bing<sup>2</sup>, CHENG Chuan-qi<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. School of Cyber Science and Engineering · WHU, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** The emergence and development of intelligent transportation system (ITS) put forward higher requirements for the medium access control (MAC) protocol of vehicle communication. The widely used carrier sense multiple access (CSMA) protocol based on channel competition has the problem of uncertain time delay. MAC protocol based on time division multiple access (TDMA) can effectively solve this problem. However, TDMA protocols cannot eliminate data transmission collisions. This paper propose a communication framework combining fog computing. And a centralized TDMA MAC protocol is proposed, which could predict upcoming data transmission collisions by taking advantage of the low-latency of fog computing. Then, time slots could be well scheduled to reduce data transmission collisions. Experimental simulation results show that this method effectively reduces data transmission collisions, and improves channel resource utilization.

**Key words:** ITS; TDMA; MAC; fog computing; collision avoidance

## 1 引言

在日益复杂的交通情况下, 为了应对道路上潜在的交通事故等安全风险, 智能交通系统日渐成为人们研究的热点. 当前, 智能交通系统正经历着关键的技术改革, V2X (Vehicle to Everything) 作为智能交通系统的关键技术之一, 包括 V2V (Vehicle to Vehicle) 和 V2I

(Vehicle to Infrastructure) 等重要技术, 用来获取实时路况信息、周边的车辆行驶状态信息和道路上的行人状况等相关信息. V2X 支持两种可以在通信实体之间创建可靠无线链路的方法: 第一种方法被称为直接 V2X, 如 DSRC (Dedicated Short Range Communication) 技术. DSRC 是一种提供高速数据传输的无线通信技术, 可以保证通信链路的低延时和低干扰. 第二种方法则被称

收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2021-03-07; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61802288, No. 61772377, No. 91746206); 湖北省技术创新专项重大项目 (No. 2019AAA024); 重庆车辆检测研究院开放课题 (No. 20AKC18); 武汉理工大学三亚科教创新园开放基金 (No. 2020KF0055); 深圳市科技计划项目 (No. JCYJ20170818112550194)

为蜂窝 V2X 或 C-V2X。C-V2X 以 LTE (Long Term Evolution) 蜂窝网络作为基础,可以分为 LTE-V2X 和 NR-V2X 两类。目前 C-V2X 通信标准均支持 TDMA 的信道接入方式。NR-V2X 是 LTE-V2X 的持续演进,用来提供更可靠、时延更短以及数据速率更高的车联网通信服务。NR-V2X 定义的物理信道有:广播信道 PSBCH (Physical Sidelink Broadcast Channel)、控制信道 PSCCH (Physical Sidelink Control Channel)、共享信道 PSSCH (Physical Sidelink Shared Channel) 和反馈信道 PSFCH (Physical Sidelink Feedback Channel)<sup>[1]</sup>。

本文将结合 DSRC 和 C-V2X 着重研究 V2X 下的 MAC 协议。MAC 协议通常分为两类:基于信道争用的和无争用的。在常用的信道争用协议 CSMA 中,节点访问信道前,需要感知信道状态。如果信道繁忙则节点必须执行随机退避策略。这种基于争用的 MAC 协议可能导致无限的延迟。在常用的无争用协议 TDMA 中,时间被划分为在车辆节点之间同步的恒定数量时隙组成的多个帧,允许多个车辆在不同的时隙使用相同的传输频率,能够确保低时延的数据传输。但在车辆密度较高情况下,TDMA 协议仍会发生数据传输碰撞。数据传输碰撞有两种类型:访问碰撞和相遇碰撞。当多个车辆处于彼此两跳通信范围内试图获取相同的空闲时隙发送数据时,则会发生访问碰撞。当使用同一时隙的多个车辆行驶至彼此的两跳通信范围内时,发送数据所造成传输碰撞被称为相遇碰撞。

现有的研究表明,基于 TDMA 的集中式协议通过管理和调度时隙能够有效避免数据传输碰撞的发生。文献[2]提出了基于碰撞预测的 TDMA MAC 协议,在该协议中路侧单元 RSU (Road Side Unit) 统一为车辆分配时隙避免访问碰撞,并根据车辆的基本信息预测未来短时间内可能会发生的相遇碰撞,然后调整时隙的分配方案避免相遇碰撞。虽然基于 RSU 的 TDMA 协议可以有效避免传输碰撞,但仍然存在一些尚未得到解决的问题,例如基础设施的部署和维护需要巨大的代价。其次,在城市道路上,由于路边建筑物遮挡导致的信道衰减或其他车辆传输信号的干扰,会造成通信链接的频繁中断。因此,如何保证 V2V 和 V2I 通信的低时延和高可靠性是一个具有挑战性的问题。

