

• 成电青年学者·信息与通信工程专栏 •



5G 蜂窝网辅助的车载自组网数据 传输机制与路由算法

李 波, 刘 雪, 冯菁翠, 孙 罡*, 虞红芳

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室 成都 611731)

【摘要】针对车联网中不同种类数据的传输需求, 该文提出一种 V2V 和 5G 蜂窝网络结合的混合消息传输机制及路由算法。将车联网中的数据包分为时延敏感型和非敏感型两种类型, 利用 5G 蜂窝网低时延、高可靠性、网络覆盖范围广的优势, 高效传输时延敏感型的数据消息。由于自组网比高性能的 5G 蜂窝网具有更低的成本, 因此针对时延非敏感型数据包设计了一种基于公交车辅助的路由算法。为降低通信链路断开机率, 提出邻居表的更新时间预测机制, 通过大量的仿真实验验证了该方案的有效性。实验结果表明, 该方案可以提高数据包的传输成功率, 降低端到端传输时延, 减小端到端的传输跳数。

关键词 5G; 公交车; 混合传输; 路由; 车联网

中图分类号 TN915.9 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2021046

V2V Data Transmission Mechanism and Routing Algorithm in 5G Cellular Network-assisted Vehicular Ad-hoc Networks

LI Bo, LIU Xue, FENG Jing-cui, SUN Gang*, and YU Hong-fang

(Key Lab of Optical Fiber Sensing and Communications, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract For the different kinds of packet transmission requirements in vehicular ad-hoc network (VANET), this paper proposes a hybrid message transmission mechanism and routing algorithm combining vehicle to vehicle (V2V) and 5G cellular communications. The packets in VANETs are divided into two types: delay sensitive and delay insensitive. The delay-sensitive packets can be transmitted efficiently taking the advantages of 5G cellular network with low delay, high reliability and wide network coverage. Since the ad-hoc network has a lower cost than the 5G cellular network, a routing algorithm based on bus assistance is designed for delay insensitive data packets. In order to reduce the probability of communication link disconnection, a prediction mechanism for the update-time of the neighbor table is proposed. The effectiveness of the scheme is verified by a large number of simulation experiments. Simulation results show that the proposed routing scheme can improve the delivery ratio of packets, reduce the end-to-end delay and decrease end-to-end transmission hops.

Key words 5G; bus; hybrid transmission; routing; VANETs

近几十年, 随着无线网络技术的飞速发展和交通需求的不断增长, 智能交通系统 (intelligent transport system, ITS) 得到迅速发展。车载自组网 (vehicular ad-hoc network, VANET) 作为 ITS 的重要技术之一, 成为了一个重要的研究课题^[1]。目前已广泛应用于交通管理、紧急信息广播及移动娱乐等多种场景, 以此来提高道路交通安全、缓解交通拥堵、提供娱乐服务和互联网接入^[2]。然而, 由于 VANET 中节点移动性高, 节点分布不均匀、

运动轨迹受限, 导致车载网络拓扑结构快速变化和链路频繁断开, 如何提高 VANET 的路由性能是一项重要的挑战^[3-4]。

VANET 中有两种基本的通信类型, 即车辆与车辆 (vehicle to vehicle, V2V) 之间通信和车辆与基础设施 (vehicle to infrastructure, V2I) 之间通信^[5]。基于专用短程通信 (dedicated-short-range communication, DSRC) 技术的 IEEE802.11p 被提出作为 V2V 和 V2I 的通信标准^[6-7]。在以车辆为拓扑

收稿日期: 2021-02-11; 修回日期: 2021-03-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB1802800)

作者简介: 李波 (1986-), 男, 博士生, 主要从事通信网络协议和算法方面的研究。

通信作者: 孙罡, Email: gangsun@uestc.edu.cn

节点的移动自组织网络中, 每一个车辆节点都被视为一个单独的移动通信载体, 进行数据包中继转发^[8]。但由于网络拓扑结构的快速变化, 以及 DSRC 有限的传输范围和配套设施的缺乏, 导致 DSRC 无法达到 V2V 通信的某些需求。第五代移动通信 (5th generation mobile networks, 5G) 拥有连续广域覆盖、超高速移动、超高流量密度、超低能耗等特点, 将其应用到车联网中, 能够在一定程度上优化车联网体系架构, 解决当前车联网中面临的问题与挑战。

车联网中的数据可以分为两种类型, 即普通数据和紧急数据^[2]。其中, 紧急数据包括交通事故、道路损坏、救护车之间传输的文本和视频信息, 必须以最小的延迟传送到目的点^[9], 这类紧急消息的传输对时延及可靠性的要求极为苛刻。另一种普通数据, 诸如商业广告宣传、视频新闻的获取、数据信息备份, 这类消息旨在为节点提供数据信息服务, 对传输时延不敏感, 针对此类普通数据消息, 大部分研究采用存储转发的方式进行传输^[10]。

现有研究将信息传输策略按照传输介质分为基于 VANET 方案和集成蜂窝网 VANET 异构方案两类^[11]。文献 [12] 提出云辅助的下行安全信息传输框架, 公交车配备蜂窝网接口和 VANET 接口, 云在收集大量的交通流量信息后, 选择公交车作为网关, 公交车收到来自蜂窝网的信息后进一步通过 V2V 通信, 将信息传输到附近的车辆。同时为了减少广播带来的数据包冗余和丢失, 设计了一种并行多点安全信息传播方法。该方案能够高效、快速传输信息, 但是也在一定程度上增加了通信成本。文献 [13] 提出一种混合方案, 该方案将带有 5G 蜂窝网的软件定义 VANET 控制平面用于南向通信, 为平衡自组网络的传输时延和蜂窝网的传输成本, 设计了一种带宽补偿策略平衡南向通信的成本和性能, 将带宽补偿问题构造为两阶 Stackelberg 博弈, 并对博弈的均衡进行了分析。

一些研究将车联网中的数据赋予不同的优先级。文献 [14] 提出一种新型蛛网紧急消息传输机制, 使用动态多优先级队列管理方法, 首先处理高优先级的紧急消息, 来降低紧急消息的传输延迟。文献 [15] 将车辆的地理区域划分为网格, 通过强化学习得到关于网格的 Q 值表, 然后基于 Q 值表选取下一跳中继车辆, 时延不敏感的数据包则采用存储转发策略进行传输。

一些研究工作提出了以公交车为主要通信骨干网络的传输框架。文献 [16] 提出基于社区的公交车系统, 构建了基于社区的公交骨干网, 并在此基础上提出公交骨干网上的路由方案。文献 [17] 提出一种名为 Vela 的地理广播路由机制, 根据公交车行驶的历史轨迹, 建立了公交车行驶的时间和空间相遇模型, 利用公交车间的时空关系增加转发数据包的机率。

