

## 移动分布感知的车载自组网络数据分发<sup>\*</sup>

吴磊<sup>1</sup>, 刘明<sup>1+</sup>, 王晓敏<sup>1</sup>, 陈贵海<sup>2</sup>, 龚海刚<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

<sup>2</sup>(南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

### Mobile Distribution-Aware Data Dissemination for Vehicular Ad Hoc Networks

WU Lei<sup>1</sup>, LIU Ming<sup>1+</sup>, WANG Xiao-Min<sup>1</sup>, CHEN Gui-Hai<sup>2</sup>, GONG Hai-Gang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

+ Corresponding author: E-mail: csmliu@uestc.edu.cn, <http://www.uestc.edu.cn>

**Wu L, Liu M, Wang XM, Chen GH, Gong HG. Mobile distribution-aware data dissemination for vehicular ad hoc networks. *Journal of Software*, 2011, 22(7): 1580–1596. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3871.htm>**

**Abstract:** This paper proposes MDA, a mobile distribution-aware data dissemination, based on Publish/Subscribe, for Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs). To take advantage of VANETs' self-organization and self-stabilization, this paper first establishes an appropriate Publish/Subscribe model in VANETs. Next, the subscribers' distribution is predicted by calculating the delivery probabilities between vehicles and subscribers. Third, based on the predicted distribution, adjust notification token's deployment and forwarding in the VANETs are used to achieve effective distribution of notification brokers (notification-token holder). Compared with existing solutions, a novel heuristic algorithm is applied to alter the notification broker distribution and to adapt to a real-time VANETs situation. Furthermore, MDA can also reduce an overall network load of VANET by controlling the occurrences in broadcasting. Simulation results based on a real city map and realistic traffic situations show that the MDA performs much better in terms of delivery and delay ratios and have a higher network load than other solutions.

**Key words:** VANET (vehicular ad hoc network); data dissemination; publish/subscribe; notification-token; notification-broker

**摘要:** 提出了一种面向发布/订阅系统基于车辆移动分布感知的事件分发策略 MDA (mobile distribution-aware data dissemination). 基于车流的自组织性及自稳性的特点, 建立 VANET (vehicular ad hoc network) 下的发布/订阅模型, 通过计算车辆与移动订阅者的相遇概率, 预测订阅者的移动分布, 并以此为依据实时部署和调度广播令牌在网络中的转发, 从而有效地控制事件代理的分布, 保证了数据传递的有效性. 与已有相关研究相比, MDA 采用的启发式算法, 能够使事件代理的分布更好地适应网络环境的动态变化. 此外, MDA 采用了一种基于概率预测密度的令牌控制算法, 通过实时地调整令牌的数量, 进而控制事件代理的数量, 降低了整个网络的负载. 模拟实验结果表明, 与现有的几种消息分发算法相比, MDA 能以较低的网络负载和传输延迟获得较高的数据传输成功率.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60703114, 60903158, 6082520, 61003229); 国家重点基础研究发展计划(973)(2006CB303000); 四川省科技支撑计划项目(2009GZ0004)

收稿时间: 2009-11-23; 修改时间: 2010-03-05; 定稿时间: 2010-04-23

关键词: 车载自组织网络;数据分发;发布/订阅;事件令牌;事件代理

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

随着无线通信技术的迅速发展,车载自组织网络(vehicular ad hoc network,简称 VANET)逐渐由新兴网络研究的分支成为了一个重要的无线网络研究领域,受到学术界和工业界的瞩目.如欧洲的 CAR2CAR<sup>[1]</sup>,SVC<sup>[2]</sup>,美国的 ITS<sup>[3]</sup>,日本的 Ashra<sup>[4]</sup>等.VANET 技术可以实现事故告警、辅助驾驶、道路交通信息查询、乘客间通信和 Internet 信息服务等应用.这些信息会通过多跳方式在大范围车辆间传递.从网络角度来看,这些应用涉及到了有效信息的获取、交换、扩散和处理机制.虽然现有的许多无线设施也能够实现前面提到的这些服务,例如 3G,但是它的代价高,而且当基础设施不存在的时候,就不能够提供这些服务.特别是在灾害发生时,无线基础设施很可能被破坏,这种情况下,车载自组织网络就能够给用户 提供交通、救助和撤离信息.

显然,数据分发(data dissemination)是大多数 VANET 应用的基本功能<sup>[5,6]</sup>,但与传统 MANET(mobile ad hoc network)相比,VANET 既具有节点高速移动、间歇连通性和快速动态网络拓扑等不利因素,难以保证移动节点间持续稳定的连接;也具有节点可装配 GPS、容易获得自身及邻近节点的地理位置信息、运动轨迹具有可预测性、数据转发的延迟容忍等有利因素;且使用可充电电池,无能源受限问题.可见,传统的 MANET 数据分发算法<sup>[7]</sup>在 VANET 环境下并不适用.此外,在实际应用中,车辆获取和扩散的数据信息种类都是多种多样的,由于数据的接收者可能只对其中某种或某几种信息感兴趣,因此这些数据需要进行分类传输.例如:对于一个交通事故引起的堵塞信息,只有那些行驶路线经过该区域或者目的地就在该区域的车辆需要知悉,再比如事故告警、道路交通信息查询等.我们可以将车辆收集的不同种类数据分类传输给不同的兴趣车辆,以便及时进行处理.为了满足上述应用的需求,就需要设置一种高度灵活、动态的数据信息分发处理系统,而发布/订阅系统(publish/subscribe,简称 pub/sub)正具有这样的数据分发处理能力.

发布/订阅系统是一种使分布式系统中的各参与者,能以发布/订阅的方式进行交互的中间件系统.在 pub/sub 方式下,信息发布者以“事件”的形式将信息发布到 pub/sub 系统中;订阅者定义一个订阅条件,表示对系统中的某一特定种类的事件感兴趣;而 pub/sub 系统事件代理则保证将所发布的事件及时、可靠地传送给所有感兴趣的订阅者.然而,由于 VANET 是间断连通的,并且一般的发布/订阅系统没有考虑网络拓扑快速变化的问题,所以传统的发布/订阅路由技术<sup>[8]</sup>在 VANET 环境下也不适用.

本文根据 VANET 的特点,给出了 VANET 中发布/订阅系统的网络模型,进而提出了一种基于车辆移动分布感知的发布/订阅系统事件分发策略 MDA(mobile distribution-aware data dissemination).基于车载自组织网中的车辆运动具有有序的自组织结构,建立一种事件广播令牌机制,规定凡捕获该令牌的车辆即为事件代理,充分利用车流的自组性和自稳性的特点,通过计算车辆与移动订阅者的相遇概率来预测订阅者的移动分布;并以此为依据,实时部署和调度事件令牌在网络中的移动,捕获该令牌成为事件代理的车辆通过对事件的周期性的广播,有效地覆盖了订阅者的当前分布区域,保证了数据传递的有效性.与以往的相关研究相比,MDA 在 VANET 中引入了发布/订阅系统模型,采用了一种全新的启发式概率算法,能够使概率的更新更好地适应网络环境的动态变化.此外,MDA 也采用了一种基于概率预测密度的令牌数控制算法,能够根据订阅者的移动分布实时地调整事件令牌的数量,从而有效地控制事件代理的密度,降低了整个网络的负载.模拟实验结果表明,在 VANET 环境下,MDA 能以较低的网络负载和传输延时获得较高的事件传输成功率.

本文第 1 节对相关工作进行说明.第 2 节对本文的动因以及采用的系统模型进行描述.第 3 节给出 MDA 的详细描述.第 4 节进行模拟验证.最后总结全文.

## 1 相关工作

VANET 是一个运行在特殊环境中、承载特殊应用的移动自组网.由于网络拓扑的频繁变化,车辆移动速度很快,路由技术成为重大挑战之一.由于车载网络的间歇连通性,单播的多跳递交常常是不可靠的和高时延的,大量的信息通告仍然依靠广播完成.目前,有关 VANET 中这方面的研究大多使用可靠的广播机制来实现<sup>[9,10]</sup>.

然而,在较大的范围内广播消息会引起广播风暴,因此许多研究采用了区域划分或消息限制的方法.

传染式路由(epidemic routing)<sup>[11]</sup>规定移动节点相遇时随机地成对交换消息,从而避免无差别泛洪的巨大开销.但是它不适合于节点缓存和网络带宽受限制的网络,特别是当车辆密度较高时,过多的车辆在通信时容易导致对无线信道的剧烈竞争.Ram 等人<sup>[12]</sup>提出了一种分级扩散协议(prioritized epidemic),协议中维护复制密度的梯度参数.同时,基于递送到目的地的开销、源和失效时间,将 bundles 划分为多个级别.这种开销按照每个链路的“平均可用性”信息计算,并且通过扩散的方式在网络中分发.Huang 等人<sup>[13]</sup>基于中国上海市区车载网络(SUVnet)的研究,分析了其间歇连通性,并且基于延迟容忍网络提出了改进的 DAER(distance aware epidemic routing)路由协议.文献[14]则基于 VANET 环境改进了 Epidemic 算法,充分利用车流的聚类特性,通过各簇的边界车辆实现消息的广播,把扩散限制在不同车流簇之间,降低了网络的通信负载.

