

## 城市环境下跨层 VANET 路由协议研究

王 桐, 王 鹏, 柳冰忆

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 车载自组织网络(VANET)单分层结构路由协议考虑因素较少, 导致分组投递率低、端到端时延较高。为此, 考虑车辆位置、速度、路口密度、无线链路质量、MAC 层误帧率等影响因素, 提出一种应用于城市环境的基于位置信息的 VANET 跨层路由协议(MCLPR)。设计路口车辆节点选择算法提取无线链路质量和 MAC 层误帧率的跨层信息, 采用层次分析法计算各影响因素的权重值, 确定最佳转发路径。仿真结果表明, 与 AODV, DSDV 等路由协议相比, MCLPR 路由协议具有较高的分组投递率及较低的端到端时延, 保证了数据传输的可靠性与高效性, 适用于网络密度与负载较大、车辆移动速度较快的城市环境。

**关键词:** 车载自组织网络; 位置信息; 跨层; 路由协议; 加权决策

**中文引用格式:** 王 桐, 王 鹏, 柳冰忆. 城市环境下跨层 VANET 路由协议研究[J]. 计算机工程, 2017, 43(11): 55-65.

**英文引用格式:** WANG Tong, WANG Peng, LIU Bingyi. Research on Cross-layer Routing Protocol in VANET Under Urban Environment[J]. Computer Engineering, 2017, 43(11): 55-65.

## Research on Cross-layer Routing Protocol in VANET Under Urban Environment

WANG Tong, WANG Peng, LIU Bingyi

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**[Abstract]** Vehicular Ad Hoc Network(VANET) single-layer construction routing protocols consider less factor, causing low packet delivery ratio and high average end to end delay. Considering the influencing factors of vehicles position, speed, density of intersections, wireless link quality, and MAC layer frame error rate, this paper proposes Multi-factor Cross-layer Position-based Routing Protocol for VANET(MCLPR) for urban environment. An algorithm for Vehicle Selection at Intersections(AVSI) is designed to extract the cross-layer information of the wireless link quality and the MAC layer frame error rate. The weight value of each influencing factor is calculated by using the Analytic Hierarchy Process(AHP) to determine the best forwarding path. Simulation results show that, compared with routing protocols such as AODV and DSDV, MCLPR protocol has higher packet delivery ratio and lower end to end delay, ensuring the reliability and efficiency of data transmission. This routing protocol is suitable for urban environment with the large network load and density, fast moving speed.

**[Key words]** Vehicular Ad Hoc Network(VANET); location information; cross-layer; routing protocol; weighted decision making

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.11.010

### 0 概述

城市计算<sup>[1]</sup>作为一种新型交叉学科, 其交通子领域对城镇环境再发展、重布局提供了一定导向作用。车载自组织网络(Vehicular Ad Hoc Network, VANET)<sup>[2-3]</sup>是一种应用场景特殊的移动自组织网络(Mobile Ad Hoc Network, MANET)<sup>[4-5]</sup>, 由配备通信传输模块的车辆为节点组成, 具有无中心、自组

织、拓扑变化较频繁的特点。

车载自组织网络车-车(Vehicles to Vehicle, V2V)通信中通信协议的性能好坏对数据传输可靠性与高效性起到关键作用。传统路由协议由于工作机制和反应机理的不同, 导致在不同路由协议下分组投递率(Packet Delivery Ratio, PDR)与平均端到端时延存在差异。VANET 路由协议的研究将对改善车载自组织网络通信的可靠性与高

**基金项目:** 国家自然科学基金(61102105); 中央高校基本科研业务费专项资金(GK2080260138); 黑龙江省博士后出站启动基金(LBH-Q12117); 哈尔滨市科技局青年后备人才项目(2015RAQXJ008)。

**作者简介:** 王 桐(1977—), 男, 副教授、博士, 主研方向为车联网、移动社交网络、大数据; 王 鹏、柳冰忆, 硕士。

**收稿日期:** 2016-10-28

**修回日期:** 2016-12-02

**E-mail:** wangtong@hrbeu.edu.cn

效性具有重要影响。为此,本文提出一种基于位置信息的 VANET 跨层路由协议(MCLPR)。在 MCLPR 协议中综合考虑了物理层、网络层和 MAC 层的主要影响因素,使其在路由决策时能够更加快速准确。

## 1 相关工作

近年一些学者致力于车-车通信中路由协议的研究。VANET 路由协议可以分为单一分层路由协议与跨层路由协议两大类。单一分层路由协议主要包括:1)基于拓扑信息的主动式路由协议<sup>[6-8]</sup>。文献[7]加入了序列号信息避免路由表维护过程中的循环路径错误。该类路由协议中只要存在数据通信请求,每个节点单元就必须周期性地向外广播路由信息。当网络拓扑改变时,节点将更新路由表信息,这类路由存在冗余较多,无法较好地适应快速变化的道路拓扑结构等问题。2)基于拓扑信息的按需路由协议<sup>[9-10]</sup>。文献[9]定义了发送请求包、路由回复包和路由错误包,通过按需分配方式进行工作。该类协议工作过程分为路由发现阶段与路由维护阶段,然而在路由发现与维护过程中,延时会增大,对网络传输高效性造成较大影响<sup>[11-13]</sup>。3)基于位置信息的路由协议<sup>[14-16]</sup>。文献[14]采取了贪婪转发机制,主要考虑位置因素实现路径选择。文献[15]引入参考点因素,根据参考点位置确定转发路径的选择。该类协议依靠 GPS、北斗导航、位置传感器等当前先进的定位设备获取实时地理位置、速率和运动方向,利用这些信息寻找转发数据包的下一跳。其核心思路是路由协议周期性地对外广播 HELLO 信息,通过 HELLO 数据包节点可以告知邻居节点自身位置信息、速率、运动方向等信息,从而使邻居节点可以根据不同情况做出转发策略。该类路由协议考虑的因素多为应用层方面,较为单一,对于下一跳决策的准确度较低<sup>[17-19]</sup>。4)基于电子地图信息的路由协议<sup>[20-21]</sup>。文献[21]引入了街道信息,采用 Dijkstra 算法计算最佳路径。该类路由协议主要通过地图在城市环境下进行数据的转发与最优下一跳的选取,但该类路由协议并没有考虑链路质量,信号在单播多跳传输后将产生较大衰减。

跨层路由协议<sup>[22-23]</sup>研究起步较晚,主要分为:1)基于层的集成与新建路由协议。文献[24]提出了新建路由模块集成层 RMIL 的概念,重新定义接口标准。这样的集成新层 RMIL 策略一定程度上提高了路由协议的性能,但新层的引入对整体结构造成较大影响。文献[25]提出了一种集成的思路来设计跨层路由协议。该协议在原 OSI 模型上集成各层,最终合成为应用层、网络层、PHY&MAC 层,并考虑了来自 PHY&MAC 层的信息与队列缓

冲信息,而且涉及链路质量信息。该类路由协议通过集成与新建的跨层策略优化路由协议,尽管连通性有一定提高,但缺乏统一的标准,对于实际应用具有一定难度。2)基于跨层信息获取的路由协议。文献[26]在拓扑信息路由 AODV 的基础上,引入 MAC 层可用的传输次数与网络层路由跳数作为路由指标。当网络密度较大时,数据的延迟和丢包将会增大。