本文主要基于 5G 和 VANET 的异构网络框架, 最大化车联网的路由传输性能, 提出针对不同种类数据包的路由转发策略。

1 VANET 混合消息传输机制

车载自组织网是由位置和行驶轨迹时刻变化的车辆节点组成的, 其中每一个车辆节点既是消息的产生节点, 又是消息路由转发的中继节点。每一辆车都装有高精度传感器和车载单元 (on board unit, OBU), 用于车辆之间的通信和信息采集^[18]。

DSRC 是一种专门用于车-车以及车-路之间的短距离无线通信技术^[19-20]。在进行数据包传输时, 车辆节点之间可以在 DSRC 所支持的通信范围内进行直接通信。对于通信范围外的车辆节点, 可以通过其他节点的中继逐跳传输, 直至到达目的节点。由于车辆节点的行驶路线受道路结构的约束, 行驶轨迹和速度受驾驶员习惯以及主观意识的影响, 导致车辆节点的位置时刻变化, 进而使整个网络拓扑结构动态改变, 导致数据包在传输过程中, 会因已经建立好的通信链路断开而路由失败, 对长距离传输的数据包影响尤为显著^[21-22]。

图 1 为本文提出的城市场景下混合消息传输网络架构。针对此架构作出如下假设:

- 1) 5G 蜂窝基站覆盖城市的每一条街道, 基站之间相互连接且存储整个城市道路上的信息;
- 2) 所有车辆都配备全球定位系统 (global positioning system, GPS), 每辆车可以通过 GPS 获取到自己以及周围车辆的位置信息、速度信息, 这些信息有助于在转发数据包时, 做出路由决策, 选取最佳下一跳;
- 3) 道路上行驶的车辆包括普通车辆和有固定行驶轨迹以及固定行驶时刻表的公交车, 每一辆车都配备蜂窝接口和 VANET 接口, 车辆节点之间可以通过 VANET 接口进行通信, 车辆节点和 5G 基站之间可以通过蜂窝接口进行通信;
- 4) 下一跳路由选择时, 普通车辆节点的优先级

高于公交车节点。

由于 5G 蜂窝网具有低传输时延, 因而适用于时延敏感型数据包的传输。如图 1 所示, 道路上高速行驶的黑色车辆, 驾驶员突然身体不适, 无法继续正常驾驶, 需要紧急救援, 此时携带紧急消息的车辆立即向距离自己最近的 5G 蜂窝基站上传紧急数据包, 基站接收到数据包之后, 获取数据包的目的点信息, 即图中所示医院位置。如果该目的点在其覆盖范围内, 则直接将数据包传送到目的点, 如果该目的点不在其覆盖范围内, 则将数据包交付给其他基站进行传输。

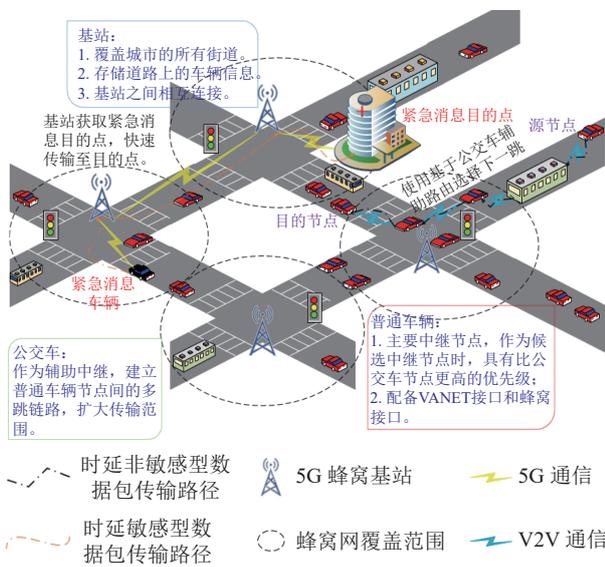


图 1 混合消息传输网络架构

5G 蜂窝网由于其通信成本高不适用传输普通数据包。针对普通数据包的传输, 采用基于公交车辅助的路由策略。图 1 所示为该策略在转发数据包时的一种传输场景。当源节点有数据包要发送到目的节点时, 由于周围的一跳邻居范围内没有普通的车辆节点, 为扩大传输范围, 选择公交车节点作为中继节点, 然后选取普通车辆作为中继节点, 逐跳进行转发, 直到传输至目的节点为止。

2 数据包路由算法设计

2.1 算法流程图

图 2 为路由算法的执行流程图。当有数据包需要传输时, 首先确定数据包的类型, 如果是时延敏感型数据包, 则通过 5G 蜂窝网高速可靠传输, 如果是时延非敏感的普通类型数据包, 则使用基于公交车辅助的路由策略中继转发。

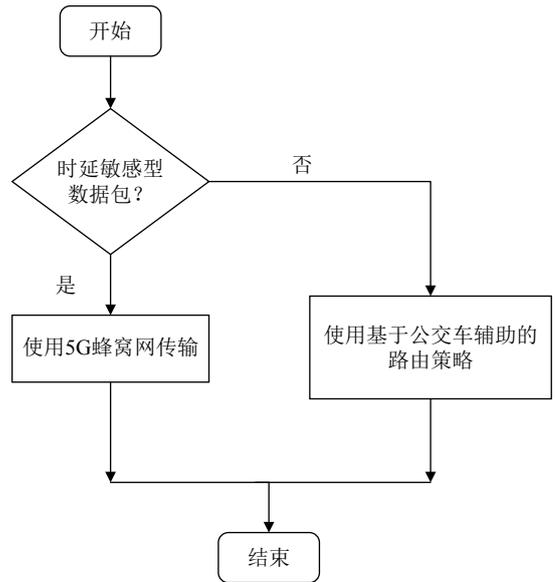


图 2 路由算法流程

2.2 基于 5G 蜂窝网的时延敏感型数据包的路由

相比 3G 和 4G, 5G 蜂窝网借助于网络切片、移动边缘计算和毫米波等核心技术, 为车联网提供多种类型的网络传输功能。毫米波的频段处于 30~300 GHz 范围内, 对应的波长为 1~10 mm, 文献 [23] 指出, 处于 60 GHz 频段的毫米波, 每传输 1 000 m, 功率损耗为 16 dB。5G 可以实现低时延、高速率、大带宽传输, 其下行速率可以达到 500 Mbit/s, 上行速率可以达到 100 Mbit/s, 端到端最小延迟为 1 ms^[24]。图 3 为 5G 蜂窝网在车联网中应用的系统模型, 车辆节点可以通过 5G 蜂窝基站将信息数据上传到云平台, 然后经过 MEC 分析处理后, 再按照不同业务进行网络切片, 最后通过 5G 蜂窝网络传送到终端的车辆节点。