近年来,雾计算凭借其灵活的部署方式和能够提供低延迟、高效率数据通信的优势,在车辆通信领域越来越受到人们的关注。在文献[3]中,作者初步尝试提出一种基于雾计算的数据分发架构,用于在软件定义的异构车载自组网中分发数据。在文献[4]中,作者针对车辆雾计算 VFC (Vehicular Fog Computing) 提出了两层体系结构,探讨了云、静态雾和移动雾在物联网 IoT (Internet of Things) 中处理时延敏感型任务时的协同

效应。

本文考虑了一种结合雾计算的 TDMA MAC 协议,利用公交车代替基础设施作为雾节点,用以管理周围车辆,并基于邻居车辆的基本信息(速度、位置和方向等)预测短时间内即将发生的数据传输碰撞,及时采取措施以避免数据传输碰撞。本文的主要贡献总结如下:

(1) 研究设计了一个结合雾计算的车联网通信框架。将公交车作为雾节点,收集周围车辆的信息,为数据传播和周围车辆的时隙管理提供依据。通过数据分析公交车的分布特性,验证了该框架的可行性。

(2) 提出了一种基于 TDMA 的集中式 MAC 协议,不仅可以避免访问碰撞,还可以结合雾计算的优势提前预测和避免相遇碰撞。

(3) 实验结果验证了该协议的有效性,该协议使数据传输碰撞显著减少,提高了数据包传输成功率和信道资源利用率。

## 2 相关工作

在本节中,将讨论基于 TDMA 的车联网消息传输方法和结合雾计算的 VANET (Vehicular Ad Hoc Network) 的相关工作。

近年来,许多基于 TDMA 的 MAC 协议被提出用于 VANET 的研究。文献[5]中,作者将基于用户保障 (UI) 协议序列的信道接入机制与 TDMA 相结合,提出了基于 UI-TDMA 的混合信道接入机制。该机制可自适应车流密度的动态变化,提高了高速公路场景下车辆节点的用户平均有效数据吞吐量。MoMAC<sup>[6]</sup>考虑车辆的流动性,根据道路拓扑结构和道路上的车道分布将时隙划分为不同的集合,并将不同的时隙集分配给不同车道的车辆使用。在 VeMAC<sup>[7]</sup>中,将不相交的时隙集分配给 RSU 和车辆。三个时隙集  $\{L, R, F\}$  分别给向左行驶的车辆、向右行驶的车辆和 RSU 使用,减少了由于车辆拓扑结构改变造成的相遇碰撞。还有一些使用 TDMA 的 MAC 协议可基于车辆信息预测传输碰撞。在文献[8]中,作者提出利用可变传输功率来提高消息传输成功率,减少数据传输碰撞,并通过车辆之间的协作来预先检测和避免相遇碰撞。在文献[9]中,作者提出基于 TDMA 的 PTMAC 协议,该协议利用道路上的行驶车辆作为中间车辆,预测在两跳通信范围之外使用同一时隙的车辆是否会相遇。然而,使用中间车辆将产生额外的协作开销和传输延迟。

雾计算的概念在 2013 年被提出后,基于雾计算的相关研究也越来越受到人们的关注。在文献[10]中,作者将雾计算与智能推理结合,把推理节点分配到环境内配置的智能节点中协同推理,有效减轻了网关负载。在文献[11]中,雾节点共享多个交叉路口的交通流量

状况,从而协调不同交叉路口的交通灯,使各个交叉路口的交通效率得以提高,整个交通网络的交通流量得到缓解.在文献[12]中,作者提出了一种利用雾节点作为服务器来减少访问延迟和阻塞的紧急信息传输方案.文献[13]中提出了一种用于在 VANET 环境中部署雾计算的通用架构,该架构可以在极短的时间内提供可靠的信息传输.虽然上述基于 TDMA 的 MAC 协议和面向雾的 VANET 研究对于提高通信效率非常重要,但很少有研究将这两个结合起来并利用雾计算的优势进行 TDMA 通信的时隙管理.本文提出一种结合雾计算的 TDMA MAC 协议,该协议利用公交车作为雾节点来预测数据传输碰撞,并通过雾节点协作来合理分配时隙,从而避免数据传输碰撞.

### 3 系统模型

#### 3.1 结合雾计算的网路结构

图 1 显示了结合雾计算的车联网无线通信网络.它由三部分组成:第一部分为普通车辆节点,每个普通车辆配备 DSRC 通信模块,负责收集交通信息并广播给公交车.第二部分为公交车节点,每个公交车配备两个无线通信模块:DSRC 通信模块和 LTE 通信模块.公交车和普通车辆之间使用 DSRC 模块通信,公交车之间通过 LTE 空口模块直接通信.这些装备 LTE 模块的公交车作为雾节点收集周边车辆的基本信息并负责管理周围邻居车辆.最后一部分是云端,它可以提供全局的交通信息.每辆车都配备了全球定位系统(GPS),并以同样的时间间隔广播自身信息,如位置、速度和行驶方向等.

消息传输模式如下:首先,雾节点收集邻近普通车辆广播的基本信息并构建邻居表.接下来,雾节点交换它们的邻居表.同时,雾节点还应该向云端报告自己的基本信息,如地理坐标、访问时延、带宽等.然后,云端将信息发送到雾节点,雾节点将信息分发给邻居车辆.

