

## 公交移动协助城市车载网络分层路由协议<sup>\*</sup>

彭雅丽<sup>1</sup>, 尹红<sup>1</sup>, 喻鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(江西师范大学 软件学院, 江西 南昌 330022)

<sup>2</sup>(江西师范大学 商学院, 江西 南昌 330022)

通讯作者: 彭雅丽, E-mail: iampylily@hotmail.com

**摘要:** 城市车载网络作为未来智能交通的重要组成部分,为解决城市交通问题提供了有效的解决方案.现有大部分路由方案未能很好地解决车辆高速移动、复杂城市交通环境和不同车流密度三大问题对路由转发的影响,导致路由协议的性能在高效和可靠性方面不足.根据城市交通信号传播环境、红灯等停以及公交运行轨迹固定、周期循环等特性,提出公交移动协助的城市车载网络路由协议,将车车之间的复杂、不确定路由转换为普通车辆-簇头-公交三层节点之间的确定、协作方式,发挥公交周期移动优势,并用簇头策略优化普通车辆与公交之间的通信.设计根据城市信号传播衰减与车辆移动相关的单跳链路筛选与多跳延迟相关的概率转发机制,保证公交转发的高效、可靠,并设计能自适应车流密度的簇头触发策略.仿真实验结果表明,整体方案转发跳数达到一定数量时,能取得较好的数据传输成功率和较低的网络延迟.

**关键词:** 公交移动协助;路由协议;城市车载网络;自适应车流密度;概率转发

中文引用格式: 彭雅丽,尹红,喻鹏.公交移动协助城市车载网络分层路由协议.软件学报,2014,25(Suppl.(1)):75-84.  
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14009.htm>

英文引用格式: Peng YL, Yin H, Yu P. Layered urban VANETs routing protocol on bus mobile assistant. Ruan Jian Xue Bao/  
Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 75-84 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14009.htm>

### Layered Urban VANETs Routing Protocol on Bus Mobile Assistant

PENG Ya-Li<sup>1</sup>, YIN Hong<sup>1</sup>, YU Peng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Software, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

<sup>2</sup>(School of Business, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Corresponding author: PENG Ya-Li, E-mail: iampylily@hotmail.com

**Abstract:** Urban VANETs will be an important part of intelligent transportation in the future as it provides an effective solution to solve the city traffic problem. Most of the existing routing schemes have low performance on efficiency and reliability, because they can't solve the problems of high speed mobility, complex city traffic environment and different traffic density. Focusing on the urban environment of signal propagation and traffic pattern with red-light stops and fixed and cyclic bus route, this article proposes a layered urban vehicle ad-hoc network routing protocol model on mobility support in public transportation. The model transfers the complex and uncertain routing protocol model between the vehicles to collaborative and definitive three layered routing, taking advantages of the fixed bus route to optimize communication between ordinary vehicles and buses with the cluster head strategy. Mechanism of single-hop selection is provided according to the signal propagation attenuation model and vehicle mobility model, and mechanism of multi-hop forwarding is given based on delay probability. The resulted design can ensure the reliability and efficiency on bus-assistant forwarding. A cluster trigger strategy capable of adapting to the vehicle density is also presented. The simulation results show that the whole scheme can achieve good data delivery and low delay with sufficient hops.

**Key words:** bus mobile assistant; routing protocol; urban VANETs; adaptive vehicle density; probability forwarding

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61363077)

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

城市车载网络作为智能交通的主要技术,借助装载在车辆上的传感设备(如 RFID、传感器、GPS 等)收集车辆的属性信息和静、动态信息,以车载无线通信单元为节点、按自组织方式建立移动通信网络,可以实现对车辆运行状态和交通状况的全面感知,将车辆和道路信息及时、可靠地收集并传输<sup>[1,2]</sup>.车辆通过多跳方式实现车车、车路的信息传输,其多跳转发方式决定了路由转发协议成为组网技术的关键与核心<sup>[3]</sup>,然而,由于城市车载网络的特殊特点,在对路由传输技术的研究过程中,势必面临着许多特殊的问题:首先,由于车辆的高速移动,网络具有间歇连通性,且其中间转发节点的不确定性,导致无法估计时延,难以保证数据的高效、可靠转发.其次,城市交通环境下,高大建筑物、桥梁、隧道以及绿化带等,使本就因车辆高速移动带来的通信信道衰减更加严重,而且使通信的车载点的移动呈带状分割状态,如何解决信号衰减和道路带状分割对路由的影响是一大难题.再次,城市交通流量具有拥堵密集期和夜间稀疏期,如何设计适应不同车流密度的路由协议也是一个关键问题.