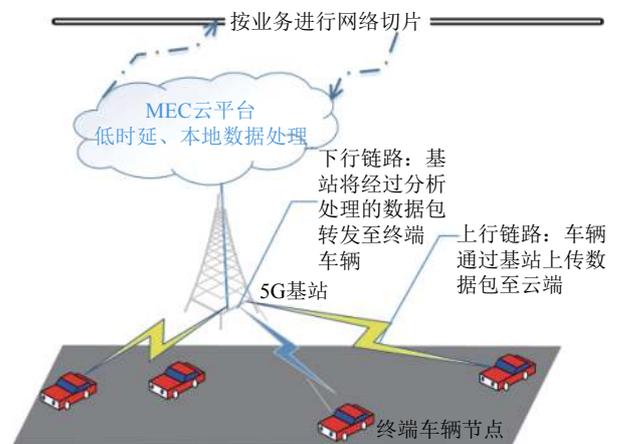


图 3 5G 的车联网系统模型

时延敏感型数据包的传输时延, 主要来自于车

辆节点和 5G 蜂窝网间的无线传输。根据文献 [25-26] 中关于毫米波无线传输信道模型, 相距距离为 d 的发送节点和接收节点间的毫米波无线信道路径损耗表示为:

$$\begin{aligned} \text{PL}(d) &= 69.6 + 20.9 \lg(d) + \xi \\ \xi &\sim (\sigma^2) \end{aligned} \quad (1)$$

根据文献 [27], 只考虑噪声的条件下, 接收节点即 5G 蜂窝基站处的信噪比 SNR 可以表示为:

$$\text{SNR} = P_s - \text{PL} - N_0 W_{\text{mw}} P \quad (2)$$

式中, P_s 表示发送端节点的发送功率; N_0 是高斯白噪声功率谱的功率谱密度; W_{mw} 是 5G 蜂窝网中的毫米波频率带宽。接收端节点的信噪比 SNR 大于接收机的信噪比门限时, 接收端节点便可以接收发送端节点的消息, 即在一个单跳的无线传输链路中, 消息传输的成功概率 P_{Success} 可以表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{Success}} &= P(\text{SNR} \geq \theta) = P(P_s - \text{PL} - N_0 W_{\text{mw}} \geq \theta) = \\ &P(\text{PL} \leq P_s - \theta - N_0 W_{\text{mw}}) = \\ &P(\xi \leq P_s - \theta - N_0 W_{\text{mw}} - 69.6 - 20.9 \lg d) = \\ &\frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{erf} \left(\frac{\varphi(d)}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\text{erf}(\cdot)$ 是误差函数, 且:

$$\varphi(d) = P_s - \theta - N_0 W_{\text{mw}} - 69.6 - 20.9 \lg d \quad (4)$$

使用毫米波进行通信传输, 消息从发送端到接收端的时间长度为 t_{slot} 时, 可以得到消息的单跳传输时延, 即车辆节点将数据包转发到 5G 基站的传输时延 $T_{\text{hop}}(d)$ 表达式为:

$$T_{\text{hop}}(d) = \frac{t_{\text{slot}}}{P_{\text{Success}}} = \frac{2t_{\text{slot}}}{1 + \text{erf} \left(\frac{\varphi(d)}{\sqrt{2}\sigma} \right)} \quad (5)$$

2.3 基于公交车辅助的路由

经典的贪婪周边无状态协议 (greedy perimeter stateless routing, GPSR) 是一种基于地理位置的路由协议, 主要利用邻居节点的位置信息选择下一跳中继节点 [28]。有两种转发模式: 贪婪转发模式和周边转发模式。一般情况下使用贪婪转发模式, 即选择邻居节点中距离目的节点最近的节点作为下一跳, 且被选择的下一跳节点距离目的节点的距离要小于当前节点距离目的节点的距离。如果不满足此条件, 则进入周边转发模式, 周边转发模式的主要思想是右手法则, 之后数据包便交替地在贪婪转发模式和周边转发模式之间切换, 直到数据包被传输到

目的节点为止。

GPSR 只是单纯地将距离作为下一跳选择的约束条件, 而没有考虑到车辆行驶方向的影响, 这很容易导致一种情况, 即被选择的下一跳满足距离约束条件, 但其行驶轨迹方向远离目的节点。当此节点被选作下一跳节点后, 在其周围一跳范围内没有邻居节点存在时, 此被选作下一跳节点且背离目的节点行驶的车辆, 就会携带数据包朝着不断远离目的节点的方向行驶, 致使数据包的路由路径偏离正确的传输方向, 带来不必要的传输时延, 甚至导致路由失败。

如图 4 所示, 假设节点 A 是源节点, 节点 B 、 C 、 D 分别为节点 A 的邻居节点, 节点 E 是目的节点。当节点 A 有数据包要发送时, 节点 A 应选择邻居节点 C 而非节点 D 作为下一跳中继节点, 因为节点 D 虽然距离目的点最近, 但节点 D 的行驶方向与目的节点的行驶方向相反。假设此时将数据包转发给邻居节点 D , 在节点 D 收到数据包后由于距离目的节点还有一段距离, 而此时其邻居范围内不存在一跳中继节点, 节点 D 将会选择携带数据包, 然后向与目的节点相反的方向移动, 最终导致数据包丢弃。本文提出基于行驶方向和距离的路由算法。当传输范围内同时存在多个节点时, 将行驶方向和距离作为下一跳选择的约束条件。图 5 给出了下一跳中继节点的选择过程。