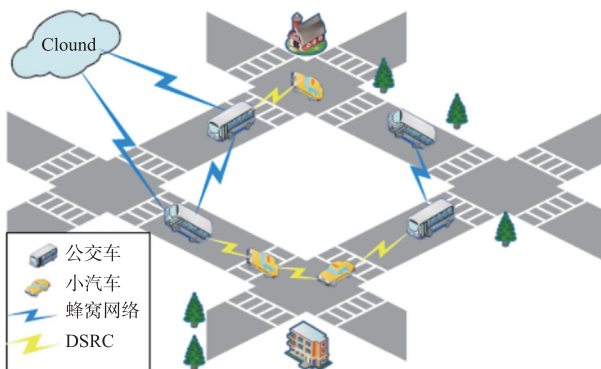


图1 网络架构

#### 3.2 市内公交车分布特性

为了获取单条道路上的公交车分布情况,在 Google Earth 卫星图像中选取公交车站点覆盖率达到 80% 的城市武汉,并对武汉市内不同区域的五个主干道进行公交车标注并进行数据分析.公交车数据分析如图 2 所示,从图中可以看出,在随机选取的五个主干道上 95% 的相邻公交车之间的距离小于 300m.且基于公交车的车辆网络可以覆盖大部分城市区域,能满足公交车作为雾节点管理普通车辆的需求<sup>[14]</sup>.在文献[15]的工作中,作者从理论上验证了两辆公交车之间的距离小于车辆的通信范围.文献[16]中通过实验证明较高的车辆可以显著增加车辆的有效通信范围,实验数据表明高度大于等于 3.35m 的车辆在通信范围为 400m 时数据包传输成功率仍大于 90%,通信范围为 300m 时数据包传输成功率约为 98%.由于公交车车体较高,信道衰减因此被削弱,文献[16]的实验结果也表明公交车之间的通信链路更稳定.

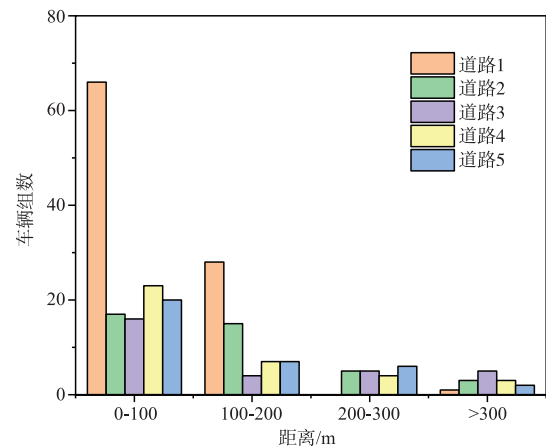


图2 公交车距离分布图

#### 3.3 问题分析

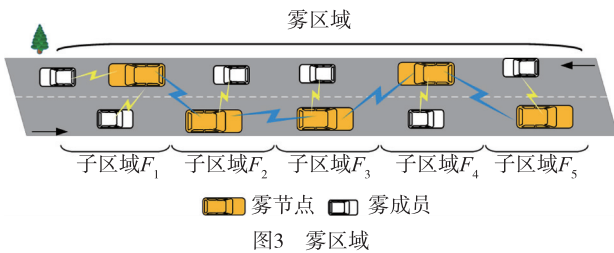
为了有效管理和充分利用信道资源,公交车被作为雾节点并形成雾区域,保证周边地区的消息覆盖.道路划分为等长的多个雾区域,再将雾区域划分为等长的多个子区域,一个子区域的长度设置为车辆的通信距离  $R$ .每个子区域都有一个雾节点作为管理者对普通车辆进行管理.如图 3 所示,雾区域有 5 个标记为  $F_1 \sim F_5$  的子区域,雾区域内的普通车辆称为雾成员车辆(Fog Member Vehicle, FMV),公交车称为雾节点车辆(Fog Node, FN).

本文为时隙调度算法建立了一系列规则:(1)为避免数据传输碰撞,在连续三个子区域里面的车辆分配不同的时隙;(2)为了最大限度提高信道利用率,当两车之间的距离大于两个子区域的长度时可以使用相同的时隙;(3)为避免数据传输碰撞,分配给两跳范围车

辆的时隙数不能超过时隙总数量. 本文目标是最大化每个 FMV 的数据包成功接收率  $R(v_i)$  (不发生碰撞), 提高信道利用率, 形式化如下, 其中  $v_i$  表示车辆  $i$ ,  $F(v_i)$  的值为 1 时表示车辆  $v_i$  获取到了时隙.

$$\max \sum_{i=1}^n F(v_i) \times R(v_i) \quad (1)$$

本文采用模拟退火算法解决式(1)中的问题, 如算法 1 所示. 模拟退火算法在其搜索过程中引入随机因素, 以一定的概率  $p$  接受比当前解差的解. 因此, 它可以跳出当前的局部最优解并逼近全局最优解, 并且具有很好的鲁棒性. 雾节点为车辆节点分配时隙, 设定当前车辆集合  $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{n-1}, v_n\}$ , 时隙分配状态为  $t_{state} = \{F(v_1) = 1, F(v_2) = 0, F(v_3) = 1, \dots, F(v_{n-1}) = 0, F(v_n) = 1\}$ . 将当前车辆集合时隙分配状态  $t_{state}$  设为初始解, 初始化目标函数值式(1)为  $f(t_{state})$ , 并引入模拟退火算法求解最优解.