文献[15-18]都是建立在车辆到车辆(vehicle-to-vehicle,简称 V2V)上的分布式自组织交通信息系统.文献[15]提出了 SOTIS(information dissemination in self organising intervehicle networks)协议,SOTIS 要求每个车辆节点都监测周围节点信息并独自分析交通状况,再将结果发送给周围所有邻居节点,实现交通管理.Sormani 等人在文献[16]中以高速路上发生的交通事故为例,说明为了避免危险情况的发生,事故消息须立刻传递到3个地方,分别是:(1)最近的警察局和急救中心;(2)通知高速路附近的车辆前方有事故,注意减速避让;(3)通知最近的高速路入口处.文献[17]针对类似的直路场景,提出了一种告警消息广播扩散协议,协议中采用二分法对待转发区域进行分割,从而在分割区域中选择最佳转发车辆.此外,类似的应用在文献[18]中也有讨论.然而,上述方法主要都是针对高速公路这类的一维场景,并不适用于基于城市网络道路的复杂场景.Leontiadis 等人<sup>[19]</sup>提出了一种机会性的事件传输方案,针对城市场景中的移动车辆作为接收目的点,结合直路与十字路口两种场景,根据车辆的当前运动模式对事件副本进行简单的转发扩散.然而,由于未考虑交通流具有的自组织性及自稳性的特点,易受当前车辆运动的偶然因素影响,对车流变化的动态适应性较差.文献[20]提出的 MDDV(a mobility centric data dissemination algorithm for vehicular networks)算法,利用称为 message holder 的车辆携带数据到目标区域扩散消息.然而,数据包的传递是基于预载入的网络拓扑流量状态.由于路段的汽车密度是随时间而变化的,因此这种基于预载入的历史统计数据计算的延时最短路径,不能够反映出真实的最优路径.李舒等人<sup>[21]</sup>利用动态渗流理论分析和讨论了车载自组网在一维和二维场景下的连通性问题,给出了一些初步的理论性结论,但并未涉及具体的路由广播算法.此外,路边设施辅助的路由方案比较少见.陈军等人<sup>[22]</sup>设计了一种适合在城市场景下的高效、稳健的路由策略,通过在交通岔口引入固定节点,采用二次选择路由方向的方法,提高了数据的有效递交率.文献[23]同样讨论了在街道路口安装固定设施来中继和递交数据包,这些设施节点像静态路由器一样工作,采用 store-and-forward 方式保证以最佳路径传递数据.文献[24]采用类似的机制,规定信息沿主要干道车流扩散,通过在交叉路口设置固定设施广播信息,将数据包传递给来自其他道路的车辆.文献[25]提出如何解决城市中的停车场信息的查询问题,将通知区域划分为若干级小区,将各级小区中的发布信息进行分级融合,再按照各级区域扩散,有效地限制了广播范围,控制了网络负载.然而,这些方法均是围绕如何把数据无区分地在通知区域内尽量传递给每个车辆这一问题而进行的,并未考虑消息的过滤和分类传输,也未充分利用车载网络中节点运动相对有规律、具有一定的自组织结构以及其轨迹具有可预测性的特点.

除上面提到的算法以外,相关研究还包括文献[26-31].文献[26]提出的 MobEyes(smart mobs for urban monitoring with vehicular sensor networks)协议依靠节点收集数据,但只扩散数据的摘要,最后根据摘要在网络中建立了一种分布式的数据索引,有效地减少了系统开销.文献[27]把无关联的邻近车辆组织到一起,仅在群体内部进行频繁的安全信息交互.在文献[28]中,每个车辆节点从路由层获得邻居位置信息,根据消息的覆盖区域和邻居位置共同决定是否向邻居广播消息,有效地限制了广播范围.Naumov 等人在文献[29]中针对城市和高速路环境下车辆间的通信情况,提出了一种基于连接的路由协议(connectivity-aware routing),协议首先从源点到目的点之间建立多跳的连接路径,一旦路径建立成功,就会根据变化自动调整以保持路径,而无需搜索另外的路径.文献[30]则利用车辆自组织构成的簇建立与维护车辆间的稳定连接路径,而簇的构成又是根据各车辆的运动方向和速度来完成的.但是,上述两者均是以端到端连接这一假设作为前提的,并不适合于节点稀疏且拓扑变

化剧烈的网络.文献[31]则针对城市场景下车流实时变化的情况,提出了一种结合道路拓扑和车流密度的路由协议,然而车流密度与拓扑路径的权重因子选取直接影响着协议的性能优劣.

## 2 系统模型与问题分析

本节首先给出系统模型假设和定义,然后讨论相关应用场景,在模型中引入“事件令牌”概念,用于分析 VANET 中的发布/订阅问题,最后在该模型下对 VANET 的发布/订阅系统进行全面分析和描述.

### 2.1 假设与定义

假设每辆汽车都装配了自动导航系统(navigation system),能够通过 GPS 服务获得其所在的位置.整个交通网络能够被抽象成一个有向图,其中,节点表示路口,边表示路段.每辆车都装载了电子街道地图,在导航系统的协助下,能够计算出从源点到目的点的一条地理最优路径.汽车利用短距离无线信道(100m~250m)与其他汽车进行通信.此外,每辆汽车都能记录订阅信息(subscription),并能与接收事件进行快速匹配.

**定义 1(邻居汽车).** 汽车的邻居汽车指的是在其通信范围内的所有汽车.汽车通过 hello 消息获取邻居信息,如位置、速度以及运动方向,并保存在邻居表(neighbors table)中,这在文献[29]中有相关讨论.

**定义 2(事件令牌).** 事件令牌主要由两部分组成:(1) 通告消息;(2) 广播令牌.通告消息即为事件产生源需要扩散的消息;广播令牌就是节点车辆广播事件消息的许可证.事件令牌的数据记录格式如下:

$$\langle Range, TTL, Notification, Token \rangle,$$

其中,Range 定义了扩散区域,TTL 代表了事件的生存时间,Notification 为广播的事件,Token 则为令牌.

**定义 3(事件代理).** 捕获令牌的车辆即为代理,能够周期性地在其通信范围内持续广播事件(notification).

例如,在图 1 中,拥有事件令牌的车辆成为了事件代理,凡在其通信范围内的事件订阅者均能接收到事件代理广播的消息.只有当代理释放令牌或离开扩散区域时,才会停止广播.而事件令牌通过短距离无线信道转发给下一个普通车辆,捕获该令牌的车辆即成为新的事件代理,而原事件代理变为普通车辆.

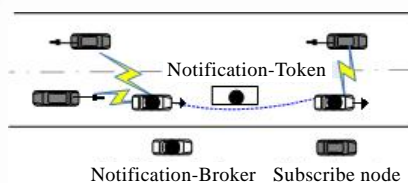


Fig.1 Notification-Token and notification-broker

图 1 事件令牌与事件代理

### 2.2 应用场景

在图 2 所示的城市街道中,由于突发事故而引起局部的交通拥塞.为了减少事故区域对交通的影响,需要将路况信息转发给正驶向该区域或是导航系统的路线经过该区域的车辆,以协助车辆及时更正和调整路线,从而缓解事故区域的拥塞程度,改善路段的交通状况.据统计<sup>[32]</sup>,在欧洲每天有大约 3 000 万辆汽车阻塞在道路上,由此增加的能源消耗、尾气排放和时间浪费而带来的经济损失数以亿计.一项由美国德克萨斯州交通委员会 2005 年的研究报告<sup>[33]</sup>表明,到 2010 年,全美 75 个大城市因为交通拥塞而引起的经济损失的总和将达到 695 亿美元.类似的应用还包括城市停车场信息的查询问题,根据文献[34]中研究人员对德国慕尼黑市一个街区的统计,每天仅仅是因为寻找有效停车位就会造成 350 万欧元的能源损失和 15 万小时的时间消耗.此外,还有如事故告警、辅助驾驶等相关应用.故在城市交通网络中,研究和建立基于车载自组网的信息分发处理系统有着十分重要的意义.

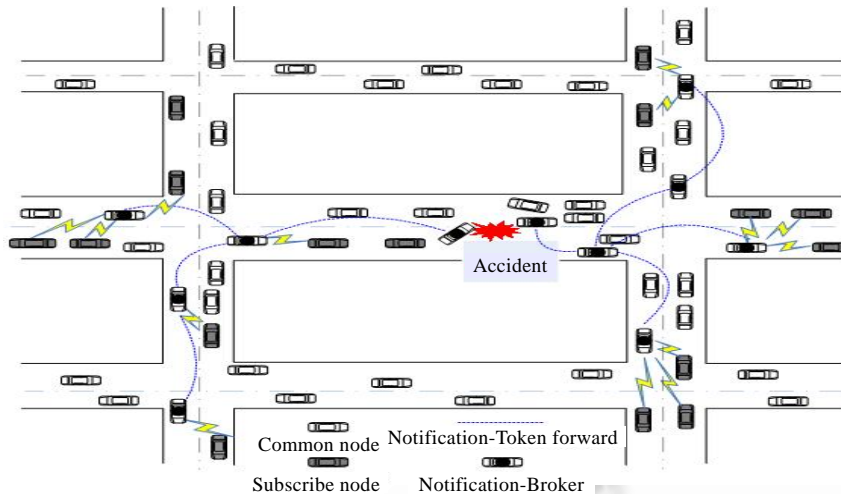


Fig.2 A sample accident scenario on a urban environment with notification being delivered to interested vehicles

图2 城市场景中,路段拥堵事件被传递给兴趣车辆

### 2.3 问题描述

车载自组织网络中的发布/订阅系统由事件发布者、事件订阅者和事件代理组成.图2中,由事故车辆或附近车辆作为消息源发布事故消息,通过实时部署和调度事件令牌在车载自组网中的移动,委派相关车辆作为事件代理,从而有效地控制了代理车辆的运动和分布.根据定义3,车辆一旦捕获令牌,即成为事件代理,通过代理车辆的周期性广播,将消息传递给其通信范围内的所有订阅车辆,避免了消息无区分的盲目扩散.

