

一种基于链路感知的 VANET 路由协议*

沈 虎⁺, 王晓东, 周兴铭, 夏戈明

(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

Link-Ware Based Routing Protocol for VANET

SHEN Hu⁺, WANG Xiao-Dong, ZHOU Xing-Ming, XIA Ge-Ming

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: E-mail: shen.hooo@gmail.com

Shen H, Wang XD, Zhou XM, Xia GM. Link-Ware based routing protocol for VANET. *Journal of Software*, 2011, 22(Suppl. (1)): 157-164. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11017.htm>

Abstract: Due to high mobility and sparse distribution of vehicle nodes, data packets transmission in VANET face great challenges. To address the problem, this paper proposes a link-ware routing protocol named as LALO. The study first introduces a distributed beacon detection scheme to gather local traffic statistics, so vehicle nodes storing packets can predict performance matrix of transmission paths and decide which path is the optimal one to choose. Results show that the proposed LALO protocol outperforms existing solutions in terms of packet delivery ratio, protocol overhead and transmission range.

Key words: vehicular ad hoc network (VANET); routing protocol; link-ware; performance modeling

摘 要: 针对于数据报文在节点高速移动和链路部分连通的车载自组织网络中的传输问题,提出一种基于链路感知的路由协议 LALO,该协议使用信标探测机制感知报文存储车辆节点周遭链路信息,以此为根据预测传输路径性能并决定报文的转发决策.模拟仿真结果表明,LALO 路由协议具有报文成功传输率高,协议控制开销小,传输范围大等优点.

关键词: 车载自组织网络;路由协议;链路感知;性能建模

1 概 述

车载自组织网络(vehicular ad hoc network,简称 VAENT)是一种特殊形式的移动自组织网络(mobile ad hoc network,简称 MANET),它由车辆节点以及少量路边无线基础设施共同构建而成,能够为车辆与车辆之间的直接通信(V2V)和车辆与路旁基础通信设施(V2I)之间的通信提供支持.车载自组织网络正成为一个能够向车载用户提供安全驾驶、导航、广告及娱乐等各种信息和服务的通信平台.

由于车辆节点高速移动及非均衡分布等特性,车载自组织网络的网络拓扑变化剧烈,通信链接也会发生频繁中断甚至可能产生多个部分连通的通信“孤岛”.对于上述新的问题和挑战,适用于移动自组织网络中的传统路由协议如 AODV^[1],DSR^[2],GPSR^[3]等无法解决,这是因为它们都建立于报文源节点与目标节点之间存在至少一条稳定通信路径的前提假设上.为了适应车载自组织网络的特性及需要,一些概念性的路由协议已经被设计

* 基金项目: 国家自然科学基金(61070201, 61070203)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

出来,其中以 Epidemic^[4]和 VADD^[5]协议影响最甚,但这些协议多数局限于一跳传输或小范围的多跳传输,另外存在较大的报文预期时延预测偏差、与网络规模相关的计算复杂性及协议开销等不足.本文基于链路感知为车载自组织网络设计了轻量级路由协议 LALO,主要的工作包括:

(1) 在报文传输时延预测模型基础上,结合报文转发方向、通信链路稳定性等构建一个评价车载自组织网络传输路径性能的预测模型;

(2) 摒弃了传统集中式全网链路状态信息广播架构,首次采用了分布式链路状态信息感知构架,大大降低了路由协议控制开销及网络通信负载;

(3) 基于时空交通数据生成器 NGMO 和网络模拟器 NS-2,构建了一个车载自组织网络模拟仿真实验平台,并在此基础上实现了 LALO,Epidemic,GPSR 和 VADD 等路由协议,最后我们对各路由协议进行了性能评测及分析.