文献[4]分析车载网络的间歇性特性,提出了在这种网络下利用机会路由转发机制传递消息.文献[5]提出两跳中继算法,即源节点首先向  $n$  个中继节点发送数据拷贝,然后源节点和所有的中继节点都有拷贝发往目的节点.由于网络中存在  $n+1$  个拷贝,提升了路由的性能,但难以确定  $n$  值.文献[6]提出的 SW(spray and wait)算法,设定源节点消息的最大副本数为  $L$ ,并使用基于二叉树的方法来产生  $L$  份拷贝,相比只允许源节点分发消息拷贝的两跳算法,SW 进一步降低了传输延迟.文献[7]进一步提出了 SF(spray and focus)协议,在 spray 阶段将消息分发后,各中继节点会根据效用值的大小进行单副本转发,显著提高了传输性能.文献[8]提出同步复制的传染性路由转发策略,当节点发送一个报文时,报文被放置在本地缓存里,用唯一的 ID 进行标识.当两个节点相遇的时候,它们互相发送缓存中已有的报文列表,交换各自没有的报文.当操作完成后,两节点的缓存里有着同样的报文.传染性路由盲目地将数据转发给所有邻居节点或某些相邻节点,这种盲目性将极大浪费网络资源.如何确定路由复制转发的数据,以在保证可靠数据传递的同时,减少网络资源的浪费,取得性能上的平衡,成为一大关键难题.

为了减少资源的浪费,文献[9]基于历史数据对节点未来的运动状态进行预测,提出了一种概率性路由协议 PROPHET,从而进行有目的的数据转发.文献[10]提出采用移动汇聚节点以协助进行网络数据的转发,通过将网络分割成相对独立、自治的子簇,将广播信息的传输限制在簇内和有限的节点之间进行,将能获得高效的路由转发效率.文献[11]指出移动汇聚节点能够减少数据传输的跳数,在单跳传输方式下,能降低通信冲突的概率,提高了数据的可靠性.文献[12]假设移动协助节点以匀速固定路线运动,控制与汇聚节点一跳范围传输时,根据位置预先选取汇聚节点,能简化网络通信,提高系统稳定性.可见,通过将网络分层,借助移动汇聚节点将网络分割,以在有限范围内进行数据广播拷贝转发,是一个有效的手段.但由于车载网络的随机性,如何分层选取汇聚节点,成为需要研究的关键问题.

文献[13]将公交车作为移动网关,建立了基于公交移动网关转发的车路数据传输优化模型,然后通过对模型求解得出移动公交网关的数据传输的最优转发决策,在满足传输成功率阈值前提下,该方法能够获得最小传输延迟期望.文献[14]基于公交节点的特性,构建了一种抽象的网络拓扑模型,并基于该模型提出了一种基于索引的多级分组路由算法.文献[15]提出使用实时网络延时估计,通过实时获取邻居节点信息,并结合车辆运动方向,对各路段网络延时进行实时估计.轨迹固定的移动节点,在选择下一跳转发时具有更多可供参考的条件.城市车载网络中,公交车不仅对自身的移动具有可预测性,还可以了解其他线路车辆的运行线路.选取移动的、可预测的动态公交承担主要转发任务,可作为研究公交车载网络路由转发技术的重要突破口.

本文充分利用公交运行的周期性移动规律,考虑信号传播衰减与道路红灯等停对转发延时的影响,提出适用于城市车载网络的公交移动协助分层路由协议 BMAMLRP(bus mobile-assistant multilayer routing protocol).将公交作为车辆的中间转发节点,设计单跳链路生存期筛选与多跳延迟概率转发机制,辅助完成车车之间的信息传输,并设计普通车辆的簇头转发机制,以适应不同的车流密度通信需求.将车车之间的复杂、不确定路由转换为普通车辆-簇头-公交三层节点之间的确定、协作方式,发挥公交周期移动优势,并用簇头策略优化普通车辆与公交之间的通信,以获得高效可靠的路由转发性能.

## 1 分层协作路由模型

### 1.1 城市车载网络路由传输特性分析

由于城市环境的特殊性,车辆高速移动、分布不均匀、红绿灯等停以及城市带状道路分布等特性,给车载网络通信带来一系列挑战,但如能充分利用其优势特点,将能提高路由效率,增加信息传输的可靠性.首先系统总结分析城市环境下,车载网络的路由传输特性:

1) 节点的高速移动造成网络间歇连通以及中间转发节点的不确定性,加大了路由转发的难度,要充分利用其规律性进行路由转发的设计:

公交车沿着固定的轨迹周期性移动,不仅可以有效地获得自身移动至各路段的周期概率,还可以获得与之通信的其他线路车辆的周期相遇概率,将这种周期性概率关系列为路由转发指标,可作为车载网络路由转发的重要突破口.

城市交通通过红绿灯控制车流,车辆在道路上行驶遭遇红灯必须等停,若能充分利用红灯等停状态辅助路由转发,将对设计能自适应不同车流密度的高效路由协议具有重要作用.

车辆沿道路行驶具有带状特性,且相遇时具有同向与反向特性,结合车辆方向属性作为通信依据,是提高网络传输可靠性的重要方法.

2) 通信信道有严重的多普勒效应,衰减严重:

实际的城市交通环境下,高大建筑物、桥梁、隧道以及绿化带,会使本就因车辆高速运动带来的通信信道衰减更加严重.理想环境下的车辆转发协议设计,不能较好地适用于城市车载网络的数据传输,因此城市车载网络的路由转发指标设计应考虑信号质量因素<sup>[16]</sup>.