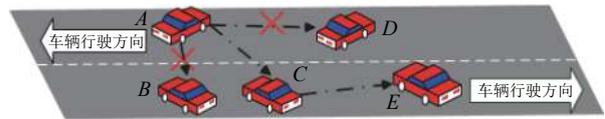


图 4 节点行驶方向的影响

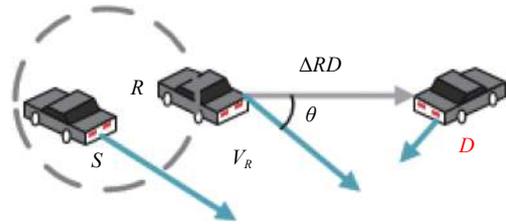


图 5 下一跳中继节点的选择

假定当前源节点为 S , 目的节点为 D , 下一跳中继节点为 R , 三者的速度分别为 V_S, V_D, V_R , 位置分别为 P_S, P_D, P_R , ΔRD 为节点 R 和 D 之间的相对距离:

$$V_S = (V_{S_x}, V_{S_y}), P_S = (P_{S_x}, P_{S_y})$$

$$V_D = (V_{D_x}, V_{D_y}), P_D = (P_{D_x}, P_{D_y})$$

$$V_R = (V_{R_x}, V_{R_y}), P_R = (P_{R_x}, P_{R_y})$$

$$\Delta RD = (P_{D_x} - P_{R_x}, P_{D_y} - P_{R_y})$$

下一跳中继节点 R 和目的节点 D 间的距离记为 Distance_{RD} , 源节点 S 和目的节点 D 间的距离记为 Distance_{SD} , 则:

$$\text{Distance}_{RD} = \sqrt{(P_{D_x} - P_{R_x})^2 + (P_{D_y} - P_{R_y})^2} \quad (6)$$

$$\text{Distance}_{SD} = \sqrt{(P_{D_x} - P_{S_x})^2 + (P_{D_y} - P_{S_y})^2} \quad (7)$$

下一跳中继节点 R 速度 V_R 与目的节点和中继节点之间的相对距离 ΔRD 夹角 $\text{Angle}_{(V_R, \Delta RD)}$, 记为 θ , 则:

$$\theta = \arccos \theta \quad (8)$$

$$\cos \theta = \frac{V_R \Delta RD}{|V_R| |\Delta RD|} = \frac{V_{R_x}(P_{D_x} - P_{R_x}) + V_{R_y}(P_{D_y} - P_{R_y})}{\sqrt{(V_{R_x})^2 + (V_{R_y})^2} \sqrt{(P_{D_x} - P_{R_x})^2 + (P_{D_y} - P_{R_y})^2}} \quad (9)$$

此夹角能够反映出下一跳中继节点相对于目的节点的行驶方向。当角度 θ 大于 90° 时, $\cos \theta$ 值为负值, 沿着此方向行驶, 二者之间距离增大, 表明下一跳中继车辆节点正在驶离目的节点。反之当角度 θ 小于 90° 时, 表明在驶向目的节点。

最后综合考虑距离与行驶方向的影响, 计算出每一个邻居节点的权重值 $\text{Weight}_{\text{value}}$:

$$\text{Weight}_{\text{value}} = \alpha \cos \theta + \beta \frac{\text{Distance}_{SD} - \text{Distance}_{RD}}{\text{Distance}_{SD}} \quad (10)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (11)$$

拥有最大权重值的节点将被选为下一跳中继节点, 其中 α 、 β 分别为方向和距离的权重影响因子。

公交车具有固定的行驶轨迹, 能够覆盖整个城市的主干道, 且其通信传输范围较普通车辆大。因此当一跳范围内没有合适的邻居节点时, 可以将公交车作为辅助的中继节点, 扩大传输范围, 提高端到端的传输成功率。

时延非敏感型数据包, 在没有合适的下一跳转发节点时, 当前节点采用存储转发策略, 携带数据包, 直到遇到合适的中继节点。

2.4 邻居表的更新时间预测

VANET 中的节点, 受道路环境的影响行驶速度和位置时刻变化, 节点之间的通信链路频繁断开。本文中, 车辆节点间通过周期性发送 Hello 数据包, 获取邻居节点的信息, 维护邻居列表。因此 Hello 数据包的发送周期对路由决策有重要影响。如果周期设置太长, 邻居表中的信息停滞时间过长, 会导致邻居节点在中继数据包前已经离开通信范围, 但由于长时间未更新邻居表, 当前节点仍然将其选为中继节点, 从而导致路由失败。如果周期设置过短, 将会增加网络中的开销, 同时也会影响正常数据包的传输。

针对此问题, 本文提出邻居表的更新时间预测机制。该机制利用节点的位置信息和状态信息, 对 Hello 数据包的发送周期 T_{hello} 进行预测, 避免因邻居表中信息失效导致通信链路断开。

图 6 为车辆节点的运动模型, 假设车辆节点间的通信范围为 R , t 时刻两节点 M, N 的速度和位置坐标分别为 V_M, V_N 和 $(P_{M_x}, P_{M_y}), (P_{N_x}, P_{N_y})$, 两节点的速度矢量与水平方向夹角分别为 θ_M, θ_N 。

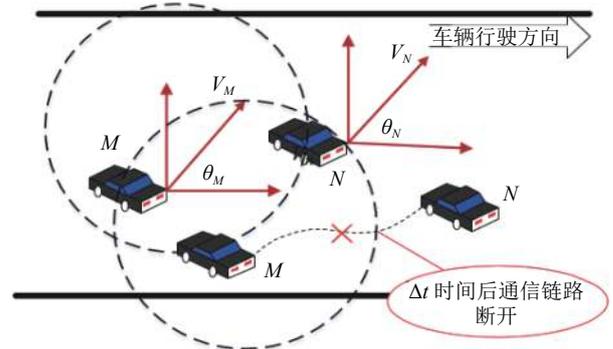


图 6 节点运动模型

首先计算出车辆节点经过 Δt 时间后的位置坐标, 再根据位置坐标信息推导链路的存活时间。

$$v = v + a\Delta t \quad (12)$$

$$x = x + (v\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2)\cos \theta \quad (13)$$

$$y = y + (v\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2)\sin \theta \quad (14)$$

两车之间的距离记为 L , 则:

$$L = \sqrt{(P_{M_x} - P_{N_x})^2 + (P_{M_y} - P_{N_y})^2} \quad (15)$$

计算经过 Δt 时间后两车之间的距离, 若两车

之间的距离 L 大于通信范围 R , 则表明原来建立的通信链路断开。可以得出节点 M 和邻居节点 N 间的链路存活时间 $T_{\text{live}(M \rightarrow N)}$, 则:

$$T_{\text{live}(m \rightarrow n)} = \frac{-(AB + CD) + \sqrt{(A^2 + C^2)R^2 - (AD - BC)^2}}{A^2 + C^2} \quad (16)$$

式中, $A = V_M \cos \theta_M - V_N \cos \theta_N$; $B = P_{M_x} - P_{N_x}$; $C = V_M \sin \theta_M - V_N \sin \theta_N$; $D = P_{M_y} - P_{N_y}$ 。

节点 M 的 Hello 数据包发送周期可以估计为:

$$T_{\text{hello}}(M) = \min(T_{\text{live}(M \rightarrow N)}) \quad (17)$$

式中, $1 \leq N \leq \text{NeighborNums}$, NeighborNums 表示节点 M 的邻居节点总数。

通过对 Hello 数据包的发送时间进行预测, 可以将邻居表的更新时间控制在合理范围内, 增加邻居节点信息的时效性, 从而避免因更新时间过长造成的路由失败以及频繁更新带来的开销问题。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真环境