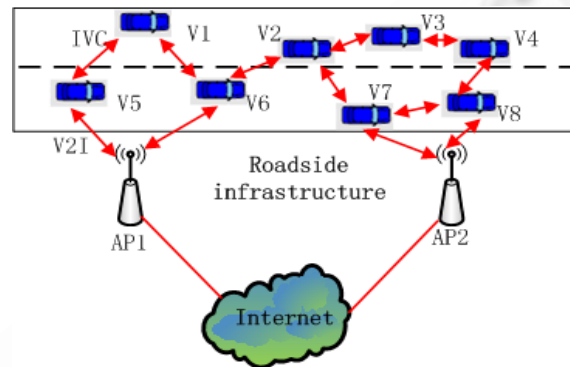


图1 车载自组织网络结构图

2 LALO 路由协议设计

2.1 传输路径性能预测模型

由于车载自组织网络的通信链路是部分连通的,因此进行数据报文传输时必须采用存储-转发策略,即当通信链路不存在时,数据报文存储在移动的车辆节点;若存在向前中继转发的机会,数据报文通过无线传输的方式转发到其他的车辆节点.存储-转发策略能够解决车载自组织网络部分连通问题,但值得注意的是数据报文传输的存储时延比转发时延要高数个量级,所以在车载自组织网络中单一的传输路径长度不能有效衡量传输路径性能,故车载自组织网络的路由协议首先需要构建一个评判传输路径转发性能的评价模型.

我们将城市街道抽象成一张图 $G(U,V,E)$,图中有限点集 V 表示十字路口集合,图中有向边集合 E 表示连接相邻路口的街道,如果在 E 中能够找到一条边 e_{ab} 就表示城市中的路口 a 与路口 b 之间有一条连通的街道.无线接入点集合 U 是集合 V 的子集.

2.1.1 链路传输时延

车载自组织网络中数据报文的传输存在存储和转发两个阶段,故报文自十字路口 a 传输到十字路口 b 的预期传输时延可表达如下

$$d_{ab} = \frac{(1-\lambda) \cdot \|e_{ab}\|}{v_{ab}} + \frac{\lambda \cdot \|e_{ab}\|}{c} \quad (1)$$

公式(1)中常量 c 表示电磁波在空气中的传播速度, v_{ab} 表示传输路径 e_{ab} 上车辆节点的平均速度,传输路径长度 $\|e\|$ 由两端十字路口的 GPS 坐标确定,而校正系数 λ 与传输路径 e_{ab} 上的车流密度 ρ_{ab} 以及饱和密度 $\rho_{saturation}$ 关系如下:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{\rho_{ab}}{\rho_{saturation}}, & \text{if } \rho_{ab} < \rho_{saturation} \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

公式(2)中饱和密度 $\rho_{saturation}$ 表示数据报文在传输路径中能够连续进行中继转发所要求的最小车流密度,车流密度 ρ_{ab} 由传输路径 e_{ab} 上的车辆节点数目以及路径长度 $\|e\|$ 计算.

2.1.2 链路转发方向

链路转发方向是指传输路径趋近于报文传输目标的关系,我们选取传输路径缩短的报文传输距离 $\Delta\varphi$ 来表征.报文自十字路口 a 传输到十字路口 b 缩短的传输距离:

$$\Delta\varphi_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (3)$$

其中, φ_a 表示十字路口 a 与报文传输目标(距十字路口 a 最近的无线接入点)之间的欧几里德距离(我们忽略有线网络中的传输时延).

$$\varphi_a = \min\{\sqrt{(x_a - x_u)^2 + (y_a - y_u)^2}\} \quad (\forall u \in U) \quad (4)$$

公式(4)中的 x_a 及 y_a 分别为十字路口 a 的水平及垂直坐标值,两者可以通过携带信息的车辆节点自身的车载GPS设备获知,而无线接入点的坐标值 x_u 及 y_u 可由车载电子地图提供.

2.1.3 链路稳定度

链路稳定度是衡量传输路径保持稳定通信链路的能力.在这里我们不将车流密度作为其中的一个影响因素,因为在链路传输时延建模过程中已经考虑了车流密度的影响.在这里我们考虑的影响链路稳定度因素包括车辆车行方向与路径转发方向的背离关系以及传输路径上车辆速率相对于平均速率的背离关系.

为表征传输路径 e_{ab} 上所有车辆的车行方向对数据报文的影响,我们将车流密度分为正向转发密度 ρ'_{ab} 与逆向转发密度 ρ''_{ab} (ρ'_{ab} 及 ρ''_{ab} 的计算需要结合车辆节点的车行方向信息),那么对通信链路稳定度起影响的转发密度

$$\overline{\rho_{ab}} = \alpha\rho'_{ab} + \beta\rho''_{ab} \quad (5)$$

其中 α 与 β 是两个校正系数,满足 $\alpha > \beta$ 的关系,并且 ρ'_{ab} 与 ρ''_{ab} 满足关系 $\rho'_{ab} + \rho''_{ab} = 1$.

传输路径 e_{ab} 上车辆速率的背离系数可量化为

$$\text{Var}[v]_{ab} = E[v^2] - (E[v])^2 \quad (6)$$

公式(6)中的 $E[V]$ 为传输路径 e_{ab} 所有车辆速率的期望值,而 $E[v^2]$ 为所有车辆速率平方的期望值,即

$$E[v] = \sum_{i=1}^n v_i / n \quad (7)$$

$$E[v^2] = \sum_{i=1}^n v_i^2 / n \quad (8)$$

综合车行方向与转发方向的背离关系以及传输路径上车辆速率相对于平均速率的背离系数,我们可以构建出转发链路稳定度

$$S_{ab} = \overline{\rho_{ab}} + \delta \cdot \text{Var}[v]_{ab} \quad (9)$$

其中 δ 为校正系数.

综上所述我们构建了一个表征传输路径 e_{ab} 转发性能的三维特征向量 $\vec{x}_{ab} = [d_{ab}, \Delta\varphi_{ab}, S_{ab}]^T$.

利用贝叶斯公式可以计算得出传输路径 e_{ab} 状态的后验概率:

$$P(\omega_i | \vec{x}_{ab}) = \frac{p(\vec{x}_{ab} | \omega_i)P(\omega_i)}{\sum_{j=1}^N p(\vec{x}_{ab} | \omega_j)P(\omega_j)}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (10)$$

之后基于最小错误率的贝叶斯决策规则可以传输路径 e_{ab} 进行分类:

$$\text{if } P(\omega_i | \vec{x}_{ab}) = \max_{j=1,\dots,N} P(\omega_j | \vec{x}_{ab})$$

then $\vec{x} \in \omega_i$ (判决条件)

最后我们可以从最优传输路径类别中选取最优传输路径作为数据报文转发的第一选择.

2.2 分布式链路状态信息感知机制

为了满足协议运行的需要,VADD 和 TSF^[6]等车载自组织网络路由协议一般都采用了集中式全网链路状态信息广播架构,要求网络后端的数据中心向车辆节点周期性提供全局网络实时交通信息,这种消息分发措施极大地增加了网络通信负载并降低了网络带宽利用率.与此相对应,我们采取了一种分布式链路状态信息感知机制来感知车辆节点周围的交通信息,这种分布式机制使得交通信息的采集和传输更有区域针对性,并且能够减少路由协议控制开销.

我们的分布式机制采用的是一个简单的信标探测算法:携带信息的车辆节点会周期性地广播信标报文,该报文包括广播者的 IP 地址及其当前位置坐标,我们将其 IP 地址编码为一个 4 比特长的无符号字符型指针,另外我们用两个 4 比特长浮点型指针分别表示节点位置信息的 x 和 y 坐标值.为了避免与邻居车辆节点的信标广播发生冲突,我们为不同的信标发送设置不同的抖动时间(等待时间),信标报文的抖动上界是两个信标报文平均广播间隔 T 的 50%,因此信标报文广播间隔在区间 $[0.5T, 1.5T]$ 内均衡分布.当邻居车辆接收到一个信息报文后,它们不会将此报文转发给下一跳车辆节点,因而报文探测就被限制在一跳传输范围之内,这样就避免了报文泛洪风暴.邻居车辆节点 i 会向携带信息的车辆节点回复一条包含它们 IP 地址(IP_i)、位置坐标值(x_i 及 y_i)、行驶速度(v_i)及车行方向(d_i)等信息的短报文.携带信息的车辆节点接收到回复报文后会不断地刷新它的邻居节点信息表.

链路感知机制能够向报文存储车辆节点提供其邻居节点位置坐标、行驶速度及车行方向等信息,在此基础上报文存储车辆节点可依据上述本地实时交通信息估算诸如传输路径上的车流密度、转发密度及速率方差等变量,并结合其车载 GPS 及车载电子地图等提供的位置信息来构建可选传输路径的性能特征向量.

2.3 LALO路由协议工作流程

LALO 路由协议具有 3 种数据报文传输模式:十字路口模式、直路模式以及接入点模式.

