

# 车载 Ad Hoc 网络中基于移动网关的数据传输

陈 丽 李治军 姜守旭 冯 诚

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

**摘 要** 由于车载 Ad hoc 网络拓扑的动态变化及车载节点的快速移动,应用现有传输方法在其上进行 Internet 接入点向移动车辆(Infrastructure-to-Vehicle, I2V)数据传输时成功率较低,而且传输延迟高、延迟抖动大.为了解决这一问题,文中利用公交车路线固定、运行特征可预测、节点及线路分布稠密等特性,将公交车作为移动网关(Mobile Gateway, MG),提出了一种新的基于 MG 转发的 I2V 数据传输方法(Mobile Gateway based Forwarding, MGF).文中首先将公路网模型化为状态-空间图,再运用马尔可夫决策方法建立了一种基于 MG 转发的 I2V 数据传输优化模型,然后通过对模型求解得出 I2V 数据传输的最优转发决策,最优转发决策指的就是每个状态下对应的最优动作序列,最后在目的车辆行驶轨迹上选取满足传输成功率阈值,并使 I2V 传输延迟最小的路口节点作为数据包与目的车辆的最优汇聚节点,即目标节点.应用 MGF 方法, MG 节点将以最优概率转发序列向目标节点转发数据包.文中利用模拟平台对 MGF 方法的传输性能进行了评估,结果表明该方法在满足传输成功率阈值前提下,能够获得最小传输延迟期望.理论分析同样也证明了该方法的有效性.

**关键词** 智能交通系统;车载 Ad hoc 网络;马尔可夫决策过程;I2V 数据传输;移动网关;物联网

**中图法分类号** TP393 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2012.00454

## MGF: Mobile Gateway Based Forwarding for Infrastructure-to-Vehicle Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks

CHEN Li LI Zhi-Jun JIANG Shou-Xu FENG Cheng

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** The highly dynamic topology and the rapid movement of destination node pose special challenges to Infrastructure-to-Vehicle (I2V) data delivery in Vehicular Ad Hoc Networks (VANET). Current data delivery methods are with the strong delay, the large jitter of delay and low delivery ratio for I2V data delivery. The paper investigates how to effectively utilize the prominent characteristic of buses, and proposes Mobile Gateway (MG) based Forwarding (MGF) that buses are installed as MG to forward data packet. To solve the problem that the paper models road network as a probabilistic state-space graph, in which applies the value iteration algorithm for the markov decision processing model to derive the optimal forwarding policy, that means the optimal forwarding sequence. In order to improve the performance of data delivery, the paper selects an optimal rendezvous point of the packet and the destination vehicle as the target point while satisfying the required packet delivery probability. Through theoretical analysis and extensive experiments, it is shown that our design provides an efficient I2V data forwarding under a variety of vehicular traffic conditions.

**Keywords** Intelligent Transportation Systems (ITS); Vehicular Ad hoc NETWORK (VANET); Markov Decision Process (MDP); Infrastructure-to-Vehicle Data Delivery (I2V); Mobile Gateway (MG); Internet of Things

收稿日期:2011-08-26;最终修改稿收到日期:2012-02-10. 本课题得到国家自然科学基金(60803148, 60973124)、教育部高校博士点科研基金(20102302110036)资助. 陈 丽,女,1975 年生,博士研究生,主要研究方向为移动通信及移动感知网络技术. E-mail: chen-li20040415@hit.edu.cn. 李治军,男,1977 年生,副教授,主要研究方向为移动通信与无线网络技术. 姜守旭,男,1968 年生,教授,主要研究领域为网络体系结构和无线网络技术. 冯 诚,女,1986 年生,博士研究生,主要研究方向为 DTN 上的数据管理技术.

## 1 引 言

近年来,车辆的增多和无处不在的信息需求将通信网络和车辆日益紧密地结合起来,人们在车辆移动过程中的通信服务需求日益增大,车辆间、车辆与 Internet 接入点之间相互通信组成了一种开放的移动 Ad hoc 网络——车载 Ad hoc 网络(简称 VANET)。VANET 部署方便、费用低廉、结构开放,利用它可以实现事故告警、辅助驾驶、道路交通信息查询、乘客间通信等。VANET 还可以作为末端网接入 Internet,为用户提供音乐下载、资讯共享等服务<sup>①②</sup>,是近年来迅速兴起一个热点研究领域<sup>[1-6]</sup>。

VANET 的特点是大量节点高速移动、网络拓扑变化快及广播报警信息要求紧迫。目前的研究成果表明,VANET 具有其它移动自组织网络所不具备的特性和数据通信问题。首先,VANET 是移动自组织网络在道路上的应用,它具有移动自组织的各种特点,比如自治性和无固定结构、路由多跳、网络拓扑的动态变化、网络容量有限以及良好的可扩展性等。但特殊的应用环境,如节点沿狭窄的道路高速移动、节点分布密度相对较高且不均匀等将直接影响 VANET 网络的数据传输,如使得丢包数增加、延迟增大等。实验表明<sup>[7]</sup>,在 VANET 中使用传统的传输层协议(如 TCP、UDP 等)和路由协议(如 AODV、DSR、OLSR 等)时延迟较大且延迟抖动剧烈,数据包传输成功率一般不超过 50%。

由于 VANET 中节点的高速移动,造成了端到端链接的间歇性,其多跳路由是由普通节点协作完成而不是由专用路由设备来完成的。在现有文献中,普通节点路由时一般基于公路网布局及车流量等统计信息来“携带-转发”<sup>[8]</sup>数据包。VANET 现有数据传输方法用于向静止的目的节点(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)传输数据时颇为有效,而用于向移动的目的节点(I2V)传输数据时,延迟及成功率等传输性能太差,在实际应用中往往不可忍受。这是因为目的节点的高速移动使得源节点发出的数据包要经过多个中继节点协作转发,而只有刚好及时的数据包才能被传到高速移动的目的车辆上。现有的这些数据传输方法都是选择随机移动且移动可预测性不强的普通车辆节点作为中继节点,使得传输延迟抖动剧烈,因此不可能准确估计出数据包的传输延迟。这就使得 Internet 接入点欲将数据包传到某移动目的车辆上变得困难,几乎不可能实现。只有

刚好及时的数据包才能被传到高速移动的目的车辆上。这也使得 I2V 数据传输成为该网络当前最具挑战的研究问题之一。

## 2 相关工作

VANET 中 Internet 接入点向移动车辆(I2V)传输数据包时,由于 Internet 接入点的通信范围有限,往往需要多跳携带-转发。I2V 数据传输过程中网络拓扑动态变化,而且目的节点是高速移动的,只有刚好及时的数据包才能被传到快速移动的目的车辆上,所以其数据传输的难度更大。