本论文仿真基于 64 位 win7 系统, 使用网络仿真模拟器 (OMNet++ 5.4.1) 和车载网络仿真框架 (Veins 4.7.1) 对网络进行模拟; 使用道路交通模拟器 (Sumo 0.30.0) 生成公交车线路和普通车辆的行驶轨迹; 仿真地图的大小为 2 000 m × 2 000 m, 包含 64 个路口。表 1 为本文的仿真参数设置。

表 1 仿真参数设置

参数	数值
仿真地图面积/m ²	2 000 × 2 000
每条路上车道数量	2
车辆速度/m · s ⁻¹	5 ~ 30
车辆数目	[100, 500]
通信半径/m	250
5G覆盖范围/m	1000
MAC协议	IEEE802.11p
传输速率/Mb · s ⁻¹	6
数据包大小/B	512
数据包发送间隔/s	1
仿真时间/s	100

每一个车辆节点都有一个初始位置、速度、加速度和行驶方向, 整个网络每隔一秒随机产生一对源目节点, 进行数据包的传输。将本文提出的基于 5G 蜂窝网的混合消息传输机制及路由算法记为

5GHCT 算法, 将基于公交车辅助的路由算法记为 CT 算法。选取文献 [29] 中提出的 V2R 算法作为对比算法, 该算法主要以 RSU 作为辅助基础设施, 将无线传输和有线传输结合, 通过对节点的位置状态进行预测来选择下一跳。

3.2 仿真结果分析

为分析路由算法的性能, 选取数据包传输成功率、端到端时延、平均传输跳数作为衡量路由性能的指标。本论文仿真了不同网络场景对路由算法数据包传输成功率、端到端时延以及平均端到端传输跳数的影响。

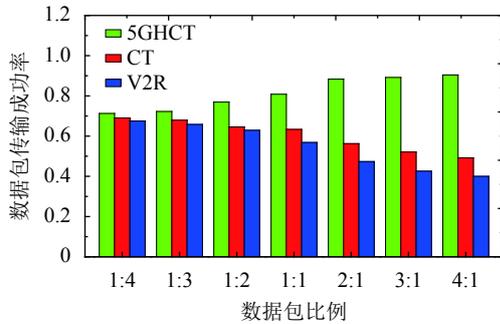
3.2.1 数据包传输成功率

数据包传输成功率是指目的节点接收到的数据包总数与从源节点发送的数据包总数的比值。本文分别仿真了不同数据包比例、节点数目、节点速度、数据包传输距离下的数据包传输成功率, 结果如图 7 所示。

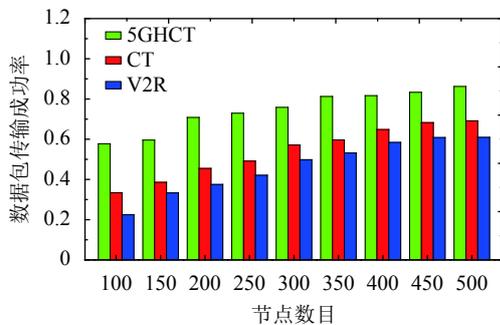
图 7a 表示在数据包总数目一定下, 数据包传输成功率随着数据包比例 (时延敏感型: 时延非敏感型) 的变化。可以看出, 随着时延敏感型数据包比例的增加, 5GHCT 算法的数据包传输成功率逐渐增大, CT 算法和 V2R 算法的数据包传输成功率逐渐减小。CT 算法性能优于 V2R 算法。这是因为 5GHCT 算法使用不同的传输机制传输不同类型的数据包, 避免了全部采用单一传输方式导致的链路拥塞。且在数据包总数目一定的情况下, 随着时延敏感型数据包数目的增加, 5GHCT 算法使用具有传输时延低、可靠性高的蜂窝网传输时延敏感型数据包, 而另外两种算法的传输时延由于无法满足时延敏感型数据包的时延需求, 导致数据包在未达到目的节点之前便由于存活时间达到而被丢弃, 数据包传输成功率下降。CT 算法的数据包传输成功率优于 V2R 算法, 是因为 CT 算法通过对邻居表的更新时间进行预测, 保证了通信链路的稳定性, 且在一跳范围内没有普通车辆节点时, 使用公交车作为辅助转发节点, 扩大了通信范围, 提高了数据包的传输成功率。

图 7b 表示数据包传输成功率随着节点数目的变化。可以看出, 随着节点数目的增加, 3 种算法的传输成功率逐渐增大。这是因为随着节点数目增加, 网络的连通度增大, 节点间逐跳传输的成功率增加。由于蜂窝网的覆盖范围大, 传输距离远, 因

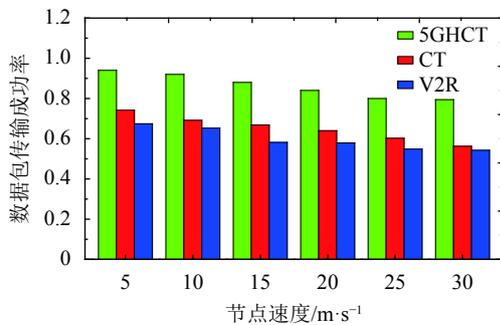
而在节点数目较少的情况下, 其传输性能不受影响。相比于 V2R 算法, CT 算法在网络连通度较低的情况下采用存储转发策略, 使用行驶轨迹经过目的点的公交车携带数据包, 提高了数据包的传输成功率。



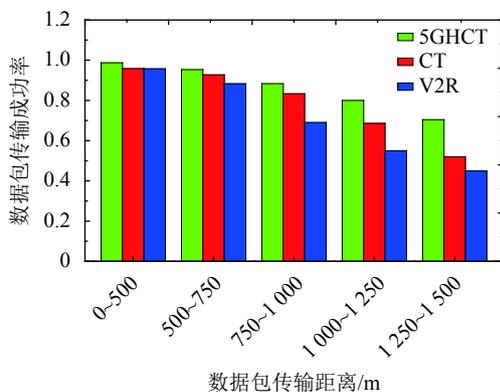
a. 数据包传输成功率随数据包比例的变化



b. 数据包传输成功率随节点数目的变化



c. 数据包传输成功率随节点速度的变化



d. 数据包传输成功率随数据包传输距离的变化

图7 数据包传输成功率的变化

图 7c 表示数据包传输成功率随着节点速度的变化情况。可以看出, 3 种算法的数据包传输成功率几乎不受节点速度的影响, 5GHCT 算法和 CT 算法性能优于 V2R 算法。这是因为相对于 V2R 算法而言, CT 算法通过计算邻居节点间通信链路的生存时间, 及时更新邻居列表的信息, 避免了因节点运动速度快而导致的通信链路失效。5GHCT 算法使用基于公交车辅助的路由策略转发普通类型的数据包, 所以有着和 CT 算法相似的变化趋势, 但由于其使用蜂窝网传输时延敏感型数据包, 所以比单一传输方式的 CT 算法具有更高的数据包传输成功率。