数据报文的传输处于何种模式取决于携带报文的车辆节点的位置.数据报文在传输过程中主要在十字路口模式与直路模式之间进行切换:在十字路口模式,车辆节点会周期性地感知其周围的局部链路状态信息,更新传输路径的性能特征向量从而为十字路口模式下的路径决策提供支持;在直路模式下 LALO 协议采用基于地理位置的贪婪转发算法^[3]的存储-转发策略,尽可能快地将数据报文向前传输;当数据报文进入其目标节点——无线接入点的覆盖范围后,数据报文通过一跳传输的方式完成最终的传输,即意味着数据报文在车载自组织网络中的传输过程完成.

2.4 逆向转发路由

逆向转发路由是指报文从无线接入点向车辆节点传输,在这个过程中报文目标车辆节点处于不断移动的状态,这对我们评测各传输路径的性能特征造成了困难.我们解决方案是根据目标车辆节点的历史移动信息预测其下一时间段内的移动轨迹:无线接入点可以从已经接收的数据报文中解析出目标车辆节点的历史位置信息,并根据该车辆节点的移动规律预测出其在下一时间段内的行车轨迹.在无线接入点接收到某车辆节点传输的数据报文后,它在回复报文中填充以该报文目标接收车辆节点的预测移动轨迹,则车载自组织网络中的中继转发节点可以知道与当前时间相对应的目标车辆节点位置,从而使用与正向转发路由相同的转发策略.

3 模拟仿真平台

为了对比传统的移动自组织网络路由协议(以 GPSR 为例)、经典的车载自组织路由协议(以 VADD 和 Epidemic 为例)和我们提出的 LALO 路由协议的性能,我们利用时空交通数据生成器 NGMO^[7]在一幅真实的德国奥登海姆市电子交通图上生成了一组车辆移动轨迹,然后将这些车辆移动数据以脚本文件的形式导入网络

模拟器 NS2 中,以此构建相应的 VANET 场景并在此基础上评测各路由协议的性能。

仿真环境主要参数设置:车载自组织网络中车辆节点总数为 400,每个节点的传输半径为 250 m,其缓存空间可管理 400 个数据包的队列,这些车辆节点将以 0km/h~100km/h 的速度行驶在 5000m×3200m 的仿真区域中的预定线路上(对应于德国奥登海姆市部分区域的街道),在这个区域中总计有 70 个十字路口,3 个无线网络接入点,接入点的覆盖半径是 500m,仿真时间对应实际时间是 550s,仿真过程使用 12 个连续比特率(CBR)源,发送速率设为控制变量,测试各路由协议在不同网络负载下的效能,每个数据包 1460bit.另外饱和和密度 $\rho_{saturation}$ 设为 0.008,校正参数 α , β 和 δ 分别设为 0.9,0.1 和 0.5 比较合适。

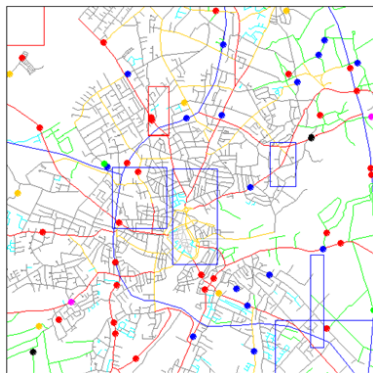


图 2 NGMO 数据生成器

newpoint	0	3	0	20435	19558
point	0	3	1	20455	19688
newpoint	5	0	1	13858	10979
point	0	3	2	20475	19818
point	5	0	2	13800	11627
newpoint	10	1	2	5079	18012
point	0	3	3	20496	19948
point	5	0	3	13504	12223
point	10	1	3	5334	17822
newpoint	15	0	3	13566	20167
disappearpoint	0	3	4	20493	20078
point	5	0	4	13258	12841
point	10	1	4	5981	17832
point	15	0	4	13612	19876

图 3 车辆移动轨迹

4 仿真结果

4.1 报文成功传输率

图 4 显示了各个路由协议以数据传输率为控制变量的数据报文成功传输率对比结果.我们观察可以得知没有采用缓存机制的 GPSR 协议的报文成功传输率最低.Epidemic 路由协议会尽可能地探寻所有可能存在的传输路径,因此它的性能可以视为理论上的最佳上限,我们可以看到在数据流传输率比较低的时候其数据报文成功传输率的确很高,但是当数据流传输速率增加后,Epidemic 路由协议的报文成功传输率急剧降低.我们可以从下图 7 和图 8 中获知原因:由于 Epidemic 路由协议是一种多播协议,因此它会生成许多冗余的数据报文,MAC 层的冲突会随之增加并导致报文递送率的降低.我们发现 LALO 路由协议的成功传输率性能良好,其平均性能比其主要对比协议 VADD 要高出 25%。

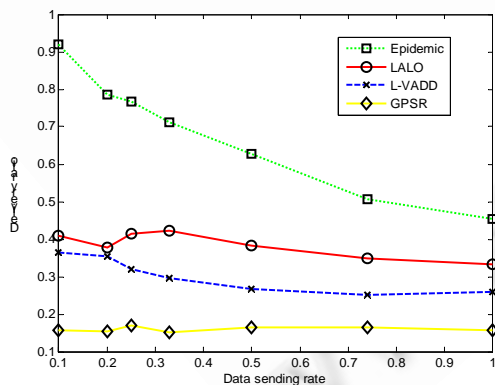


图 4 报文成功传输率对比

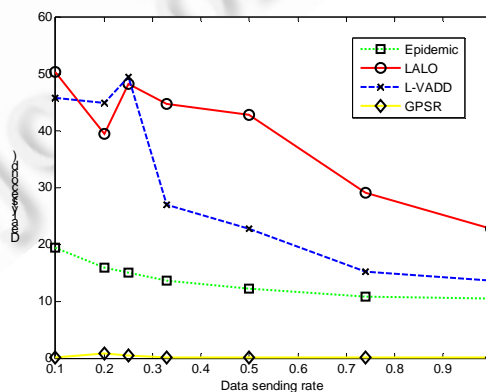


图 5 端到端传输时延对比

4.2 报文时延

图 5 显示了各路由以数据流传输速率为控制变量的数据报文时延对比.由于 GPSR 并没有采用存储机制(及缓存机制)故其数据报文时延非常低.Epidemic 路由协议的数据报文时延比 VADD 及 LALO 要小一些,这是因为 Epidemic 路由协议测试中能够成功传送的数据报文比 VADD 及 LALO 中的报文要更靠近无线接入点.最后我们比较 LALO 及 VADD 在时延性能方面的比较可以发现 VADD 路由协议的时延要比 LALO 的平均要少 14%.我们认为这样的时延损失是可以接受的,因为在我们实验测试中绝大部分数据报文的时延在 50s 以下而车载自组织网络中的应用一般对时延的要求不是很高,大部分应用的时延容忍上界可以达到分钟量级.

4.3 报文传输范围

图 6 显示 Epidemic 和 GRSR 路由协议的报文传输范围(平均报文转发跳数)比 VADD 和 LALO 的明显要小,说明前两者处理远方报文请求的能力比较低.此外 Epidemic 和 VADD 的报文传输范围会随着数据流传输速率的增加而减少,这表明在网络负载较重的车载自组织网络中 Epidemic 和 VADD 对远处报文请求的处理能力会受到影响,特别是 Epidemic 的对报文请求的处理范围将减小 50%以上,这是 Epidemic 和 VADD 路由协议的一个明显弊端.实验结果表明 LALO 路由协议传输范围较大且对数据传输速率的变化具有良好的鲁棒性.