目前 VANET 的 I2V 数据传输中,为了减少延迟抖动,降低数据包的传输延迟,SADV<sup>[9]</sup>与 TSF<sup>[10]</sup>提出基于路侧控制单元(Based Roadside Unit, BRSU)转发的数据传输方法。BRSU 方法通过路口处静态路侧控制单元(RoadSide Unit, RSU)对数据包的存储-转发,来减少数据包转发过程的随机性,以达到提高传输性能的目的。实验结果表明了 BRSU 方法的有效性,但我们可以看到该类方法假设公路网的每个路口都部署了 RSU,强烈依赖于假设,并以此为前提进行 I2V 数据传输研究。可想而知,公路网中的每个交叉路口都部署固定 RSU 节点,其投入成本及维护费用会是多么的庞大。考虑到现实情况,不难看出 BRSU 方法对 I2V 数据传输的研究过于理想化,其研究成果在实际的 VANET 中很难被广泛采用,不能成为问题的最终解决手段。那么研究在一般的公路网中,即无需稠密部署 RSU 节点,如何转发才能更有效地提高其传输性能,已经成为 I2V 数据传输中最为迫切需要解决的问题。

在此背景下,本文提出利用公路网中已有的移动可预测强的公交车作为移动网关(Mobile Gateway, MG),基于 MG 转发数据包而无需 RSU 的辅助的 MGF 方法。模拟实验及理论分析都证实了 MGF 方法用于一般公路网进行 I2V 数据传输的有效性。

目前在 VANET 中无需 RSU 协助(No Road-Side Unit, NRSU)转发的数据传输方法有 VADD<sup>[2]</sup>、TBD<sup>[11]</sup>与 MDDV<sup>[12]</sup>,它们均使用基于车流量统计的随机模型尝试在路口没有设置静态 RSU 的条件下,使用携带-转发方法将数据包机会转发给数据包的目的节点。VADD 和 TBD 都说明

① NoW: Network on wheels. 2006. <http://www.network-on-wheels.de>

② Internet ITS consortium. 2006. <http://www.internetits.org>

了 NRSU 方法用于 V2I 数据传输时的有效性,但是由于没有解决延迟的估计精度过低问题,在目的节点高速移动的 I2V 数据传输中其实际传输性能往往不可忍受,如丢包率高、延迟抖动大、传输成功率低,因此不适用 I2V 数据传输. NRSU 数据传输方法应用于 I2V 数据传输性能差的根本原因是没能有效地降低数据传输过程的随机性. 我们利用公路网中节点异构的特性,将公路网中特殊的车辆节点作为中继节点,利用其移动特征可预测性强等特性有效降低数据转发的随机性,以此提高数据传输性能.

目前大部分对 VANET 数据通信的研究都是将出租车、公交车及其它车辆作为对等节点<sup>[1-6,10-15]</sup>,而没有考虑 VANET 网络中节点异构的特性. 部分文献<sup>①[9,16-17]</sup>考虑了移动节点的异构性,但只是利用其辅助 VANET 的数据传输过程.

针对有关 I2V 数据传输方面的研究所存在的诸多问题,综合考虑了影响 I2V 数据传输的各种因素,本文尝试在无静态基础设施辅助的条件下,提出基于 MG 转发数据包的 I2V 数据传输 MGF 方法. 本文的研究目标就是在满足用户约束的传输成功率阈值条件下,最小化传输延迟. 该目标的实现需解决以下两个问题:第 1 个问题是公路网中持有数据包的 MG 节点会以不同概率与其它 MG 节点相遇,如何转发才能使得数据包传输延迟最小. 本文将该问题形式化为求解使得数据包传输延迟期望最小的转发序列,即求最优转发序列. 第 2 个问题就是向哪个路口转发才能使得 I2V 数据传输延迟最小,本文将该问题形式化为数据包与目的车辆汇聚节点的优化选择. 即在目的车辆行驶轨迹上选取满足用户约束传输成功率阈值要求,并使得 I2V 传输延迟最小的路口作为数据包与目的车辆的优化汇聚节点,即目标节点. 在进行 I2V 数据传输时,应用本文提出的 MGF 方法,可以使 MG 以最优的概率转发序列向目标节点转发数据包.

MGF 方法将路线固定、运行时间间隔稳定的车辆节点(如公交车)作为 MG,并基于 MG 转发数据包. 可以大大地降低 I2V 数据传输过程中数据包转发的随机性,大幅减少传输延迟的抖动,从而有效地提高 I2V 的数据传输性能. 本文的研究对于节能降耗、缓解资源压力、促进经济发展,具有重要的理论意义与实用价值. 本文的 MGF 方法有效地提高了 I2V 数据传输性能,达到在满足要求的传输成功率前提下,传输延迟的期望最小,并且无需公路网部署稠密的 RSU 节点来辅助数据的传输,即 NRSU 方

法,其研究更接近现实环境.

### 3 传输模型与问题定义

本节将形式化定义 VANET 中基于 MG 转发的 I2V 数据传输问题. 我们将公路网中配有无线通信设备的车辆称为车载设备单元(On Board Unit, OBU),OBU 之间通过专用短程通信设备 DSRC<sup>②</sup>进行数据通信. 随着智能交通系统的快速发展以及 GPS 自身研发技术与配套服务的不断完善、成熟, GPS 正逐步成为智能交通不可或缺的车载设备之一. 如今,许多汽车供应商(如 GM 和 Toyota 等)都在计划发售带 GPS 和 DSRC 设备的汽车<sup>③④</sup>.

假设目标车辆装有 GPS 导航系统及数字地图,已知自己的行车路线并定期地将路线信息报告给公路网中 Internet 接入点(Access Point, AP). 这个定期报告可以使用目前已有的方法(如 VADD<sup>[2]</sup>、SADV<sup>[9]</sup>和 TBD<sup>[11]</sup>等)来完成. 公交车路线及发车时间间隔等信息已知,各线路公交车相互联系的概率可以基于历史统计信息来获得. 图 1 给出了一个 Internet 接入点将数据包转发给沿已知轨迹行驶的车辆的 I2V 数据传输实例.

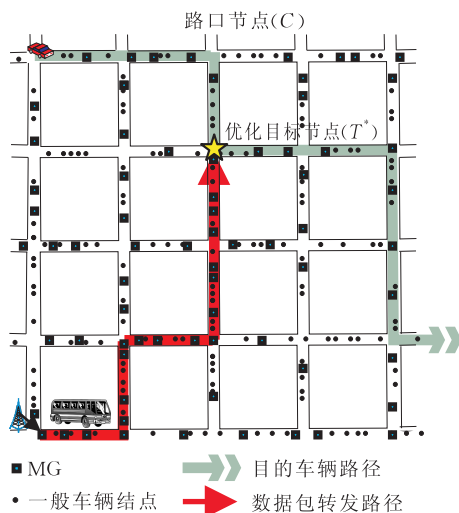


图 1 MG 转发的 I2V 数据传输实例

- ① General Motors (GM). Vehicle-to-Vehicle (V2V) Communications. <http://www.gm.com/experience/technology/research/overview/isl/vcim.jsp>
- ② Carter. The Status of Vehicle-to-Vehicle Communication as a Means of Improving Crash Prevention Performance. Tech. Rep. 05-0264, 2005. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-01/esv/esv19/05-0264-W.pdf>
- ③ ETSI. DSRC Standardization. <http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/DSRC.aspx>
- ④ Toyota Motor Corporation (TMC). TMC Develops On-board DSRC Unit to Improve Traffic Safety. <http://www2.toyota.co.jp/en/news/09/09/0903.html>

### 3.1 数据传输模型

在大中型城市的公路网中,公交车自身路线固定、运行时间间隔稳定并且节点及线路分布稠密,如图 2 所示为部署多个 AP 且公交线路完全覆盖的公路模型,图中阴影表示 AP 节点的通信区域.公交车间相互已知行车路线及发车时间间隔等信息.本文将运行特征稳定且可预测强的公交车作为 MG, MG 点构成 VANET 的 Overlay 层,其 I2V 数据传输系统架构如图 3 所示.

我们将公路网模型化为一个概率状态-空间图  $G=(S,E)$ ,其中  $S$  为状态的集合,即节点集; $E$  为状态间联系的集合,即边集,如图 4 所示. 状态  $s_{ij} \in S$

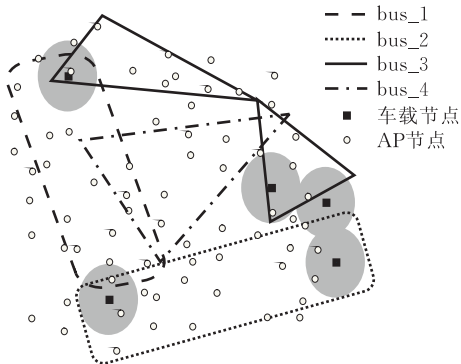


图 2 部署多个 AP 的公路网模型

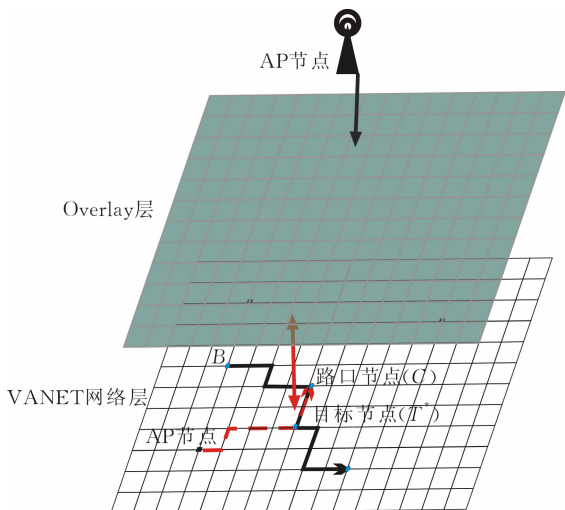


图 3 基于 MG 转发的 I2V 数据传输系统架构

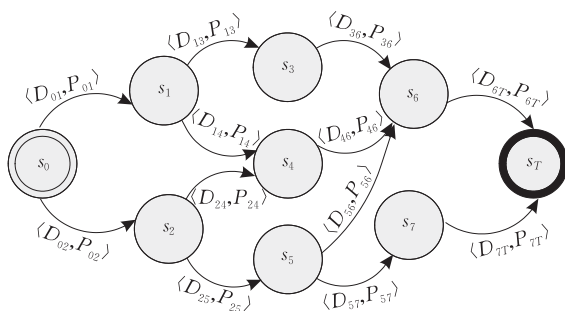


图 4 概率状态-空间图示例

是一个二元组  $s_{ij} = \langle b_i, I_j \rangle$ ,其中  $b_i$  为第  $i$  条公交线路上的公交车,  $i=1,2,\dots,n$ ;  $I_j$  为路口,  $j=1,2,\dots,m$ . 为简化讨论,将状态下标统一标记为  $s_1, s_2, s_3, \dots$ . 边  $e_{ij} \in E$  是一个二元组  $e_{ij} = \langle d_{ij}, p_{ij} \rangle$ ,  $e_{ij}$  表示经延迟  $d_{ij}$  从状态  $s_i$  转移到状态  $s_j$  的概率为  $p_{ij}$ .

### 3.2 基于 MG 转发的 I2V 数据传输

本节将对基于 MG 转发的 I2V 数据传输问题及相关内容进行描述.

#### 3.2.1 问题描述

我们的问题是:给定一个公路网,无需部署稠密 RSU,在满足用户要求传输成功率前提下,以最小的传输延迟将数据包从 Internet 接入点转发到目的车辆.首先将该问题形式化为满足约束传输成功率阈值条件下,最小化传输延迟期望的优化问题;然后将原问题分解为如下两个子问题,通过求解子问题即可获得原问题的解.

**问题 1.** 向哪个路口转发? 为了使 I2V 数据传输延迟最小,可将其形式化为数据包与目的车辆的汇聚节点的优化选择问题.在目的车辆行驶轨迹上选取满足传输成功率阈值,并使得 I2V 传输延迟最小的路口节点作为数据包与目的车辆的汇聚节点.

**问题 2.** 如何转发? 公路网中持有数据包 MG 会以不同概率与其它 MG 节点相遇, MG 如何转发才能使得数据包到达汇聚节点的传输延迟最小.为此,我们提出了一种基于 MG 节点随机转发 (Mobile Gateway based Random Forwarding, MGRF) 方法,模拟实验结果如图 7 所示.为了进一步提高传输性能,基于 MGRF 我们又提出了 MGF 方法, MGF 将这个子问题形式化为求解使得数据包传输延迟期望最小的转发序列,即求最优转发序列.本文首先将公路网模型化为状态-空间图,将基于 MG 转发的数据传输描述为马尔可夫决策过程模型 (Markov Decision Process, MDP),在状态-空间图中应用值迭代方程求出使得传输延迟期望最小的最优决策,即每个状态下对应的最优动作序列.

应用 MGF 方法进行 I2V 数据传输的过程分为以下 3 个阶段:(1)由 Internet 接入点转发给 MG; Internet 接入点 AP 要将数据包发到某目的的车辆,基于 GPSR 路由算法<sup>[14]</sup>首先将数据包转发给通信半径内距目标节点最近的 MG;(2) MG 转发给目标 MG; MG 以最优转发序列转发数据包,最终以最小传输延迟期望转发给经过目标路口节点的目标 MG;(3)目标 MG 携带-转发数据包给目的的车辆;目标 MG 沿目的车辆的反向路径携带-转发数据包,当

且仅当通信范围内存在以当前路段  $e_c$  为特定首字符的最长公共子串 (the specifically First character Longest Common Substring, FLCS) 比自身的 FLCS 更长时, 才进行数据包的转发, 否则携带数据包. 该携带-转发数据包的过程直到数据包成功转发给目的车辆或延迟大于 TTL 才结束. 本文提出的 MGF 数据传输方法为非等待的积极数据传输, 这将进一步减小传输延迟.

### 3.2.2 MGF 操作中的概念

**定义 1.** 目的车辆路径. 目的车辆路径是公路网中节点与边相间隔的有序序列, 我们将其符号化为  $R^{(V_d)} = \langle I_1^v, e_1^v, I_2^v, e_2^v, I_3^v, e_3^v, \dots, I_{l-1}^v, e_l^v, I_l^v \rangle$ ; 且目的车辆路径路口节点的集合  $V^{(V)} = \{I_i^v | i=1, 2, \dots, l\}, V^{(V)} \subseteq V$ .

**定义 2.** 目标节点. 目标节点定义为数据包与目的车辆的优化汇聚节点, 用  $T^*$  表示. 目标节点的优化选择通过数据包的传输延迟分布和目的车辆行驶延迟分布的分析实现.

**定义 3.** 目标路段. 沿目的车辆路径反方向, 目标节点与下一路口节点间的路段定义为目标路段. 如图 1 所示, 路段  $e_T = \langle T^*, C \rangle$  就是目标路段.

**定义 4.** 目标公交车  $b^*$ . 路段  $e_T$  在其行驶轨迹上的公交车, 称为目标公交车 (即目标 MG 节点).

**定义 5.** 特定首字符的最长公共子串 (FLCS): 公交车  $b_i$  的行驶路径  $R^{(b_i)} = \langle e_1^{b_i}, e_2^{b_i}, e_3^{b_i}, \dots \rangle$  与数据包转发路径  $R^{(F)} = \langle e_1^F, e_2^F, e_3^F, \dots \rangle$  以当前路段  $e_c$  为首字符的最长公共子串定义为  $LCS_{b_i} = \langle \hat{R}^{(b_i)} \cap R^{(F)} \rangle$ , 其中  $\hat{R}^{(b_i)} = \langle e_c, \dots, e_{i,h-1}, e_{i,h} \rangle$  表示字符串  $R^{(b_i)}$  中以  $e_c$  为首字符的最长子串.

## 4 优化目标节点

本节将对基于 MG 进行 I2V 数据传输所要解决的第一个子问题——数据包与目的车辆汇聚节点的优化选择进行求解. 优化选择出来的汇聚节点作为数据包传输的目标节点. 在目的车辆行驶路径上选取满足传输成功率阈值, 并使得 I2V 传输延迟最小的路口作为数据包与目的车辆优化的汇聚节点  $T^*$ , 如图 2 所示. 其优化选择通过分析数据包传输延迟分布与目的车辆行驶延迟分布实现.

$$P(D^P \leq D^V) \geq \theta \quad (1)$$

式(1)的含义就是找到满足传输成功率大于等于  $\theta$  ( $\theta$  为用户要求的传输成功率阈值) 时的汇聚节点  $T$ . 当然存在多个这样的  $T$ , 从中选取传输延迟最

小的  $I_i^v$  作为优化的汇聚节点  $T^*$ , 即目标节点, 目标函数形式化如下:

$$T^* \leftarrow \arg \min_{i \in V^{(V)}} \{E(D_i^V)\} \\ \text{subject to } P(D^P \leq D^V) \geq \theta \quad (2)$$

式(1)和式(2)中的  $D^P$  与  $D^V$  分别表示数据包的传输延迟及目的车辆的行驶延迟,  $E(D_i^V)$  表示目的车辆从当前位置  $I_i^v$  到路口节点  $I_i^v$  的行驶延迟的期望. 假设公路网中到达某路口的车流量服从泊松分布. 将车辆的行驶延迟  $D^V$  建模为一个形如  $D^V \sim \Gamma(\alpha_V, \beta_V)$  [18] 的伽马分布.

下面构建目的车辆从公路网中一个位置到另一位置的行驶延迟模型. 给定一个公路网可以将其抽象为图  $G' = (I, E')$ ,  $I$  为节点集, 即公路网中路口节点的集合;  $E'$  为边集, 即相邻两路口间路段的集合. 经过路段  $e_i \in E'$  的行驶时间模型化为伽马分布  $d_i \sim \Gamma(\alpha_i, \beta_i)$ ; 每个路段的行驶延迟分布可以通过车流量获得, 通常认为每个路段上的行驶延迟服从伽马分布  $d_i \sim \Gamma(\alpha_i, \beta_i)$  [19-20]. 伽马分布中的参数  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  可以通过  $E[d_i]$ 、 $Var[d_i]$  与  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  之间的关系求得, 这里的  $E[d_i] = \alpha_i \beta_i$  且  $Var[d_i] = \alpha_i \beta_i^2$ ,  $d_i, \alpha_i, \beta_i > 0$  [18],  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  的计算方法如下:

$$\alpha_i = \frac{E[d_i]}{\beta_i} = \frac{\mu_i^2}{\sigma_i^2} \quad (3)$$

$$\beta_i = \frac{Var[d_i]}{E[d_i]} = \frac{\sigma_i^2}{\mu_i} \quad (4)$$

在目的车辆的行驶路径上, 假设从当前位置到目标节点的路径由  $M$  个路段组成, 且这  $M$  个路段上的行驶延迟相互独立. 我们用求数据包传输延迟相同的方法计算车辆延迟分布的均值和方差如下:

$$E[D^V] = \sum_{i=1}^M E[d_i] = \sum_{i=1}^M \mu_i \quad (5)$$

$$Var[D^V] = \sum_{i=1}^M Var[d_i] = \sum_{i=1}^M \sigma_i^2 \quad (6)$$

有了  $E[D^V]$ 、 $Var[D^V]$ , 就可以计算出车辆行驶延迟伽马分布中的参数  $\alpha_V$  和  $\beta_V$  了. 下一节我们将在数据传输模型, 即状态-空间图 (见 3.1 节) 中, 采用 MDP 决策模型求解最小期望延迟.

式(1)和式(2)中  $D^P$  表示数据包基于 MDP 决策将数据包转发到目标节点  $T^*$  处的最小期望传输延迟  $EMD$  (Expectal Minimum Delay), 详见 5.2 节. 求出数据包的传输延迟及车辆的行驶延迟  $D^P$  和  $D^V$ , 就可计算出概率值  $P(D^P \leq D^V)$ .  $P(D^P \leq D^V)$  表达的含义就是数据包从源节点基于 MG 转发到目标节点  $T^*$  的传输延迟小于等于目的车辆从当前位

置到目标节点  $T^*$  的行驶延迟的概率, 即数据包先于目的车辆到达目标节点的概率,  $P(D^p \leq D^v)$  计算如下:

$$P(D_i^p \leq D_i^v) = P(EMD_i \leq X) = \int_{EMD_i}^{TTL} g(X) dx \\ = \int_{EMD_i}^{TTL} g(X; \alpha_v, \beta_v) dx, \alpha_v > 0 \quad (7)$$

式中,  $g(X)$  表示车辆的行驶延迟的概率密度函数.  $TTL$  是数据包的生存时间;  $TTL$  是由目的车辆沿行驶路径从当前位置到达路径上的最后一个位置的行车时间所决定的. 传输成功率的计算要考虑数据包的生存时间  $TTL$ . 由于经过时间  $TTL$  以后数据包就将被丢弃, 因此  $TTL$  以后的传输成功率都为 0.

本文的核心问题就是在满足式(2)的约束条件下, 通过优化选择目标节点来最小化传输延迟, 而目标节点的优化选择除了与目的车辆的行驶延迟  $D^v$  有关外, 还依赖于数据包由源节点转发到目标节点的最小期望传输延迟,  $EMD$  的详细描述见下节.

## 5 最小期望延迟 $EMD$

公路网中持有数据包的 MG 以不同概率与其它 MG 节点相遇, 如何转发才能使数据包到达目标节点的传输延迟最小, 这是本文要解决的第 2 个子问题. 显然这是一个顺序决策, 即寻求最优策略的问题. 在此问题中未来状态转移概率具有无后效性, 即只与当前状态有关而与历史无关. 因此可将该问题的求解过程模型化为马尔可夫决策过程. VANET 数据传输过程中, 携带延迟比通信延迟大 3~5 个数量级. 虽然存在很小的通信延迟, 但是由于携带延迟在整个传输延迟中占主导地位, 所以寻求最优转发决策就是寻求携带延迟期望最小的策略. 本节首先描述 MDP 决策模型; 然后描述如何利用 Bellman-Ford 算法求解最优转发决策, 即每个状态的最优转发序列; 最后可以求得应用最优转发决策将数据包转发到目标节点的最小期望延迟  $EMD$ .

### 5.1 MDP 模型

马尔可夫决策过程  $MDP^{[21]}$  可用如下的五元组来描述:  $M = \langle S, A, \Gamma, D, S_T \rangle$ , 其中,  $S$  是状态空间, 即包括所有状态的有限集合, 状态  $s \in S$  用公交车及其所在路口的二元组  $s = \langle b_i, I_j \rangle$  来表示,  $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ .  $A$  是指包括所有动作的有限集合;  $\Gamma$  是状态转移函数, 通常用  $\Gamma_a(s, s')$  表示从状态  $s$  执行动作  $a$  转移到状态  $s'$  的概率,  $\sum_{s' \in S} \Gamma_a(s, s') = 1$ . 具体的概率值依照优先级排序及公交车间联系的概率情

况来确定. 延迟函数  $D(s, s')$  表示由状态  $s$  转移到状态  $s'$  的延迟.  $S_T$  是目标状态集.  $S_T = \{s_T | s_T = \langle b_i, I_j \rangle \text{ IFF } I_j \in E_T \text{ and } \langle e_{j_i}, e_T \rangle \in R_{b_i}\}$ , 其中  $E_T$  表示目标节点  $T^*$  的邻居路口节点的集合.

### 5.2 MDP 求最小传输延迟

在给定公路网中由 Internet 接入点向目标路段转发数据包时, 我们把基于 MG 转发时的中继节点规划问题看作是寻求最优转发决策问题.

本小节描述如何基于马尔可夫决策过程 MDP 求解最小传输延迟. 我们应用值迭代方程<sup>[22]</sup> 至值收敛, 更新所有状态的值函数 (即  $\gamma^*(s) = \min_{a \in A(s)} \sum_{s' \in S} \{\Gamma_a(s, s') \times [D(s, s') + \gamma^*(s')]\}$  Bellman 方程) 以求解马尔可夫决策过程 MDP. 相应地, 最优策略为  $\pi^*(s) = \arg \min_{a \in A(s)} (\Gamma_a(s, s') \times [D(s, s') + V^*(s')])$ , 对于 Bellman 方程的解, 采用函数迭代法, 在每一轮的  $t+1$  次迭代, 都是基于前  $t$  次迭代的结果, 每个状态  $s \in S_G$  的值  $\gamma_{t+1}(s)$  都是基于历史统计概率信息选择一个使得  $\gamma_{t+1}(s)$  最大的动作  $a \in A_s$  来进行更新的. 在式(8)的右式中, 采取一个动作  $a$ , 状态  $s$  的值就是最大转发概率期望值, 即由状态  $s$  转移到下一状态  $s'$  的概率  $\Gamma_a(s, s')$  为权重, 状态  $s$  所有  $\gamma_t(s')$  的加权和.

$$\gamma_{t+1}(s) = \min_{a \in A(s)} \sum_{s' \in S} \{\Gamma_a(s, s') \times [D(s, s') + \gamma_t(s')]\} \quad (8)$$

通常当  $\gamma_{t+1}(s)$  与  $\gamma_t(s)$  之差小于某个阈值时, 迭代过程结束. 只要适当初始化这些状态的值, 就可使得值迭代收敛于这些状态的最小延迟的期望. 适当初始化指的是在状态-空间图中迭代应用式(9), 这实质上就是 Bellman-Ford 算法.

$$\gamma_0(s) = \min_{a \in A(s)} \{ \min_{s': \Gamma_a(s, s') > 0} \gamma_0(s') \} \quad (9)$$

当前公交车  $b_c$  可能将数据包转发给公交车  $b_1, b_2$  或  $b_3$ , 而将其状态  $s$  转移到状态  $s_1, s_2$  或  $s_3$ , 若  $\gamma(s_1) < \gamma(s_2) < \gamma(s_3)$ , 则状态转移的优先顺序为  $\{s_1, s_2, s_3\}$ , 因此  $b_c$  尽可能将数据包转发给  $b_1$ , 状态转移到  $s_1$ ; 只有在既不能转发给  $b_1$  也不能转发给  $b_2$  时,  $b_c$  才将数据包转发给  $b_3$ , 状态转移到  $s_3$ . 设  $p_1^T, p_2^T$  和  $p_3^T$  分别表示从状态  $s$  转移到状态  $s_1, s_2, s_3$  的转移概率.  $p_1^T + p_2^T + p_3^T = 1$ , 为了使转发概率的期望最大, 必须最大化  $p_1^T$ , 其次在  $p_1^T$  最大化前提下再尽量最大化  $p_2^T$ , 所以  $p_1^T = p_{c1}, p_2^T = (1 - p_1^T) \times p_{c2}, p_3^T = (1 - p_1^T - p_2^T) \times p_{c3}$ .  $p_{c1}, p_{c2}$  和  $p_{c3}$  分别表示在当前状态  $s$ , 当前公交车  $b_c$  与公交车  $b_1, b_2$  和  $b_3$  通信的概率. 实例中的  $p_1^T, p_2^T$  和  $p_3^T$  为式(8)中的权重  $\Gamma_a(s, s')$ ,



$$s' = s_1, s_2, s_3.$$

本节基于 MDP 模型求出了数据包的最优转发序列以及以最优转发序列将数据包转发到汇聚点的最小期望延迟  $EMD$ , 将  $EMD$  的值带回目标函数中就可求出目标节点. 最后, 我们通过对两个子问题的求解, 获得了最优的转发策略及数据包与目的车辆的目标汇聚节点. 实现了在满足约束传输成功率阈值要求条件下, 以最小的传输延迟期望进行 I2V 数据传输.

## 6 性能分析

本节将从模拟实验及理论两方面对 MGF 的 I2V 数据传输方法的性能进行分析, 进而证实该方法的有效性.

### 6.1 模拟实验

我们通过对最小期望传输延迟、传输成功率及传输延迟估计误差的标准差实验结果的分析 MGF 方法的传输性能.

文献[10]已对网络中车的数量、车速等因素对数据传输延迟及传输成功率的影响进行了性能分析. 我们在此不再赘述, 仅对公路网中公交车(即 MG 节点)的发车时间间隔对传输延迟及传输成功率的影响进行分析.

如图 5 所示, 我们比较公交车发车时间间隔分别为  $\Delta t$  和  $\Delta t/2$  时 MGF 的传输性能. 实验统计结果表明 100 次实验中当发车时间间隔为  $\Delta t$  时, 最小传输延迟占 71%, 其  $EMD$  为 771.07 s; 而当它为  $\Delta t/2$  时, 最小传输延迟高达 92% 并且  $EMD$  降为 519.29 s.

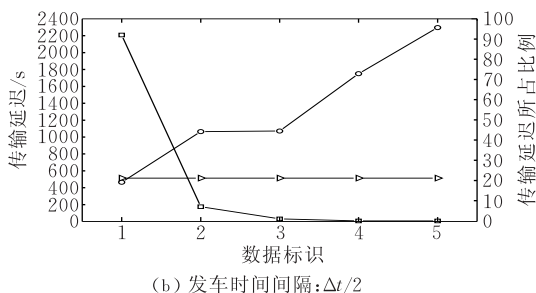
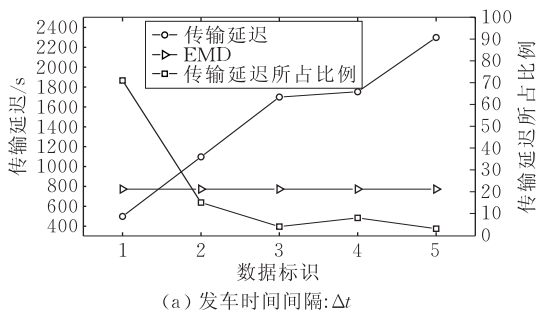
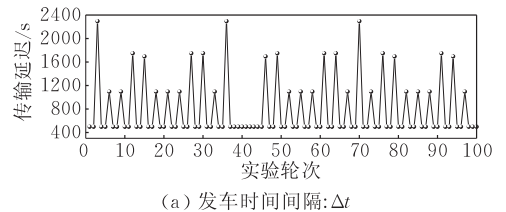
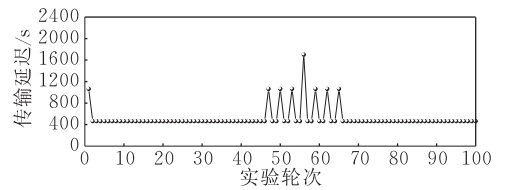


图 5  $EMD$  与最小传输延迟所占比例

I2V 数据传输问题的核心就是“刚好及时”地将数据包从 Internet 接入点(如 AP)传到移动的车辆节点, 实质就是要解决传输延迟估计的精确性问题. 从图 6 的模拟实验结果可以看出, 当发车时间间隔由  $\Delta t$  降为  $\Delta t/2$  时, 传输延迟抖动大大小于  $\Delta t$  时的延迟抖动. VADD<sup>[2]</sup> 的传输延迟估计误差的标准差高达 1277.1%<sup>[10]</sup>, 而本文提出的 MGF 方法(当发车时间间隔为  $\Delta t/2$  时)传输延迟估计误差的标准差为 194.48%.



(a) 发车时间间隔:  $\Delta t$



(b) 发车时间间隔:  $\Delta t/2$

图 6 传输延迟统计

发车时间间隔的变化对方法 MGF、MGRF 及 TSF 的传输成功率的影响如图 7 所示. 无论是 TSF 方法, 还是 MGRF(见 3.2.1 节)和 MGF 方法, 随着  $\Delta t$  的减小传输成功率增大. 当公交车发车时间间隔  $\Delta t$  不断减小时, 网络中的车辆总数增加. 本文的实验结果表明传输成功率随车辆个数的增加而增大, 与文献[10]的结论相符.

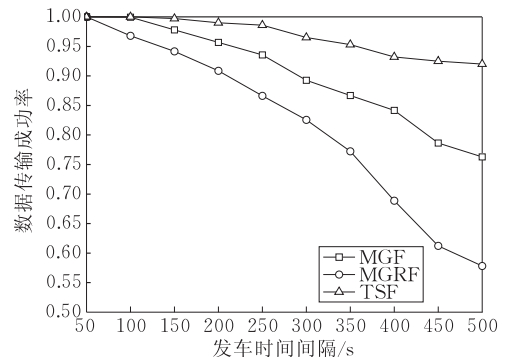


图 7 发车时间间隔对传输成功率的影响

TSF 方法假设每个路口都设置了静态的 RSU 节点. 基于路口的这些 RSU 节点对数据包进行存储-转发, 数据包会以 1 的概率沿预先计算出的最优转发路径进行转发. 我们可以看出, TSF 方法为理想情况下的 I2V 数据传输方法. 本文提出的 MGF 方法研究在一般的公路网中无需 RSU 节点辅助数

据传输的方法. 从图 7 中可以看出, MGF 方法随着  $\Delta t$  的不断减小, 传输成功率无限趋近于理想情况 TSF 方法的传输成功率. 这是由于网络中公交车的密度随公交车发车时间间隔  $\Delta t$  的减小不断增大, 数据包会以更高的概率沿最优转发路径向目标节点转发.

综上所述, 实验结果表明了 MGF 方法在满足传输成功率阈值条件下, 随着 MG 节点发车时间间隔  $\Delta t$  不断减小, 传输延迟抖动大大降低, 在提高传输延迟估计的精度同时, 获得了最小传输延迟期望 EMD, 并且随着  $\Delta t$  的不断减小, 其传输成功率无限趋近于 TSF 方法的传输成功率.

## 6.2 理论分析

本文提出的基于 MG 转发的 I2V 数据传输 MGF 方法, 对数据包与目的车辆优化汇聚节点的计算  $\epsilon$  容错,  $\epsilon = \hat{D}^p$ . 设  $t_1$  时刻数据包由 Internet 接入点发送到了目标节点, 从此刻起目标公交车沿目的车辆的反向路径转发数据包, 即从时刻  $t_1$  开始, 数据包通过携带-转发与目的车辆在目的车辆路径上相向而行;  $t_2$  时刻数据包成功转发给目的车辆, 此时显然  $(t_2 - t_1) = \hat{D}^p = \hat{D}^v$ ,  $\hat{D}^p$  和  $\hat{D}^v$  分别表示的数据包传输延迟及目的车辆的行驶延迟 (见 3.2.1 节).

**定理 1.** 对数据包与目的车辆优化汇聚节点的计算至少  $\epsilon$  容错,  $\epsilon \geq \frac{L_{e_T}}{V_b}$ .

证明. 目标公交车以 1 的概率携带数据包经过目标路段的延迟为  $\frac{L_{e_T}}{V_b}$ , 所以  $\epsilon$  的下界为  $\frac{L_{e_T}}{V_b}$ ; 又由于目标公交车将数据包转发给目的车辆反向路径的目标路段的下一路段上公交车的概率  $p > 0$ , 所以  $\epsilon \geq \frac{L_{e_T}}{V_b}$ .

**定理 2.** 本文提出的 I2V 单副本 MGF 数据传输方法依据期望延迟是最优的单副本机会转发方法.

假设  $D_{AT}$  为在当前状态下由节点  $b_A$  转发到  $b_T$  的期望最小延迟,  $D_{ACT}$  为在当前状态下由节点  $b_A$  转发给  $b_C$  再转发到  $b_T$  的期望最小延迟. 由于增加转发给中继节点  $b_C$  这个约束条件, 节点  $b_C$  有可能位于由节点  $b_A$  到  $b_T$  期望最小延迟的转发序列中, 所以  $D_{AT} \leq D_{ACT}$ .

证明. 要证 I2V 单副本数据传输协议 MGF 依据期望延迟是最优的单副本机会转发方法成立, 只需证明 MGF 数据包的每次转发都是最小传输延迟转发即可.

设  $S$  为在当前状态下可将数据包转发到  $b_T$  的节点集,  $b_A \in S$ ,  $S' = S - \{b_A\}$ ,  $\forall b_B \in S'$ , 若  $D_{AT} < D_{BT}$ , 则不存在经  $b_C$  转发的期望最小延迟比  $D_{AT}$  小, 这是因为  $D_{AT} < D_{BT} \leq D_{BCT}$ .

本文提出的 MGF 方法基于 MG 节点转发数据包, 以此提高 I2V 数据传输可靠性与实时性. 实验结果及理论分析都证实了 MGF 方法的有效性, 既大幅提高传输延迟估计的精度, 降低延迟抖动, 同时也有效地提高了 I2V 数据传输的性能. MGF 方法无需在公路网中部署稠密的 RSU 节点, 即不需要稠密的静态 RSU 节点辅助数据转发, 其研究更接近实际, 更具有理论意义与实践价值.

## 7 结 论

VANET 中 I2V 数据传输方法从是否借助 RSU 转发的角度分为两大类: (1) NRSU 方法. 无需借助 RSU 转发数据的 I2V 传输方法, 如 VADD<sup>[2]</sup>、TBD<sup>[11]</sup> 与 MDDV<sup>[12]</sup> 无需借助 RSU 节点转发数据包, 而是使用车辆间携带-转发的方法将数据包机会转发给目的车辆. 由于 NRSU 方法没能从根本上降低 I2V 数据传输过程中传输的随机性, 使得数据传输延迟抖动过大, 要实现从 Internet 接入点到移动车辆的数据传输难度非常大, 几乎不可能; (2) BRSU 方法. 需稠密 RSU 存储-转发数据的 I2V 数据传输方法, 如 SADV<sup>[9]</sup> 与 TSF<sup>[10]</sup> 都假设公路网中已部署了稠密的 RSU 节点, 基于已部署在路口的静态 RSU 节点对数据包进行存储-转发, 即在数据包携带-转发的每一路口节点都部署了 RSU 节点, 去解决 I2V 数据传输中传输随机性大的问题, 以保证数据包传输延迟估计的精确性. 考虑现实情况, 不难看出 BRSU 方法的假设过于强烈, 即该方法对于 I2V 数据传输的研究过于理想化, 其研究成果在实际的 VANET 中很难被广泛采用, 不能成为问题的最终解决手段. 基于此种考虑, 本文剔除该假设, 利用城市中公交车与生俱来的一些特性, 如线路稠密, 路线固定、运行特征可预测强等特性, 将公交车作为 VANET 中的 MG, 基于 MG 转发以实现有效的 I2V 数据传输. 本文提出的 MGF 方法通过 MG 节点进行 I2V 数据转发, 大大降低了传输过程中转发的随机性, 既解决了 I2V 传输延迟估计的精确性问题, 同时也解决了由于传输的随机性所导致的延迟抖动大的问题. MGF 方法在无需在 VANET 中额外部署稠密的 RSU 的情况下, 有效地提高了 I2V 数据传输的成功率, 降低了传输延迟. 该方法假



设条件少,其研究更接近现实,因此更利于广泛应用.本文从实验及理论两个角度对 MGF 数据传输方法进行性能分析,分析的结果进一步证实了该方法的有效性.

## 参 考 文 献

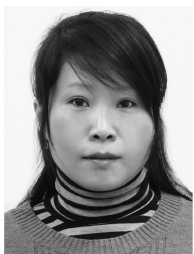
- [1] Naumov V, Gross T R. Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad hoc networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM2007). Anchorage, USA, 2007: 1919-1927
- [2] Zhao J, Cao G. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1910-1922
- [3] Skordylis A, Trigoni N. Delay-bounded routing in vehicular ad hoc networks//Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc2008). Hong Kong, China, 2008: 341-350
- [4] Ott J, Kutscher D. Drive-thru Internet; IEEE 802.11b for "automobile" users//Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM2004). Hong Kong, China, 2004: 362-373
- [5] Eriksson J, Balakrishnan H, Madden S. Cabernet: Vehicular content delivery using WiFi//Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM2008). San Francisco, USA, 2008: 199-210
- [6] Bychkovsky V, Hull B, Miu A, Balakrishnan H, Madden S. A measurement study of vehicular internet access using in situ WiFi networks//Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2006). Los Angeles, USA, 2006: 50-61
- [7] Hao J, Hou, K M, Li J-J et al. The capacity and packets delivery of MANET on road; MANETOR//Proceedings of the Global Mobil Congress (GMC2005). Chongqing, China, 2005: 553-558
- [8] Davis J, Fagg A, Levine B. Wearable computers as packet transport mechanisms in highly-partitioned ad-hoc networks//Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2001). Zurich, Switzerland, 2001: 141-148
- [9] Ding Y, Wang C, Xiao L. A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks//Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks. Montreal, Canada, 2007: 59-68
- [10] Jeong J, Guo S, Gu Y, He T, David H C. TSF: Trajectory-based statistical forwarding for infrastructure-to-vehicle data delivery in vehicular networks//Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS2010). Genova, Italy, 2010: 557-566
- [11] Jeong J, Guo S, Gu Y, He T, Du D. TBD: Trajectory-based data forwarding for light-traffic vehicular networks//Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS2009). Montreal, Canada, 2009: 231-238
- [12] Wu H, Fujimoto R, Guensler R, Hunter M. MDDV: Mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks//Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks. Philadelphia, USA, 2004: 47-56
- [13] Keränen A, Ott J. DTN over aerial carriers//Proceedings of the 4th ACM Workshop on Challenged Networks. Beijing, China, 2009: 67-76
- [14] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks//Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM2000). Boston, USA, 2000: 243-254
- [15] Chen L, Li Z J, Jiang S X. An efficient routing protocol in a bus-based vehicular ad hoc network//Proceedings of the International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications (PCSPA 2010). Harbin, China, 2010: 70-73
- [16] Liu C, Wu J. Practical routing in a cyclic mobispace. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(2): 369-382
- [17] Zhang X L, Kurose J, Levine B N, Towsley D, Zhang H G. Study of a bus-based disruption-tolerant network; Mobility Modeling and Impact on Routing//Proceedings of the 13th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom2007), Montreal, Canada, 2007: 195-206
- [18] DeGroot M, Schervish M. *Probability and Statistics*. 3rd Edition. USA: Addison-Wesley, 2001
- [19] Polus A. A study of travel time and reliability on arterial routes. *Transportation*, 1979, 8(2): 141-151
- [20] Berry D S, Belmont D M. Distribution of vehicle speeds and travel times//Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley, USA, 1950
- [21] Howard R A. *Dynamic Programming and Markov Processes*. Cambridge, MA: MIT Press, 1960
- [22] Bonet B, Geffner H. Faster heuristic search algorithms for planning with uncertainty and full feedback//Proceedings of 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2003). Acapulco, Mexico, 2003: 1233-1238

**CHEN Li**, born in 1975, Ph. D. candidate. Her research interests include mobile communications and Mobile Sensor Network (MSN) technology.

**LI Zhi-Jun**, born in 1977, associate professor. His research interests include mobile communications and wireless networking technology.

**JIANG Shou-Xu**, born in 1968, professor. His research interests include network architecture and wireless networking technology.

**FENG Cheng**, born in 1986, Ph. D. candidate. Her research interest is data processing technology on delay tolerant network.



## Background

With the development of wireless communication and Ubiquitous Computing technologies, Intelligent Transport Systems (ITS) have been attracting public attention in The Internet of Things (IOT) Environments. ITS is expected to solve the traffic problems including traffic accidents and traffic jams by transmission of traffic information among roadside infrastructures and vehicles by wireless communication in VANETs.

Current research on data delivery in Vehicular Ad hoc Network (VANET) has been mainly focused on Vehicle-to-Infrastructure data delivery (V2I) and Vehicle-to-Vehicle (V2V). Since the rapid movement of destination vehicle, and only just-in-time packets can be delivered to a moving vehicle, Infrastructure-to-Vehicle data delivery (I2V) has become even more challenging than V2I and V2V.

Recently, several I2V data delivery schemes forwarding packet based on road network deployed a great number of static nodes have been proposed. However, taking into consideration the present conditions of road networks, they idealize research so that the achievements are hard to be extensive used. Moreover, they can't be a final resolution of the problem for I2V.

The authors investigate how to effectively utilize the prominent characteristic of buses, and propose a data forwarding scheme called Mobile Gateway(MG) based Forwarding (MGF), tailored for the data delivery from infrastructure nodes to moving vehicles in VANET. To improve the performance of the packet delivery, the paper models the road network as a probabilistic state-space graph. With the state-space graph, the paper applies the markov decision process to derive the Expected Minimum Delay (EMD) of the packet. In order to improve the performance of data delivery, the paper selects an optimal rendezvous point of the packet and the destination vehicle as the target point while satisfying the required packet delivery probability. Through theoretical analysis and extensive experiments, it is shown that our design provides an efficient I2V data forwarding under a variety of vehicular traffic conditions.

The research project is funding by Doctoral Fund of Ministry of Education of China under Grant No. 20102302110036, and is funded in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 60803148.