图 7d 表示数据包传输成功率随着数据包传输距离的变化。可以看出, 当数据包传输距离小于 500 m 时, 3 种算法的数据包传输成功率相近。之后随着传输距离的逐渐增大, 3 种算法的数据包传输成功率逐渐下降。5GHCT 算法和 CT 算法的性能优于 V2R 算法。这是因为 5GHCT 算法使用蜂窝网传输时延敏感型数据包, 能够保证长距离传输的可靠性, 避免了多跳转发造成的路由失败。相比于 V2R 算法, CT 算法在长距离传输过程中, 使用具有固定行驶轨迹的公交车辅助转发, 扩大传输范围, 并在一跳范围内无可用中继节点时, 携带数据包直到目的节点。

3.2.2 数据包端到端时延

数据包端到端时延是指, 从数据包发送开始, 到目的点接收到数据包为止的整个传输过程中, 成功传输数据包的总时延与成功传输的数据包总数目之比(即平均时延)。

图 8a 表示端到端时延随数据包比例的变化。可以看出, 3 种算法的端到端时延随着数据包比例(时延敏感型: 时延非敏感型)的增加而降低。相比于 CT 算法和 V2R 算法, 5GHCT 算法的性能最优, 而 CT 算法优于 V2R 算法。这是因为数据包总数目一定的情况下, 随着时延敏感型数据包数目的增加, 普通类型数据包数量减少, 5GHCT 算法使用具有低时延的蜂窝网传输时延敏感型数据包, 极大地缩短了平均端到端时延。相比于 V2R 算法, CT 算法在进行中继节点选择时, 选取距离目的节点最近, 且行驶方向和目的节点同向的节点作为下一跳, 减少了反向行驶的车辆节点携带数据包带来的传输时延。

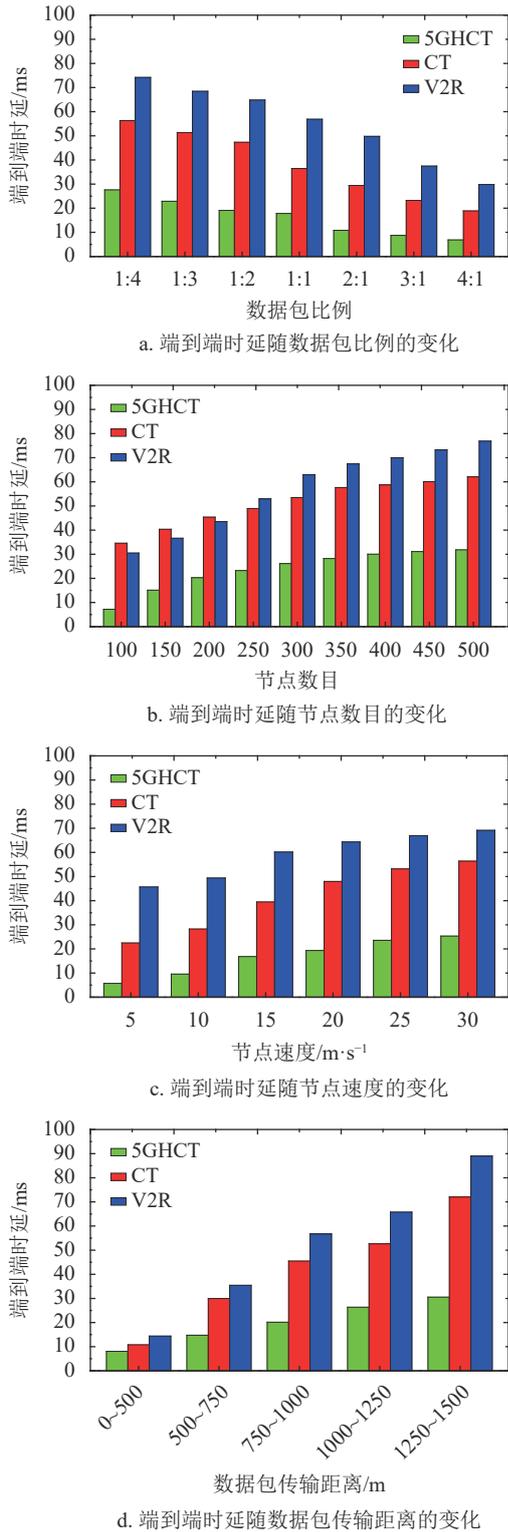


图 8 数据包端到端传输的变化

图 8b 表示端到端时延随节点数目的变化。可以看出, 3 种算法的端到端时延随着节点数目的增加而增大。这是因为随着节点数目的增加, CT 算法和 V2R 算法进入周边转发模式时, 中间节点的转发次数会产生大量的冗余, 这一过程会导致传输

时延增加。当节点数目为 100、150 和 200 时, CT 算法的传输时延高于 V2R 算法, 这是因为节点数目少, 网络连通度小, 在找不到合适的中继节点时, CT 算法采用存储转发策略, 导致端到端时延增大。之后随着节点数目增加, CT 算法的端到端时延低于 V2R 算法, 这是因为随着节点数目增加, V2R 算法网络负载增大, RSU 的缓存队列因为数据包过多而产生较长的排队等待时间, 导致端到端传输时延增加。5GHCT 算法使用基于公交车辅助的路由策略转发普通类型的数据包, 所以有着和 CT 算法相似的变化趋势, 但由于其使用 5G 蜂窝网传输时延敏感型数据包, 所以比 CT 算法具有更低的端到端时延。

图 8c 表示端到端时延随节点运动速度的变化。可以看出, 随着节点运动速度的增加, 3 种算法的端到端时延呈现上升趋势。这是因为随着节点速度的增加, 节点间通信链路的稳定性下降, 链路断开的机率变大, 重新路由的过程增加了端到端时延。相比于 V2R 算法, 一方面, CT 算法通过计算邻居节点间通信链路的生存时间, 及时更新邻居列表的信息, 避免无效节点的选取; 另一方面, CT 算法使用公交车作为辅助节点, 相比于普通车辆, 公交车的行驶速度均匀缓慢, 因而能够在一定程度上保证通信链路稳定, 减少了重新路由的过程, 从而改善了端到端时延。