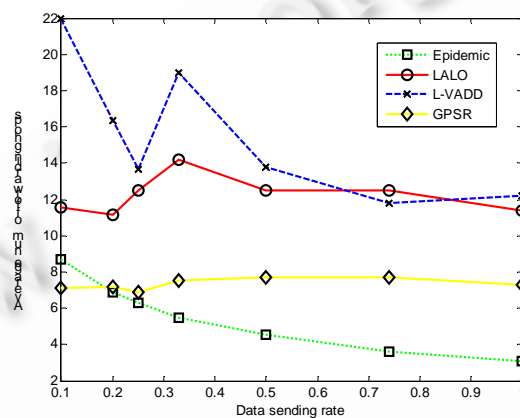


图 6 平均传输条数对比

4.4 协议开销

图 7 显示了各路由协议以数据流传输速率为控制变量的协议开销对比,这里所说的协议开销指的是在整个仿真时间内全网生成的全部数据报文数目.图 8 显示了各路由协议以数据流传输速率为控制变量的丢弃报文和冗余报文的数目.我们观察可知 Epidemic 路由生成的协议开销要远远大于其他的路由协议同时其 MAC 层频繁的冲突也导致了大量的报文被丢弃,它的广播特性也带来了许多的报文冗余.因此 Epidemic 路由协议对网络传输负载非常敏感,它的网络传输效率是所有评测协议之中最差的.GPSR、VADD 和 LALO 路由的协议开销大致上与网络中数据流传输速率成正线性关系,其中 LALO 协议表现得最好,它生成的所有的数据报文量要比其主要对比协议 VADD 平均要少 36.7%.

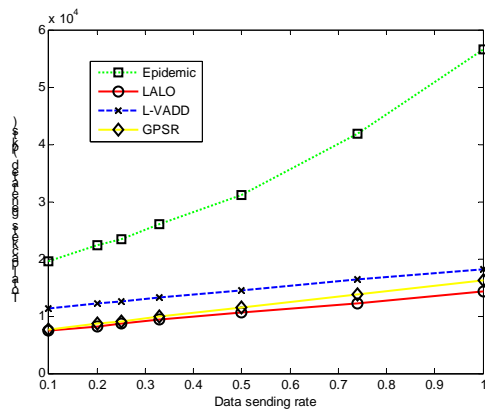


图7 报文生成总量对比

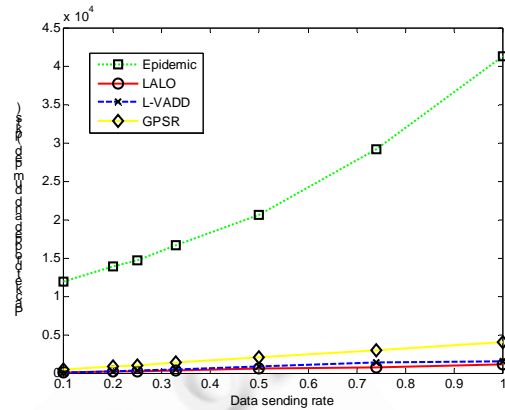


图8 丢弃和冗余报文总量对比

5 结束语

为了适应车载自组织网络通信链路频繁断裂、链路冗余度受限等新特性,另外为了提高车载自组织网络路由协议在计算复杂性以及协议控制开销等方面的网络性能,本文设计了符合大范围尺度下车载自组织网络特性的基于链路感知的轻量级路由协议 LALO.实验结果表明我们设计的 LALO 协议具有报文成功传输率高、协议控制开销小、传输范围大等优点,这表明 LALO 路由协议适合于应用在追求报文成功传输率、对延迟不敏感以及网络带宽有限的大范围尺度下的车载自组织网络中。

致谢 在此特别感谢 VADD 的作者 Zhao Jin 对本文实验的建议和帮助。

References:

- [1] Perkins CE, Royer EM. Ad hoc on-demand distance vector routing. In: Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999.
- [2] Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. Mobile Computing, 1996. 153–181.
- [3] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proc. of the ACM MOBICOM 2000. 2000.
- [4] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical Report CS-200006, 2000.
- [5] Zhao J, Cao G. VADD: Vehicle-Assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2006), 2006. 1–12.
- [6] Jeong J, Guo S, Gu Y, He T, Du D. TSF: Trajectory-Based statistical forwarding for infrastructure-to-vehicle data delivery in vehicular networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Distributed Computing Systems, 2010.
- [7] Brinkhoff T. A framework for generating network-based moving objects. GeoInformatica, 2002,6(2):155–182.
- [8] Shen H. A link-aware lightweight routing in large scale vehicular ad hoc networks [MS. Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [8] 沈虎.大范围尺度车载自组织网络基于链路感知的轻量级路由研究[硕士学位论文].长沙:国防科学技术大学, 2010.



沈虎(1986—),男,湖南株洲人,博士生,主要研究领域为无线网络,移动计算.



王晓东(1973—),男,博士,研究员,主要研究领域为无线传感网,无线自组织网络,移动计算.



周兴铭(1938—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要研究领域为高性能计算机,无线网络与移动计算.



夏戈明(1973—),男,博士,副教授,主要研究领域为信息安全,无线网络.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn