

城市车载网络中基于停放车辆辅助的数据分发*

赵慧^{1,2}, 刘明², 刘念伯², 龚海刚², 周圣二², 吴跃²

¹(东莞理工学院 计算机学院, 广东 东莞 523808)

²(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

通讯作者: 赵慧, E-mail: jenniferzhao09@gmail.com

摘要: VANETs(vehicular ad hoc networks)具有节点高速移动、网络间歇性连通和拓扑高度动态变化等特点.要分发的数据很难被维持在目标区域的道路上,不能持续为行驶经过的车辆提供服务.鉴于城市区域道路两旁长时间拥有大量停放车辆这一事实,提出了 VANETs 中基于停放车辆辅助的数据分发策略 PADD(parked-vehicle assisted data dissemination).PADD 按照簇的结构对目标区域内的路边停放车辆进行管理,将要分发的数据从数据源路由到目标区域合适的停车簇,并采用订阅/发布机制在停车簇一跳范围内实现数据分发.理论分析证明了停放车辆辅助的有效性;基于真实城市地图和交通数据的模拟实验结果表明:与现有的几种数据分发算法相比,PADD 能以较低的网络负载和较小的传输延迟获得较高的数据传输成功率.

关键词: 车载自组织网络;数据分发;路边停放车辆

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 赵慧,刘明,刘念伯,龚海刚,周圣二,吴跃.城市车载网络中基于停放车辆辅助的数据分发.软件学报, 2015,26(6):1499–1515. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4591.htm>

英文引用格式: Zhao H, Liu M, Liu NB, Gong HG, Zhou SE, Wu Y. Parked-Vehicle assisted data dissemination paradigm for urban vehicular ad hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26(6):1499–1515 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4591.htm>

Parked-Vehicle Assisted Data Dissemination Paradigm for Urban Vehicular Ad Hoc Networks

ZHAO Hui^{1,2}, LIU Ming², LIU Nian-Bo², GONG Hai-Gang², ZHOU Sheng-Er², WU Yue²

¹(School of Computer, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

²(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Vehicular ad hoc networks (VANETs) are characterized by high mobility of vehicle nodes, intermittent connectivity, and rapid dynamic topology. Data to be disseminated can hardly be kept within a target area, and therefore cannot provide continuous services for the vehicles passing by. Motivated by the fact that there are large amounts of roadside parked vehicles in urban areas, this paper proposes a parked-vehicle assisted data dissemination (PADD) paradigm for vehicular ad hoc networks (VANETs). In PADD, the parked vehicles in the target area are managed on the basis of parking cluster, the data to be disseminated are forwarded from the data source to the selected parking clusters, and the pub/sub scheme is adopted to achieve data dissemination within one hop of the parking cluster. Theoretical results illustrate the effectiveness of the proposed approach, and meanwhile simulation results based on a real city map and realistic traffic situations show that PADD achieves a higher delivery ratio with lower network load and reasonable transmission delay.

Key words: VANET (vehicular ad hoc network); data dissemination; roadside parked vehicle

为了实现交通安全和舒适驾驶,越来越多的汽车制造商开始为其生产的车辆配备无线通信设备.这些具备无线通信功能的车辆在不久的将来会组成大规模的车载自组织网络(vehicular ad hoc networks,简称 VANETs).

* 基金项目: 国家自然科学基金(61170256, 61173172, 61103226, 61103227, 61003229)

收稿时间: 2012-06-11; 定稿时间: 2014-02-27

VANETs 可以支持事故告警、道路交通信息查询、广告分发和 Internet 信息服务等应用,为驾驶者和乘客提供有效的信息获取方式.虽然 3G 网络也能够实现前面提到的这些服务,但是它的代价高,而且当基础设施不存在时就不能够提供服务.相比之下,VANETs 具有结构开放、部署便捷、费用低廉等特点,因此受到了学术界和工业界的广泛关注.

数据分发(data dissemination)是大多数 VANETs 应用的基本功能^[1],而多数要分发的数据具备时空特性,需要在指定的目标区域内持续分发一段时间.例如:对于一个交通事故引起的拥塞信息,在交通事故得到处理之前,需要持续发送给事故区域附近受影响的车辆.VANETs 具有节点高速移动、网络间歇性连通和拓扑结构高度动态变化等不利因素,难以保证移动节点间持续稳定的连接,这使得分发数据很难维持在目标区域内,不能持续为行驶经过的车辆提供数据分发服务.针对这一问题,一些研究人员提出了利用移动车辆来维持分发数据的方法^[2].由于 VANETs 具有节点高速移动的特点,这一方法需要在移动车辆之间频繁地进行数据移交,带来了很大的传输代价.另外一种解决方案是在目标区域内部署一些基础设施,由基础设施保存需要分发的数据^[3,4].这一方法较为有效,然而在城市区域大规模部署基础设施会带来很大的成本投入,而且如何对基础设施进行部署也是个难题.大量调查发现:城市道路两旁分布有大量的停车场,并且这些停车场长时间处于被使用的状态.例如,文献[5]提供了加拿大蒙特利尔市(市中心)面积为 5 500 平方公里区域的两次停车调查统计结果.结果表明,路边停放车辆占总停放车辆的 69.2%.图 1 为蒙特利尔市晚上 10 点钟的停放车辆分布情况,不难看出广泛分布在路边的停放车辆.基于这一事实,我们提出了 VANETs 中基于停放车辆辅助的数据分发策略 PADD(parked-vehicle assisted data dissemination),由路边停放车辆维持要分发的数据,并为行驶经过的车辆提供数据分发服务.

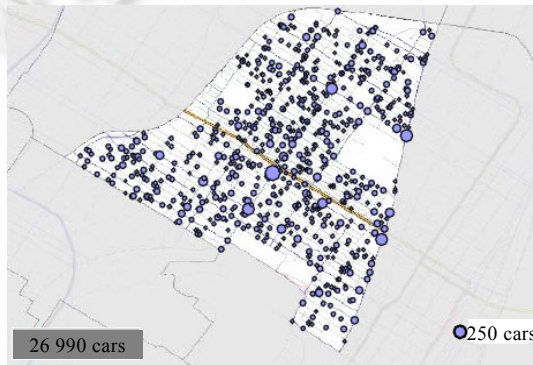


Fig.1 Parking distribution in Montreal

图 1 蒙特利尔市停车分布情况

PADD 将目标区域内的路边停放车辆按照簇的结构进行管理,提供了有效的数据路由方法.将要分发的数据路由到目标区域内合适的停车簇,并采用了订阅/发布机制在停车簇一跳范围内实现数据分发.本文通过理论分析和实验仿真,对 PADD 进行了验证.理论分析说明了停放车辆用于数据维持的有效性;模拟实验结果表明:与现有的数据分发算法相比,PADD 能以较低的网络负载和较小的传输延迟获得较高的数据传输成功率.

本文第 1 节对相关工作进行说明.第 2 节介绍系统模型并进行了问题分析.第 3 节给出算法的详细设计.第 4 节展开理论分析.第 5 节进行仿真验证.最后,总结全文.