与大多数已有发布/订阅系统类似,VANET 的发布/订阅系统要解决的关键问题也是如何使发布者发布的事件尽量低成本、高效和可靠地到达各订阅者.为了满足上述要求,有效的 VANET 中的发布/订阅需要同时满足以下特点:(1) 能够实时地根据订阅者的移动分布,合理地调度令牌的移动,从而使捕获令牌成为事件代理的车辆,以有效地广播覆盖订阅者的当前分布区域.若令牌的部署和扩散不正确,则无法保证事件代理周期性的广播能够有效地覆盖订阅者的当前分布区域,进而降低数据传递的有效性;(2) 设计恰当的事件令牌数控制算法,合理的令牌数量能够有效地控制事件代理的分布密度,这必然有利于降低网络的负载,提高整个网络的性能.

基于上述分析,事件的传输成功率是主要的设计目标,在考虑事件传输成功率的同时还要兼顾事件的传输延时和由此带来的网络通信负载,以达到三者之间的平衡.为此,本文提出了 VANET 中面向发布/订阅系统的事件分发策略 MDA.在下一节中,将对 MDA 进行具体描述.

## 3 MDA 策略的设计实现

### 3.1 策略的主体框架和步骤

基于 MDA 策略的数据分发中共有 4 种参与角色:事件发布者、事件代理、事件订阅者和普通车辆.方案实现需要经过以下两个阶段的 7 个步骤:

#### 1) 事件订阅者的确认及预测概率的计算

- a) 普通车辆均能在任何必要时刻产生并记录订阅消息(subscription);
- b) 事件产生源首先扩散订阅确认包(polling packet),该确认消息会在通知区域内周期性地扩散,车辆记录的 subscription 一旦与 polling 消息匹配,该车辆即成为事件订阅者;
- c) 通知区域内的每辆车将实时计算和更新自身与订阅车辆的相遇概率;
- d) 订阅车辆一旦驶离事件规定的通知区域,则取消订阅转变成普通车辆.

## 2) 事件令牌的调度和代理的产生

- a) 事件源发布者会初始化产生和发布一定数量的事件令牌(注:数据格式见定义 2).该类令牌会通过网络中的移动车辆进行扩散;
- b) 接收到事件令牌的车辆将捕获其中的令牌从而转变成代理,再将通知事件进行周期性的广播,直到事件令牌被转发给下一个车辆或令牌有效时间耗尽为止;
- c) 各代理会周期性地对通信范围内的邻居进行聚类,根据各簇对订阅车辆的预测概率来决定令牌的转发.此外,代理还会根据邻居车辆概率预测密度实时地调整令牌的数量,有效地控制网络通信负载.

这里给出 4 种相关的原语操作:

- (1) *math()*——匹配原语,能够将接收事件与车辆自身所记录的订阅信息进行快速匹配;
- (2) *notification-forward()*——事件令牌转发原语,释放事件令牌,将其转发至下一指定车辆;
- (3) *notification-add()*——事件令牌复制原语,复制增加事件令牌,从而增加事件代理;
- (4) *notification-delete()*——事件令牌删除原语,删除冗余令牌,减少事件代理.

下面将对各关键步骤进行详细的讨论和分析.

## 3.2 确认事件订阅者

普通车辆均能产生并记录自己的订阅消息,大量确认订阅身份的数据包(*polling packet*)会以传染式路由(*epidemic routing*)方式,按照包中指定的通知区域迅速扩散,该数据包格式如下:

$$\langle Range, Location, Type, TTL \rangle,$$

其中,*Range* 代表扩散区域,*Location* 代表事件源地点,*Type* 表示事件类型,*TTL* 是该事件的有效时间.区域内的车辆会在其有效时间内以传染式路由方式持续扩散该订阅确认包(*polling packet*),只有当车辆离开该区域或者有效时间耗尽时,车辆才停止扩散.这样,一旦在事件有效时间内,任何订阅该类事件的车辆进入事件通知区域,均能在短时间内迅速收到订阅确认包,然后使用 *math()*原语与记录的订阅消息进行高速匹配,以确定该车辆是否作为订阅者对该事件感兴趣.

需要注意的是:(1) 订阅消息的模式为(*type, name, operation, value*),其中,*operation* 是操作符,例如“<, >, =, between”等.一个 *polling packet* 匹配一个 *subscription* 当且仅当 *subscription* 的所有约束被满足;(2) 订阅确认数据(*polling packet*)仅包括扩散区域、事件类型、事件源地点与有效时间等少量关键信息,其大小远小于事件令牌数据本身.在我们的模拟实验中,一次实验所扩散的所有 *polling packet* 的数据总量只占总数据通信量的 2.5% 左右,并且从初始传染源(即事件产生源)采用传染式方法扩散该消息至全通知区域的时间也不足 4 分钟,仅占模拟实验时间的 6.5% 左右.

## 3.3 计算与更新节点对订阅者的预测概率

预测车辆与订阅者相遇的概率表明了车辆与订阅者通信的可能,数据传输就是根据对订阅者的预测概率进行的.预测概率是基于车辆与订阅者历史相遇的频率而做出的一种预测估计.由于在城市场景下,车辆构成的交通流具有典型的自组织特性.因此,在我们的系统模型中,事件订阅车辆并不是均匀地分布在通知区域内,它们的运动模式也不是随机的.实际上,在自组织的交通流系统中,车辆的运动是一种有目的的行为,而不是一种完全无规则的游走,每个交通流的主体行为是一种理性驾驶,从而使其本身具有一定的自稳能力,并具有保持并恢复其有序状态的能力.这在一定条件下会导致车辆间形成一定的、有序的自组织结构.车辆对订阅者相遇概率的计算,要充分考虑和利用车辆交通流的这些特点,以使预测概率能够较准确地反映订阅车辆的局部动态分布,有效地提高数据的传输能力.

根据定义 1,车辆会通过周期性接收的 *hello* 消息获知邻居的速度和方向.为了能够知道邻居车辆对订阅者的预测概率,我们修改 *hello* 消息的数据记录格式为  $\langle \vec{v}_j, P_j \rangle$ ,其中:  $\vec{v}_j (\theta_j, v_j)$  是速度矢量,包括车辆 *j* 的运动方向  $\theta_j$  和运动速率  $v_j$ ;  $P_j$  则表示车辆 *j* 对订阅者的预测概率.  $\|\vec{v}_j - \vec{v}_i\|$  则是车辆 *i* 与邻居车辆 *j* 速度的欧拉距离.由于车



辆交通流的自组织特性,邻域内的欧拉距离小,代表车辆的运动模式相似,这些相似运动的车辆会以一种“协作”的方式来选择它们共同的群体行为,因此,这些车辆也应该有类似的订阅者的预测概率的变化趋势.反之,当邻域内的车辆速度间的欧拉距离变大时,车辆间表现出不同的运动模式,因此有着相对独立的对订阅者的预测概率的变化趋势.基于上述分析,车辆对订阅者的预测概率的变化形式将借鉴自组织映射原理(SOM)<sup>[35,36]</sup>,其具体计算和更新的公式如下所示:

$$\begin{cases} P_i(0) = P_{\text{int}} & (1) \\ P_i(n+1) = P_i(n) + \sum_{k=0}^{\text{count}(n_{d_{j,i}} < R | P_i < P_j)} \frac{\eta h_{j,i}(P_j(n) - P_i(n))}{\text{count}(n_{d_{j,i}} < R | P_i < P_j)}, n \geq 1 & (2) \\ P_i(n+1) = P_i(n) \times \alpha^{t_{\text{age}} / \Delta t} & (3) \end{cases}$$

公式(1)中, $P_{\text{int}} \in (0,1)$ 是车辆对订阅者预测概率的初始值.需要注意的是,这里我们假设订阅者自身的概率  $P_i=1$ .

公式(2)中, $h_{j,i} = \exp(-\|\bar{v}_j - \bar{v}_i\|^2 / 2R^2)$ 表示拓扑领域函数, $R$ 是窗口宽度,其大小等于车辆的无线通信距离; $\eta$ 是当前学习速度因子,表示当前车辆  $i$  其  $P_i$  的递增速度. $\text{count}(n_{d_{j,i}} < R | P_i < P_j)$ 表示计数操作,计算当前车辆  $i$  的邻居范围内满足条件  $P_i < P_j$  的邻居车辆数, $P_i$  的更新周期设为  $\Delta t$ .根据拓扑领域函数  $h_{j,i}$  可知, $h_{j,i}$  的幅度值随侧向距离  $\|\bar{v}_j - \bar{v}_i\|$  的增加而单调递减.换句话说,与邻居车辆  $j$  的运动模式越接近,预测相遇概率的变化趋势就越一致, $P_i$  受  $P_j$  的影响程度也就越大;反之,其预测相遇概率的变化趋势就越独立, $P_i$  受  $P_j$  的影响程度也就越小.这里,我们采用邻居车辆的平均影响度来实现对概率  $P_i$  的递增变化计算,避免个别车辆节点的偶然性影响.