3) 城市交通车辆通信节点特性

单一车辆节点本身基本都装载 GPS 定位仪,可以获得自身的准确位置信息,并能提供不间断电力支持,因此要充分利用其位置可知的特性,而忽略普通传感器网络的低能耗要求.

车流密集时由于退避等待造成的时延较大,重视密集车流区域通信信道的竞争问题,为可靠的网络路由传输提供保障.

### 1.2 分层协作路由模型

综合各项城市交通特性,设计分层协作的路由协议模型,将车辆划分为 3 个层次:普通车辆节点、簇头节点与公交节点,将车车之间的路由协议转换为以公交为主体、簇头为辅助的 3 层节点之间的路由协作方式,各层路由发挥城市交通特点利于建模,公交层与普通车辆层之间的通信采用簇头分隔进行优化.3 层节点划分方式如下:

1) 公交节点:利用移动轨迹固定的公交车作为全网主要数据的转发节点,公交节点使用公交层移动协助路由转发协议相互通信转发信息,公交只与一跳范围内的簇头节点通信,不与普通车辆通信.

2) 簇头节点:为优化普通车辆与公交之间的路由通信模式,普通车辆节点可在不同条件下被触发为簇头,簇头收到普通车辆节点信息达到一定量或收集数据起止时间间隔达到一定阈值后,选择离自己最近的公交转发,转发完成后恢复为普通车辆节点.设计自适应车流密度的车辆簇头触发机制,簇头节点之间不通信,簇头作为普通车辆的信息转发节点.

3) 普通车辆节点:除公交和簇头节点,均为普通车辆节点,普通车辆节点根据车辆层选取簇头路由机制选择通信范围内的簇头节点进行路由转发.其多层协作路由模型如图 1 所示.

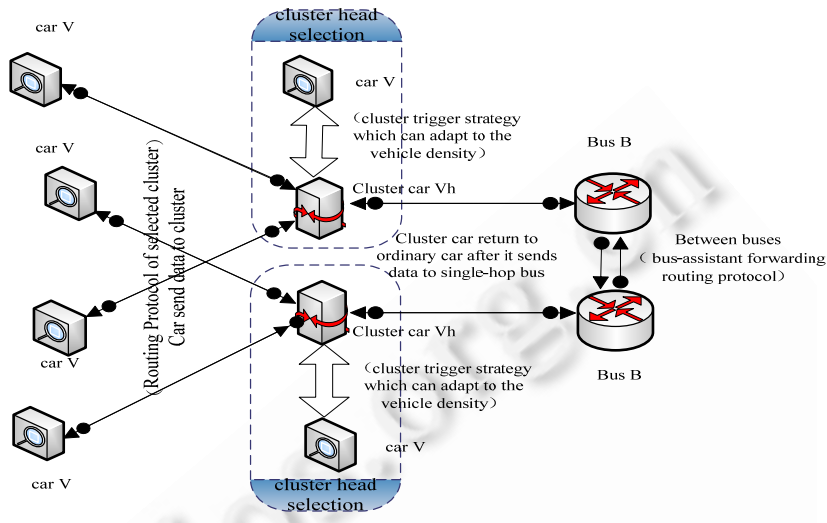


图1 多层协作路由模型图

如图1所示,普通车辆V根据一定的规则,自动触发为簇头节点 $V_h$ ,并选择通信范围内的某个簇头节点进行路由转发.簇头 $V_h$ 节点处于时刻激活状态,当收集的信息达到一定量或收集的起止时间间隔达到一定阈值后,找到一跳范围内的公交节点B转发收集的所有信息,并恢复为普通节点V.公交B只收集簇首节点 $V_h$ 的信息,公交B之间进行多跳转发,最终发送至目的节点(目的簇头车辆或路边静态辅助单元RSU).

在该多层协作路由模型下,需要重点研究公交车移动协助的路由转发协议以及普通车辆与公交的路由转发协议.本文主要针对公交车移动协助的路由转发以及普通车辆的簇头触发策略展开研究.

## 2 公交层移动协助路由转发协议

公交车节点在收集各簇头信息后,完成大范围内的路由转发,承载了数据量最大的路由转发任务.要保证全网路由的转发,首先要保证公交之间的高效可靠路由.移动轨迹固定的公交通过存储-转发完成全网数据的主要转发任务,大多数的公交转发协议都是针对历史数据进行分析,建立相应的路由度量指标,但城市交通由于红绿灯控制、道路车辆的随机性,对车辆运行的影响很大,基于历史数据的路由协议往往不能适应实际城市车载网络.

本文提出实时修正离散型随机动态规划延迟概率模型,基础模型通过单跳链路生存期阈值进行候选转发集筛选,然后基于公交历史运行数据建立车车、车路相遇基本概率模型,并结合实时等停数据进行修正,能获得更符合实际城市车载网络的高效可靠路由方案.