1 相关工作

VANETs 具有车辆高速移动、网络拓扑频繁变化和间歇连通性等特点,这使得 VANETs 中的数据分发极具挑战性.目前,已经有大量研究人员对 VANETs 中的数据分发进行了研究.文献[6]中,Xu 等人提出了 opportunistic dissemination(OP)数据分发机制.OP 类似于泛洪机制,数据中心周期性地广播某些数据,行驶经过其通信范围的车辆接收并保存这些数据.当车辆离开数据中心通信范围时,会相互交换各自收到的数据.这一机制不依赖于任

何基础设施,简单易实现,适用于高度动态变化的 VANETs。然而,由于 VANETs 具有带宽有限、易冲突的特性,不加限制地泛洪会造成广播风暴,进而引起严重的网络拥塞,造成很高的丢包率。为了缓解网络拥塞问题, Korkmaz 等人^[7]提出了链路层的广播协议,利用链路层的确认机制来提高多跳广播的可靠性。然而在出现广播风暴的情况下,链路层的确认机制不能从根本上解决问题。文献[8]基于 VANETs 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,从而降低了网络的通信负载。文献[9]将通知区域划分为若干级小区,并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。文献[10]提出了 MDDV 算法,利用称为 message holder 的车辆携带数据到目标区域扩散。文献[11]提出了一种基于车辆移动分布感知的事件分发策略 MDA,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的转发,从而有效地控制事件代理的分布,并保证数据传递的有效性。虽然文献[8-11]减少了网络负载,然而由于 VANETs 呈现间断连通性,且车辆是高速移动的,数据很难被维持在指定区域内。

为了将需要分发的数据成功维持在指定目标区域,从而实现持续的数据分发服务, Maihofer 等人在文献[2]中给出了两种典型的 Abidng geocast 方法,分别为基于服务器的方法和基于移动节点选举的方法。基于服务器的方法中,服务器节点周期性地广播数据,移动车辆以 carry and forward 的方式转发数据到目标区域。这种方法的不足是:每个广播数据在到达目标区域之前都需要经过一段路由,服务器频繁广播数据会消耗大量的带宽资源。基于移动节点选举的方法中,数据保存在目标区域内选定的移动节点上,由这些选中的节点周期性或根据需要广播数据。如果保存数据的节点要离开,数据需要移交给新选举的节点。由于 VANETs 节点的移动性很强,这一方法需要频繁地在移动车辆之间进行数据移交,带来大量的操作开销;此外,在车辆密度比较稀疏的环境下,很可能找不到能够帮助维持数据的移动车辆。文献[12]中, Leontiadis 等人给出了和上面两种方法类似的数据维持机制。

除上面提到的算法以外,相关研究还包括文献[3,4,13,14]。文献[3]中,Zhao 等人提出了 data pouring(DP)方法用于数据分发。在 DP 中,数据中心周期性广播数据到目标区域的主干道路,主干道路上的移动车辆保存数据,并为从目标区域其他道路(与主干道路相交的道路)上行驶过来的车辆提供数据分发服务。然而,DP 策略要求数据中心频繁地向主干道路广播数据,以保证从其他道路经过主干道路的车辆可以收到数据。因此,其数据分发容量不够理想。为了提高数据分发容量,作者进一步提出了基于十字路口缓存的 data pouring(DP-IB)方法,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。此外,文献[4,13,14]也尝试通过部署路边基础设施(roadside unit,简称 RSU)来协助数据分发。虽然这种方法可以有效地将数据维持在目标区域,持续地为行驶经过的车辆提供信息服务,然而大规模部署路边基础设施需要大量的成本投入,尤其是在城市区域。此外,静态的路边基础设施很难适应迅速变化的交通状况,而且如何对基础设施进行部署也是个难题,想要实现一种可以综合考虑预算、街道拓扑、交通变化等诸多因素的最优部署几乎是不可能的。

文献[15]证明了停放车辆的加入可以极大增强 VANETs 的连通性,但并未涉及数据分发的细节,然而其为我们的研究提供了如下启发:停放车辆可以作为路边节点加入 VANETs。此外,文献[16,17]均指出:长时间停放在路边停车场的车辆可以被用于提供第三方服务。这说明越来越多的研究目光正在转向路边停放车辆这一分布广泛但未被利用的资源。基于以上背景,我们提出了城市区域路边停放车辆辅助的数据分发策略。

2 系统模型与问题分析

2.1 基本假设

假设 1:假设时间被划分为以 100ms 为周期的时隙(为了保证车辆行驶安全,两个相邻安全消息的广播间隔应小于 100ms^[18]),每个时隙内控制信道和服务信道各占一半时间,其中,控制信道用于安全消息(车辆位置和速度等)的广播和传输控制短消息的发送,服务信道用于非安全类消息(交通拥塞通告、停车场可用信息、商业广告等)的分发,如图 2 所示。所有车辆,包括行驶车辆和停放车辆时钟同步,并周期性地在控制信道和服务信道之间切换。

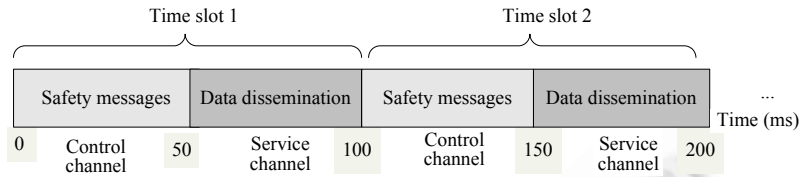


Fig.2 Time and channel utilization

图 2 时隙和信道划分

假设 2:每个车辆都配备有 GPS 和电子地图,且这些设备在车辆停放时亦可以使用.GPS 设备不仅可以提供车辆的准确位置,还可以确保时间同步.电子地图提供了各街道道路拓扑图及历史交通流量(如,不同时段实时的车辆密度和车辆速度),这样的地图目前已经非常普遍.例如,Google 在其电子地图上集成了交通流量的统计信息,可以提供许多国家主要城市的历史交通信息.

假设 3:部分停放车辆的车主愿意共享车辆的无线通信功能和存储功能.这一假设可以建立在一定的激励机制之上,如提供免费停车位等.鉴于路边停放车辆巨大的潜在应用价值^[16,17],这方面的激励机制在不久的将来会得到广泛的研究和应用.

假设 4:要分发的数据具备如下两个属性:(1) 目标区域;(2) 生存时间.这一假设基于如下观察:绝大多数要分发的数据具有空间和(或)时间特性.例如:对于一个交通事故引起的拥塞信息,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,且这一信息在交通事故得到处理后即失效.

2.2 应用场景

在图 3 所示的城市街道中分布有大量的路边停车场,且每个停车场内绝大多数时间有停放车辆.某一时刻,其中的一条路段发生了交通事故,并引起局部的交通拥塞.为了减少事故对交通的影响,需要将该拥塞信息转发给正驶向该区域的车辆,以协助车辆及时调整路线,从而缓解事故区域的拥塞程度.

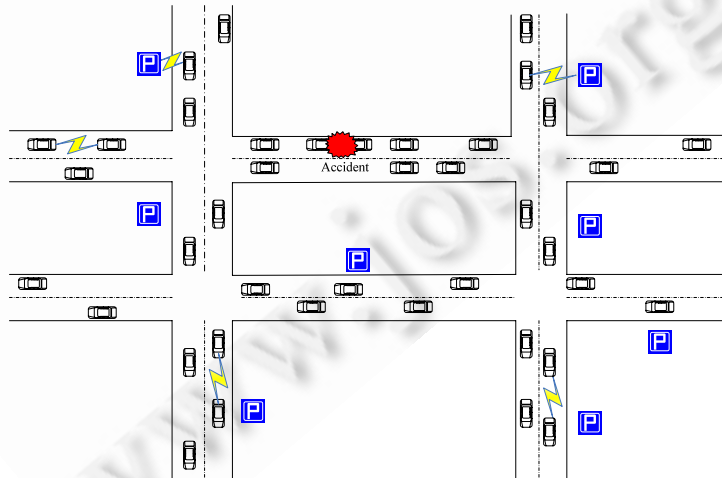


Fig.3 A sample scenario

图 3 应用场景示意图

美国德克萨斯州交通委员会 2010 年的年度城市道路畅通性评价报告^[19]中指出:全美 2009 年因交通堵塞而造成的经济损失高达 1 150 亿美元,其中包括 48 亿小时的时间浪费和 147.42 亿升的燃油消耗.类似的应用还包括城市停车场信息的发布.根据文献^[20],美国洛杉矶市的一个小商业街区,每年因为寻找有效停车位会消耗

47 000 加仑(约为 177 895 升)的汽油,并产生 730 吨的二氧化碳.如果将各停车场的可用车位信息通过 VANETs 实时发布给附近需要停车的行驶车辆,司机便可以在较短时间内找到合适的停车位,这样不仅可以节约能源和时间,还能在一定程度上减少环境污染.此外,相关应用还包括商家广告促销信息的分发.在广告无所不在的今天,VANETs 正在成为下一块广告公司竞相争取的新领域^[21].当来自成千上万商家的大量广告涌入 VANETs 时,一种有效的数据分发机制便显得尤为重要.综上所述,研究和实现城市区域基于 VANETs 的高效数据分发有着十分重要的意义.

2.3 问题分析

数据成功传输率是 VANETs 数据分发算法的首要设计目标,即,要分发的数据消息在其生存期内要尽可能多地到达目标区域内感兴趣的移动车辆;此外,VANETs 带宽有限、易发生冲突,为了最大化利用带宽资源,设计数据分发算法时要尽可能降低网络传输代价;最后,VANETs 虽然允许一定的延迟,但我们仍希望分发数据能够尽快到达目标区域内各车辆,便于司机收到信息后尽早做出决定.因此,如何以尽量低的数据传输代价和传输延迟来达到尽可能高的数据传输成功率,实现传输成功率、网络开销以及传输延迟之间的平衡,就成了 VANETs 数据分发要解决的首要问题.

基于停放车辆辅助的数据分发的主要思想是:各数据源将要分发的数据保存在目标区域内的路边停放车辆,由停放车辆为行驶经过的车辆提供数据分发服务.参与数据分发的有:

- (1) 数据源(data source):发布数据的源头,可以是移动车辆、具有无线通信功能的计算机、无线 AP 节点或 infostation^[22];
- (2) 移动转发车辆(mobile helpers):帮助数据源将数据路由到目标区域路边停放车辆的移动车辆;
- (3) 路边停车簇(roadside parking cluster):同一路段在彼此通信范围内的路边停放车辆形成的连通子集,是数据存储和分发的基本单元;
- (4) 终端用户(end user):对分发数据感兴趣的行驶车辆.

基于停放车辆辅助的数据分发包含两个阶段:

Step 1. 数据从数据源经 VANETs 发送到目标区域合适的停车簇;

Step 2. 数据从停车簇分发到行驶车辆.

需要解决的关键问题有:

- (1) 如何对目标区域的路边停放车辆进行有效的管理?有效的停放车辆管理机制,可以实现高效的数据分发;
- (2) 按照何种策略在较短的时间内将数据路由到目标区域内合适的停车簇?良好的路由策略可以减少网络冲突,避免广播风暴;
- (3) 如何进行有效的数据分发?高效的数据分发机制可以以较小的代价实现良好的用户体验.

3 数据分发

PADD 主要包括 3 部分:(1) 停车簇管理;(2) 数据路由;(3) 停车簇数据分发.本节将对各部分逐一介绍.

3.1 停车簇管理

为了方便汽车驾驶者,通常城市道路的两边设有路边停车场,从而带来了大量的路边停放车辆.一项研究^[23]调查了美国密歇根州安娜堡市路边停车场的使用状况,并在 6 个工作日内进行了连续观察.结果发现:停车场全天的平均占用率约为 93%,在低峰期的平均占用率达到了 80%,且每辆车的平均停放时间约为 41.40 分钟(标准差为 27.17 分钟)^[23].鉴于路边停车场的高占用率和稳定性,将路边停放车辆按照簇的结构进行管理是可行的.我们把同一路段在彼此通信范围内的路边停放车辆形成的连通子集定义为一个停车簇,如图 4 所示,并将其作为数据存储和分发的基本单元.为了保证经过目标区域任意路段的车辆均能以较高的概率和较小的延迟收到感兴趣的数据,我们以路段为单位选举服务停车簇.根据停车簇的定义,一个路段内可能会形成多个停车簇.由于

车辆的行驶受交通规则和道路拓扑限制,没有必要将每个停车簇作为服务停车簇.因此,我们规定:在有多个停车簇的路段,各停车簇通过协商的方式随机选举一个停车簇作为服务停车簇.作为一种特殊情形,如果一条路段上仅有一个停车簇时,这个停车簇将自己选举为服务停车簇.需要说明的是,在接下来的描述中,我们提到的停车簇特指服务停车簇.在每个簇内, ID 号最大的车辆被选举为簇头,负责簇内的网络管理,处理节点加入和离开等事件.簇头确定后,各簇成员周期性报告自己的位置到簇头,由簇头维护整个簇,并进行数据分发.考虑到簇头随时都有可能离开停车簇,我们规定:当簇头车辆将要离开时(引擎发动),会触发新一轮的簇头选举过程,并且新旧簇头会完成数据交接工作.

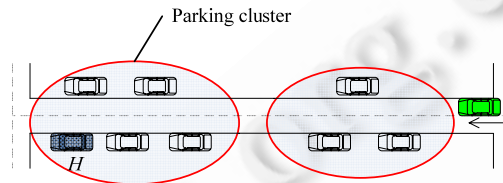


Fig.4 Parking cluster

图4 停车簇

3.2 数据路由

为了实现停放车辆辅助的数据分发,首先需要将要分发的数据由数据源经 VANETs 路由到目标区域内所有的停车簇.根据使用的机制不同,我们将这个过程分为两个阶段:数据源到目标区域的路由和数据在目标区域内的路由.

3.2.1 数据源到目标区域的路由

如果数据源未在目标区域内,我们使用改进的 VADD 路由协议将数据路由到各目标区域内.作为经典的 VANETs 路由协议,VADD^[24]基于预载入的历史交通流量状态评估经由不同路段将消息传递到目的地所需要的端到端(end-to-end,简称 E2E)延迟,并规定消息传递总是选择当前可传递的、具有最小 E2E 延迟的路段.理论上讲,VADD 可以以较小的延迟将数据从源节点路由到目的节点.然而,由于其是单副本路由协议,VADD 在高度动态变化的 VANETs 环境中难以保证一定的数据递交率.为了实现一定的数据递交率,我们采用多副本的数据路由方式,将要分发的数据从数据源路由到目标区域内.具体而言,在路口模式,当数据有多条传输路径可选时,我们根据历史交通流量的统计数据,如车辆密度、车辆行驶速度和道路长度,按照 VADD 延迟计算方法来估计数据经由各条传输路径的传输延迟,并选择估计传输延迟较小的 n 条路径作为数据转发路径.具体 n 的取值,应当根据当前车辆密度和网络负载共同决定.当车辆密度较高或网络负载较大时, n 应取小一些;当车辆密度较低且网络负载较小时 n 应取大一些.在直路上,我们使用地理上的贪婪算法将数据朝着前面的路口路由.由于使用了多副本路由,相比 VADD 路由协议,改进的 VADD 可以以更小的延迟和更高的递交率将数据路由到目标区域.作为一种特殊情形,如果数据源在目标区域内,这一步可以省去.

3.2.2 目标区域内的路由

为了防止广播风暴,且便于数据更新和维护,我们将目标区域内的所有停车簇组织成一棵树的结构,数据在目标区域内的路由基于这棵树结构进行.具体而言,数据到达目标区域后,被行驶车辆以 carry and forward 的方式转发给第 1 个遇到的停车簇;之后,这个收到数据的停车簇将自己作为根节点,沿着树结构将数据路由到目标区域内的其他停车簇.为了确定一个停车簇是否为目标区域内第 1 个收到分发数据的停车簇,可以在数据消息的头部增加一个 bit,当其为 0 时,表明此数据到目前为止未经过目标区域内任何停车簇;当其为 1 时,表明此数据至少已经经过目标区域内一个停车簇.下面介绍如何将目标区域内停车簇构建成树结构.

假设各停车簇具备一定范围内其他停车簇的存在信息,这可以通过一个简单的机制来实现,例如,各停车簇周期性地将自己的存在信息(编号和位置)以 hello 消息的方式广播到两跳范围内的停车簇,然后,各邻居停车簇交换自己掌握的停车簇信息(类似于文献[25]中提出的链路更新机制).鉴于停车簇的稳定性,各停车簇的广播周

期不需要太小.有了这个假设后,目标区域内所有的路边停车簇以及连接这些停车簇的道路构成了一个带权连通图 $G(V,E)$,其中, V 代表路边停车簇的集合, E 代表连接两个相邻路边停车簇的路径(每条路径可能包含多个路段)的集合,边的权值 D_{ij} 代表这两个停车簇之间道路当前的传输延迟.一个典型的带权连通图如图 5 所示.

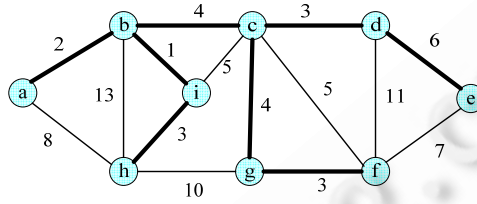


Fig.5 Weighted connected graph formed by parking clusters

图 5 停车簇形成的带权连通图

D_{ij} 可以按照如下方式计算:

$$D_{ij} = \sum_{r_{xy} \in r_{ij}} d_{xy}$$

其中, d_{xy} 为簇 i 和簇 j 之间路段 r_{xy} 的传输延迟,其可以表示为

$$d_{xy} = f(\text{density}(r_{xy}), \text{speed}(r_{xy}), \text{length}(r_{xy})),$$

其中, $\text{density}(r_{xy})$ 为路段 r_{xy} 的车辆密度, $\text{speed}(r_{xy})$ 为路段 r_{xy} 的车辆速度, $\text{length}(r_{xy})$ 为路段 r_{xy} 的长度.

由于每个车辆都具备各条道路不同时间段的交通流量统计数据,可以利用文献[24]中的方法来估算这个值.目标区域内不同停车簇之间的传输延迟构成了传输延迟矩阵,根据这个传输延迟矩阵,每个车辆可以得到当前的最小生成树:

$$MST = \arg \min_{T \subset G} \left\{ \sum_{(i,j) \in T} D_{ij} \right\}.$$

求解最小生成树的算法如下:

算法 1. Generate MST.

1. $T = \Phi$;
2. while ($|T| < N - 1$) // $|T|$ 代表 T 中边的个数
3. {
4. $E' = \{\arg \min_{e \in E} D(e)\}$ // 从 E 中选择传输延迟最小的边 e , 加入 E'
5. if ($|E'| > 1$) // e 不唯一
6. $e = \arg \min_{e \in E'} d(e)$ // 从 E' 中选择道路长度最短的边 e
7. else
8. $e = \arg \min_{e \in E} D(e)$
9. $E = E - e$;
10. if (e will not form a loop in T) // e 不会在 T 中形成环路
11. $T = T \cup e$;
12. else
13. abandon e ;
14. }
15. return T ;

算法 1 采用了克鲁斯卡尔算法的核心思想,其可以保证每个停车簇获得的最小生成树是唯一确定的.各停车簇周期性地根据当前的交通统计数据值来估算目标区域内各邻居停车簇之间的传输延迟,并构建基于传输延迟的最小生成树.有了最小生成树后,数据在目标区域内的路由沿着这棵树结构进行.由于其只在出现分支时

才进行数据包复制,数据路由的代价非常小.另外,基于最小生成树的路由可以在较短的时间内将数据发送到目标区域内所有停车簇.

在 PADD 中,将数据成功维持在各停车簇是数据分发的基础,因此,需要确保各数据能够成功到达目标区域内各停车簇.为此,我们规定:收到数据的簇(根节点除外)需要向其父节点发送确认消息,格式如下:

$\langle CONFIRMMSG, SourceID, DestinationID, PacketID \rangle$.

这一确认消息被移动车辆以 carry and forward 的方式转发.如果一个沿最小生成树转发数据的簇在规定时间内未收到某个子节点的确认消息,其会重新发送,直到收到确认消息.

3.3 停车簇数据分发

若想确保行驶经过停车簇的车辆能够收到感兴趣的消息,一种最简单的方法是,让停车簇周期性地广播要分发的数据.然而,由于多数行驶车辆只对个别消息感兴趣,不加区分地对所有数据进行广播会造成极大的带宽资源浪费,而且还会增加网络冲突的可能性.因此,我们使用订阅/发布机制来实现有效的数据分发.移动车辆根据自身需求订阅相关事件,例如,根据导航系统中的行车路线订阅相关路段的交通信息,或根据车上乘客的需求订阅某一类广告信息.停车簇簇头收到订阅信息后,按照一定的匹配算法找出相匹配的事件,并分发给订阅者.

数据源产生的消息格式定义如下:

$\langle MsgID, AOI, topic, TTL \rangle$,

其中, $MsgID$ 代表消息编号,用于唯一标记一个消息; AOI (area of interest)代表消息的感兴趣区域,用于限定消息分发的范围; $Topic$ 代表消息的类型,用于订阅请求和发布消息的匹配; TTL (time to live)代表消息的生存时间,超出生存时间的消息会被丢弃.对于 $topic$,我们采用图 6 所示的树结构来表示.

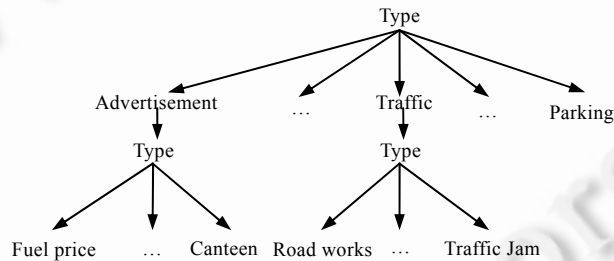


Fig.6 Fromat of topic

图 6 topic 格式

为了支持订阅/发布机制,我们定义如下原语:

- (1) $Subscribe(topic)$ ——对某类事件进行订阅;
- (2) $Unsubscribe(topic)$ ——取消对某类事件的订阅;
- (3) $Match(m, topic)$ ——找出满足订阅条件的事件 m .

数据分发过程如下:

- (1) 行驶车辆进入停车簇簇头通信范围后,周期性地在控制信道广播订阅信息;
- (2) 停车簇簇头收到订阅请求后,将其和保存的事件进行匹配.而订阅请求和发布事件的匹配可以采用已有的匹配算法^[26,27];
- (3) 簇头节点在服务信道广播被订阅的消息.

为了避免车辆在经过同一目标区域的不同停车簇时重复收到某些订阅消息,其在遇到停车簇时,将最近收到的数据 ID 告知停车簇.对于已经收到的数据,停车簇不再发送.

4 理论分析

本节通过理论分析来比较移动车辆维持数据和停车簇维持数据的有效性和代价.我们以目标区域内一个有路边停放车辆的路段为研究对象进行分析.

对于移动车辆维持数据的方法,我们假设车辆在离开目标路段时,将数据移交给通信范围内离其最远的节点,并假设在时间 t 内到达目标路段的车辆数 $n(t)$ 服从泊松分布,即有:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N) \tag{1}$$

其中, λ 为单位时间内到达目标路段的车辆数目.

基于这个假设,根据排队论的基本理论,相继到达的车辆的间隔时间 T 服从负指数分布:

$$P(T \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2}$$

当维持数据的移动车辆准备离开一条路段时,其可以成功将数据移交给此路段内下一个移动节点的必要条件为其通信范围内有移动车辆,即,相继到达的车辆间隔时间 T 满足: $T \leq R/v$. 根据公式(2)有:

$$P\left(T \leq \frac{R}{v}\right) = 1 - e^{-\lambda \frac{R}{v}} \tag{3}$$

假设分发数据需要持续广播的时间(即,需要将数据维持在目标路段的时间)为 T_b , 第 i 个维持数据的车辆的平均行驶速度为 v_i , 其在收到需要维持的数据时与行驶方向道路末端的距离为 l_i , 则数据移交次数为满足下式的最小正整数 K :

$$\frac{L}{v_1} + \sum_{i=2}^K \frac{l_i}{v_i} \geq T_b \tag{4}$$

这里,第 1 个携带数据进入目标路段的车辆(平均速度为 v_1)维持数据的时间为 L/v_1 , 之后,其他移动车辆(平均速度为 v_i)维持数据的时间为 l_i/v_i .

数据在时间 T_b 内被成功维持在目标路段的概率为 K 次数据移交均能成功实现的概率,即:

$$P = \prod_{k=1}^K \left(1 - e^{-\lambda \frac{R}{v_k}}\right) \tag{5}$$

对于移动车辆维持数据的方法,假设所有要分发的数据可以被成功维持在目标路段,数据总数为 M , 平均大小为 D , 则数据移交带来的带宽开销为 MDK .

对于停车簇维持数据的方法,如果某一路段有路边停放车辆,则数据被维持在目标区域的概率为 100%, 且数据移交只在簇头节点离开时发生. 假设数据移交的平均周期为 T_h , 则数据移交带来的带宽开销为 MDT_b/T_h .

分析:为了简单起见,我们假设在广播时间 T_b 内,车辆行驶速度为一常数 v . 由于 $l_i \leq L$, 根据公式(4), 通过移动车辆维持数据的数据移交次数 K 满足:

$$K \geq \frac{T_b v}{L} \tag{6}$$

从而有:

$$P \leq \left(1 - e^{-\lambda \frac{R}{v}}\right)^{\frac{T_b v}{L}} \tag{7}$$

考虑 $R=200m, v=72km/h, T_b=1h, L=1000m$, 则 $P \leq P_0 = (1 - e^{-10\lambda})^{72}$, 而 P_0 随 λ 变化见表 1.

Table 1 Effects of λ on P_0

表 1 P_0 随 λ 的变化

λ	0.2	0.4	0.6	0.8	1
P_0	0.285×10^{-4}	0.265	0.835	0.976	0.996

我们发现:移动车辆维持的方法对车辆密度非常敏感,当车辆密度比较低时,在整个广播时间 T_b 内将数据成

功维持在目标区域的可能性非常小.相比之下,对于停车簇维持数据的方法,如果某一路段有路边停放车辆,则数据在整个广播时间 T_b 内被成功维持在目标区域的概率为 100%.此外,移动车辆维持的方法数据移交带来的带宽开销大于 72MD.根据文献[22],车辆平均停放时间为 41.40 分钟,因此,停放车辆维持方法数据移交带来的带宽开销为 2MD.综上所述,我们可以得出如下结论:停车簇数据维持的方法能以较小的代价和较高的成功率将数据维持在目标区域.

5 模拟实验

我们对城市环境中的停车和交通状况进行了调查,并在 NS-2.33 上对 PADD 的性能进行了评估,与其他数据分发策略进行了性能对比.

5.1 调查

为了获取城市停车和交通状况,我们对成都市的市区进行了为期 6 周的调查.如图 7 所示,被调查区域是大小为 1600m×1400m、包含 10 个十字路口(图中编号为 0~9)和 14 个长度总和为 7 860m 的双行道.需要特别说明的是:由于调查区域的选择对于性能仿真至关重要,我们未选择停车数量高于整个城市水平的市中心,而是选择了成都市的一个普通区域.



Fig.7 Road topology used in the simulation

图 7 仿真采用的街道拓扑

我们对被调查区域内所有路段每周二、周四、周六的停车情况做出了调查,对所有沿路 5m 内停放的车辆按 16:00,18:00 和 22:00 分时段进行了统计.在统计中,我们排除了周围有障碍物环绕、明显不易通信的车辆.调查结果见表 2.

Table 2 Roadside parking survey

表 2 停车调查结果

Street	Policy	Density (veh/km)	Average (veh/km)
R_{04}, R_{15}, R_{26}	No limits	280~320	308
R_{37}, R_{79}	Strict limits	15~25	21
$R_{01}, R_{12}, R_{23}, R_{45}, R_{56}, R_{67}, R_{48}, R_{68}, R_{89}$	Moderate limits	72~180	95

在 3 类有不同停车限制的街道中,停放车辆的密度有很大区别.在允许免费停车的路段 R_{04}, R_{15} 和 R_{26} ,停车密度非常高;在缺少公共停车位的路段 R_{37} 和 R_{79} ,停车密度较低,且这些停放车辆主要来自专用停车和违章停车.在其他路段,停车密度比较适中.总体而言,在一天不同时段,各路段的停车数量相对稳定.在调查中,我们还对被

调查区域内随机位置单位时间内行驶经过的车辆数目进行了统计.结果发现,不同时间段的行驶车辆密度在 300 辆/小时和 2 200 辆/小时之间变化.区域内行驶车辆的数目在 60~400 之间,且车辆平均行驶速度在 4040km/h~80km/h 之间.

5.2 仿真模拟

由于准确地刻画车辆节点的移动对于仿真至关重要,我们使用开源软件 VanetMobiSim-1.1^[28]来生成真实的城市车辆移动轨迹,并将其用于 NS-2.33 仿真.为了能体现出交通流量的变化,我们在图 7 所示的仿真地图上先后部署了 50,100,150,200,250 和 300 个车辆节点.所有车辆的初始位置均随机产生,车辆无线通信范围为 200m,MAC 层协议采用 2Mbps 的 802.11.在仿真中,停放车辆按照表 1 中的密度随机分布在各街道.每辆车的平均停放时间约为 41.40 分钟(标准差为 27.17 分钟)^[23].默认的情况下,我们假设 30%的车主愿意共享车辆的无线通信功能,参与数据分发.假设停车簇在仿真之前便已建立,并以 60 秒为周期进行维护.我们在中心区域设置事件消息产生源,这个数据源按照一定的周期产生新数据.对于每个数据,它的目标区域被指定为整个仿真区域,目标区域内感兴趣的移动车辆比例为 20%.默认参数设置见表 3.

Table 3 Simulation parameters

表 3 模拟参数

Parameter	Default value
Number of vehicle	200
Vehicle velocity	40~80 kph
Size of data message	1 kb
Interval of beacon message	1 second
Data generation rate	0.1/second
Data survival time	20 minutes
n	1~3
Simulation time	1 hour

我们对 PADD,OP^[6]和 MDA^[11]进行了模拟仿真.OP 类似于泛洪机制,而 MDA 是近年来专门针对城市区域 VANETs 设计的数据分发策略.此外,为了验证 PADD 中数据维持的有效性,我们将它与移动节点选举机制 (election)相比较.在 Election 中,由移动车辆在每个路段维持数据并响应订阅请求,当维持数据的移动车辆离开当前路段时,将数据移交给通信范围内离自己最远的节点;如第 2.3 节的问题分析所述,我们关注如下 3 个性能:

- 平均传输成功率:对于一个分发数据,数据传输成功率是指在规定的模拟时间内收到数据的车辆数目和经过目标区域感兴趣的车辆数目的比值.数据平均传输成功率为所有分发数据传输成功率的平均值;
- 平均传输延迟:移动车辆进入目标区域后,获得分发数据所需时间的平均值;
- 网络传输代价:在整个仿真过程中产生的数据通信总量,默认情况下单位为 KB.

MDA 仿真参数的设置见文献[11],以下的实验结果如未特别说明,均为 100 次独立实验结果的均值.

5.2.1 性能对比

我们首先验证了在默认参数下 4 种策略的性能,结果见表 4.

Table 4 Simulation results comparison with default parameters

表 4 默认参数下仿真结果的对比

	PADD	OP	Election	MDA
Average delivery ratio (%)	90.3	80.8	88.7	82.8
Average delivery delay (s)	25.5	28.5	22.4	40.5
Network traffic overhead (KB)	4.21×10^3	1.9×10^5	3.2×10^4	2.4×10^4

综合 3 个性能指标可以看出:PADD 的性能最好,它以较低的消息平均传输延迟和较小的网络传输代价得到较高的数据传输成功率;OP 方法网络传输代价最大,但数据递交率并不理想.这是由于 OP 策略规定移动节点相遇时交换对方未有的消息,从理论上分析,这种泛洪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。

从表 4 我们还可以看出:与 Election 策略相比,PADD 具有更高的数据递交率,且其在网络传输代价方面的性能优势非常明显.这是由于 PADD 依靠广泛分布的路边停放车辆进行数据维持和数据分发,数据被维持在目标区域各路段的路边停车簇,并根据订阅情况在一跳范围内进行广播.虽然极少数的路段不允许路边停车,车辆在经过目标区域其他有停放车辆的路段时,仍然可以获得感兴趣的数据.因此,它可以以较高的概率保证不同时间经过目标区域的车辆获得数据.另外,由于其在停车簇簇头范围内使用订阅/发布机制进行数据分发,因此网络传输代价比较低.对于 Election,其依靠移动节点进行数据维持和数据分发,由于车辆具有高速移动的特性,移动车辆之间需要频繁地进行数据移交,因此数据传输代价较大.此外,在个别路段可能存在如下情形:在携带数据的车辆离开目标路段时,其通信范围内没有邻居节点,数据不能成功移交,数据无法维持在路段内,不能持续为行驶经过的车辆提供数据分发服务,因此,数据传输成功率低于 PADD.另外,与 MDA 策略相比,PADD 策略的性能优势非常明显.对于 MDA 策略,其需要在通知区域内周期性的以 epidemic 的方式扩散订阅确认包,传输代价比较高,而且由于其缺少将数据维持在目标区域的机制,数据递交率低于 PADD 和 Election.

5.2.2 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 种方法性能的影响.当其他参数为默认值、移动车辆节点的总数从 50~300 的增长过程中,各算法的性能变化如图 8(a)~图 8(c)所示.

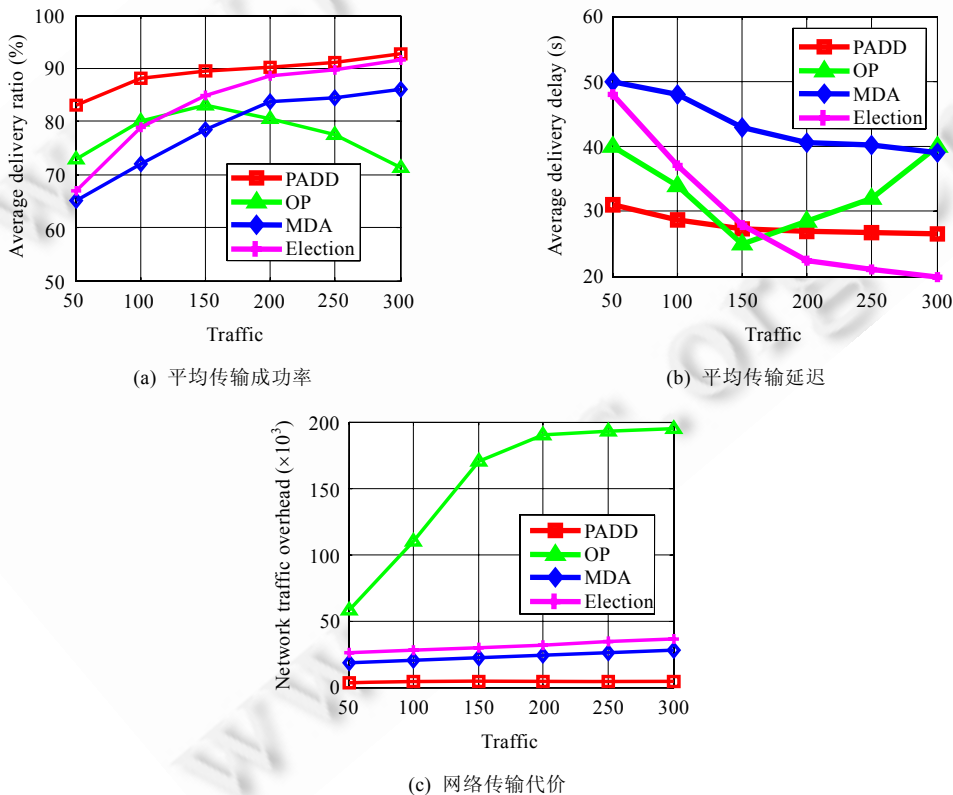


Fig.8 Impact of vehicle density

图 8 车辆节点密度的影响

从图 8(a)可以看出:随着车辆密度的增大,PADD,MDA 和 Election 的传输成功率在节点稀疏阶段均有一定程度的提高,并且 PADD 的传输成功率始终高于其他两种方法.对于 PADD,在车辆稀疏的时候,节点密度的增加

会显著增强网络的连通性,保证了数据在正确路径上传递到各停车簇的机会,这将间接提高事件到达订阅者的几率.对于 Election 策略,当移动节点比较稀疏时,数据很难被维持在目标区域,传输成功率很低.当节点密度增加时,数据被成功维持的可能性增加,传输成功率随之明显增加.对于 MDA,随着车辆密度的增加,订阅者数目迅速增加,代理的数目也因此增多,从而其传输成功率随之提高.当节点密度继续增加(300~400)时,节点数的变化对上述 3 种方法传输率的影响则将迅速弱化,因此它们的传输成功率基本保持稳定.另外值得注意的是:对于 OP,当节点比较稀疏时,其性能表现良好;随着节点密度的增加,网络通信量迅速增加,当节点密度增加到一定程度后,无线冲突严重,传输成功率迅速下降.此外,如图 8(b)所示:随着车辆密度的增大,PADD 传输延迟变化不大,MDA 和 Election 策略传输延迟有了一定程度的减少,OP 的传输延迟先减少后增加.这一现象同样是由于 4 种方法的机制不同引起的.从图 8(c)中我们还可以看出:随着节点密度的增大,OP 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 PADD,Election 和 MDA 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 PADD 不需要频繁地进行数据移交和广播订阅确认包,减少了无效通信量的产生,具有最合理的网络负载.

5.2.3 数据产生率对性能的影响

数据产生率决定了需要分发的消息数目,高数据产生率会带来更大的网络负载.本组实验研究了数据产生率的变化对 4 种算法性能的影响.当其他参数保持默认值、数据产生频率从每 10 秒 1 个包到每 10 秒 10 个包的变化过程中,各种算法的性能变化如图 9(a)~图 9(c)所示.

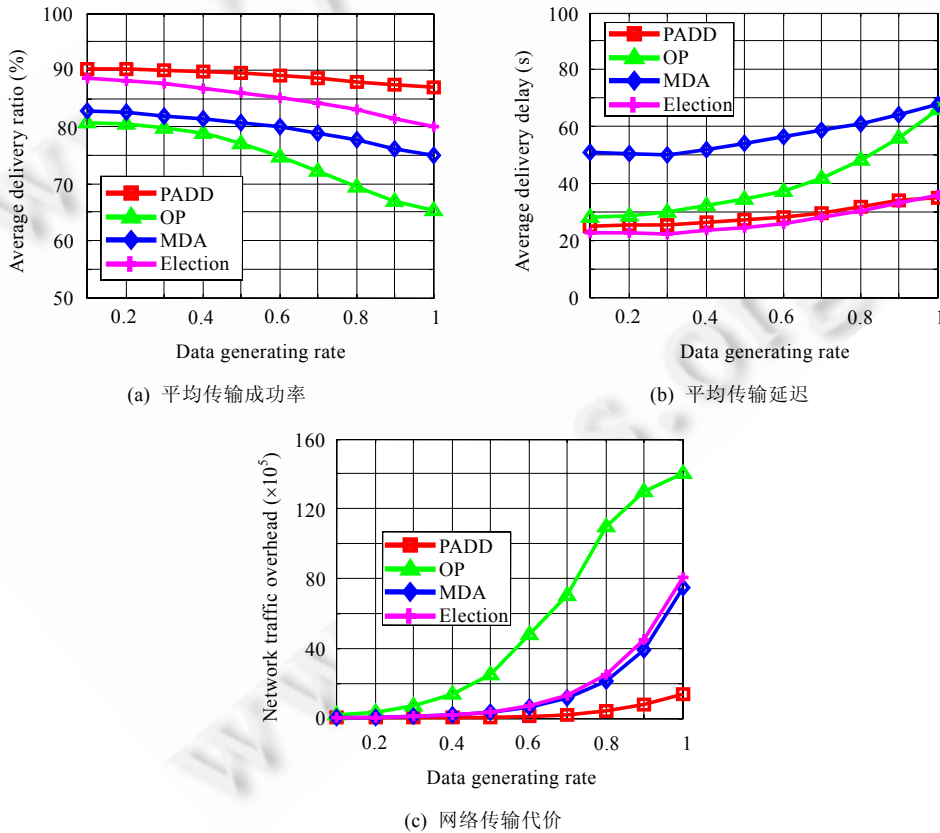


Fig.9 Impact of data generating rate

图 9 数据产生率的影响

从图 9(a)中我们发现:在不同的数据产生率下,PADD 均表现出了极高的数据递交率;随着数据产生频率的

逐渐增大,PADD 的传输成功率变化很小,而另外 3 种策略的传输成功率却明显的降低了.对于 PADD,其将数据维持在静止的车辆节点上,并只在一跳范围内广播,极大地降低了无线传输冲突的可能性,因此数据传输成功率很高,且可以同时分发的数据量更大.对于 Election 策略,当要分发的数据增多时,数据移交占用的带宽随之增加,因此,网络冲突的可能性增加,数据递交率有所降低.对于 OP,数据产生率的增加会迅速提高单位时间的通信量,进而导致 MAC 层的冲突加剧,极大地降低了其在传输率方面的性能.对于 MDA,数据产生率的增加意味着需要在网络中以 epidemic 的方式广播更多的消息确认包,带来了更大的网络冲突可能性,因此数据递交率明显降低.

从图 9(b)中可以看出:PADD、Election 和 MDA 的传输延迟受数据生成率变化影响不大,而 OP 的传输延迟会随着数据生成率的增加而增加.

此外,如图 9(c)所示:随着数据产生率的增加,OP 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 Election,PADD 和 MDA 均限制了事件副本扩散的范围,通信量负载的增长维持在一个稳定的水平;相比之下,3 种策略中 Election 由于需要频繁进行数据移交,传输代价更大.

5.2.4 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.图 10(a)、图 10(b)表示在不同协议下,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,PADD,Election 和 MDA 随数据包大小变化均相对稳定,且 PADD 明显优于 Election 和 MDA.与 OP 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 OP 则相当明显,当数据包增大时,带宽资源则减少,OP 的数据递交率则急剧下降,延时则急剧增加,甚至比 Election 还要严重.

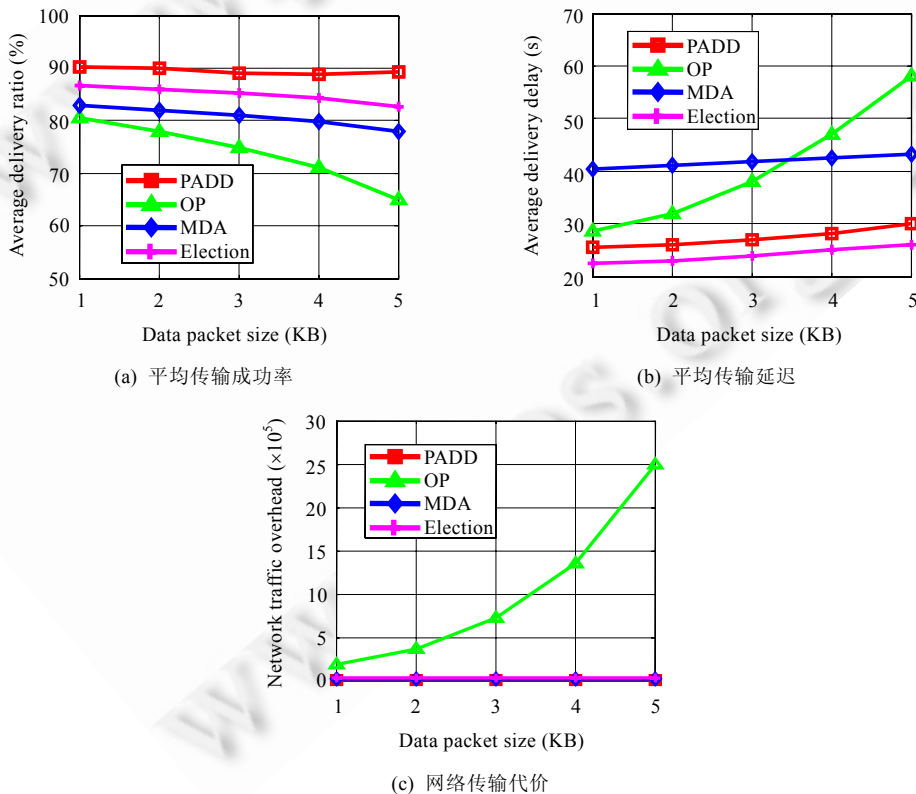


Fig.10 Impact of data packet size

图 10 数据包大小的影响

图 10(c)表示网络传输代价与数据包大小的关系.网络传输代价是指在整个仿真过程中产生的总的数据量.

因为 PADD, Election 和 MDA 都有各自的数据扩散控制策略, 所以当数据产生率固定时, 其网络传输代价与数据包大小呈线性变化. 而 OP 具有很强的扩散性和副本性, 网络传输代价随着数据包大小的增加而急剧上升.

5.2.5 停放车辆辅助率对性能的影响

停放车辆辅助率 (parked vehicle assistance ratio) 是指参与数据分发的停放车辆占总停放车辆的比例, 本文实验测试了停放车辆辅助率对 PADD 性能的影响.

如图 11 所示, PADD 数据传输成功率随停放车辆辅助率的变化很小. 即使在停放车辆辅助率为 10% 的情况下, 数据递交率也达到了 85%. 当停放车辆辅助率从 10%~30% 变化时, PADD 的数据传输成功率有微弱的增加; 然而当其在 30%~90% 变化时, PADD 传输成功率变化很小. 这是由于 PADD 借助停放车辆维持数据, 只要有一辆停放车辆提供停车辅助, 就可以将数据维持在本路段, 并为行驶车辆提供数据分发服务. 因此, 停放车辆辅助率对数据分发过程影响不大.

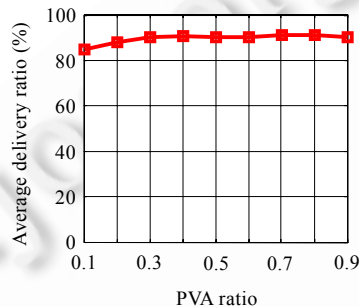


Fig.11 Impact of delay tolerant value

图 11 停放车辆辅助率的影响

6 结论及下一步工作

鉴于城市区域道路两旁长时间拥有大量停放车辆这一事实, 本文提出了 VANETs 中基于停放车辆辅助的数据分发策略 PADD, 由路边停放车辆维持要分发的数据, 并为行驶经过的车辆提供数据分发服务. PADD 对目标区域内的停放车辆按簇管理, 提供了从数据源到目标区域各选定停车簇的有效路由算法, 并给出了停车簇数据分发机制.

本文通过理论分析和大量的仿真实验对提出的数据分发策略进行了验证. 理论分析通过比较说明了基于停放车辆辅助的数据维持方法的有效性. 仿真结果表明, PADD 以较小的网络传输代价和传输延迟实现了较高的数据传输成功率.

由于城市区域的多数路段允许路边停车, 我们在设计 PADD 时只考虑了由路边停放车辆实现数据分发的情形. 为了提高本算法在数据递交率和传输延迟方面的性能, 下一步我们将考虑在个别没有停放车辆的路段使用 V2V 的方式实现数据分发. 另外, 路边停放车辆除了可以用于数据维持外, 还可以参与到数据路由阶段, 这将是我们的下一步研究工作的重点.

References:

- [1] 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. [doi: 10.1109/ICVES.2008.4640900]
- [2] Maihofer C, Leinmuller T, Schoch E. Abiding geocast: Time-stable geocast for ad hoc networks. In: Proc. of the VANET. 2005. [doi: 10.1145/1080754.1080758]
- [3] 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]

- [4] Lochert C, Scheuermann B, Caliskan M, Mauve M. The feasibility of information dissemination in vehicular ad-hoc networks. In: Proc. of the 4th Annual Conf. on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS 2007). 2007. 92–99. [doi: 10.1109/WONS.2007.340478]
- [5] Morency C, Trpanier M. Characterizing Parking Spaces Using Travel Survey Data. CIRRELT, 2006.
- [6] Xu B, Ouksel A, Wolfson O. Opportunistic resource exchange in inter-vehicle ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on MDM. 2004. 4–12. [doi: 10.1109/MDM.2004.1263038]
- [7] Korkmaz G, Ekici E, Ozguner F, Ozguner U. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. In: Proc. of the Proclaims VANET. 2004. 76–85. [doi: 10.1145/1023875.1023887]
- [8] 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]
- [9] 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]
- [10] Wu H, Fujimoto RM, Guensler R, Hunter M. MDDV: A mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks. In: Proc. of the ACM 1st Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004). ACM Press, 2004. 47–56. [doi: 10.1145/1023875.1023884]
- [11] Wu L, Liu M, Wang XM, Chen GH, Gong HG. Mobile distribution-aware data dissemination for vehicular ad hoc Networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2011,22(7):1580–1596 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3871.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03871]
- [12] leontiadis I, Costa P, Mascolo C. A hybrid approach for content-based publish/subscribe in vehicular networks. Pervasive Mob. Comput., 2009,5(6):697–713. [doi: 10.1016/j.pmcj.2009.07.016]
- [13] Lochert C, Scheuermann B, Wewetzer C, Luebke A, Mauve M. Data aggregation and roadside unit placement for a VANET traffic information system. In: Proc. of the 5th ACM Int'l Workshop on Vehicular Inter-Networking. 2008. 58–65. [doi: 10.1145/1410043.1410054]
- [14] 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]
- [15] Liu NB, Liu M, Lou W, Chen GH, Cao JN. Pva in vanets: Stopped cars are not silent. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on INFOCOM. 2010. 431–435. [doi: 10.1109/INFOCOM.2010.5935198]
- [16] Eltoweissy M, Olariu S, Younis M. Towards autonomous vehicular clouds. In: Proc. of the AdHocNets. 2010.
- [17] Olariu S, Khalil I, Abuelela M. Taking VANET to the clouds. Int'l Journal of Pervasive Computing and Communications, 2011, 7(1):7–21. [doi: 10.1108/17427371111123577]
- [18] Mak T, Laberteaux K, Sengupta R, Ergen M. Multichannel medium access control for dedicated short-range communications. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2009,58(1):349–366. [doi: 10.1109/TVT.2008.921625]
- [19] Schrank D, Lomax T, Turner S. Annual urban mobility report. 2010. http://tti.tamu.edu/documents/ums/mobility_report_2010_wappx.pdf
- [20] Shoup D. Cruising for parking. Access, 2007,30:16–22.
- [21] Nandan A, Tewari S, Das S, Gerla M, Kleinrock L. AdTorrent: Delivering location cognizant advertisements to car networks. In: Proc. of the WONS 2006. 2006. 203–212.
- [22] Frenkiel RH, Badrinath BR, Borrás J, Yates R. The infostations challenge: Balancing cost and uiquity in delivering wireless data. In: Proc. of the IEEE Personal Communications. 2000. [doi: 10.1109/98.839333]
- [23] Adiv A, Wang W. On-Street parking meter behavior. Transportation Quarterly, 1987,41:81–307.
- [24] Zhao J, Cao GH. VADD: Vehicle-Assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the INFOCOM 2006. 2006. 1–12.
- [25] Kurose JF, Ross KW. A top-down approach featuring the Internet.
- [26] Meier R, Cahill V. STEAM: Event-Based middleware for wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the 1st Int'l Workshop on Distributed Event-Based Systems (DEBS 2002). 2002. [doi: 10.1109/ICDCSW.2002.1030841]

- [27] Fiege L, Gärtner FC, Kasten O, Zeidler A. Supporting mobility in content-based publish/subscribe middleware. In: Proc. of the Middleware. 2003. 103–122.
- [28] Härrilä J, Filali F, Bonnet C, Fiore M. VanetMobiSim: Generating realistic mobility patterns for VANETs. In: Proc. of the VANET. 2006. 96–97. [doi: 10.1145/1161064.1161084]

附中文参考文献:

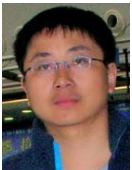
- [11] 吴磊,刘明,王晓敏,陈贵海,龚海刚.移动分布感知的车载自组网络数据分发.软件学报, 2011,22(7):1580–1596. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/22/1580.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03871]



赵慧(1983—),女,内蒙古巴彦淖尔人,博士,主要研究领域为无线传感器网络,车载自组织网络.



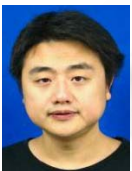
龚海刚(1975—),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络.



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



周圣二(1991—),男,主要研究领域为无线自组织网络.



刘念伯(1975—),男,博士,主要研究领域为车载自组织网络.



吴跃(1958—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为无线网络,数据库系统.