综上,单一分层路由协议考虑因素较少,易产生决策不确定等问题。在跨层路由协议中,层的集成与新建路由不具有统一标准作为支持。因此,为了解决上述问题,本文提出一种多因素影响下基于位置信息的车载自组织网络跨层路由协议(Multi-factor Cross-Layer Position-based Routing Protocol for VANET, MCLPR)。该协议综合考虑车辆节点属性,路口信息,无线链路质量中信号对噪声加干扰比(Signal to Noise Plus Interference Ratio, SNIR),MAC 层误帧率(Frame Error Rate, FER)等方面的影响,给出基于跨层路由的路口车辆节点选择算法(Algorithm for Vehicles Selection at Intersections, AVSI)和非路口车辆节点选择算法(Algorithm for Vehicles Selection of Non-intersections, AVSNI),并采用层次分析法计算上述各因素的权重值,确定最佳转发路径。

## 2 车辆移动建模

本节主要阐述无线传输模型与车辆移动模型的研究与实际应用。在 VANET 中,车辆节点在网络中具有特殊性,交通状况存在多样性。VANET 场景与移动模型的抽象与搭建影响到车载路由协议的性能。因此,需要搭建符合实际情况的场景与车辆移动模型,设计具有参考意义的路径衰落模型与车辆无线传输模型。

### 2.1 无线传输模型

在 VANET 无线传输模型中,一般可以分为视线(Line of Sight, LOS)传输和非视线(Not Line of Sight, NLOS)传输。视线传输在本文研究中主要是存在于非路口交通环境中,在路口交通环境下存在遮挡等复杂情况,则为非视线传输。

在图 1 中,从源节点(Source Node, SN)到目的节点(Destination Node, DN)的一条传输路径中,车辆会经过 3 个路口,距离路口最近的车辆节点  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  作为路口标志,若存在建筑物遮挡,则车辆使用 NLOS 无线传输;若不存在遮挡,则进行 LOS 传输。在不断变化的车载网络中,该“标志”也在不断变化。在非路口交通环境中,如  $f_2$  与  $f_3$  的传输为 LOS 传输。综合上述,存在一条无线传输路径  $SN \rightarrow c_1 \rightarrow f_1 \rightarrow c_2 \rightarrow f_2 \rightarrow f_3 \rightarrow c_3 \rightarrow DN$  综合使用了 LOS 与 NLOS 传输模型。

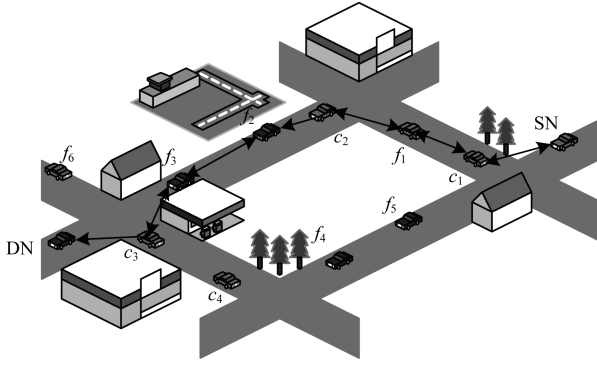


图1 无线传输模型

## 2.2 曼哈顿移动模型

在随机移动模型下,车辆节点并非无规律运动,其运动受限于道路拓扑结构,同时需要考虑车辆平均速度,运动方向,在交叉路口是否转向等因素。为此,学者在随机移动模型的基础上,增加道路拓扑信息,使节点只能在道路间运动,形成一种与道路相关的模型,称为曼哈顿移动模型<sup>[27]</sup>,如图2所示。

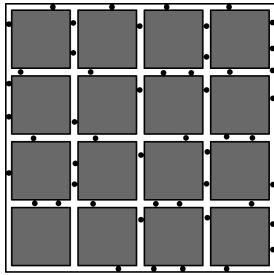


图2 曼哈顿移动模型

从图2中可以获得如下信息:

1)道路为双向车道,车辆节点在非路口区域存在2种行驶方向。

2)每2条道路相交形成一个路口,车辆节点存在直行或转向的可能性,并且这2种可能性是随机的,如式(1)所示,该概率可以在模拟仿真过程中根据需要进行调整。

$$p_i(A) = \begin{cases} b, & \text{直行} \\ 1-b, & \text{转弯} \end{cases} \quad (1)$$

3)图2中一个方框表示一个街区,若存在 $n \times n$ 的街区,则会产生 $[(n+1) \times (n+1)]$ 条街道,在 $4 \times 4$ 的街区下,产生了 $5 \times 5$ 的街道。

## 2.3 地图选取与模型抽象

由于选取真实地图的二维架构,抽象为曼哈顿移动模型,对工程领域的研究有一定的现实意义,因此本文选取石家庄市东南方向二环以内的街道进行处理分析,抽象过程如图3所示。图3(a)显示的是河北省石家庄市东南二环内的真实道路情况;图3(b)显示的是在JOSM软件下的osm格式图,图中信息较多,需进行处理;图3(c)中显示的是处理后的区域图,近似为 $4 \times 4$ 街区;图3(d)中显示的是抽象为曼哈顿模型的 $4 \times 4$ 街区图。

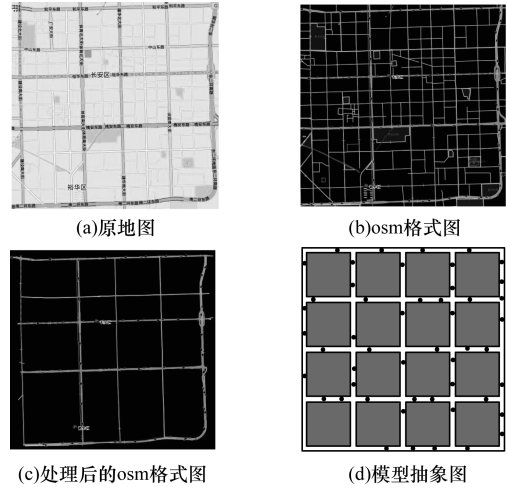


图3 真实地图环境下的模型抽象

## 3 MCLPR 路由协议

### 3.1 方案假设与模型阐述

#### 3.1.1 方案假设条件

MCLPR 协议主要应用于城镇环境中车辆节点间数据的转发。在该协议中做出以下假设:车辆节点总是配备GPS、北斗导航等定位装置,周期性地获取自身相关信息并存储于本地;车辆节点能够获知周围道路信息,即通过实时地图获得周围的相对位置信息;车辆节点在路口区域的无线数据传输默认存在一定的遮挡物;在非路口区域的无线数据传输不存在遮挡物。

#### 3.1.2 模型阐述

在城镇环境下,本文协议基于河北省石家庄市东南方向二环以内真实地图为背景,并抽象为曼哈顿模型,假设网络中一共有 $N$ 个节点,任意一个节点为 $q_i \in Q, 1 \leq i \leq N, Q$ 为所有车辆节点的集合, $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_N\}$ ,每个节点 $q_i$ 均已知自己的位置信息。任意一个节点 $q_i$ 的所有邻居节点(节点 $q_i$ 也默认在邻居节点中)个数为 $m$ ,每个邻居节点为 $f_j, f_j \in P, 1 \leq j \leq m, F$ 为邻居节点集合, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m\}$ 。目的节点为 $d_k$ ,个数为 $l, d_k \in D, 1 \leq j \leq n, D = \{d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_l\}$ ,车辆节点传播半径为 $R$ 。结合上述假设给出如下定义:

**定义1** HELLO\_STREAM 信息流。每个节点 $q_i$ 通过周期性广播一跳HELLO信息给周围邻居节点 $f_j$ ,HELLO信息列表记为HELLO\_STREAM $\{Road\ ID, Speed, Position, Number\}$ 。HELLO信息包括道路标识、车辆节点速度、位置、邻居节点数量。