公式(3)则给出了概率  $P_i$  的衰减趋势,其中  $\alpha \in (0,1)$  是概率衰减因子, $\Delta t$  为衰减周期(注意:更新与衰减周期均为  $\Delta t$ ), $t_{\text{age}}$  是概率连续衰减的持续时间.由公式可知,当在一个衰减周期内,车辆  $i$  的邻居车辆  $j$  均不满足  $P_i < P_j$  时,车辆  $i$  的概率  $P_i$  按照公式(3)进行衰减,并且随着衰减时间的持续增长, $P_i$  的衰减速度将会加快.这意味着,车辆已经进入到了订阅者移动分布的低概率区.

### 3.4 事件令牌的控制

事件令牌在车载自组网中的移动和分布就是基于各车辆对订阅者的预测相遇概率来实现的.在我们的系统模型中,并不是所有车辆都会参与事件的转发,只有捕获了事件令牌的车辆才会成为代理,周期性地广播事件,凡在其通信范围内的事件订阅车辆均能接收到该事件消息.我们的目的就是合理地控制事件令牌的数量,实时调度和部署令牌在VANET中的移动分布,将事件令牌向订阅者当前实际分布的区域转发,尽量避免令牌长期在未分布订阅车辆的区域存在,从而使事件代理的持续性广播能够有效地覆盖订阅车辆,避免无效的事件广播.

#### 3.4.1 事件令牌的转发

首先给出事件代理对邻居车辆的聚类算法.

假设在当前代理车辆  $i$  的通信范围内有  $N$  个邻居车辆,令  $\Sigma = \{ \nu \in \{1 \leq n \leq N\} \}$  代表这  $N$  个节点的集合.节点  $i$  首先与这  $N$  个节点通过 hello 消息了解它们此刻各自的速度矢量  $\bar{v}_j (\theta_j, v_j)$ .注意:由于车辆的运动受到道路拓扑的限制,各车辆交通流具有自组织性和自稳定能力,其运动流呈管状分布,我们以速率  $v_j$  为极径,运动方向  $\theta_j$  为极角构建极坐标系.例如,在十字路口的模式下,车辆  $i$  的邻居集合  $\Sigma$  中的节点在极坐标系下的分布如图 3 所示(注意:直路模式下的节点分布与此类似),节点  $i$  直接使用速度矢量进行聚类.具体算法概括如下:

**算法 1.** 速度矢量聚类算法.

Step 1. 初始化  $C$  个代表节点,获得初始类簇集合  $\Phi = \{U_1, U_2, \dots, U_C\}$ ;

Step 2. 对每个节点  $n_j \in \Sigma$ , 计算它的速度  $\bar{v}_j$  与每个类簇  $U_i \in \Phi$  的平均速度  $\bar{v}(U_i)$  间的欧拉距离;

Step 3. 选择具有的最小欧拉距离  $D(U_i) = \min(\|\bar{v}(U_i) - \bar{v}_j\|)$ , 若  $D(U_i) / \|\bar{v}(U_i)\| \leq \varepsilon$ , 则  $U_i = \{n_j\} \cup U_i, n(U_i)_{\text{new}} = n(U_i)_{\text{old}} + 1$ , 否则新增一个类簇:  $C = C + 1, \Phi = \Phi \cup \{U_{C+1}\}$ ;

Step 4. 更新类簇  $U_i$  的平均速度  $\bar{v}(U_i)_{\text{new}} = (\bar{v}(U_i)_{\text{old}} n(U_i)_{\text{old}} + \bar{v}_j) / n(U_i)_{\text{new}}$ , 若未对所有邻居节点聚类完毕,则

转 Step 2.

Step 5. 返回类簇集合  $\Phi=\{U_1,U_2,\dots,U_C\}$ .

初始化代表节点时,可根据道路的交通流模式,在通信范围内的每个车流方向随机选择一个车辆作为代表节点.例如图 4 中的十字路口场景,节点在极坐标系下呈 4 个方向的间断或连续的管状分布,在各方向上随机选取一个代表节点,获得初始类簇集合  $\Phi=\{U_1,U_2,U_3,U_4\}$ ,预设  $\varepsilon$  为聚类阈值, $n(U_i)$  为簇  $U_i$  的节点数.算法的计算复杂度为  $O(NCd)$ ,其中, $d$  代表聚类特征的维数, $N$  代表当前代理通信范围内的邻居车辆数, $C$  是已获得的簇数.这里, $d=2;C<N$ ;而邻居车辆数  $N$  由于受到道路拓扑和通信范围的限制,其值较小,故算法的计算复杂度较低.

令牌转发的原则:就是让事件代理尽可能地在订阅车辆分布区域进行有效性的广播覆盖,并使令牌尽量向订阅者高密度分布区移动,避免代理在未分布订阅车辆的区域或低密度区域内进行长期无效广播.

我们设定转发周期为  $T_{int}$ ,车辆使用原语 *notification-forward*( $\cdot$ )转发事件令牌应考虑两种不同情况:

- 事件代理在通知区域内
  - (1) 事件代理每隔  $T_{int}$  时间间隔,就使用算法 1 对邻居车辆进行聚类;
  - (2) 代理车辆分别计算邻居范围内各车流簇的平均预测概率  $P_{avg}$ ,并求出最大平均值  $\max(P_{avg})$ ;
  - (3) 若该代理的概率  $P<\max(P_{avg})$ ,则选择一个与该簇运动方向相反的车辆作为新代理转发令牌.
- 事件代理在通知区域外
  - (1) 事件代理一旦发现自己驶离通知区域,立即将令牌转发给当前邻域内正驶向通知区域的车辆;
  - (2) 若事件令牌超过预设的延迟容忍时间仍未进入通知区域,则当前转发车辆删除该令牌.

分析:1) 在第 1 种情况下,令牌转发的依据是车辆对订阅者的预测相遇概率,由于相遇概率是基于车辆与订阅者历史相遇频率的估计,车辆的预测概率越高,则意味着该车辆与订阅者的历史相遇频率越高;那么令牌则应该向车辆运动的反方向传递,从而逆向追踪订阅者的移动.事件代理对邻居范围的车辆进行聚类,得到不同运动模式的车流簇,选择具有最大平均值的簇的运动反方向作为追踪参照.在 VANET 中,车辆交通流具有自稳能力,特别是在邻居车辆范围内,利用速度矢量进行聚类得到的车流簇,在一段时间内具有相对的稳定性.通过计算簇的平均概率,可以有效避免个体车辆的偶然性影响,提高转发机制的可靠性.此外,当某局部区域内代理车辆过多时,未接收到事件副本的订阅者数量会快速减少,使该区域的订阅者分布密度迅速降低,造成事件代理的预测概率  $P$  快速衰减.结果是,代理释放令牌将其向高概率分布区转发.图 4 中(其中,椭圆区域代表车流簇),事件代理  $i$  在其通信范围内对邻居车辆聚类(见算法 1),得到  $A,B,C,D$  这 4 个车流簇,通过计算获知簇  $B$  具有最大平均预测概率,并且  $P_{avgB}>P_i$ ,故在与簇  $B$  运动方向相反的簇  $D$  中,随机选择车辆  $j$  作为新的候选代理,将令牌转发给它.一旦释放令牌,车辆  $i$  就转变成普通车辆停止广播,而车辆  $j$  捕获令牌后则成为新的代理开始广播事件消息.

2) 在第 2 种情况下,事件代理一旦离开通知区域就停止广播,这样将减少区域内的代理数,降低事件广播的有效覆盖率.为了提高事件的成功传输率,需要将离开通知区域的令牌回传到区域内,由于代理的转发时间周期是  $T_{int}$ ,那么令牌离开通知区域的距离  $distance$  一定小于  $T_{int}\times v$ , $v$  是当前携带令牌的代理车辆的速率.在实验中,车辆的速率在 40km/h 左右,而  $T_{int}$  设为 30s,则驶离距离一般不会超过 300m,正常情况下是小于一条街道的长度.故,采用将令牌转发给当前邻域内正驶向通知区域的车辆的方法,能够有效地实现令牌的回传.为了避免在特殊情况下令牌长期游荡在通知区域外,当前代理可以通过判断令牌在区域外存在的持续时间,使用原语 *notification-delete*( $\cdot$ )来删除区域外存在时间过久的令牌(详见第 3.4.2 节).