图 8d 表示端到端时延随数据包传输距离的变化。可以看出传输距离小于 500 m 时, 3 种算法的端到端时延差异不大, 之后随着数据包传输距离的增加, 3 种算法的端到端时延呈现上升趋势。与 V2R 算法和 CT 算法相比, 5GHCT 算法的性能最佳。这是因为长距离传输时, 数据包在经过一系列节点的转发过程中, 由于目的节点的位置是时变的, 所以在制定路由路径时, 要不断地根据目的节点位置信息的变化选取合适的中继节点, 因而增加了端到端传输时延。5GHCT 算法使用蜂窝网传输时延敏感型数据包, 其覆盖范围大, 传输距离长, 数据包无需经过多跳转发便可到达目的节点, 所以端到端时延最小。V2R 算法使用 RSU 进行数据包传输, 但 RSU 的覆盖范围有限, 在长距离传输时, RSU 无法把数据包直接传送至距离目的节点最近的中继节点, 导致数据包需要经过多跳通信才能到达目的节点, 从而增加了端到端时延。CT 算法在选择中继节点时, 通过对邻居列表的更新时间进行计算, 可以实时地获取到目的节点的位置信息, 并选取合适的中继节点, 减少了重新路由的次数, 从而降低了端到端时延。

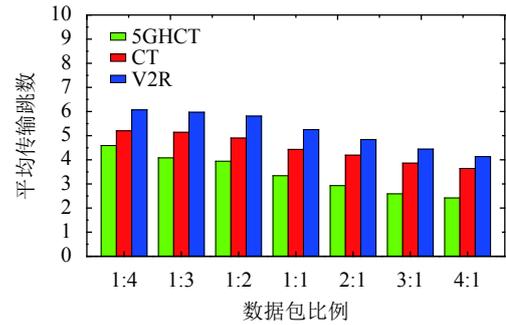
3.2.3 数据包平均传输跳数

平均传输跳数是指,在数据包从源节点至目的节点传输过程中,所经过的中间节点转发总次数与成功传输的数据包总数目之比。本小节分别仿真了不同数据包比例、节点数目、节点速度、数据包传输距离下端到端的平均传输跳数,结果如图9所示。

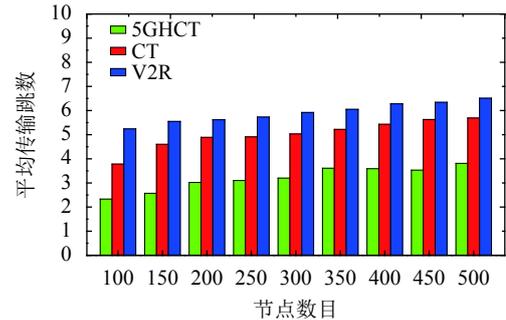
图9a表示在数据包总数目一定下,端到端平均传输跳数随着数据包比例(时延敏感型:时延非敏感型)的变化。可以看出,随着时延敏感型数据包比例的增加,3种算法的数据包端到端平均跳数呈现下降趋势。相比于CT算法和V2R算法,5GHCT算法的性能最优,而CT算法优于V2R算法。这是因为5GHCT算法使用蜂窝网传输时延敏感型数据包,其覆盖范围大,传输距离长,数据包无需经过多跳转发便可到达目的节点,因而端到端平均传输跳数最小。相比于V2R算法,CT算法在进行中继节点选择时,一方面,基于相对目的节点的距离和行驶方向,选择下一跳,避免了冗余节点的选择。另一方面使用公交节点进行辅助转发,扩大了通信范围。从而减小了端到端的平均传输跳数。

图9b表示端到端的平均传输跳数随节点数目的变化。可以看出,3种算法的端到端的平均传输跳数随着节点数目的增加而增大。这是因为随着节点数目的增加,CT算法和V2R算法进入周边转发模式时,中间节点的转发次数会产生大量的冗余,这一过程会导致平均端到端跳数增加。V2R算法使用RSU进行有线传输,随着节点数目的增加,RSU的负载变大,当传输容量低于阈值时,数据包被重新传输到附近车辆节点,增加了转发次数,导致端到端的平均传输跳数增大。而CT算法使用公交车节点辅助转发,扩大了传输范围,在一定程度上减小了端到端的平均传输跳数。

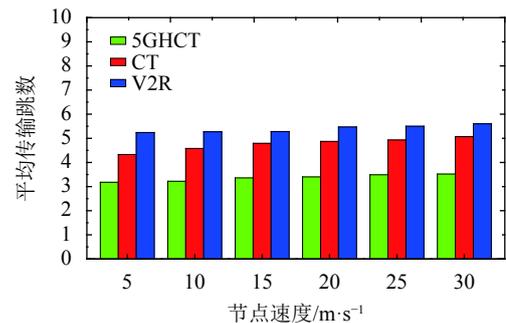
图9c表示端到端的平均传输跳数随节点运动速度的变化。可以看出,随着节点运动速度的增加,3种算法端到端的平均跳数呈现上升趋势。这是因为随着速度增加,节点间通信链路的稳定性下降,链路断开机率变大,重新路由的过程增加了数据包被转发的次数,从而导致端到端的平均传输跳数增加。5GHCT算法使用蜂窝网传输时延敏感型数据包,其覆盖范围大,传输距离长,数据包无需经过多跳转发便可到达目的节点,因此端到端的平均传输跳数最小。CT算法相比于V2R算法有较好的性能,这是因为CT算法通过计算邻居节点间通信链路的生存时间,及时更新邻居列表,避免无效节点的选取,减少了数据包被转发的次数。



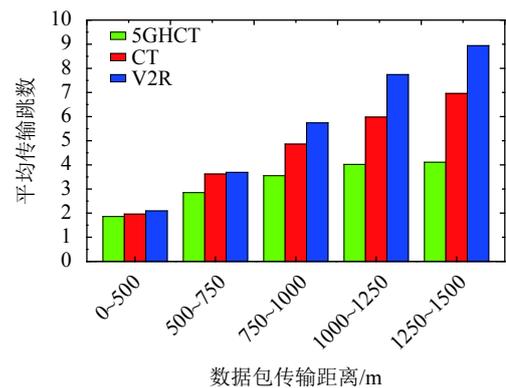
a. 平均传输跳数随数据包比例的变化



b. 平均传输跳数随节点数目的变化



c. 平均传输跳数随节点速度的变化



d. 平均传输跳数随数据包传输距离的变化

图9 数据包平均传输跳数的变化

图9d表示端到端的平均传输跳数随数据包传输距离的变化。可以看出传输距离小于500m时,3种算法端到端的平均传输跳数差异不大,之后随着数据包传输距离的增加,3种算法端到端的平均传输跳数呈现上升趋势。与V2R算法和CT算法