### 2.1 单跳链路生存期候选转发集筛选

为了降低车辆高速移动的影响,确保相邻节点的单跳转发不会因为链路中断而导致数据丢失,设计单跳转发的候选集筛选规则,使每次的单跳转发能在链路生存期内完成.保证单跳转发时数据的可靠递交,是可靠公公路由转发协议的基础.

对任意公交节点 $i$ ,计算其邻居节点的链路生存期 $L_{ij}$ ,与当前数据包传输时延 $T_i$ 对比,若满足 $L_{ij} > T_i$ 时,进入当前转发的候选转发集 $H_i = \{j | L_{ij} > T_i\}$ .鉴于城市环境的复杂性,其链路生存期指标需要综合考虑信号衰减的影响和车辆相对移动的方向以及速度.根据公交车的移动环境,采用经典的shadowing模型<sup>[11]</sup>描述公交车通信的无线传播特性,shadowing模型反映了信号强度和两个正在通信的公交车在真实场景下的关系.因此,根据shadowing模型,可得:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \times 10^{\frac{-10\beta \lg(d/d_0) + \sigma * N^{-1}(\theta)}{10}} \quad (1)$$

其中,  $P_r(d)$  是无线节点在距离发射节点为  $d$  时接收节点的信号强度,  $d_0$  为参考距离,  $P_r(d_0)$  表示距离一个无线节点  $d_0$  远时的接收功率,  $P_r(d_0)$  由 Friis 自由空间方程计算可得.  $\sigma$  是 shadowing 模型变量的标准差, 用以反映在某个距离处的通信概率.  $\theta$  为一个分布在  $[0, 1]$  之间的随机变量.  $N^{-1}(\cdot)$  为反正态分布函数,  $\beta$  为信道路径衰减指数.

若给定信号阈值  $q_c$ , 根据本式则可得有效接收范围  $R_v$ . 当两辆公交车的通信范围小于  $R_v$ , 通信被认为是有效的. 否则, 通信视为无效.

综合车辆相对移动速度, 可计算出公交车之间以及公交车与 RSU 之间的链路生存时间. 如果公交车  $i$  和  $j$  之间的绝对距离表示为  $|d_{ij}|$ , 其速度为  $v_i$  和  $v_j$ , 其移动方向为  $f_i$  和  $f_j$ , 则公交车  $i$  和  $j$  之间的链路生存期  $L_{BB}$  为.

$$L_{BB} = \begin{cases} \frac{R_v - |d_{ij}|}{|v_i - v_j|} & (f_i = f_j, v_i > v_j \text{ 且 } i \text{ 位于 } j \text{ 前}) \\ \frac{R_v + |d_{ij}|}{|v_i - v_j|} & (f_i = f_j, v_i > v_j \text{ 且 } i \text{ 位于 } j \text{ 后}) \\ \frac{R_v - |d_{ij}|}{|v_i + v_j|} & (f_i = -f_j, \text{ 且 } i \text{ 远离 } j) \\ \frac{R_v + |d_{ij}|}{|v_i + v_j|} & (f_i = -f_j, \text{ 且 } i \text{ 移近 } j) \end{cases} \quad (2)$$

公交车与 RSU 之间的链路生存期模型  $L_{BR}$  为

$$L_{BR} = \begin{cases} \frac{R_v - |d_i|}{v_i} & (i \text{ 远离 } AP) \\ \frac{R_v + |d_i|}{v_i} & (i \text{ 移近 } AP) \end{cases} \quad (3)$$

$d_i$  为公交车  $i$  与 RSU 之间的距离.

## 2.2 离散型随机动态规划的实时延迟概率模型

为充分利用公交轨迹固定、周期循环的特性, 拟采用随机动态规划方法建立与延迟相关的传输概率模型, 该方法在文献[9]中已对历史公交相遇数据建立模型并求解, 在不考虑城市其他影响因素的条件下, 能获得有限时延内数据成功递交给目的公交的最优多跳路径. 但城市环境实时的路由转发不能仅依靠历史数据的分析, 还需要充分结合实时数据. 为结合实时数据进行分析, 本文从建模事件、离散时间、周期选取以及历史数据基础模型的实时修正 4 个方面提出改进, 具体实施步骤如下:

### (1) 建模事件

模型事件 A 定义为公交到达某个路段的时间段的概率.

### (2) 运动周期与离散时刻定义

节点的运动周期指的是其一次循环运动所持续的时间, 为更好的刻画城市交通不同车流密度下的公交转发, 由于每天的城市交通流量的周期循环特性更准确, 我们取一天为一个周期  $T_p$ .

为了与建模事件保持一致, 采用离散化的处理思想, 离散时刻  $t_i$  取公交在一般路段的平均运行时间  $\Delta t_{slot}$  段, 则时刻  $t_i \in [t_i, t_i + \Delta t_{slot}]$ , 可得:  $m = T_p / \Delta t_{slot}$  为一个周期内的时隙个数.