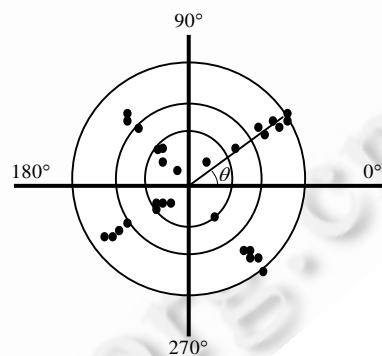


Fig.3 Neighbors' distribution in polar coordinates

图 3 邻居节点在极坐标系中的分布



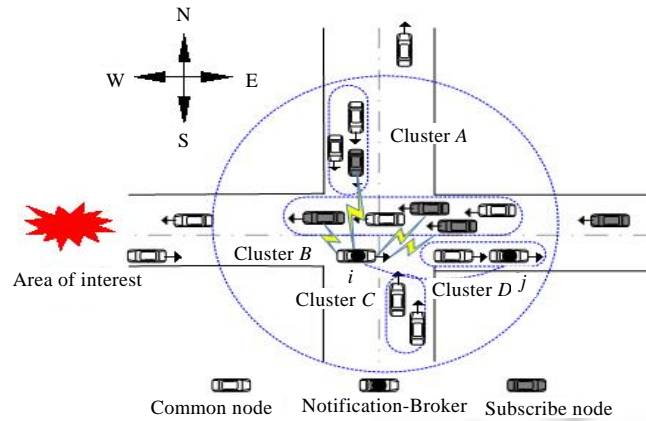


Fig.4 Select the next vehicle to forward notification-token  
图4 选择新代理转发事件令牌

### 3.4.2 事件令牌数的动态调整

根据定义 3,只有捕获了事件令牌的车辆才能成为事件代理,对接收到的事件进行持续性广播;而一旦释放令牌,则该事件代理转变成普通车辆,停止对消息的广播扩散.故,令牌的数量直接决定了事件代理的数量.过多的事件令牌会导致产生过多的事件代理,将增加网络的无效通信量;而过低的令牌数量又会使事件代理大量减少,从而导致代理车辆广播的覆盖面急剧缩小,降低了传输成功率,延长了传递延时.

令牌数调整原则是:一方面,通过删除冗余令牌,减少过多代理的无效广播;另一方面,增加适量令牌,提高代理的广播对订阅者当前分布区域的有效覆盖.这里提出一种利用概率预测密度控制令牌数的算法.首先,令牌会记录在最近连续  $k$  个转发周期时段内每个周期的邻居集合中最大的概率预测值.设  $\max(P_i)$  为第  $i$  个转发周期内邻居车辆具有的最大概率预测值.令概率预测密度  $p = \sum_{i=1}^k \max(P_i) / k$ ,  $\delta$  为概率预测密度阈值.其算法形式化描述如下:

Begin

While (令牌的生存时间  $TTL$  没有终止) DO

代理根据当前捕获的令牌最近  $k$  个转发周期的记录计算概率预测密度  $p = \sum_{i=1}^k \max(P_i) / k$

If ( $p > \delta$ ) then 代理触发原语 *notification-add*(·)增加一个令牌向邻居车辆转发.

Else if ( $p < \delta$  且位于通知区域外) then 代理触发原语 *notification-delete*(·)删除捕获的令牌,退出.

If (令牌在区域外且持续时间超过  $\Delta t_{tolerate}$ ) then 代理触发原语 *notification-delete*(·)删除捕获的令牌,退出.

Else if (当前代理在邻居范围内检测到其他事件代理的广播)

then {代理停止广播,进入静默期,并开始记录静默持续时间;

while (静默持续时间小于  $\Delta t_{tolerate}$ ) DO

if (当前代理再次检测到其他事件代理的广播)

then 代理触发原语 *notification-delete*(·)删除自身捕获的令牌,退出算法流程.

Else 持续记录静默时间;

Endwhile

代理进入激活状态,恢复广播.}

Endwhile

令牌生存时间结束,触发原语 *notification-delete(·)*,删除令牌.

End

分析:当事件的有效时间尚未终止时,代理会根据令牌的记录信息计算概率预测密度  $p$ ,若  $p$  大于预设的阈值  $\delta$ ,则代表当前令牌所在区域的订阅者分布密度较高,需要增加令牌,提高广播覆盖率(如图 5 所示);而对令牌的删除则需要考虑以下 4 种情况:

- (1) 若  $p$  小于阈值  $\delta$  并且捕获该令牌的代理位于通知区域以外,则表示令牌从订阅者低密度分布区进入了无效区域,需要删除令牌(如图 6(b)所示),否则保持现状,避免在通知区域内删除过多令牌;
- (2) 若令牌在通知区域外存在的时间超过了预设的延迟容忍时间  $\Delta t_{tolerate}$ ,则当前事件代理删除该令牌,避免令牌在无效区域内长期游荡;
- (3) 当代理在邻居范围内检测到其他同类代理时,也会删除自身捕获的令牌,避免在同一个邻域内存在冗余的令牌(如图 6(a)所示).需要注意的是,为了不至于删除过多令牌,邻域内各代理将采用两次握手确认机制,以保证该邻域内至少存在一个令牌.具体描述如下:当代理接收到其他代理的直接广播时,立即进入静默期,停止广播.这里,设静默期的最长持续时间等于  $\Delta t_{tolerate}$ .若在静默持续期内再次接收到其他代理的广播,则当前代理删除自身令牌;若超过静默期的最大持续时间仍未再次收到其他代理的广播,则当前代理恢复广播;
- (4) 若事件有效时间终止,则令牌生存时间结束,删除令牌.

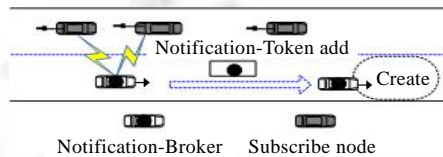


Fig.5 Create a new notification-token

图 5 复制事件令牌

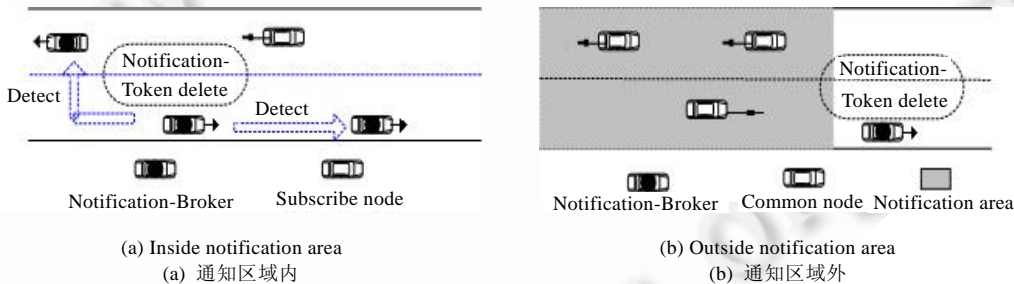


Fig.6 Delete notification-token

图 6 删除事件令牌

#### 4 模拟实验

本节通过模拟实验来评估 MDA 的性能,将它与 Epidemic routing<sup>[11]</sup>和 Opportunistic spatio-temporal dissemination(OSTD)<sup>[19]</sup>进行比较.需要说明的是:参与比较的 Epidemic 协议作为经典的数据扩散算法,在不考虑节点缓存及网络带宽资源受限的情况下,理论上应具有最优的成功传输率和延时.而 OSTD 则是近年来专门针对二维城市场景中的移动车辆作为接收目的的节点的代表性方法.此外,为了验证 MDA 中令牌转发机制的有效性,特意将它与随机转发机制(random)相比较.在 Random 中,令牌转发的方式改为随机选择邻居车辆转发,而对令牌数的控制算法以及消息的发布/订阅方式则与 MDA 保持不变.实验主要比较不同协议在数据成功传输率、延时和网络通信量负载这 3 个方面的性能.数据成功传输率是指,在规定的模拟时间内接收到数据的订阅者数

量与实际发起订阅的车辆数的比率,延时是指订阅者从进入消息扩散区域开始到接收到消息所经历的时间,而通信量负载则是网络中产生的数据总量.

#### 4.1 模拟环境

根据成都市的真实地图,实验选取了一块 4500m×5000m 的区域,包括 65 个路口,98 条双向两车道通行的路段,并且在 12 个主要路口设置了交通信号灯,其拓扑如图 7 所示.在中心区域设置事件消息产生源,所有车辆的



Fig.7 Road topology used in the simulation

图 7 仿真中采用的街道拓扑

初始位置均随机产生,消息扩散面积(notification area)为实验区域(simulation area)的 80%.为了简化问题,我们规定凡行驶目的地在该产生源 500m 范围内的节点均符合订阅条件.特别地,在实验中控制符合订阅条件的车辆数在任意时刻不超过车辆总数的 25%.实验采用开源的 VanetMobiSim<sup>[37]</sup>交通模拟器来完成场景的实现以及车辆轨迹文件的产生.该模拟器能够较真实地模拟城市道路中车辆的移动.需要说明的是,除了指定的相关参数设置以外,其余的参数,如车辆的加/减速度、安全距离、路径选择算法等,均采用 VanetMobiSim 的缺省设置.实验的网络模拟平台采用 NS-2.33.其中,移动节点的通信半径为 200m,MAC 协议采用 2Mbps 的 IEEE 802.11,hello 消息的时间间隔为 1s,模拟时间为 1h.其他网络参数以及相应的缺省值见表 1.以下的实验结果若未特别说明均为 100 次独立实验结果的均值.

Table 1 Simulation parameters

表 1 实验参数

Parameter	Default value	Parameter	Default value
Notification area	20 sq.km	Clone threshold	0.75
Vehicle velocity	30~60 kph	Aging constant	0.85
Probability updating interval	20 s	Learning rate	0.25
Vehicle forwarding interval	30 s	CBR rate	1 packet per sec
Initial number of notification-token	10	Delay tolerant value (s) of notification-token	300 s
Number of vehicle	1 000	Notification packet size	2 KB
Cluster threshold	0.25	Buffer size (in packet)	200

#### 4.2 性能对比

默认参数下算法的性能比较见表 2.综合 3 个性能指标可以看出,MDA 的性能最好,它在 4 种方法中具有最高的传输成功率以及最低的传输延迟,而且对网络通信量负载控制得比较好.由表 2 可见,MDA 策略的传输成功率明显高于 Epidemic,达到了 85.5%.同时,在延迟性能方面也优于 Epidemic.这是因为,传染式扩散(epidemic)规定移动节点相遇时成对交换对方未有的消息.从理论上分析,这种基于传染病模型的转发扩散应该有很好的传输和延时性能.但当网络带宽受限时,特别是在实验中车辆密度较高的情况下,过多的车辆在通信时容易产生对无线信道的剧烈竞争,导致传输成功率的降低和延时的增加,并使整个网络的通信量急剧增加.此外,随机转发策略(random)由于是随机转发和部署令牌,导致代理在网络中呈随机分布,订阅者只有遇见代理才能接收到事件.因此,从表 2 中可以看出,其成功传输率最低而延时最大,同时造成了大量的无效事件广播,增加了网络的通信负载.