**算法 1 模拟退火算法求最优解**

输入: 初始解  $t_{state}$ , 初始化目标函数  $f(t_{state})$ , 初始化  $T = 1000$ ,  $\alpha = 0.995$ , 迭代次数 = 1000

输出: 最优解

- 1: 随机搜索产生新解  $t_{state\_new}$ , 计算目标函数  $f(t_{state\_new})$
- 2: 计算  $temp = f(t_{state\_new}) - f(t_{state})$
- 3: if  $temp > 0$  then
- 4:     接受新的解  $t_{state\_new}$
- 5: else
- 6:     计算可能性  $p$ , 其中  

$$p = \exp(f(t_{state\_new}) - f(t_{state})) / T$$

$$T = T * \alpha$$
- 7:     if  $p > 1$  then
- 8:         接受新解  $t_{state\_new}$
- 9:     else if 达到迭代次数  $\|f(t_{state})\| = n$  then
- 10:         返回最优解
- 11:         else
- 12:             跳转至 1
- 13:         end if
- 14:     end if
- 15: end if

**4 协议设计**

集中式 TDMA MAC 协议通过结合雾计算的网路架

构解决数据包传输碰撞问题. TDMA MAC 协议分三个步骤实现: FN 首先根据 FMV 的基本信息检测车辆是否切换子区域. 然后根据实时交通信息对 FMV 间的数据传输进行碰撞预测. 最后为即将发生数据传输碰撞的车辆进行时隙调度.

**4.1 子区域切换检测**

**4.1.1 时隙使用表**

为了在数据传输碰撞发生前检测到碰撞, 需要识别出任何在两跳通信范围之外但在三跳通信范围内且使用同一时隙的车辆. 因为两辆四跳通信范围的车辆仍然距离较远, 在一段时间是安全的<sup>[9]</sup>. 本文中, 雾节点通过协作获取相邻三个子区域内的车辆信息. 例如图中位于  $F_4$  子区域的公交车不仅需要和其他雾节点协作获取  $F_1, F_2, F_3$  子区域的车辆信息, 还需要协作获取  $F_5, F_6, F_7$  子区域的车辆信息. 因此, 为雾节点定义了一个时隙使用表, 用于存储和查询相邻车辆使用的时隙信息. 如图 4 所示, 将时隙使用表划分为多个小模块, 每个模块包含时隙号、标志位 Flag、使用该时隙的车辆信息和优先级. 具体来说, 标志位 Flag 的取值分为以下三种情况: (1)  $Flag = 0$ , 表示当前时隙是空闲的, 没有车辆使用, “车辆信息” 部分为空; (2)  $Flag = 1$ , 表示当前时隙只有一辆车使用, “车辆信息” 部分存储使用该时隙的车辆信息; (3)  $Flag = 2$ , 表示当前时隙被多辆车同时使用, “车辆信息” 部分存储所有使用该时隙的车辆信息. 在时隙使用表中, 标志位 Flag 可以使雾节点快速检测到潜在的数据传输碰撞, 并且对后续传输碰撞的避免起着至关重要的作用. 对于优先级字段, 时隙在不同的使用状态下具有不同的优先级, 这个问题将在 4.3 小节中详细讨论.

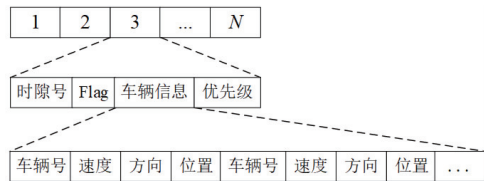


图4 时隙使用表

**4.1.2 子区域边缘**

虽然规定连续三个子区域内的车辆不使用同一个时隙, 但切换区域后它们可能与其他区域内的车辆节点发生数据传输碰撞. 为此, 定义子区域边缘的概念. 当 FMV 与所在子区域的边界距离小于  $x$  时, 称该车辆处于子区域边缘, 子区域边缘值  $x$  的计算方法如下:

$$x = V_{max} \times T \quad (2)$$

由于车辆速度的差异, 不同 FMV 子区域边缘值  $x$  不同, 为了方便计算子区域边缘值  $x$ , 将 FMV 的速度划分为多个区间.  $V_{max}$  为各速度区间的最大值,  $T$  代表毫秒

级的极小一段时间.一旦存在 FMV 进入子区域边缘,邻近 FN 检查时隙使用表判断是否有另一个 FMV 共享同一时隙,这个相邻 FN 称为 *coorFN*.若进入子区域边缘的 FMV 与另一个 FMV 共享一个时隙,则进入子区域边缘的 FMV 为危险车辆,该危险车辆与另一个 FMV 存在潜在数据传输碰撞.

### 4.2 潜在数据传输碰撞预测

当 *coorFN* 发现进入子区域边缘的 FMV ( $F_4$  子区域的车辆)与其他  $V_1, V_2, V_3$  和  $V_4$  共享一个时隙,如图 5 所示,*coorFN* 首先获得 FMV 的行驶方向、速度和位置信息,然后根据这些信息分析潜在的数据传输碰撞,具体可以划分为以下四个情形.

情形 1:两个 FMV (危险车辆和  $V_1$ ) 沿相反方向运动,它们之间距离较远,可以忽略它们之间的潜在碰撞.

情形 2:两个 FMV (危险车辆和  $V_2$ ) 相向而行,在危险车辆或  $V_2$  下一次切换子区域之前,它们行驶至两跳通信范围内,因此必须避免这种潜在的数据传输碰撞.

情形 3:两个 FMV (危险车辆和  $V_3$ ) 行驶方向相同,因为危险车辆在  $V_3$  前面,所以它们之间的潜在数据传输碰撞可以忽略,且危险车辆切换子区域后与  $V_3$  之间的距离仍然大于三个子区域的长度.

情形 4:两个 FMV 在同一方向行驶,后方的 FMV 切换到另一个子区域后,两个 FMV (危险车辆和  $V_4$ ) 距离更近,这需要进一步讨论.如果危险车辆的速度小于  $V_4$  的速度,可以忽略这种潜在的数据传输碰撞.危险车辆切换子区域后,即使和  $V_4$  的距离小于三个子区域的长度,但  $V_4$  的速度大于危险车辆的速度,这种情况是暂时的,也可以忽略.如果  $V_4$  在危险车辆后面,且有一个更快的速度,  $V_4$  有可能追上危险车辆.此时,要根据 FMV 的速度和位置信息进一步判断两个 FMV 是否会发生数据传输碰撞.假设  $A$  位于  $B$  的后面,首先,*coorFN* 需要从邻近的 FN 获得  $B$  的最新信息.然后 *coorFN* 根据车辆信息进行预测,两个车辆行驶一段时间后距离减小到  $2L$ ,则会发生潜在的数据传输碰撞,其中  $L$  表示子区域的长度.用公式表示为

$$\begin{cases} (V_a - V_b) \times T \geq D_{AB} - 2L, (\text{if } V_b < V_a) \\ T = \min \{ T_f, T_b \} \end{cases} \quad (3)$$

$V_a$  和  $V_b$  分别表示  $A$  和  $B$  的速度.  $T_b$  为  $B$  切换到下一个子区域或离开雾区域所需的时间,  $D_{AB}$  代表  $A$  与  $B$  的当前距离.

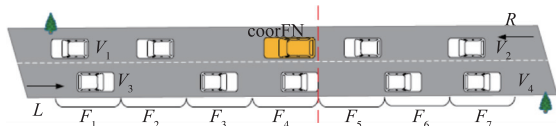


图5 潜在数据传输碰撞预测

前距离.  $T_f$  表示危险车辆以较高成功率切换时隙所需的时间.  $T$  是一段很短的时间,所以  $V_a$  和  $V_b$  在  $T$  内被视为一个常数值.如果  $A$  和  $B$  满足式 (3),则必须避免这种潜在数据传输碰撞,反之,可以忽略.

### 4.3 潜在数据传输碰撞避免

预测到潜在的数据传输碰撞即将发生时, *coorFN* 通过为共享同一时隙的车辆切换新时隙来避免数据传输碰撞.一个 FMV 位于某个子区域的边缘并成为了一个危险车辆,则危险车辆所在子区域的 FN 负责潜在的碰撞预测.这个 *coorFN* 单跳通信范围内的危险车辆被选做切换时隙的目标车辆, *coorFN* 可以直接和该车辆通信无需进行消息转发.

*coorFN* 首先更新时隙使用表,根据时隙使用状态标记该时隙的优先级.我们将时隙划分为 4 个优先级级别 1、2、3、4,其中 4 的优先级最高.确定时隙优先级的规则如下.

(1) 优先级为 4:  $\text{Flag} = 0$ ,即当前时隙空闲,当前时隙的优先级设置为 4.

(2) 优先级为 3:  $\text{Flag} = 1$ ,使用当前时隙的车辆子区域和危险车辆将要加入的子区域被两个子区域分隔开.设定车辆间的四种位置和速度关系如下. (a) 车辆位于危险车辆前方且速度更大; (b) 车辆位于危险车辆后面且速度更小; (c) 车辆和 *coorFN* 在同一方向行驶,且车辆在 *coorFN* 前面; (d) 车辆和 *coorFN* 行驶方向不同,当前车辆在 *coorFN* 后面.使用当前时隙的车辆和危险车辆行驶在同一个方向且它们满足关系 (a) 或者关系 (b) 时,或者使用当前时隙的车辆和危险车辆行驶方向相反且满足关系 (c) 或者关系 (d),当前时隙的优先级均设置为 3.

(3) 优先级为 2:  $\text{Flag} = 1$ ,使用当前时隙的车辆子区域和危险车辆将要加入的子区域被两个子区域分隔开.车辆与危险车辆沿同一方向行驶,但不能满足优先级为 3 中 (a) 或 (b) 条件,当前时隙的优先级设置为 2.

(4) 优先级为 1: 对应两种不同的时隙使用情况. 第一种情况,  $\text{Flag} = 1$ ,使用当前时隙的车辆子区域和危险车辆将要加入的子区域被两个子区域隔开.车辆与危险车辆沿相反方向行驶,但不满足优先级为 3 中的 (c) 或 (d) 条件. 第二种情况,  $\text{Flag} = 2$ ,使用当前时隙的两个车辆子区域和危险车辆将要加入的子区域分别被两个子区域隔开.在这两种情况下,当前时隙的优先级均设置为 1.

没有分配优先级的时隙不能使用.为了提高可用时隙的搜索效率,在优先级标记过程中,若 *coorFN* 遇到了优先级最高的时隙,则该时隙将作为新的时隙用于切换,标记过程停止.若一半的时隙被标注,没有优先级

为 4 的时隙, *coorFN* 选择优先级为 3 的时隙作为切换的时隙. 否则, *coorFN* 在标记完所有的时隙后, 切换到优先级最高的时隙. *coorFN* 确定要切换的时隙后, 将时隙 ID 和使用这个时隙的车辆信息广播给其他雾节点, 其他雾节点更新时隙使用表.

## 5 仿真与结果

### 5.1 实验设置

本文仿真实验使用了 Veins、OMNeT++、SUMO 等仿真软件. 交通场景设置为双向的城市道路, 每个行驶方向上有两个车道. 实验仿真参数如表 1 所示, 车辆通信范围设定为 300m, 车辆之间的通信链路稳定. 本文选择 A-VeMAC<sup>[17]</sup> 作为对比, 对提出的方案进行性能分析. A-VeMAC 将帧划分不相等的时隙集合, 集合内的时隙数量可以随车流量自适应地变化. 实验分别评估对比本文方法和 A-VeMAC 的数据传输碰撞次数、数据包传输速率 (Package Transmission Rate, PTR) 和通信开销. 在本文提出的结合雾计算的 TDMA 协议中, 雾节点只对即将驶离子区域的车辆进行子区域边缘的距离计算, 因此本文的计算开销可以忽略不计. 数据传输碰撞次数为相遇碰撞的次数和访问碰撞次数之和. 数据包传输率定义为数据包成功传输次数占总传输次数的比率.

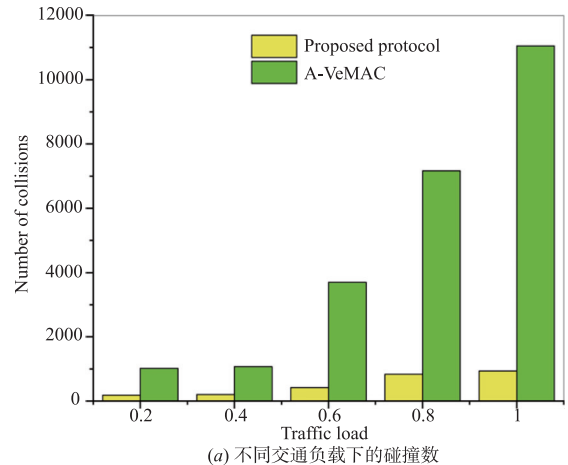
表 1 实验参数设置

参数	数值
道路长度	2000m
车道数	4
通信范围	300m
帧长	100ms
交通负载	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
时隙/帧	70, 75, 80, 85, 90
仿真时间	100s

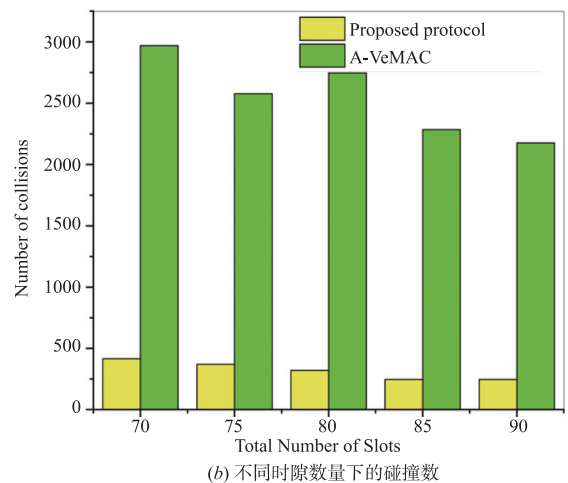
### 5.2 性能评估

在图 6 中引入 A-VeMAC 中定义的一个参数交通负载 (Traffic load). 图 6 展示了不同交通负载 (0.2、0.4、0.6、0.8、1.0) 和不同时隙数量下 (70、75、80、85、90) 的数据传输碰撞数, 从图中可以看出, 不论在何种情况下, 本文方法的数据传输碰撞数都远远小于 A-VeMAC 中的碰撞数. 因为本文提出的方法中, 雾节点及时预测数据传输碰撞并切换时隙避免碰撞.

图 7 分别显示了不同交通负载和不同时隙数量下的包传输成功率, 结果表明本文的方法有更高的包传



(a) 不同交通负载下的碰撞数



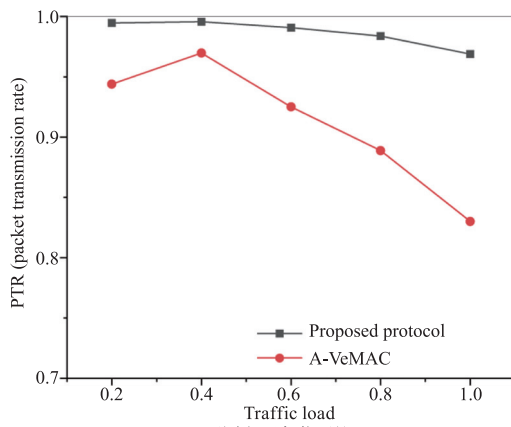
(b) 不同时隙数量下的碰撞数

图 6 数据传输碰撞总数

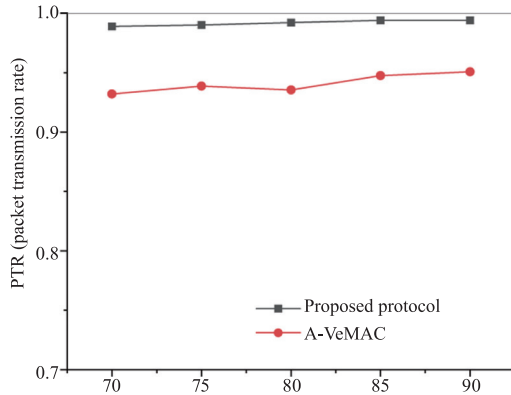
输成功率. 图 8 比较了不同交通负载下的通信开销. 本文中协议的通信开销可以用公式表示为

$$O = \frac{P_m + P_{retr}}{P_{total}} \quad (4)$$

$P_m$  表示用于雾节点之间通信和维护的数据包数量,  $P_{retr}$  表示数据包发生传输碰撞之后再次重传的数据包数量,  $P_{total}$  表示传输数据包的总数量. 实验结果如图 8 所示, 随着交通负载的增大, 本文方法的通信开销随着交通负载的增大呈平滑缓慢增加的趋势. 虽然 A-VeMAC 的通信开销在交通负载较低时小于本文方法的通信开销, 但 A-VeMAC 的通信开销在交通负载超过 0.6 之后迅速增加. 由于在交通负载较低时, 车辆密度较小, 本文方法中用于雾节点维护和通信的数据包占比较高, 而 A-VeMAC 在车辆密度较小的情况下发生数据传输碰撞的概率小, 所以会出现通信负载小于本文方法的情况. 但是随着交通负载的增大, 本文方法在通信开销方面的优势逐渐显现出来, 本文方法的通信开销不会随着交通负载的变大而剧增.



(a) 不同交通负载下的PTR



(b) 不同时隙数量下的PTR

图7 数据包传输率PTR

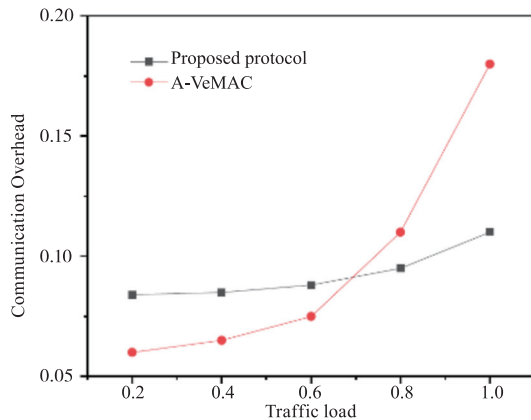


图8 不同交通负载下的通信开销

## 6 结论

本文提出了一种结合雾计算的 TDMA MAC 协议,利用雾计算的优势有效避免数据包传输碰撞.在本文的协议中,公交车充当雾节点收集局部和全局信息.雾节点检查时隙使用表判断共享时隙的雾成员车辆是否存在潜在的数据传输碰撞.为了避免数据包传输碰撞,雾节点为雾成员车辆切换优先级较高的可用时隙避免碰撞.实验结果表明,提出的方案有效避免了数据包传

输碰撞,显著提高了包传输成功率.在未来工作中,将采用短时交通流预测模型,针对不同的交通流预测结果和公交车分布动态调整雾节点网络架构,对数据传输碰撞避免协议展开进一步研究.

## 参考文献

- [1] 任晓涛,马腾,刘天心,等. 5G NR Rel-16 V2X 车联网标准[J]. 移动通信,2020,44(11):33-41.  
Ren X T, Ma T, Liu T X, et al. Introduction to Internet of vehicles standard of 5G NR rel-16 V2X[J]. Mobile Communications, 2020, 44(11):33-41. (in Chinese)
- [2] Lin L Z, Hu B J, Wei Z H, et al. A collision-predicted TDMA MAC protocol in centralized vehicular network[A]. 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT). [C]. Chengdu, China: IEEE, 2017. 593-597.
- [3] Liu K, Xiao K, Dai P, et al. Fog computing empowered data dissemination in software defined heterogeneous VANETs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, PP(99):1-1.
- [4] Liu C H, Liu K, Guo S T, et al. Adaptive offloading for time-critical tasks in heterogeneous Internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9):7999-8011.
- [5] 徐哲鑫,蔡苓玲,郑丽丽,等. VANET 中基于协议序列及 TDMA 的混合信道接入机制[J]. 电子学报, 2017, 45(6):1408-1414.  
Xu Z X, Cai L L, Zheng L L, et al. A hybrid channel access mechanism based on protocol sequences and TDMA for VANET[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(6):1408-1414. (in Chinese)
- [6] Lyu F, Zhu H Z, Zhou H B, et al. MoMAC: mobility-aware and collision-avoidance MAC for safety applications in VANETs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11):10590-10602.
- [7] Omar H A, Zhuang W H, Li L. VeMAC: A TDMA-based MAC protocol for reliable broadcast in VANETs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(9):1724-1736.
- [8] Li S J, Liu Y H, Wang J. An efficient broadcast scheme for safety-related services in distributed TDMA-based VANETs[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(8):1432-1436.
- [9] Jiang X X, Du D H C. PTMAC: A prediction-based TDMA MAC protocol for reducing packet collisions in VANET[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(11):9209-9223.
- [10] 汪成亮,黄心田. 智能环境下基于雾计算的推理节点优化分配研究[J]. 电子学报, 2020, 48(1):35-43.

- Wang C L, Huang X T. Study on optimal allocation of inference nodes for fog computing in smart environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48 (1): 35 – 43. (in Chinese)
- [11] Wu Q, He F F, Fan X M. The intelligent control system of traffic light based on fog computing [J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 27 (6): 1265 – 1270.
- [12] Ullah A, Yaqoob S, Imran M, et al. Emergency message dissemination schemes based on congestion avoidance in VANET and vehicular FoG computing [J]. IEEE Access, 2019, 7: 1570 – 1585.
- [13] Pereira J, Ricardo L, Luís M, et al. Assessing the reliability of fog computing for smart mobility applications in VANETs [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 94: 317 – 332.
- [14] Zeng L Q, Zhang J J, Han Q W, et al. A bus-oriented mobile FCNs infrastructure and intra-cluster BSM transmission mechanism [J]. IEEE Access, 2019, 7: 24308 – 24320.
- [15] Liu B Y, Jia D Y, Wang J P, et al. Cloud-assisted safety message dissemination in VANET—cellular heterogeneous wireless network [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11 (1): 128 – 139.
- [16] Boban M T, Meireles R, Barros J, et al. TVR—tall vehicle relaying in vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13 (5): 1118 – 1131.
- [17] Chen P, Zheng J, Wu Y Y. A-VeMAC: An adaptive vehicular MAC protocol for vehicular ad hoc networks [A]. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Paris, FR: IEEE, 2017. 1 – 6.

### 作者简介



**刘冰艺** 男, 1990 年生. 现为武汉理工大学计算机科学与技术学院副教授, 研究兴趣包括智能网联汽车、无线传感器网络、智能交通和无人驾驶等.  
E-mail: byliu@whut.edu.cn



**邓东晓** 男, 1995 年 9 月生. 现为武汉理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生, 研究兴趣为智能网联汽车、智能交通.  
E-mail: dx deng@whut.edu.cn



**秦静** 女, 1996 年 10 月生. 现为武汉理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生, 研究兴趣为智能网联汽车、雾计算.  
E-mail: qinjing@whut.edu.cn



**吴黎兵** 男, 1972 年生. 现为武汉大学国家网络安全学院教授, 主要研究兴趣包括无线传感器网络、网络管理和分布式计算.  
E-mail: wu@whu.edu.cn



**熊盛武** 男, 1966 年 11 月生. 现为武汉理工大学计算机科学与技术学院教授, 主要研究兴趣包括智能网联汽车、机器学习与数据挖掘等.  
E-mail: xiongsw@whut.edu.cn



**程传奇** 男, 1998 年生. 现为武汉理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生, 研究兴趣为车联网、强化学习、网络通信.  
E-mail: wut\_ccq@whut.edu.cn