### (3) 离散型随机动态规划延迟概率模型

从指定的时刻开始, 在有效的传输延迟时段内, 当前节点能成功传输数据到指定路段的概率. 这里, 令事件 A 表示消息成功传输到指定路段 S, 则

$P_{T_p, n}^s(v_i)_{(t, start, t, start + \Delta t, delay)}$  表示从  $t.start$  时刻开始, 在有限延迟  $\Delta t.delay$  时间内, 以  $v_i$  为源点, 无论是通过 carry 还是 forward 方式, 至多经过  $n$  跳, 最终使事件 A 发生的概率.

其中,  $T_a = \{\text{carry}, \text{forward}\}$  为活动集合, 表示在该时间段内的任意时刻, 节点将按照活动集  $T_a$  中的某一活动进行消息传递. 而  $P(v_i, v_j)_{(x)}$  表示在第  $x$  时隙, 节点  $v_i$  和  $v_j$  相遇的概率.

由于时间做了离散化处理, 故这里的连续时间概率可转换为如下的离散时间概率:

令  $P_{T_a, n}^s(v_i)_{(x, x+\Delta y)}$  表示从初始时隙  $x$  开始, 在之后的连续  $\Delta y$  个时隙内, 使事件  $A$  发生的概率, 其中  $x = [t.start/\Delta t_{slot}]$  为开始时刻所对应的初始时隙编号,  $\Delta y = [\Delta t.delay/\Delta t_{slot}]$  为持续时间段对应的时隙个数, 得到延迟概率模型:

$$P_{T_a}^s(v_i)_{(x, \Delta y)} = \max \left\{ \prod_{v_j \in U(v_i)_{(x, \Delta y)}} (1 - P(v_i, v_j)_{(x)}) [P_{carry}^s(v_i)_{(x, 1)} + (1 - P_{carry}^s(v_i)_{(x, 1)}) P_{T_a}^s(v_i)_{(x+1, \Delta y-1)}] + \sum_{v_j \in U(v_i)_{(x, \Delta y)}} P(v_i, v_j)_{(x)} P_{T_a}^s(v_j)_{(x, \Delta y)} \right\} \quad (4)$$

#### (4) 历史数据基础模型的实时修正

基础矩阵模型中, 从历史的公交运行情况中, 建立每个公交车辆在一个周期内  $\Delta t_{slot}$  离散时间段内到达每个路段的概率和两辆公交车相遇的概率. 在计算  $v_j$  时, 首先从候选转发集中选择  $j$  点, 其次, 每次获取  $j$  后, 可得其当前的红灯延时, 用于修正  $j$  节点车辆基础矩阵列概率值, 以获取当前  $j$  的实时路段概率.

实时红灯等停的数据修正方法如下: i) 从等停路段  $j$  开始, 红灯等停时间为  $t_{jr}$ , 遵照该公交车轨迹, 到下一路段  $R_{j+1}$  的所有时隙概率进行修正; ii) 设置一个实时调整系数  $\zeta$ , 作为红灯延迟对整体概率的影响因子; iii) 则公交车  $N_i$  在时刻  $x$  的修正概率满足:

$$\Delta k = \begin{cases} t_{jr} \% \Delta t_{slot}, & t_{jr} \bmod \Delta t_{slot} = 0 \\ 1 + t_{jr} \% \Delta t_{slot}, & t_{jr} \bmod \Delta t_{slot} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P'_{R_{j+1}}(N_i)_{(x+\Delta k, x+\Delta k+1)} = P_{R_{j+1}}(N_i)_{(x+\Delta k, x+\Delta k+1)}, & t_{jr} \bmod \Delta t_{slot} = 0 \\ P'_{R_{j+1}}(N_i)_{(x+\Delta k, x+\Delta k+1)} = P_{R_{j+1}}(N_i)_{(x+\Delta k, x+\Delta k+1)} \times \zeta \times \frac{t_{jr} \bmod \Delta t_{slot}}{\Delta t_{slot}}, & t_{jr} \bmod \Delta t_{slot} \neq 0 \\ P'_{R_{j+1}}(N_i)_{(x, x+\Delta k)} = P_{R_{j+1}}(N_i)_{(x, x+\Delta k)} \times \zeta \end{cases} \quad (6)$$

#### (5) 传输概率模型的函数空间迭代法

对于任意的  $x \geq 1, \Delta y \geq 1$  ( $x, \Delta y$  均为正数), 欲求节点  $v_i$  与延迟相关的最优概率方程的解, 得到  $v_i$  经多跳转发后, 有限延迟  $\Delta y$  传输成功率最高的路径. 而其概率模型函数  $P_{T_a, n}^s(v_i)_{(x, \Delta y)}$  与  $P_{T_a, n}^s(v_i)_{(x+1, \Delta y-1)}$  分别出现在方程的左右两边, 增加了问题的复杂性. 因而, 这样的函数方程不是递推方程, 需要采用函数空间迭代法求解, 其步骤如下:

i) 首先选定初始函数

$$P_{T_a, 0}^s(v_i)_{(x, \Delta y)} = \sum_{z=x}^{x+\Delta y} P(v_i, s)_{(z)} \times \prod_{w=x}^{z-1} (1 - P(v_i, s)_{(w)}) \quad (7)$$