Table 2 Simulation results comparison with default parameters

表 2 默认参数下模拟结果的对比

	MDA	Epidemic	Random	OSTD
Delivery ratio (%)	85.5	72	56	81.5
Delivery delay (second)	456	502	780	475
Total amount of data traffic generated (KB)	$1.5 \times 10^5$	$3 \times 10^6$	$3.2 \times 10^5$	$1.8 \times 10^5$



由表 2 我们还可以看出,MDA 策略与 OSTD 策略相比,在传输延迟和网络通信负载方面略好于 OSTD,在成功传输率方面优势最为明显.这是因为,OSTD 对事件副本的简单转发策略并未充分考虑车载网络的自组织性,未利用车辆交通流与订阅者相遇的历史数据,受车辆运动的偶然性因素影响较大,从而造成相对较低的成功传输率.相反地,MDA 结合了车载自组网络的特点,充分利用具有自稳能力的车辆交通流与订阅者相遇的历史频率,能对当前订阅车辆的移动分布做出较为准确的估计,有效地提高了传输成功率、延时和网络通信负载的性能指标.

### 4.3 节点密度对性能的影响

本组实验主要研究不同车辆节点密度对 4 种方法的性能影响.其他默认参数固定,节点密度的变化通过改变节点的总数来实现.我们将节点的总数从 200 逐渐增长到 1 000,实验结果如图 8(a)~图 8(c)所示.

从图 8(a)可以看出,随着车辆密度的增大,MDA,OSTD 和 Random 的传输成功率在节点稀疏阶段均有一定程度的提高,并且 MDA 的传输成功率始终高于其他两种方法.之后,它们的传输成功率基本保持稳定.这是由于在车辆稀疏的时候,节点密度的增加会显著增强车载网络的连通性,保证了数据在正确路径上传递的机会,这将间接提高事件到达订阅者的几率.但当网络连通性保持稳定之后,节点数在 700~1 000 的变化对上述 3 种方法传输率的影响则将迅速弱化.需要注意的是,Epidemic 的传染式扩散在节点稀疏阶段有着最高的成功传输率,但随着节点密度的增大,它的成功传输率会显著降低.尤其是在高密度的环境中,车辆在通信时容易产生对无线信道的剧烈竞争,导致传输成功率的快速下降.图 8(b)显示,随着车辆密度的增大,MDA 和 OSTD 的传输延迟均有一定程度的减少,因为更多的车辆能够提供更多转发数据的机会,从而减少了数据被携带的时间,缩短了传输延迟.而 Random 由于采用随机转发扩散消息,事件的传输带有很强的偶然性,故传输延迟几乎不受密度的影响.Epidemic 则因为节点密度的增加,加剧了节点对信道的争用,造成传输延迟的迅速增加.从图 8(c)还可以看出,随着节点密度的增大,Epidemic 同样因为参与扩散消息的车辆数的增加导致网络通信量的急剧变大,而 MDA,OSTD 和 Random 则因为各自对扩散消息的限制策略,通信量负载几乎均以线性方式增长,并且由于 MDA 对订阅者移动分布的较为准确的预测,减少了无效通信量的产生,具有最好的负载控制能力.

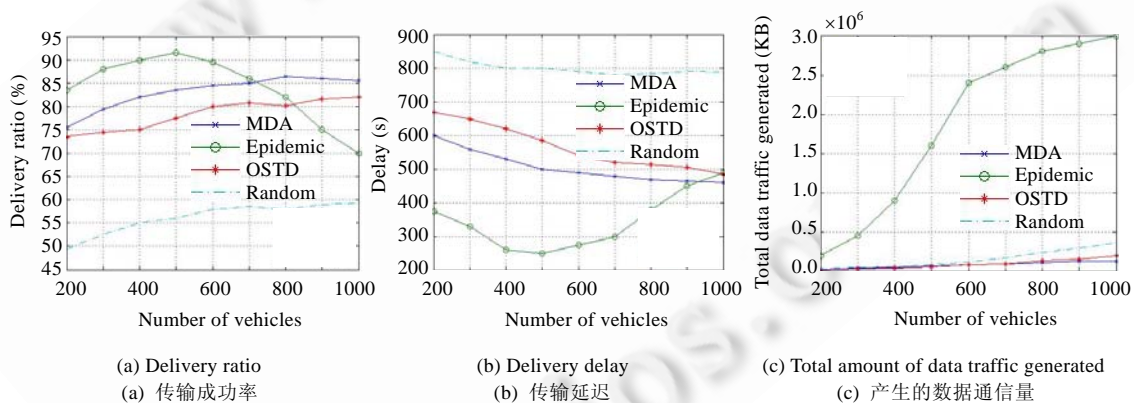


Fig.8 Impact of vehicle density

图 8 车辆节点密度的影响

### 4.4 数据产生率对性能的影响

本组实验研究数据产生率的变化对 4 种算法性能的影响.在该组实验中,分别设置节点低密度和高密度两种场景进行比较,其他参数保持默认值,设定 CBR 数据产生频率从每 10 秒钟 1 个包到每 10 秒钟 10 个包来变化.

图 9(a)、图 9(b)和图 10(a)、图 10(b)分别记录了在低密度节点和高密度节点两种场景下,4 种方法的传输成功率和传输延时与 CBR 固定数据产生率的变化关系.从图中可见,数据产生率的变化并未对 MDA,OSTD 和 Random 的传输成功率和延时产生明显影响.并且在高密度环境下,它们的传输性能要整体上高于低密度的场

景.这是由于网络的连通性加强的缘故,提高了数据在正确路由上传递的机会,同时减少了数据被携带的时间.此外,Random 采用随机选择转发事件副本,订阅者对消息的接收带有极强的偶然性,故传输成功率最低而延时最大.需要注意的是:Epidemic 在低密度节点场景下具有最高的传输成功率(如图 9(a)所示)和最少的传输延时(如图 9(b)所示).但随着数据产生率的提高,其传输成功率会显著降低,而传输延时却显著变大.这种趋势在高密度节点场景下则更为明显,如图 10(a)和图 10(b)所示.这是因为在低密度场景下,传染式的扩散能够迅速将事件副本传递至订阅者;而在高密度场景下,数据产生率的增加会提高单位时间的通信量,进而导致 MAC 层的冲突加剧,降低了其在传输率和延时方面的性能.而 MDA 由于不受数据产生率的影响,在高密度环境下,其传输性能优势更为明显.

为了说明固定数据产生率的变化对网络通信负载的影响,特地记录了各种方法在节点高密度场景下每秒的数据通信量.由图 10(c)可见,随着数据产生率的增加,Epidemic 单位时间的通信量会急剧增长,网络中扩散的事件副本数会显著增加.而 MDA,OSTD 和 Random 均有对事件副本扩散的控制策略,通信量负载的增长维持在一个稳定的水平,并且由于 MDA 对订阅者移动分布的较为准确的预测,降低了无效的数据通信量,其单位时间的通信量始终低于其他算法,具有最好的负载控制能力.

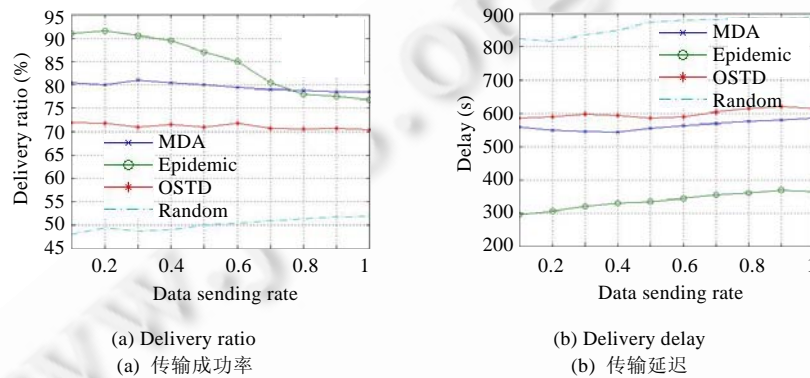


Fig.9 Impact of of data sending rate under low density (number of vehicles=200)

图 9 低密度场景下数据产生率的影响(车辆数=200)

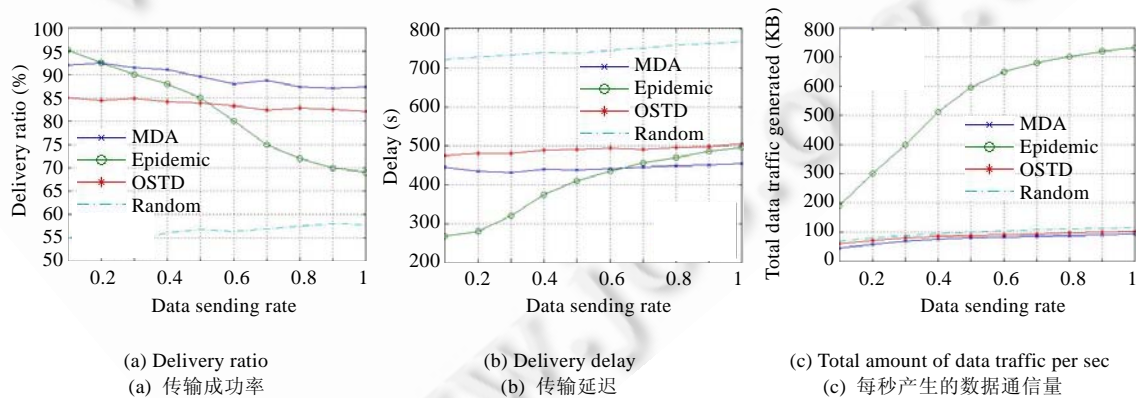


Fig.10 Impact of data sending rate under high density (number of vehicles=1000)

图 10 高密度场景下数据产生率的影响(车辆数=1000)

#### 4.5 事件扩散范围对性能的影响

本组实验研究消息扩散范围的变化对 4 种方法性能的影响.分别针对低密度节点和高密度节点两种场景

进行对比,其他参数保持默认值,设消息扩散范围是以事件产生源为中心的方圆 4sq.km 到 24sq.km 进行变化。

如图 11 所示,在两种场景下,4 种方法的传输成功率均随着消息通知区域的扩大而减小.这是因为通知区域的扩大降低了事件代理与订阅者相遇的概率,导致 4 种方法传输性能的下降.其中:在低密度场景下(如图 11(a)所示),Epidemic 由于能将消息通过尽可能多的路径进行传递,故始终保持最高的传输成功率.而在图 11(b)中,由于节点密度高,扩散范围的增大意味着更多的车辆参与了对信道的竞争,进而导致递交率的迅速下降.我们也注意到,尽管 MDA 的传输成功率总体优于 OSTD,但在低密度场景下,如图 11(a)所示,由于节点稀疏,车辆交通流的自组织结构不明显,自稳能力较弱,个体车辆运动的偶然影响大,传输率与 OSTD 接近.而在高密度情况下(如图 11(b)所示),车流的自稳能力加强,自组织性突出,个体因素影响小,其传输率的优势明显.此外,由于 Random 策略对事件代理的随机部署,导致对订阅者的消息传递带有很大的偶然性,因而具有最低的传输成功率。

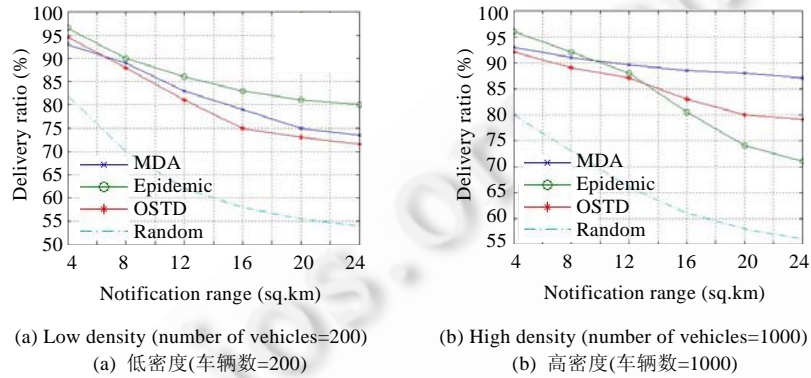


Fig.11 Delivery ratio as a function of notification range

图 11 通知区域的大小对传输成功率的影响

图 12 表明,随着消息通知区域的扩大,4 种方法的传输延迟在两种场景下均有一定幅度的增加.这是因为,通知区域的增大会引起传递路由变长,导致传输延迟的增加.同时,由于高密度场景下网络连通性的加强,提高了事件的转发效率,故 MDA,OSTD 和 Random 在高密度环境下的传输延时(如图 12(a)所示)整体均优于低密度场景(如图 12(b)所示),并且 MDA 的传输延迟始终低于其他两种方法.尤其需要注意的是,尽管 Epidemic 在低密度场景下其传染扩散式的转发能够获得最低的传输延迟,但在高密度场景情况下,随着通知区域的变大,同时转发事件副本的车辆数将增多,引起了激烈的 MAC 层冲突,从而使传输延时的增长趋势加快并迅速超过了 MDA.

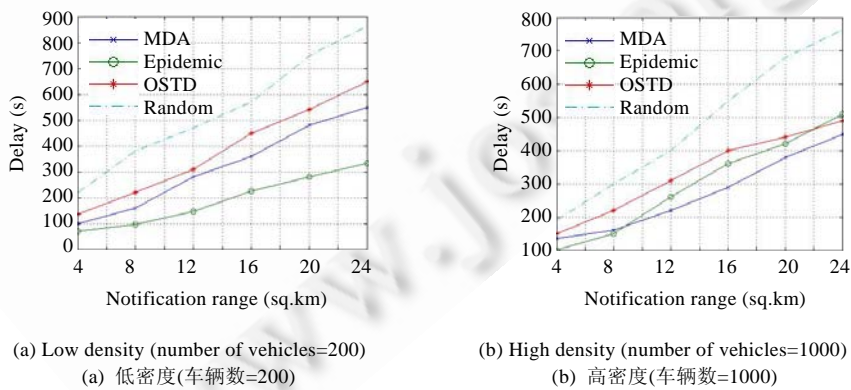


Fig.12 Delivery delay as a function of notification range

图 12 通知区域的大小对传输延迟的影响



#### 4.6 数据包大小对性能的影响

本组实验讨论数据包大小对不同方法性能的影响.网络中 CBR 数据的产生率为 0.5pkt/s,其他参数保持默认值.图 13(a)和图 13(b)为在不同协议下,传输成功率和传输延时与数据包大小的变化关系.无论是传输成功率还是延时,MDA,OSTD 和 Random 随数据包大小变化均相对稳定,且 MDA 明显优于其他两种方法.与 Epidemic 相比,由于它们对带宽资源的要求相对较小,因而受数据包大小变化的影响也很小.带宽限制对 Epidemic 则相当明显,当数据包增大时,带宽资源则减少,Epidemic 的数据递交率则急剧下降,延时则急剧增加,甚至比 OSTD 还要严重.图 13(c)是数据总量与数据包大小的关系,数据总量是指网络中总共产生的数据量,包括副本数据.因为 MDA, OSTD 和 Random 都有各自的事件副本控制策略,所以当数据产生率固定时其数据总量与数据包大小呈线性变化.而 Epidemic 具有很强的扩散性和副本性,数据总量随着数据包大小的增加而急剧上升.

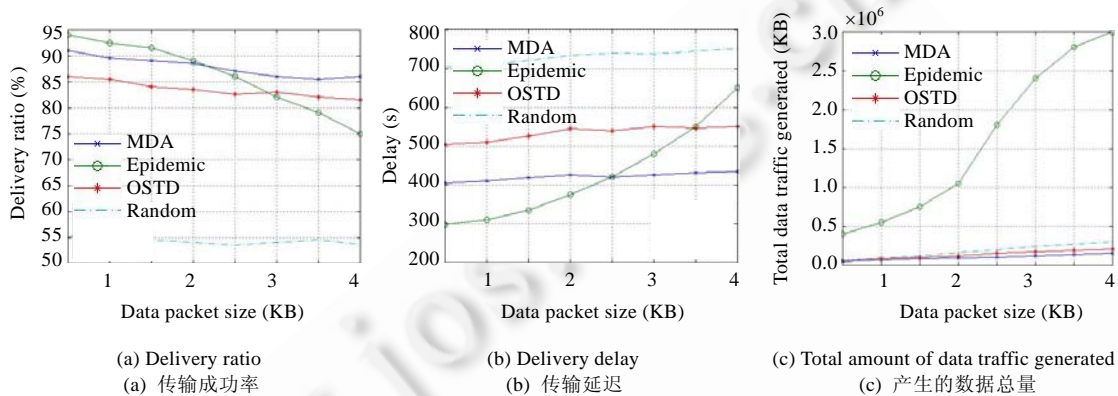


Fig.13 Impact of data packet size

图 13 数据包大小的影响

## 5 结论及下一步工作

与传统移动自组网相比,车载自组织网络 VANET 具有的独特性质使得如何有效地进行 VANET 中数据的分类传输和处理面临着许多困难和挑战.为此,本文引入发布/订阅通信模型,并提出了一种有效的事件分发策略 MDA.与已有工作相比,MDA 的主要贡献在于以下几个方面:

- (1) 提出了在 VANET 中引入发布/订阅通信模型,并基于事件代理的持续性广播进行数据分类传输的思想;
- (2) 建立了一种有效的事件广播令牌机制,充分利用车辆交通流自组性和自稳性的特点,通过预测订阅者的移动分布来合理部署和调度事件令牌的转发,进而控制事件代理的分布,以增大事件的传输成功率;
- (3) 使用一种基于概率预测密度的令牌数控制算法,能够根据订阅者的移动概率分布密度动态调整令牌数量,控制事件副本数,降低网络通信量负载.

大量的模拟实验证明了 MDA 的优异性能,特别是在高密度 VANET 的环境下,MDA 在传输成功率、传输延时和网络负载方面具有明显优势.此外,本文采用的是主动式(proactive)扩散路由算法.然而在一些应用中,订阅车辆可能会先发起消息请求,事件源再根据请求进行事件副本的转发.为了使 MDA 策略具有更广泛的应用意义,我们下一步将结合主动式路由和被动式(reactive)路由算法的特点研究改进型的综合策略.

### References:

- [1] Car-to-Car communication consortium. <http://www.car-to-car.org>
- [2] SEVECOM: Secure vehicle communication. <http://www.sevecom.org>
- [3] U.S department of transportation: Intelligent transportation systems. <http://www.its.dot.gov>

- [4] Ahsra: Advance cruise-assist highway system research association. <http://www.ahsra.or.jp>
- [5] Li F, Wang Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2007,2(2):12–22. [doi: 10.1109/MVT.2007.912927]
- [6] Chen W, Guha RK, Kwon TJ, Lee J, Hsu IY. A survey and challenges in routing and data dissemination in vehicular ad-hoc networks. In: *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2008)*. Columbus: IEEE Computer Society, 2008. 328–333. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcm.862/pdf> [doi: 10.1109/ICVES.2008.4640900]
- [7] Zou SH, Wu HT, Cheng SD. A simple and efficient broadcasting scheme for mobile ad hoc networks. *Journal of Software*, 2005, 16(6):1104–1111 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1104.htm> [doi: 10.1360/jos161104]
- [8] Xue XP, Zhang SD, Zhang HK, Wang XP, Ge L, Yin Q. Content-Based routing algorithms of the publish/subscribe systems. *Acta Electronica Sinica*, 2008,36(5):953–961 (in Chinese with English abstract).
- [9] Mimoso D, Arjan D, Leonard B. Emergency broadcast protocol for inter-vehicle communications. In: *Proc. of the 11th Int'l Conf. on Parallel and Distributed Systems — Workshops (ICPADS 2005)*. Fudoaka: IEEE Computer Society, 2005. 402–406. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1524336> [doi: 10.1109/ICPADS.2005.147]
- [10] Toyserkani AT, Strom EG, Svensson A. An efficient broadcast MAC scheme for traffic safety applications in automotive networks. In: *Proc. of the WCNC. Las Vegas: IEEE Computer Society, 2006. 2100–2105*. [doi: 10.1109/WCNC.2006.1696620]
- [11] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical Report, CS-2000-06, Duke University, 2000.
- [12] Ramanathan R, Hansen R, Basu P, Rosales-Hain R, Krishnan R. Prioritized epidemic routing for opportunistic networks. In: *Proc. of the ACM 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking*. San Juan: ACM Press, 2007. 62–66. [doi: 10.1145/1247694.1247707]
- [13] Huang HY, Luo PE, Li ML, Li D, Li X, Shu W, Wu MY. Performance evaluation of SUVnet with real-time traffic data. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(6):3381–3396. [doi: 10.1109/TVT.2007.907273]
- [14] Nekovee M. Epidemic algorithms for reliable and efficient information dissemination in vehicular ad hoc networks. *IET Intelligent Transport Systems*, 2009,3(2):104–110. [doi: 10.1049/iet-its:20070061]
- [15] Wischof L, Ebner A, Rohling H. Information dissemination in self organising intervehicle networks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2005,6(3):90–101. [doi: 10.1109/TITS.2004.842407]
- [16] Sormani D, Turconi G, Costa P, Frey D, Migliavacca M, Mottola L. Towards lightweight information dissemination in inter-vehicular networks. In: *Holfelder W, ed. Proc. of the ACM 3rd Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2006)*. New York: ACM Press, 2006. 20–29. [doi: 10.1145/1161064.1161069]
- [17] Sahoo J, Wu E, Sahu PK, Gerla M. BPAB: Binary partition assisted emergency broadcast protocol for vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the 18th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN 2009)*. San Francisco: IEEE Press, 2009. 1–6. <http://www.csie.ndhu.edu.tw/webv3/cht/speech/NDHU20101029.pdf> [doi: 10.1109/ICCCN.2009.5235233]
- [18] Yu QY, Heijenk G. Abiding geocast for warning message dissemination in vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the 43rd Int'l Conf. on Communications (ICC 2008)*. Beijing: IEEE Computer Society, 2008. 400–404. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04531929>
- [19] Leontiadis I, Mascolo C. Opportunistic spatio-temporal dissemination system for vehicular networks. In: *Proc. of the 1st Int'l MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking*. San Juan: ACM Press, 2007. 39–46.
- [20] Wu H, Fujimoto RM, Guensler R, Hunter M. MDDV: A mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks. In: *Holfelder W, ed. Proc. of the ACM 1st Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*. Philadelphia: ACM Press, 2004. 47–56. [doi: 10.1145/1023875.1023884]
- [21] Li S, Zhang DL, Jiang CJ. On connectivity of vehicular wireless ad hoc network. *Journal of System Simulation*, 2009,21(3): 888–899 (in Chinese with English abstract).
- [22] Chen J, Xu D, Li SC, Shen L. A robust and efficient routing strategy for vehicular ad hoc networks in city scenarios. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007,29(11):2555–2559 (in Chinese with English abstract).
- [23] Ding Y, Wang C, Xiao L. A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks. In: *Holfelder W, ed. Proc. of the ACM 4th Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. ACM Press, 2007. 59–68. [doi: 10.1145/1287748.1287758]
- [24] Zhao J, Zhang Y, Cao GH. Data pouring and buffering on the road: A new data dissemination paradigm for vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(6):3266–3277. [doi: 10.1109/TVT.2007.906412]
- [25] Caliskan M, Graupner D, Mauve M. Decentralized discovery of free parking places. In: *Holfelder W, ed. Proc. of the ACM 3rd Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*. Los Angeles: ACM Press, 2006. 30–39. [doi: 10.1145/1161064.1161070]

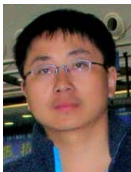
- [26] Lee U, Magistretti E, Zhou B, Gerla M, Bellavista P, Corradi A. MobEyes: Smart mobs for urban monitoring with vehicular sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, 2006,13(5):52–57. [doi: 10.1109/WC-M.2006.250358]
- [27] Chen W, Cai SW. Ad hoc peer-to-peer network architecture for vehicle safety communications. *IEEE Communications Magazine*, 2005,43(4):100–107. [doi: 10.1109/MCOM.2005.1421912]
- [28] Fracchia R, Meo M, Rossi D. Knowing vehicles location HELPS avoiding broadcast packets storm. In: Proc. of the 4th Int'l Workshop on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2006). Pisa: IEEE Computer Society, 2006. 118–123. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1598952> [doi: 10.1109/PERCOMW.2006.71]
- [29] Naumov V, Gross TR. Connectivity-Aware routing (CAR) in vehicular ad hoc networks. In: Baldwin RL, ed. Proc. of the 26th Int'l Conf. Computer Communications (INFOCOM 2007). Anchorage: IEEE Computer Society, 2007. 1919–1927. [doi: 10.1109/INFOCOM.2007.223]
- [30] Taleb T, Sakhaee E, Jamalipour A, Hashimoto K, Kato N, Nemoto Y. A stable routing protocol to support ITS services in VANET networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(6):3337–3347. [doi: 10.1109/TVT.2007.906873]
- [31] Jerbi M, Senouci SM, Rasheed T, Ghamri-Doudane Y. Towards efficient geographic routing in urban vehicular networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2009,58(9):5048–5059. [doi: 10.1109/TVT.2009.2024341]
- [32] Amditis A. Research on cooperative systems-overview of the on-going EU activities. *IEEE-ITSS Newsletter*, 2006,8(3):34–37.
- [33] Schrank D, Lomax T. Annual urban mobility report. 2005. <http://www.pittsburghregion.org/public/cfm/library/reports>
- [34] Caliskan M, Mauve M, Rech B, Lüebke A. Information collection in vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the 5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems. Hannover, 2005. 1–11. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.69.2323&rep=rep1&type=pdf>
- [35] Kohonen T. The self-organizing map. *Journal of Neurocomputing*, 1998,21(6):1–6.
- [36] Graepel T, Burger M, Obermayer K. Self-Organizing maps: Generalizations and new optimization techniques. *Neurocomputing*, 1998,21(1-3):173–190.
- [37] VanetsMobiSim project. <http://vanet.eurecom.fr>

#### 附中文参考文献:

- [7] 邹仕洪, 邬海涛, 程时端. 一种移动自组网中简单高效的广播算法. *软件学报*, 2005, 16(6): 1104–1111. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1104.htm> [doi: 10.1360/jos161104]
- [8] 薛小平, 张思东, 张宏科, 王小平, 葛乐, 尹琴. 基于内容的发布订阅系统路由算法. *电子学报*, 2008, 36(5): 953–961.
- [21] 李舒, 张栋良, 蒋昌俊. 车载无线自组网络连通性分析. *系统仿真学报*, 2009, 21(3): 888–899.
- [22] 陈军, 徐笛, 李式巨, 沈雷. 一种稳健的城市市场车载 Ad hoc 路由策略. *电子与信息学报*, 2007, 29(11): 2555–2559.



吴磊(1978—),男,四川成都人,博士生,主要研究领域为移动计算,无线自组网络.



刘明(1973—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为移动计算,传感器网络技术.



王晓敏(1978—),女,博士生,讲师,主要研究领域为无线传感器网络.



陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布式与并行计算.



龚海刚(1975—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络.