**定义2** 本地路由信息流。为将数据包以较好的路径进行转发,各节点 $q_i$ 有一个本地路由信息流,记为 $q_i\text{-STREAM}\{d_k, f_j, Number, Z_{q_i f_j}^{d_k} p_{q_i f_j}^{d_k}\}$ ,其中, $Z_{q_i f_j}^{d_k}$ 为在路口交通环境因素影响下的加权计算结果,通过该权值大小对节点转发进行评判; $p_{q_i f_j}^{d_k}$ 作为一个概率数值来表征在非路口交通环境的转发可能性大小。当节点需要发送或者转发信息时,将计算这些

数值存入路由表中并选择下一跳的转发节点。

**定义 3** 邻居节点信息流。为选取理想的转发节点,节点  $q_i$  本地都有一个邻居节点表,记录一跳范围内邻居节点的相关信息。邻居节点列表记为  $f_j\_STREAM\{f_j, RoadID, Speed, Position, Number\}$ 。当  $q_i$  接收到相邻节点发送的 HELLO\_STREAM 信息流时,检索邻居节点表  $f_j\_STREAM$  并更新,将更新后邻居节点的数量记录在本地路由表中,该信息将作为节点选取的依据。

**定义 4** 位置反馈系统(Position Feedback System, PFS)。当网络中目的节点的位置等信息未知时,将使用位置服务系统来获取目的节点  $d_k$  的信息,记为 PFS  $\{d_k, RoadID, Position, Speed\}$ 。位置服务系统详细记录目标节点道路标识、位置、速度等信息。

### 3.2 MCLPR 工作流程

MCLPR 路由协议主要分为 2 个阶段:邻居节点发现阶段和数据包转发阶段,具体工作流程如图 4 所示。

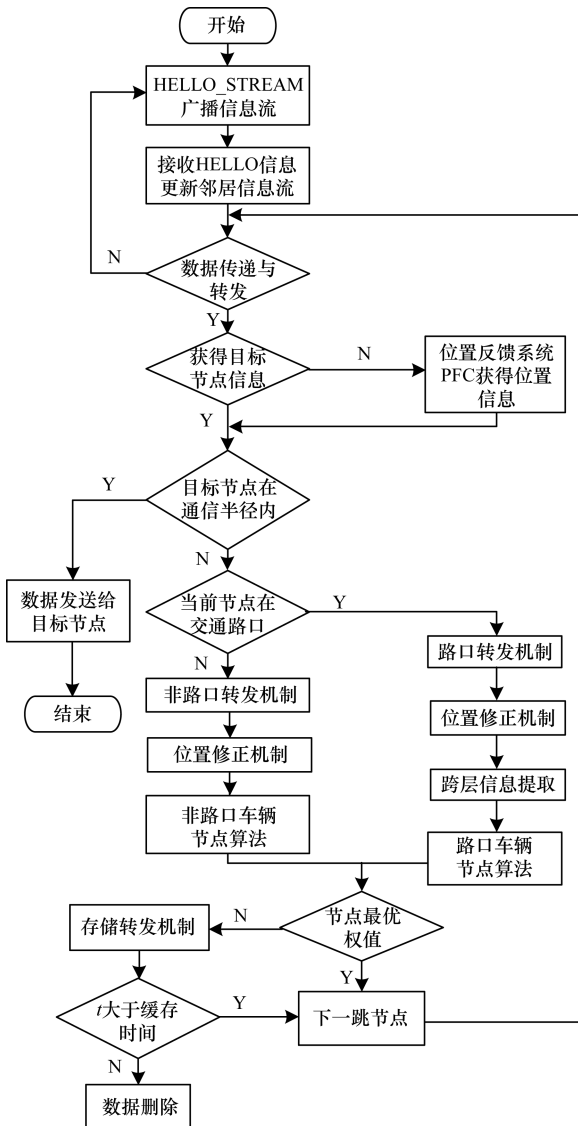


图 4 MCLPR 路由协议工作流程

邻居节点发现过程中主要完成网络中节点捕捉与消息流交换,这些信息是判定最佳下一跳选择的参考。当网络中任意一个节点  $q_i$  需要向目标节点  $d_k$  发送数据时,则切换到数据包转发过程。根据数据包当前转发节点的位置,将该过程划分为 2 种相互独立的转发机制:路口转发机制和非路口转发机制。数据发送阶段主要是将发送车辆的数据以较可靠的路径及较高的效率发送给接收车辆。为实现数据从 SN 到 DN 的转发,需经历以下步骤:

1) 初始化。车辆节点  $q_i$  通过自身内置定位系统实时获得自身相关信息 ( $RoadID, Position, Speed$ ) 并初始化自身的邻居信息流和本地路由信息流。车辆节点  $q_i$  在更新自身位置信息的同时周期性广播 HELLO\_STREAM 信息流,利用这一跳信息通知邻居节点  $f_j$ 。HELLO\_STREAM 信息流周期对采用信标的路由协议性能有一定影响,若 HELLO\_STREAM 广播周期较小,则信息将会在短时间内不断更新,信息的出错率和路由开销将会变大;反之,若 HELLO\_STREAM 周期较大,则不能保证节点相关信息的实时传递,影响下一跳或者多跳节点的选取。因此,本文协议中引入一种动态 HELLO\_STREAM 信息流广播机制。当车辆节点移动速度较快时,位置变化较明显,如果 HELLO\_STREAM 信息流广播周期比较长,那么将会产生较大的误差。当车辆速度很小时,即使 HELLO\_STREAM 信息流的广播间隔比较长,产生的位置变化也较小,对协议性能的影响不大。因此,根据车辆速度大小,采用一种动态的 HELLO\_STREAM 广播机制,如式 (2) 所示。

$$T_{HELLO\_STREAM} = \begin{cases} T_{\max}, & v \leq v_{\min} \\ (T_{\min} + T_{\max})/2, & v_{\min} < v < v_{\max} \\ T_{\min}, & v \geq v_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

根据 VANET 网络中的经验,当车辆速度小于一个预设最小值  $v_{\min}$  时,HELLO\_STREAM 周期时间为最大值  $T_{\max}$ 。当车辆速度大于一个预设最大值  $v_{\max}$  时,HELLO\_STREAM 流周期时间为较小值  $T_{\min}$ 。当车辆速度在  $v_{\min}$  和  $v_{\max}$  之间时,则采用算术平均,在 MCLPR 中设置  $T_{\min} = 1, T_{\max} = 3, v_{\max} = 16, v_{\min} = 8$ 。

2) 邻居节点接收 HELLO\_STREAM 信息流并进行处理。周围邻居节点  $f_j$  接收到节点  $q_i$  发送的 HELLO\_STREAM 信息流后,对相应信息进行添加或删除操作,以达到更新列表的目的。在此过程中记录邻居节点数量,获得这些信息后,将选取该邻居节点集合  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m\}$  中的最佳节点作为转发节点。VANET 中剩余节点等待自身是否有数据需要传送给 DN,同时检查自身是否成为转发节点进行数据转发。若上述两点都不存在,则该

车辆节点将继续等待广播;若有数据需要发送或成为转发节点进行数据转发,则节点就会进入数据转发阶段。

3) PFS 反馈目标节点信息。在邻居节点发现过程中,车载网络中某节点需要发送数据时,该节点便自动成为转发节点,接收数据的移动车辆节点则成为目标节点。此时,转发节点将查验自身是否获取目标节点基本信息,若已经获取该信息,则直接转发;反之,发送节点会发送一个请求给 PFS, PFS 收到请求就会将目标节点基本信息反馈给发送节点。

4) 路口与非路口转发机制的判定。在 MCLPR 协议中,发送节点在整个数据转发过程中使用路口转发机制和非路口转发机制,根据当前转发节点位置来决定采用哪种转发机制进行数据转发。在曼哈顿模型中,每一条道路都存在一个 *RoadID* 并将其写入电子地图中,如图 5 所示。城市 VANET 中每一辆车辆通过定位系统获知自身位置,根据自身位置在现有地图中查询就会知道自己所在道路的标号,并周期性地广播给邻居节点。图 5 显示了  $5 \times 5$  曼哈顿模型中的 *RoadID*, 较大的数字表示路口的编号,用 0~24 来表示 25 个交通路口。小括号数字表示街道号,用 0~9 来表示 10 条街道。车辆节点用 3 个数字来确定它的位置,第 1 个数字表示前一个路口的编号,第 2 个数字表示后一个路口的编号,第 3 个数字表示所在街道号。发送节点  $q_i$  的邻居节点集合  $F$  中如果存在 *RoadID* 与  $q_i$  的 *RoadID* 不同,那么就认为当前节点处在交叉路口,采用交通路口转发机制来转发数据;如果  $q_i$  中所有的道路标号与  $f_j$  的道路标号都相同,那么认为当前节点在同一条道路上,采用非路口转发机制来转发数据。

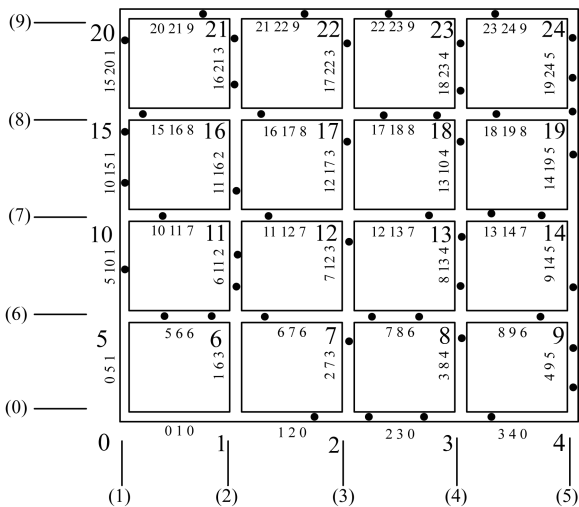


图 5 道路 ID 示意图

5) 存储转发过程。当网络中节点比较少或者节点的分布不均匀时,由于节点移动较快,稀疏的网络连通性会导致在发送节点的传输范围内无法选择合适的转发节点,节点将会面临局部最优等问题的影响。

为解决此类问题,在 MCLPR 路由协议中引入存储转发机制,在存储转发过程中设置缓存队列大小  $s$  和缓存时间  $t$  作为显示当前节点存储转发的属性。当发送节点缓存的数据包超过所设置的缓存队列  $s$  或者时间超过缓存时间  $t$  时,当前节点会选择丢弃这些数据包,路由失败。采用该存储转发机制会增加传播的延迟,但在城市环境下,车辆数据居多,移动速度较快,可以在短时间内寻找到合适的转发车辆节点,进入到非路口车辆节点选择算法中。同时,引入存储转发机制可在一定程度上提高网络中的分组投递率。

6) 算法选取过程。如果当前节点在交通路口附近,那么此节点进入路口转发机制;如果该节点不在交通路口,而是在道路中行驶,那么采取非路口转发机制。在路口转发机制中, MCLPR 协议综合考虑跨层信息以及车辆信息设计路口车辆节点选择算法 (AVSI) 选取下一跳节点。在路间转发机制中, MCLPR 协议设计非路口车辆节点选择算法 (AVSNI) 来择优选取下一跳节点。如果在节点选取中面临局部最优情况,那么采用存储转发机制。在规定时间内,若始终没有合适的节点,则当前节点就会舍弃数据包;若找到合适的节点,则将该节点选为下一跳转发节点;重复上述步骤,直到把数据传送到目标节点为止。

假设发送节点  $q_i$  发送相关数据到目标节点  $d_k$ , 通信范围内的邻居节点为  $f_j$ , MCLPR 路由协议的算法伪代码具体如下:

```
MCLPR initialize,  $q_i$  initialize  $f_j\_STREAM$  and local information stream;
 $q_i$  send HELLO_STREAM to  $f_j$ ;
 $f_j$  receive and update  $f_j\_STREAM$ ;
if ( $q_i$  send packets to  $d_k$ ;  $q_i$  become forwarding node)
{
  if ( $q_i$  does not know  $d_k$  position)
  {
    acquire position by Position Feedback System;
  }
  else { If ( $d_k \in f_j$ ),
    {
       $q_i$  send packets to  $d_k$ ;
    }
    else if ( $f_j.RoadID \neq q_i.RoadID$ )
    {
      acquire AVSI;
    }
    else { acquire AVSNI;
    }
    if (no node around or local optimization)
    {
      (store and forward);
    }
    else { forward to next hop, go around 4;
    }
    end if
  }
  end if
}
end if
else { go around 1;
}
end if
```

### 3.3 非路口车辆节点选择算法

车辆节点在整个区域内的通信可以基本分为交通路口与非交通路口通信。当车辆节点在具有相同道路 ID 的路上进行数据转发时,会采取非路口车辆

节点转发机制,无线传输模型为视线传输模型。在非路口转发机制下,发送节点周围存在一些邻居节点需进行筛选优化。在这些节点中采用非路口车辆节点算法选取最佳的节点,并定义节点转发概率  $p_{qfj}^{dk}$ 。该概率主要考虑了节点的位置信息和相关移动信息,如式(3)所示。通过计算求得转发概率最大的节点作为下一跳转发节点。

$$p_{qfj}^{dk} = \lambda \cdot \cos\theta_{fjd_k} + (1 - \lambda) \frac{D_{qfj}}{R} \quad (3)$$

其中,  $p_{qfj}^{dk}$  为节点在非路口交通环境下的转发概率,  $\theta_{fjd_k}$  为邻居节点  $f_j$  移动速度  $v_{fj}$  与  $f_j$  到目标节点  $d_k$  所形成的向量  $f_j d_k$  夹角,  $D_{qfj}$  为  $q_i$  与  $f_j$  之间的欧式距离,  $R$  为传播半径,  $\lambda$  为影响因子,该影响因子根据道路相关信息进行变化。式(3)主要阐述了在非交通路口环境下,节点转发概率是与发送节点  $q_i$  和邻居节点  $f_j$  之间距离  $D_{qfj}$ ,  $v_{fj}$  与  $f_j d_k$  夹角  $\theta_{fjd_k}$  有关系,  $\lambda$  表征这 2 个因素的影响程度。图 6 为非路口节点选择算法抽象图,  $q_i$  存在 2 个邻居节点  $f_1$ ,  $f_2$ , 目标节点  $d_k$ , 图中显示了在选取过程中各变量之间的关系。

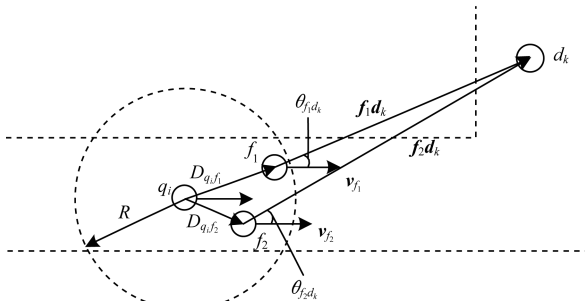


图 6 非路口节点选择算法抽象图

$$\cos \theta_{F_j Q_i D_i} = \frac{\mathbf{Q}_i \mathbf{F}_j \cdot \mathbf{Q}_i \mathbf{D}_i}{|\mathbf{Q}_i \mathbf{F}_j| |\mathbf{Q}_i \mathbf{D}_i|} = \frac{(x_{f_j} - x_{q_i})(x_{d_i} - x_{q_i}) + (y_{f_j} - y_{q_i})(y_{d_i} - y_{q_i})}{\sqrt{(x_{f_j} - x_{q_i})^2 + (y_{f_j} - y_{q_i})^2} \sqrt{(x_{d_i} - x_{q_i})^2 + (y_{d_i} - y_{q_i})^2}} \quad (4)$$

在式(4)中,发送节点到邻居节点的方向与发送节点到目标节点的方向越一致,余弦值越大,与之前所定义的权重值越小则越优的理论正好相反,因此,取其负值并与总体权重值计算保持一致,如式(5)所示。

$$f(\theta) = -\cos \theta_{F_j Q_i D_i} \quad (5)$$

在与图 7 相同的场景下,图 8 显示了在路口交通环境下车辆节点速度与邻居节点和目标节点连线所成夹角示意图。同样地,邻居节点的运动方向趋向于与目标节点方向一致性越高,越可能被选择为最佳的下一跳节点,其权重值也是越小越优。

### 3.4 基于跨层信息的路口车辆节点选择算法

车辆节点在具有不同道路 ID 的路上进行数据转发时,会采取路口车辆节点转发机制。为了能够选择出更优的下一跳,路口节点选择算法中加入了跨层信息,在路口车辆节点转发机制下主要考虑 3 个方面的因素:1) 车辆节点自身属性,主要是车辆节点的位置、速度等相关信息,同时启用位置修正机制;2) 路口交通环境的相关信息,这里主要指路口车辆节点密度,在该部分中将提出一个路口车辆密度分布函数,通过车辆密度来计算权重值;3) 无线链路质量和 MAC 层信息,无线链路质量主要通过信号对噪声加干扰比(SNIR)体现,由此计算相应权重值,MAC 层信息主要通过帧差错率来体现。

#### 3.4.1 车辆节点属性

车辆节点在路口处的位置如图 7 所示,发送节点  $q_i$  为图中点  $Q_i(x_{q_i}, y_{q_i})$ , 目标节点  $d_k$  为图中点  $D_i(x_{d_i}, y_{d_i})$ , 在路口处存在 3 个邻居节点,其坐标分别为  $F_1(x_{f_1}, y_{f_1})$ 、 $F_2(x_{f_2}, y_{f_2})$ 、 $F_3(x_{f_3}, y_{f_3})$ 。

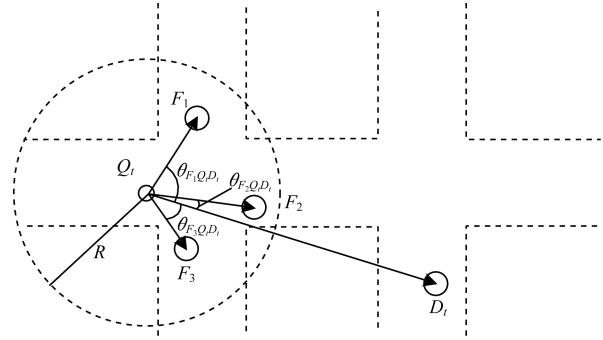


图 7 路口车辆位置示意图

这些节点均通过位置修正机制在发送节点的通信范围内,利用计算  $\theta_{F_j Q_i D_i}$  的余弦值来确定与目标节点直线距离的相近程度,如式(4)所示。

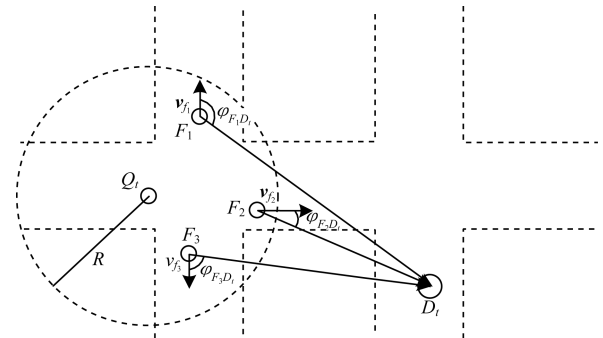


图 8 路口车辆速度关系示意图

由图 8 可知,由于邻居节点速度已知,因此速度作为矢量,可获知速率和运动方向。邻居节点与目标节点在经过位置修正机制后坐标已知,则可求

权重函数,如式(6)所示。

$$f(\varphi) = -\cos \varphi_{F,D_i} = -\frac{\mathbf{v}_{f_j} \cdot \mathbf{F}_j \mathbf{D}_i}{|\mathbf{v}_{f_j}| |\mathbf{F}_j \mathbf{D}_i|} \quad (6)$$

### 3.4.2 路口信息

车辆节点在路口处进行数据转发,会向多个路口的邻居车辆节点转发信息。在每个路口处,不同道路上的车辆节点拥有不同的 *RoadID*。由此可知,在某个 *RoadID* 上,发送节点通信半径内存在邻居节点数  $M_F$ ,根据邻居节点数分布,得到一个关于该因素的归一化路口密度分布函数,如式(7)所示。

$$f(M_F) = \begin{cases} 1, M_F \leq 3 \\ 0.75, 3 < M_F \leq 6 \\ 0.5, 6 < M_F \leq 9 \\ 0.25, 9 < M_F \leq 12 \\ 0, M_F > 12 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可以得出,当某一路口处车辆密度较小时,车辆节点将不会向该路口的邻居节点转发数据。随着路口车辆节点的增加,其权重值将越来越小,从而获得最优选择。由此可知,发送节点在某一 *RoadID* 的邻居节点数量越多,该道路上的邻居节点作为转发节点的可能性越大,选择该节点所在道路的可能性也越大。

### 3.4.3 无线链路质量

在城镇交通环境下,路口情况比较复杂,车辆非视线传输致使无线链路质量下降,主要因素为信号对噪声加干扰比(SNIR)。因此,在该因素的影响下,发送节点在路口将选择一个无线信道质量比较好的节点作为转发节点。无线信道质量 SNIR 函数取决于信息传输相关特性。在路口环境中一般车辆节点数量较多,干扰存在的可能性较大,在通信范围内处于远端的节点比在通信范围内处于近端节点受到的干扰多,数据包丢失的可能性增大。因此,在通信范围远端的节点得到的 SNIR 值较小。算法中需要选择的节点是在通信范围内离发送节点较远并且无线链路质量较好的节点。在 MCLPR 中引入了无线链路质量信息 SNIR,设置 SNIR 的阈值  $SNIR_0$ ,当计算节点的 SNIR 小于阈值时,该节点被认为位于通信范围内的远端,其信道质量较差,并赋予较大的权重值来减少选取该节点的可能性;反之,若节点的 SNIR 值较高时,赋予较小的权重值,来增加选取该节点的可能性。这样可以在下一跳节点选择上尽量选取无线链路质量较好的节点,减少数据丢失。

SNIR 权重值分析函数如式(8)所示。

$$f(SNIR) = \begin{cases} \alpha u^2, SNIR < SNIR_0 \\ \beta e^{-u}, SNIR \geq SNIR_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\alpha, \beta, SNIR_{\min}$  为常量,当  $u = SNIR_0 - SNIR_{\min}$  时,  $\frac{\alpha}{\beta} = \frac{e^{-u}}{u^2}$ 。根据表 1 数据可知,当  $SNIR_0 = 15$  时,通过计算得出其他参数的值:  $SNIR_{\min} = 9.75, \alpha = 0.000\ 999\ 5, \beta = 5.25$ ,代入得式(9)。

$$f(SNIR) = \begin{cases} 0.000\ 999\ 5 (SNIR - 9.75)^2, SNIR < 15 \\ 5.25 e^{-(SNIR - 9.75)}, SNIR \geq 15 \end{cases} \quad (9)$$

该式将作为权重值计算的一部分,对于特定的调制与编码方案组合,阈值  $SNIR_0$  是特定的,如表 1 所示,所用阈值均由 JIANG 等人<sup>[28]</sup>在交通路口通过反复实验建模所获得的数据。

表 1 V2V 通信仿真数据设置

数据传输率 /(Kb · s <sup>-1</sup> )	调制方案	编码率	SNIR 阈值/dB
3.0	BPSK	1/2	5
4.5	BPSK	3/4	6
6.0	QPSK	1/2	8
9.0	QPSK	3/4	11
12.0	64-QAM	1/2	15
18.0	64-QAM	3/4	20
24.0	64-QAM	2/3	25
27.0	64-QAM	3/4	—

### 3.4.4 MAC 层信息

在城镇 VANET 环境中,MAC 层信息的影响因素为误帧率(FER),FER 表示在传输过程中帧传错的概率。在加性高斯白噪声传输信道中,误比特率  $P_b$  与信噪比  $\frac{E_b}{n_0}$  之间的关系如式(10)所示。

$$P_b = G\left[\frac{2E_b}{n_0}\right] \quad (10)$$

$$G(x) = \int_x^\infty \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

误帧率  $P_{FER}$  与误比特率  $P_b$  的关系如式(11)所示。

$$f(FER) = P_{FER} = 1 - (1 - P_b)^{l_f} \quad (11)$$

其中,  $l_f$  为帧长,用比特数进行表示。误帧率越小,该潜在待选取的接收邻居节点越优。式(11)用来表征帧差错率因素的权重值函数。

经过逐一分析后,获得一系列权重相关函数  $f(\theta), f(\varphi), f(M_f), f(SNIR), f(FER)$ ,每个函数需通过赋予一定的权值  $weight_1 \sim weight_5$ ,最终获得一个结果保存在  $q_i\_STREAM$  中,如式(12)所示。

$$Z_{qf}^d = weight_1 \times f(\theta) + weight_2 \times f(\varphi) + weight_3 \times f(M_f) + weight_4 \times f(SNIR) + weight_5 \times f(FER) \quad (12)$$

该权重分析属于多属性决策问题。选取层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)进行权重值

分析。这是一种对某方案下多指标目标评判系统进行分析的决策手段,具有结构化、程序化、层次化和系统化等特点。

1) 建立层次结构。在该模型下将所涉及的影响因素划分为不同的层次,分别为车辆节点位置因素  $a_1$ 、速度因素  $a_2$ 、路口车辆节点密度因素  $a_3$ 、SNIR 因素  $a_4$ 、误帧率因素  $a_5$ 。

2) 构造判断矩阵。通过对比 2 个因素之间的重要性进行矩阵构造,在此 5 种因素需要构造一个  $5 \times 5$  矩阵,如式(13)所示,进行两两判别。判别过程中引入判别标度机制,在某环境下,若某种影响因素更占主导,则重要程度越大,与其他因素相比后比对数值越大。

$$A_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3) 权重值归一化处理。根据式(13)求得特征向量并计算归一化特征向量,如式(14)所示。将求得的对特征值进行一致性检验,若满足检验标准,则说明该归一化特征向量可以作为权重值,具有实际意义;反之需要再次构造判别矩阵。

$$W_0 = \left( \frac{w_1}{\sum_i w_i}, \frac{w_2}{\sum_i w_i}, \dots, \frac{w_n}{\sum_i w_i} \right)^T$$

$$= (weight_1, weight_2, \dots, weight_n)^T \quad (14)$$

## 4 仿真与结果分析

本节对 MCLPR 路由协议在仿真平台上进行模拟,获得一系列仿真数据并通过对这些数据的归纳处理,与 AODV、DSDV、DSR、GPSR 路由协议在不同影响因素下进行相关性能的仿真对比。

### 4.1 参数设定

本文在 NS-3 平台下,场景模型选用  $5 \times 5$  道路曼哈顿模型,存在  $4 \times 4$  街区,仿真区域范围是  $1\,600\text{ m} \times 1\,600\text{ m}$ 。在网络中车辆节点数量分别为 50、100、150 和 200。车辆的速度分别为  $0\text{ m/s}$ 、 $5\text{ m/s}$ 、 $10\text{ m/s}$ 、 $15\text{ m/s}$ 。本文使用 IEEE802.11p 协议的预仿真时间为  $600\text{ s}$ ,仿真时间为  $200\text{ s}$ ,HELLO\_STREAM 为  $1\text{ s} \sim 3\text{ s}$ ,节点传输半径为  $250\text{ m}$  和  $500\text{ m}$ ,分组大小为  $512\text{ Byte}$ 。在该场景中有 10 个需要通信的链路,采用 LOS 与 NLOS 无线传播模型,并对 MCLPR、AODV、DSDV、DSR、GPSR 路由协议进行仿真对比。

### 4.2 分组投递率分析

分组投递率是反映路由协议在数据传输方面的可靠程度,是 VANET 网络中的一个重要性能指标。其值越大,表示能获得越多有效数据,路由协议性能也越好。图 9 显示的是网络中节点数分别为 100、150、200 时,在车速递增的情况下 5 种协议各自的分

组投递率变化趋势。从中可得出,当区域范围内车辆节点数量一定时,各协议的分组投递率随着车辆速度增加而下降。这是因为随着车辆节点速度的增加,基于拓扑信息的路由协议 AODV、DSR、DSDV 不能适应快速变化的网络拓扑结构,基于位置信息的路由协议 GPSR 虽然一定程度上可以适应网络拓扑的变化,但在选择节点的过程中考虑的因素较少。车速增大,车辆位置变化快,导致链路连接的稳定性下降,使得数据传输成功率快速下降。对于在网络中任何某一特定的车辆速度,MCLPR 协议的平均数据传输率都高于其他 4 种协议。这是因为在 MCLPR 路由协议中,综合考虑了车辆位置信息、移动信息和路口信息与 MAC 层信息,位置修正机制和存储转发策略,使得链路稳定性较好,数据丢失减少,从而具有较好的分组投递率。

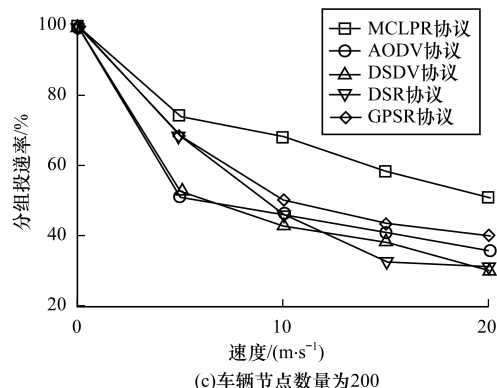
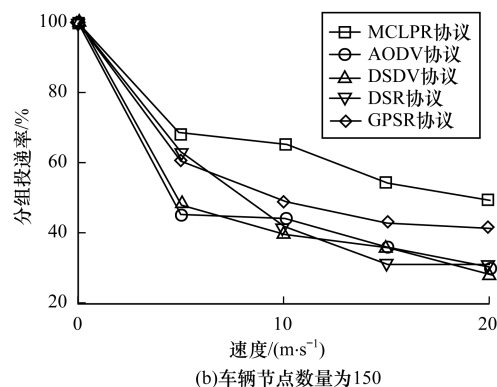
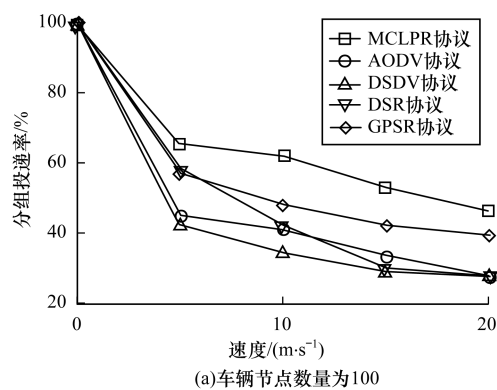


图9 确定车辆网络密度下分组投递率随车辆移动速度的变化情况



图 10 显示了在不同车辆移动速度下改变车辆网络密度时,各路由协议 PDR 随着网络密度的增大而变大。这是因为在网络中车辆密度增大,路由协议中可供选择路径将增多,道路上车辆连通性能提高,从而提高分组投递率。MCLPR 路由协议在不同速度下的 PDR 与其他路由协议相比较好,是因为 MCLPR 综合考虑了多种因素:位置,速度,路口密度,SNIR 与误帧率信息,通过优化选取,使得其具有较高的分组投递率。

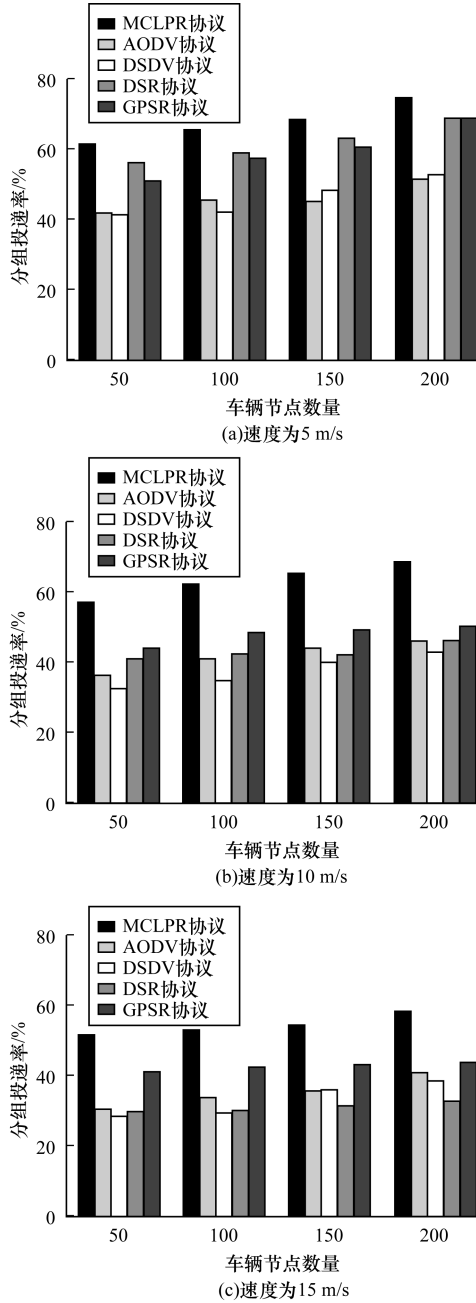


图 10 确定车辆移动速度下分组投递率随车辆网络密度的变化情况

#### 4.3 平均端到端时延分析

平均端到端时延表征了路由协议的数据传输效率,如式(15)所示。

$$m\_delay = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_i)}{D_{Receice}}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (15)$$

其中,  $\Delta\tau_i$  表示第  $i$  个分组的延迟时间;  $D_{Receice}$  表示接收有效分组总数;  $m\_delay$  表示路由协议中网络的效率。在一定条件下,协议平均端到端时延越小,其传输效率越高。图 11 反映了在确定网络密度下平均端到端时延随节点速度的变化情况。该图反映了在网络密度确定的情况下,随着车辆节点速度的增加,各协议平均端到端时延增大。这是由于车辆节点速度较慢时,通过路由协议能建立的通信链路较快并且较稳定,时延也较小。随着车速加快,节点的频繁变化或者无线链路出现的不稳定情况,使得路由协议的发现与维护过程均受到影响,则时延增大。

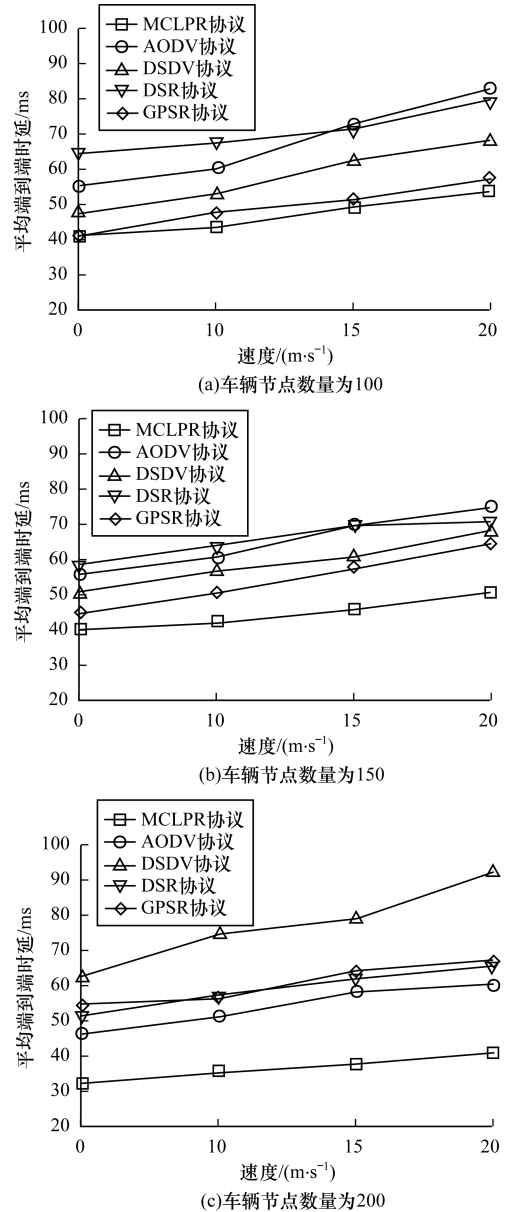


图 11 确定车辆网络密度下平均端到端时延随车辆移动速度的变化情况

在节点较少的网络中,MCLPR 同样需要考虑多种因素,因此,平均端到端时延未体现出优越性。随着网络中节点数量增加,MCLPR 连通性增强,路口因素影响逐渐减小,多跳选择无线链路情况变好,优化效果明显,平均端到端时延较低。

图 12 反映了在确定车辆速度情况下,平均端到端时延随网络密度的变化情况。从中可以看出,在一定条件下,存在 2 种不同的趋势:MCLPR, AODV 和 DSR 在确定的速度下,时延随网络密度增大而减小;DSDV 与 GPSR 在确定速度下时延随网络密度增大而增大。

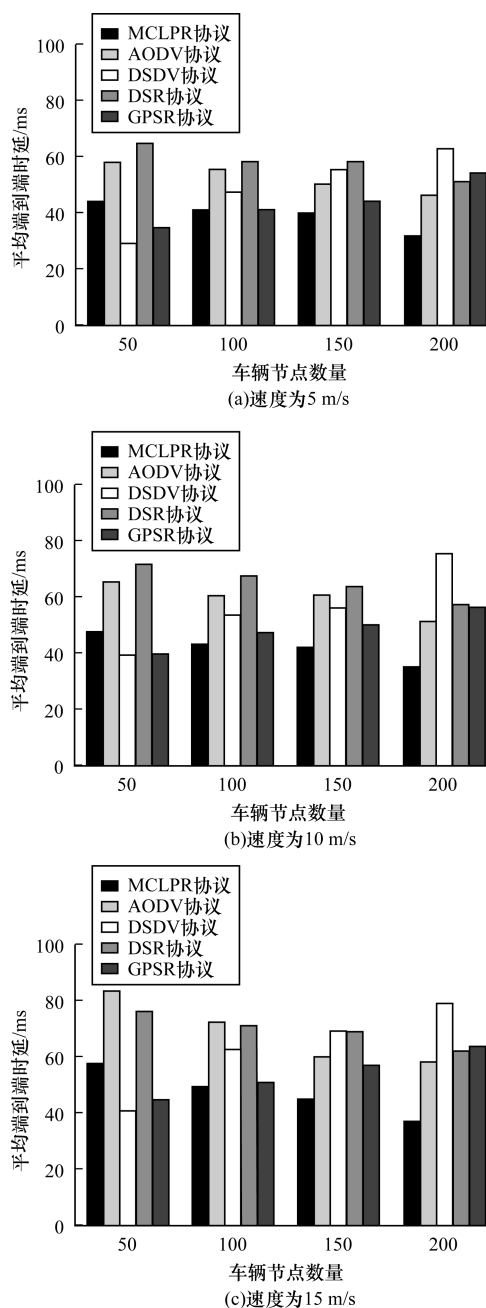


图 12 确定车辆移动速度下平均端到端时延与车辆网络密度的关系

DSDV 为基于拓扑信息的先应式路由协议,节点较少时,需要维护较少的路由表,因此路由开销较小,时延较小;网络密度增大时,需要维护较多路由表,因此时延会大大增加。GPSR 为基于位置信息的路由,网络中节点较少时,无线链路选择较容易,时延较小;节点增多后,从发送节点到目的节点需选择的路径较多,是导致时延增加的一个重要因素。AODV 与 DSR 都为基于拓扑信息的按需路由协议,节点较少时,链路质量较差,产生了较高的时延,节点增大后时延减小。MCLPR 为多因素影响下基于位置的跨层路由协议,综合考虑了多方面因素,包括在路口车辆节点算法中考虑了车辆节点位置、速度信息、交通路口信息、无线链路质量及 MAC 层相关信息。在非路口车辆节点算法中引入位置修正机制,在整个路由寻址过程中引入存储转发机制。通过多方面的作用使得在节点数量增加的情况下基于全局优化思路,降低平均端到端时延,同时使该时延保持在一个较低的水平。

## 5 结束语

本文提出一种多因素影响下基于位置信息的车载自组织网络跨层路由协议(MCLPR)。建立车辆移动模型,选取特定的真实地图场景并对车辆节点移动模型进行抽象。MCLPR 路由协议在路口车辆节点选择算法中提取跨层信息,通过 AHP 方法决策多种因素,保证了 MCLPR 稳定性与高效性。仿真结果表明,MCLPR 协议分组投递率与参考路由协议相比较高,数据传输具有一定可靠性。当网络密度较大时,MCLPR 协议时延较低,效率较高,是一种适用于较大密度网络的 VANET 路由协议。下一步将在真实地图上导入车辆移动信息,使仿真结果更贴近实际情况。

## 参考文献

- [1] 郑宇. 城市计算概述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(1): 1-13.
- [2] WANG T, CAO Y, ZHOU Y, et al. A Survey on Geographic Routing Protocols in Delay/Disruption Tolerant Networks (DTNs) [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016(6).
- [3] HAN C, DIANATI M, TAFAZOLLI R, et al. A Novel Distributed Asynchronous Multichannel MAC Scheme for Large-scale Vehicular Ad Hoc Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 3125-3138.

- [4] CAO Y, SUN Z, WANG N, et al. Geographic-based Spray-and-Relay(GSaR): An Efficient Routing Scheme for DTNs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(4): 1548-1564.
- [5] YU H, YAO N, LIU J. An Adaptive Routing Protocol in Underwater Sparse Acoustic Sensor Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 34(C): 121-143.
- [6] CLAUSEN T, JACQUET P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR): RFC 3626[S]. Network Working Group, 2003: 1-6.
- [7] PERKINS C E. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994, 24(4): 234-244.
- [8] 宋有美, 李建波, 和天钥, 等. 基于节点相似性的容迟网络概率路由算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(9): 63-70.
- [9] PERKINS C, BELDING-ROYER E, DAS S. Ad Hoc On-Demand Distance Vector(AODV) Routing: RFC 3561[S]. Network Working Group, 2000: 90-91.
- [10] JOHNSON D B, MALTZ D A, BROCH J. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks[J]. Ad Hoc Networking, 2001, 5: 139-172.
- [11] PARK V D, CORSON M S. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks[C]//Proceedings of the 16th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Driving the Information Revolution. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1997: 1405-1413.
- [12] XIE S S, BAI G W. MTAODV: A Novel VANET Routing Protocol in Highway Scenarios[J]. Microelectronics & Computer, 2011, 28(4): 30-34.
- [13] 刘晓明. 车载自组织网络 AODV 路由协议的研究与改进[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [14] KARP B, KUNG H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2000: 243-254.
- [15] LEONTIADIS I, MASCOLO C. GeOpps: Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks[C]//Proceedings of IEEE International Symposium World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 1-6.
- [16] CHENG P C, LEE K C, GERLA M, et al. GeoDTN + Nav: Geographic DTN Routing with Navigator Prediction for Urban Vehicular Environments[J]. Mobile Networks & Applications, 2010, 15(1): 61-82.
- [17] NZOUONTA J. VANET Routing on City Roads Using Real-time Vehicular Traffic Information[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3609-3626.
- [18] BOATO G, GRANELLI F, MORA: A Movement-based Routing Algorithm for Ad Hoc Networks[D]. Trento, Italy: University of Trento, 2003.
- [19] STOJIMENOVIC I. Position-based Routing in Ad Hoc Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(7): 128-134.
- [20] LOCHERT C. Geographic Routing in City Scenarios[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2005, 9(1): 69-72.
- [21] CHEN T, GERLA M. Global State Routing: A New Routing Scheme for Ad-hoc Wireless Networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1998: 171-175.
- [22] SOMMER C, DRESSLER F. The DYMO Routing Protocol in VANET Scenarios[C]//Proceedings of the 38th Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 16-20.
- [23] NOY N F, MUSEN M A. PROMPT: Algorithm and Tool for Automated Ontology Merging and Alignment[C]//Proceedings of the 17th National Conference on Artificial Intelligence & 12th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 450-455.
- [24] JANG H C, YANG C K. A Hybrid Architecture of Routing Protocols for VANET with Cross-layer Design[C]//Proceedings of 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 68-71.
- [25] REHMAN S U, KHAN M A, ZIA T A. A Multi-hop Cross Layer Decision Based Routing for VANETs[J]. Wireless Networks, 2015, 21(5): 1647-1660.
- [26] CHEN Y, XIANG Z, JIAN W, et al. An Adaptive Cross-layer Multi-path Routing Protocol for Urban VANET[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 603-608.
- [27] FOGUE M, GARRIDO P, MARTINEZ F J, et al. An Adaptive System Based on Roadmap Profiling to Enhance Warning Message Dissemination in Vanets[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(3): 883-895.
- [28] JIANG D, DELGROSSI L. IEEE 802. 11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments[C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 2036-2040.