这里,  $P_{T_a, 0}^s(s)_{(x, \Delta y)} = 1$  为边界条件.

ii) 然后用下列递推关系求出  $P_{T_a, n}^s(v_i)_{(x, \Delta y)}$ . 方法如下: 计算所有与  $i$  相遇的车辆  $j$ ,

$$P_{T_a, n}^s(v_i)_{(x, \Delta y)} = (1 - P(v_i, v_j)_{(x)}) [P_{carry, 0}^s(v_i)_{(x, 1)} + (1 - P_{carry, 0}^s(v_i)_{(x, 1)}) P_{T_a, n}^s(v_i)_{(x+1, \Delta y-1)}] + P(v_i, v_j)_{(x)} P_{T_a, n-1}^s(v_j)_{(x, \Delta y)}$$

通过求得不同  $n$  值下的延迟概率效用分布矩阵  $P_{T_a, n}^s(v_i)$ , 求得最优解. 而

$$P_{T_a, n}^s(v_i) = \begin{bmatrix} P_{T_a, n}^s(v_i)_{(1,1)} & P_{T_a, n}^s(v_i)_{(1,2)} & \dots & P_{T_a, n}^s(v_i)_{(1,m)} \\ P_{T_a, n}^s(v_i)_{(2,1)} & P_{T_a, n}^s(v_i)_{(2,2)} & \dots & P_{T_a, n}^s(v_i)_{(2,m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{T_a, n}^s(v_i)_{(m,1)} & P_{T_a, n}^s(v_i)_{(m,2)} & \dots & P_{T_a, n}^s(v_i)_{(m,m)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

最终可获得从起始节点  $v_i$  开始, 有限时延内数据成功递交给目的路段的最优多跳路径.

### 3 普通车辆簇头触发策略

为优化公交与普通车辆的数据通信, 在分层协作路由模型中已提出簇头分隔的机制. 由簇头承担普通车辆

和公交的信息转发,由于分层协作,简化簇头与公交的通信,簇头只选择距离自己最近的公交进行数据转发。

数据在车载网络传输的过程中,车流密度的不同对数据传递有着非常明显的影响。车流密度较大的道路上,车辆节点比较密集,备选中继节点多,数据转发的机会因此增加,但通信密集导致的信道冲突也更严重,退避时延增加。车流密度较小的道路上,数据携带时间增加,如果信息量较大而无法顺利传输,会导致数据丢失。而且在真实场景的车流密度会有明显不同,因此研究车流稀疏与密集时的路由算法具有很大的现实意义。为了优化普通车辆与公交之间的通信,设计能适应车流密度的车辆簇头触发机制。

在城市道路中,为控制车辆有序通行,特别是在车流密集时的通行,设置了红绿灯控制车辆通行的机制。为了能自适应车流密度,我们设置与红灯等停一致的簇头触发机制:

(1) 充分利用红灯等停机制和道路带状单车道机制,处于路口处每个车道方向的车辆节点,若遭遇红灯等停,被触发为簇头节点。

(2) 若当前道路通畅,车流量较稀疏,普通车辆会难以遭遇簇头节点。而普通车辆若有数据需要发送,当信息量达到一定阈值或一定优先级,可自动触发为簇头。

簇头节点之间不相互转发数据,只要数据量达到一定阈值,则立即将数据转发给一跳范围内的某个公交节点。簇头节点直接选取离自身最近的公交进行转发,其路由策略简单化了,而是将主要的转发任务交给移动可预测的公交车辆。由于分层协作的优化方式,可以简化由于高速移动车辆对路由转发造成的不确定性难题,将车车之间的大范围不确定路由问题转换为可预测公交机会转发与分层协作的单层路由问题。

#### 4 仿真测试与分析

仿真模拟测试基于课题组开发实现的智能交通模拟仿真平台,本平台提供了基本的车辆节点模型(包括运行起始与终点位置,运行轨迹等)、道路模型(路段、车道、车道迁移关系等)与信号灯模型,能模拟实际道路环境,能为本文提出的协议方案提供所有基础模型和模拟仿真。

我们基于真实的地图构造模拟实验中的道路布局。我们选取东湖区地块进行模拟仿真测试,模拟实验中的道路方向均是根据实际道路数据绘制,并在其中的实际道路路口配置了交通信号灯,其信号灯的配时变化在实际获取中做了微调,基本与实际相符。同时,我们设置了 10 条不同的公交车线路,根据实际公交运行做了调整,使其在该区域内循环运行,由于公交在系统内做了调整,公交运行的历史数据,基于每次模拟运行的数据做后台分析后供下次模拟使用,以对每次公交运行数据进行实时修正。其它相关仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数表

传输范围	250m	数据包大小	10byte
$d_0$	1	数据产生率	per10s
$\sigma$	4.0	簇头数据收集阈值	1000byte
$\beta$	1.8	车辆速度	0~50km/h
$\zeta$	0.5	通信信号质量	0.9

整体仿真分两大部分:首先测试车流密度为 20%、40%、60%这 3 种情况下的传输成功率与延迟性能,测试不同跳数限制下,不同车流密度对性能的影响。接着,测试本方案与 SF 与 SW 在传输性能方面的比较。

为了简化模拟,我们将公交的周期设置为 1 小时,分别测试不同车流密度下,随着上限跳数  $n$  的增加,平均传输成功率和延迟变化的情况。由图 2 可知,随着  $n$  的增加,3 种不同车流密度下的数据传输成功率都逐渐增大,在跳数较小时,3 种不同车流密度下的传输成功率相差较大,但当跳数接近 5 时,不同车流密度下的传输成功率已基本相同。而在图 3 中,很明显,不同车流密度下的传输延迟基本一致。综合分析,当上限跳数设置合适时,自适应车流密度的簇头选取机制在 20%~60%的车流密度中,其传输成功率和延迟性能指标接近,因此,本方案能取得较好的自适应车流密度的传输特性。在车辆密度低于 20%情况下,由于道路拓扑范围较大,车辆之间通信较少,整体传输基本由车辆自身携带完成数据的提交,因此,不做测试。而在车辆密度大于 80%的车流密度下,由于目前的策略没有考虑拥塞车辆通信信道竞争的问题,因此,暂不做测试,为下一阶段的研究内容。

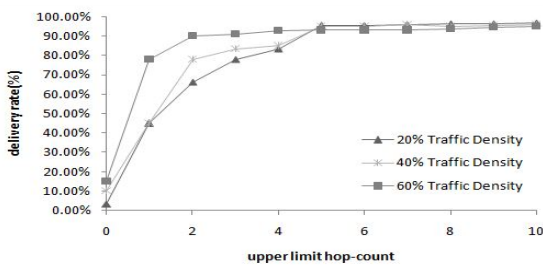


图 2 不同车流密度下上限跳数与传输成功率分布图

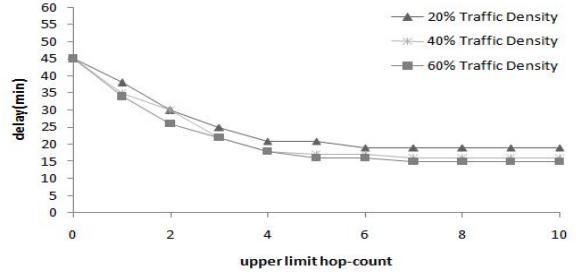


图 3 不同车流密度下上限跳数与延迟分布图

在相同的实验模拟环境下,取  $n=6$  时,通过设置不同的公交车发车间隔时间,我们比较测试了不同公交车数量下,本文提出的公交移动协助的分层路由协议(BMAMLRP)与 SF 和 SW 在传输成功率与延迟方面的性能.

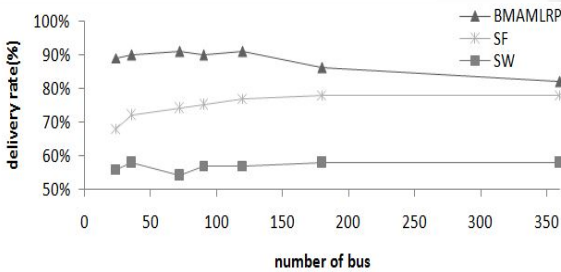


图 4 3 种协议传输成功率比较

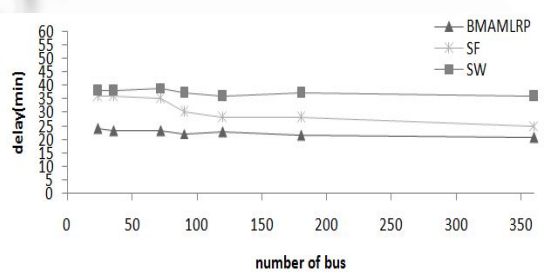


图 5 3 种协议延迟比较

由于 SF 与 SW 均是基于单幅本协议上扩展的限制副本数量的多副本协议,有效提高了网络的资源利用率,与本方案限制最大转发跳数原理类似,因此选取这两个协议与本方案进行性能的比较.从图 4 和图 5 可看出,BMAMLRP 的传输成功率明显高于 SF 和 SW,同时在延迟性能方面也优于它们.然而 SF 和 SW 两种算法均只依赖于单跳范围内邻居节点的效用,没有利用网络中普遍存在的间接多跳连通特性.而 BMAMLRP 则充分利用网络中节点运动的周期循环特性,在此基础上结合了单跳的可靠筛选和多跳的节点传输延迟概率,在可靠性和延迟性能方面都具有较好表现.

### 5 结束语

针对城市车载网络间歇连通、城市环境复杂导致信号衰减严重以及车流密度不同对车载网络通信影响的 3 大问题,本文提出 BMAMLRP 的公交移动协助分层路由协议.充分利用公交运行的周期性移动规律,将公交作为车辆的中间转发节点,设计单跳链路生存期筛选与多跳延迟概率转发机制,完成车车之间的信息传输,并设计普通车辆的簇头转发机制,以适应不同的车流密度通信需求.仿真实验表明,本 BMAMLRP 协议能达到较高的传输成功率和较低的网络延迟,设计的簇头转发机制,在当前转发跳数达到一定数量时,能自适应不同的车流密度.但是,当车流密度很大时,由于还未考虑信道竞争导致的丢包,下一步将研究普通车辆与簇头之间的竞争通信.