相比, 5GHCT 算法的性能最佳。结合图 8d 数据包传输距离对端到端传输时延影响的结果分析, 很容易得出图 9d 中所示的结果。

4 结束语

本文提出了车联网中基于 5G 蜂窝网的混合消息传输机制。首先将车联网中的数据包分为时延敏感型和非敏感型两种类型, 使用 5G 蜂窝网高效可靠地传输紧急时延敏感型消息。针对普通数据包的传输, 提出基于公交车辅助的路由算法, 综合考虑距离和行驶方向选择下一跳中继节点, 为扩大传输范围, 使用具有固定行驶轨迹的公交车节点辅助转发, 进一步提高了传输可靠性。同时使用预测机制计算 Hello 数据包周期性的发送时间, 避免控制包的路由开销和通信链路断开造成的路由失败。通过仿真实验, 验证了所提算法在数据包的传输成功率、端到端时延以及端到端的平均传输跳数方面, 性能优于已有算法。

参 考 文 献

- [1] TIAN Da-xin, ZHENG Kun-xian, ZHOU Jan-shan, et al. A microbial inspired routing protocol for VANETs[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(4): 2293-2302.
- [2] ETZA H M, OWENS T, NI Qiang, et al. Situation-aware QoS routing algorithm for vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(12): 5520-5535.
- [3] LI Fan, WANG Yu. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2007, 2(2): 12-22.
- [4] LUO Long, SHENG Li, YU Hong-fang, et al. Intersection-based V2X Routing via reinforcement learning in vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, DOI: 10.1109/TITS.2021.3053958.
- [5] SUN Gang, YU Ming-yue, LIAO Dan, et al. Analytical exploration of energy savings for parked vehicles to enhance VANET connectivity[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(5): 1749-1761.
- [6] SALVO P, TURCANU I, CUOMO F, et al. Heterogeneous cellular and DSRC networking for floating car data collection in urban areas[J]. *Vehicular Communications*, 2017, 8: 21-34.
- [7] GUO Chang, LI De-min, ZHANG Guang-lin, et al. Data delivery delay reduction for VANETs on bi-directional roadway[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 8514-8524.
- [8] ALAWI M A, SAEED R A, ABDALLA-HASGIM A H. Simplified gateway selectionscheme for multihop relay in vehicular ad hoc network[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2015, 27(12): 3855-3873.
- [9] ROSTAMZADEH K, GOPALAKRISHNAN S. Analysis of emergency message dissemination in vehicular networks[C]//2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Cancun, Mexico: IEEE, 2011: 575-580.
- [10] SUN Gang, ZHANG Yi-jing, LIAO Dan, et al. Bus trajectory-based street-centric routing for message delivery in urban vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(8): 7550-7563.
- [11] PANICHPAPABOON S, WASAN P A. A Review of information dissemination protocols for vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(3): 784-798.
- [12] LIU Bing-yi, DONG Yao, WANG Jian-ping, et al. Cloud-assisted safety message dissemination in VANET-cellular heterogeneous wireless network[J]. *IEEE Systems Journal*, 2017, 11(1): 128-139.
- [13] LI He, DONG Mian-xiong, OTA K. Control plane optimization in software-defined vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(10): 7895-7904.
- [14] QIU Tie, WANG Xin, CHEN Chen, et al. TMED: A spider-web-like transmission mechanism for emergency data in vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8682-8694.
- [15] LI Yan, SONG Xiao-yu, CHEN Hui-jie, et al. Hierarchical routing for vehicular Ad Hoc networks via reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 68(2): 1852-1865.
- [16] ZHANG Fu-sang, HAI Liu, LEUNG Yiu-Wing, et al. Community-based bus system as routing backbone for vehicular ad hoc networks[C]//2015 IEEE 35th International Conference on Distributed Computing Systems. Columbus, OH, USA: IEEE, 2015: 73-82.
- [17] ZHANG Fu-sang, JIN Bei-hong, WANG Zhao-yang, et al. On geocasting over urban bus-based networks by mining trajectories[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(6): 1734-1747.
- [18] TANG Yu-jie, CHENG Nan, WU Wen, et al. Delay-minimization routing for heterogeneous VANETs with machine learning based mobility prediction[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3967-3979.
- [19] LUO Jie, GU Xing-xing, ZHAO Tong, et al. MI-VANET: A new mobile infrastructure based VANET architecture for urban environment[C]//Vehicular Technology Conference Fall. Ottawa, Canada: IEEE, 2010: 1-5.
- [20] SUN G, ZHANG Yi-jing, YU Hong-fang, et al. Intersection fog-based distributed routing for V2V communication in urban vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(6): 2409-2426.
- [21] SHAREF B, ALSAQOUR R, ALAWI M, et al. Robust and trust dynamic mobile gateway selection in heterogeneous VANET-UMTS network[J]. *Vehicular Communications*, 2018, 12: 75-87.
- [22] SUN G, SONG Liang-jun, YU Hong-fang, et al. V2V routing in a VANET based on the autoregressive

- integrated moving average model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 908-922.
- [23] MOEZ J, RABAH M, SENOUCI S M, et al. Improved greedy traffic aware routing protocol for vehicular ad hoc networks in city environments[C]//Proceedings of the Third International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, VANET 2006. Los Angeles, CA, USA: ACM, 2006: 88-89.
- [24] 刘琪, 洪高风, 邱佳慧, 等. 基于 5G 的车联网体系架构及其应用研究[J]. *移动通信*, 2019, 43(11): 57-64.
LIU Qi, HONG Gao-feng, QIU Jia-hui, et al. Research on the system architecture and key technologies in 5G-based vehicular networks[J]. *Mobile Communications*, 2019, 43(11): 57-64.
- [25] FETEIHA M F, HASSANEIN H S. Enabling cooperative relaying VANET clouds over LTE-A networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(4): 1468-1479.
- [26] LIANG Le, PENG Hai-xia, LI G, et al. Vehicular communications: A physical layer perspective[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(12): 10647-10659.
- [27] LI Shi-kuan, LI Zi-peng, GE Xiao-hu, et al. Multi-hop links quality analysis of 5G enabled vehicular networks[C]//International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. [S.l.]: WCSP, 2017: 1-6.
- [28] KARP B, KUNG H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]//Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, Massachusetts, USA: ACM, 2000: 243-254.
- [29] GAO Hong-hao, LIU Can, LI Y, et al. V2VR: Reliable hybrid-network-oriented V2V data transmission and routing considering RSUs and connectivity probability[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020(99): 1-14.

编辑 刘飞阳