### References:

- [1] Wei D, Wang YX, Wang J, Liu YH, Deng WW. A survey on mobility models of vehicular ad hoc networks. Chinese Journal of Computers, 2013,36(4):677-700 (in Chinese with English abstract).
- [2] Jiang HT, Zhang H, Li QM. Research on routing protocol of vehicular delay-tolerant networks. Journal on Communications, 2013,34(3):76-84 (in Chinese with English abstract).



- [3] Wu L, Wu DA, Liu M, Wang XM, Gong HG. Periodic intermittently connected-based data delivery in opportunistic networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013,24(3):507–525 (in Chinese with English abstract) <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4227.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04227]
- [4] Fall K. A delay tolerant networking architecture for challenged internets. In: Proc. of the ACM SIGCOMM. 2003.
- [5] Xing GL, Wang T, Jia WJ, Li M. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station. In: Proc. of the MobiHoc 2008. New York: ACM Press, 2008. 231–240.
- [6] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. 2005. 252–259.
- [7] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Spray and focus: Efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility. In: Proc. of the 2007 Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communication Workshop on Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks, Vol.2. 2007. 902–910.
- [8] Mundur P, Seligman M, Lee G. Epidemic routing with immunity in delay tolerant network. Int'l Journal of Information Engineering, 2013,3(3):1–7.
- [9] El Oudrhiri A, El Kamili M, El Fenni MR, Omari L. New forwarding strategy for prophet routing in delay tolerant networks. In: Networked Systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 300–305.
- [10] Zhang XW, Dai HP, Xu LJ, Chen GH. Mobility-Assisted data gathering strategies in WSNs. Journal of Software, 2013,24(2): 198–214 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04349]
- [11] Xu ZZ, Cheng CL, Cheng B, Guan XP. Sharing mobility strategy improves location service in wireless sensor and actor networks. IEEE Communication Letters, 2012.
- [12] Gao S, Zhang HK, Xu HS. Efficient data gathering approach in sensor networks with path-fixed sinks. Journal of Software, 2010, 21(1):147–162 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3688.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03688]
- [13] Chen L, Li ZJ, Jiang SX, Feng C. MGF: Mobile gateway based forwarding for infrastructure-to-vehicle data delivery in vehicular ad hoc networks. Chinese Journal of Computers, 2012,35(3):454–463 (in Chinese with English abstract).
- [14] Li Z, Zha XY, Liu FY, Zhang H. Indexing based multi-level clustering routing algorithm in public transportation delay tolerant networks. Journal of Computer Research and Development, 2011,48(3):407–414 (in Chinese with English abstract).
- [15] Song C, Liu M, Gong HG, Chen GH, Wang XM. Distributed real-time information based routing protocol in vehicular ad-hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2011,22(3):466–480 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3808.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03808]
- [16] Kuang LB, Wang ZJ, Xu M, Chen YW. End-to-End transmission time based opportunistic routing protocols for bus networks. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2013,1(21):470–492.

#### 附中文参考文献:

- [1] 魏达,王沿锡,王健,刘衍珩,邓伟文.车载自组网移动模型综述.计算机学报,2013,36(4):677–700.
- [2] 姜海涛,张宏,李千目.车载时延容忍网络路由协议研究.通信学报,2013,34(3):76–84.
- [3] 吴磊,武德安,刘明,王晓敏,龚海刚.机会网络中面向周期性间歇连通的数据传输.软件学报,2013,24(3):507–525. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4227.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04227]
- [10] 张希伟,戴海鹏,徐力杰,陈贵海.无线传感器网络中移动协助的数据收集策略.软件学报,2013,24(2):198–214. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04349]
- [12] 郜帅,张宏科,徐怀松.Sink 轨迹固定传感器网络的高效数据采集机制.软件学报,2010,21(1):147–162. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3688.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03688]
- [13] 陈丽,李治军,姜守旭,冯诚.车载 Ad hoc 网络中基于移动网关的数据传输.计算机学报,2012,35(3):454–463.
- [14] 李陟,查玄阁,刘凤玉,张宏.公交时延容忍网络中基于索引的多级分组路由算法.计算机研究与发展,2011,48(3):407–414.
- [15] 宋超,刘明,龚海刚,陈贵海,王晓敏.基于分布式实时信息的车载网络路由协议.软件学报,2011,22(3):466–480. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3808.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03808]



彭雅丽(1983-),女,江西吉安人,硕士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络,智能交通.

E-mail: mr.liyanbing@gmail.com



喻鹏(1982-),男,讲师,主要研究领域无线传感器网络、计算机网络.

E-mail: 353160178@qq.com



尹红(1966-),女,高级实验师,主要研究领域为无线传感器网络,计算机网络.

E-mail: yinghong@jxnu.edu.cn

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn