

## 车载自组织网络中基于停车骨干网络的数据传输<sup>\*</sup>

朱金奇<sup>1,2</sup>, 马春梅<sup>2</sup>, 刘明<sup>2</sup>, 陈贵海<sup>3</sup>, 龚海刚<sup>2</sup>, 刘斌<sup>2</sup>



<sup>1</sup>(天津师范大学 计算机与信息工程学院, 天津 300387)

<sup>2</sup>(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

<sup>3</sup>(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

通讯作者: 朱金奇, E-mail: jingpei719@163.com

**摘要:** 车载自组织网络(vehicular ad hoc networks, 简称 VANETs)具有网络间歇连通、节点高速移动及动态的网络拓扑结构等特性, 如何有效地实现车辆间的数据传输, 成为 VANETs 的重大挑战. 现有研究工作基于历史交通流量或历史延迟预测路段当前交通状况的方法并不可靠. 此外, 要实现高效的数据路由传输, 配置大量路边基础设施节点(deploying roadside unit, 简称 RSU)是一种可行方案, 但通常需要额外开销. 基于城市区域长时间拥有大量地上停放车辆这一事实, 提出了基于停车骨干网络的数据传输策略 PBBD(parking backbone based data delivery), 不需要配置任何地面基础设施, 而是把地面的停放车辆组成一个虚拟的停车覆盖网络, 通过该停车覆盖网实现数据的传输. 为此, 首先, 对于每一条道路, 把路边和非路边停放车辆组成一个尽可能长的停车簇, 并基于这些停车簇组织城市停车骨干网络. 其次, 设计基于停车覆盖网络的全新数据传输算法来实现车辆间的有效数据传输. 基于真实城市地图和交通数据的模拟实验结果表明, 与现有的几种数据传输算法相比, PBBD 能够以较低的网络传输开销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; 簇; 停放车辆; 覆盖网; 数据传输

中图分类号: TP393

中文引用格式: 朱金奇, 马春梅, 刘明, 陈贵海, 龚海刚, 刘斌. 车载自组织网络中基于停车骨干网络的数据传输. 软件学报, 2016, 27(2): 432-450. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4839.htm>

英文引用格式: Zhu JQ, Ma CM, Liu M, Chen GH, Gong HG, Liu B. Data delivery for vehicular ad hoc networks based on parking backbone. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(2): 432-450 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4839.htm>

### Data Delivery for Vehicular Ad Hoc Networks Based on Parking Backbone

ZHU Jin-Qi<sup>1,2</sup>, MA Chun-Mei<sup>2</sup>, LIU Ming<sup>2</sup>, CHEN Gui-Hai<sup>3</sup>, GONG Hai-Gang<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer and Information Engineering, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

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

<sup>3</sup>(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Vehicular ad hoc networks (VANETs) are characterized by intermittent connectivity, high mobility of vehicle nodes and dynamic topology. This makes data delivery in VANETs very challenging. Pervious works that based on historical traffic pattern or historical data delivery delay to predict current traffic conditions on the roads are not accurate. Deploying roadside units (RSUs) is a possible solution to overcome the challenges, but it often requires investment. Driven by the fact that there are large amounts of outside parked vehicles in urban areas, this paper proposes a parking backbone based data delivery paradigm (PBBD) for VANETs. PBBD does

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61103227, 61272526, 61170256, 61103226, 61173172, 61173171, 61370204); 天津师范大学引进人才基金(SRL133)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61103227, 61272526, 61170256, 61103226, 61173172, 61173171, 61370204); Import Foundation of Tianjin Normal University of China (SRL133)

收稿时间: 2014-04-21; 修改时间: 2014-06-29, 2015-02-17; 采用时间: 2015-04-05

not need any RSUs, but leverages a virtual overlay network formed by outside parked vehicles to help transmitting messages among vehicles. This scheme consists of two parts. First, to each road, parked vehicles both at roadside and off-street are grouped into a cluster as large as possible. An urban overlay network is established based on this type of clusters for data transmission. Secondly, novel message delivery schemes are designed to efficiently transmit messages to destination vehicles through the proposed virtual overlay network. Simulation results based on a real city map and realistic traffic situations show that PBBD achieves a higher delivery ratio with lower network transmission overhead and reasonable transmission delay.

**Key words:** VANETs (vehicular ad hoc networks); cluster; parked vehicle; overlay network; data delivery

随着无线通信技术的迅速发展,如今越来越多的汽车制造商为汽车安装了智能计算和无线通信设备,以及电子地图和 GPS 系统,用于部署大规模的车载自组织网络,以提供安全、有效、方便的驾驶环境。车载自组织网络已经成为当今的一种新兴技术。在车载自组织网络中,车辆之间不仅能够相互通信,而且车辆还能直接与路边基础设施通信,应用领域包括安全驾驶、智能传输以及信息服务和娱乐等方面。

车载自组织网络是以数据为中心的网络,数据的传输和节点之间的通信是车载自组织网络的基本功能。由于车辆的高速运动、动态的网络拓扑结构以及车辆节点之间的间歇连通特性,如何以较低的网络开销在车辆节点之间高效的进行数据消息的路由传输成为研究的挑战。针对这一问题,很多研究提出了相应的解决方案<sup>[1-3]</sup>,这些解决方案大多数采取根据各路段的历史传输延迟预测当前传输延迟,而后把数据消息沿着传输延迟最小的路段传输给目的地的方法。比如,VADD<sup>[1]</sup>利用对车辆移动的预测和预载入的历史交通流量状态,车辆节点就能找到适合转发数据包的下一条路段,从而降低延时和提高协议性能。事实上,由于道路的车流量变化迅速,利用历史延迟预测路段的当前传输延迟并不准确。此外,泛洪机制和机会性传输<sup>[4]</sup>是解决移动物体间数据通信的两种可行方法,然而泛洪机制通常会大量产生网络传输开销,而机会性路由的数据传输延迟会很长,所以这两种方法都不是解决移动车辆之间数据传输的有效方法。

为了有效地进行移动车辆间的数据传输,可以在路边放置大量的基础设施节点 RSU(deploying roadside unit),通过 RSU 辅助完成车辆间的通信。相对于无基础设施支持的移动车辆通信方式,上述方法容易实现且能获得较高的数据传输性能。然而此方法存在以下缺陷:(1) RSU 的传输范围有限,很难适应快速变化的网络拓扑结构;(2) 数据传输的性能受 RSU 影响巨大,当 RSU 节点数目较多时,数据传输的性能较好。相反,若 RSU 节点数量有限,则协议性能较差;(3) 兴建 RSU 需要额外开销;(4) 城市的某些区域可能没有 RSU 且固定基础设施节点在灾害(洪水、断电、飓风)发生时容易失效。比如,2013 年四川暴雨导致 7 个城市的输电线路和大量城市基础设施严重受损,此时基于基础设施的网络全面瘫痪<sup>[5]</sup>。

为此,本文提出基于停车骨干网络(又称停车覆盖网)的数据传输策略(parking backbone based data delivery,简称 PBBD),不需要安装任何基础设施节点,而是把地面的停放车辆组成一个虚拟的停车覆盖网,并通过覆盖网络实现城市范围内车辆间的有效数据传输。由于城市区域内停放车辆数目众多,分布广泛,且平均停放时间较长<sup>[6]</sup>,一旦把这些停放车辆组织成稳定的覆盖网络,该网络就能高效地实现数据消息的存储、处理和转发。本文的基本思想包括两部分:对于每一条道路,首先把路边和非路边的停放车辆组成一个尽可能长的停车簇,再把这些停车簇组织成一个城市停车骨干网。其次,设计基于停车骨干网络的全新数据传输算法实现车辆间的有效数据传输。调查和仿真模拟验证,相对于现有的几种数据传输算法,本文的策略能够以较低的传输延迟和传输开销达到较高的数据传输成功率。

本文第 1 节介绍相关工作。第 2 节描述假设和停车覆盖网的网络结构。第 3 节介绍停车覆盖网络的设计思路。第 4 节介绍如何基于所建立的停车覆盖网实现高效数据传输算法的设计。最后基于调查和仿真模拟验证所提的协议和算法。

## 1 相关工作

近年来,VANETs 的数据传输和路由策略得到了广泛研究。如文献[7]的 RBVT 协议中,源节点在发送数据消息前先在网络中广播一个路由请求消息 RR(routing request message),用来建立一条到达目的节点的传输路径,

目的节点收到 RR 消息后发送包含传输路径的回复消息给源节点.由于只有当传输路径可用时才进行数据消息的传输, RBVT 的数据传输率通常较低.针对车载自组织网络的特性和城市交通状况, Skordylis 等人提出了 D-greedy<sup>[8]</sup>路由算法.该算法根据消息的生存时间和携带该消息的车辆与路边设施节点 RSU 的距离决定是转发消息还是让车辆携带该数据消息继续行驶.

目前,大量研究者提出基于固定基础设施实现车辆之间的数据传输.文献[9]令源车辆把数据消息先传给附近的 RSU 节点,再利用 RSU 网络转发这些数据消息,最终通过 RSU 节点把消息传递给目的车辆.然而兴建 RSU 存在额外的开销,并且该方法中消息的传输延迟主要取决于车辆在行驶过程中遇到公共 RSU 节点的频率. RSU 节点布置得越稀疏,该方法的性能就越差.此外,很少有研究提及基于车载网络的覆盖网络结构. Hsieh 等人<sup>[10]</sup>提出了车载多播覆盖网的思想,其中源车辆和所有目的车辆组成一个以源车辆为根的多播路由树,并通过该路由树实现源和目的节点的数据传输.然而该思想的缺点是,车辆的动态移动性及网络的间歇连通性导致路由树的维护相当困难.

文献[6,11]指出,城市范围内数目众多的停放车辆可以作为有相当大的容量和处理能力的数据中心,对车辆用户和外部用户提供全面的信息收集和数据处理等服务.由于车辆每天的平均停放时间占一天总时间的 95%<sup>[11]</sup>,允许停放的车辆彼此通信可以显著提高 VANETs 的连通性.

## 2 网络架构

### 2.1 基本假设

(1) 由于车载计算与通信模块为低功耗设备,车辆在停放过程中车辆电瓶的电量足够为这些设备供电,所以假设车辆在停放过程中仍具有计算和通信能力.

(2) 假设每个车辆都配备有 GPS 和电子地图,且这些设备在车辆停放时也可以使用. 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.电子地图则提供了城市各街道道路拓扑图,这样的地图目前已经非常普遍.

(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上,如提供免费停车位等.文献[12]表明,商家愿意提供各种服务来激励停放车辆的车主共享他们停放车辆的资源.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.

(4) 假设车辆节点的缓冲区极大,能够存储大量数据.

### 2.2 网络基本架构

基于真实的城市停车调查统计报告,路边停车、外部停车和内部停车分别占总停放车辆的 69.2%,27.1%和 3.7%<sup>[13]</sup>.其中,27.1%的外部停车属于非路边停车,车辆节点与道路有一定的距离.如果这一距离小于车辆无线通信距离而且无障碍物阻隔,停放车辆仍可以与道路上的行驶车辆通信.因此本文主要关注于路边停车和非路边停车,我们的目标是建立一个网络拓扑结构高度动态变化的车载自组织网络上的停车骨干网络,并基于此虚拟覆盖网络实现车辆的数据路由传输.由于城市范围的停放车辆数量庞大,停车时间较长且分布广泛,它们能够替代固定基础设施 RSU 节点进行通信,为车载自组织网络提供各种服务.本文的 3 层网络结构如图 1 所示,自底向上为物理层、逻辑层和应用层.

**物理层:**物理层为城市范围内所有车辆构成的车载自组织网络.其中,车辆之间通过车载无线通信装置实现彼此通信.

**逻辑层:**逻辑层是由大量路边和非路边停放车辆组织的停车覆盖网络.这些广泛分布的静态停放车辆既能作为数据存储单元又能作为数据传输单元,与移动车辆进行通信.虚拟覆盖网络包含若干中继单元(relay units)和虚拟链路(virtual links),中继单元为停车簇,虚拟链路为移动车辆的存储转发(carry-and-forward).该虚拟骨干网提供基于 VANETs 的车辆路由传输服务.

**应用层:**应用层主要是基于虚拟停车覆盖网络为车辆用户提供安全舒适的信息收集、数据处理、信息发布、

车辆追踪等各种车载服务,满足车辆用户的各种应用需求。

由于应用层的各种服务均是基于停车覆盖网络进行的,因此如何建立和维护停车覆盖网络是本文要解决的关键问题之一.下面我们将提出相应的解决方法,即停车骨干(parking backbone)网络。

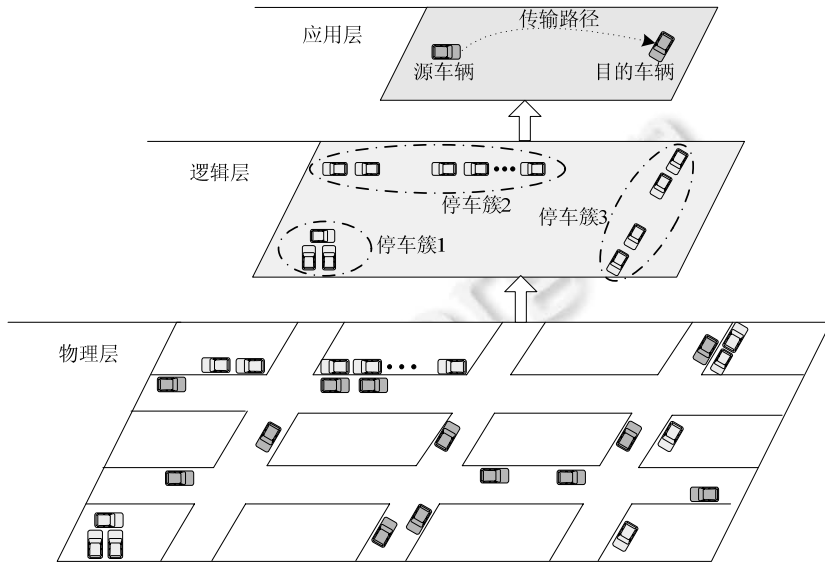


Fig.1 Layered network architecture

图1 分层网络架构

### 3 停车骨干网络的设计

停车骨干网络的设计主要包括 3 部分:停车簇的管理、骨干网的构建和骨干网络的连通性分析.本节将逐一加以介绍。

#### 3.1 停车簇管理

通常城市道路的两边设有大量的非路边停车场,且路边也有大量停车位.从而带来了大量的停放车辆.我们把同一条道路路边和非路边的停放车辆组织成一个尽可能长的停车簇.这是可行的,因为对于路边停车,一个停车位的宽度通常为 5m,而车辆的通信范围为 250m 左右,由于停车位的平均占用率很高<sup>[4]</sup>,所以对于一辆路边停放车辆,在它的通信范围内找到一辆邻居路边停放车辆的概率非常大.尽管极特殊情况下有些停放车辆与其他停放车辆相距较远不能实现相互通信,但是道路上的移动车辆可以作为它们之间通信辅助的中间节点.此外,对于城市中非路边停车场内的停放车辆,它们与最近道路的距离通常不会超过 250m,所以大部分非路边停放车辆可以与簇中其他停放车辆建立连接。

一个典型的停车簇如图 2 所示,其中,  $H1$  和  $H2$  为该簇的两个簇头(cluster head),  $M1 \sim M10$  为成员节点.停车簇的建立过程如下:首先,位于道路最尽头的两个路边节点被选举为簇头,这样,进入或离开该道路的移动车辆必会遇到其中的一个簇头.簇头负责整个簇内的网络管理,处理节点加入和离开等事件.簇头确定后,各簇成员周期性地报告自己的位置、ID 号和剩余存储空间到两个簇头,由簇头维护整个簇,并进行簇内资源的管理和数据的转发.考虑到簇头随时都有可能离开停车簇,我们规定两个备用簇头节点,如图中  $QH1$  和  $QH2$  所示.备用簇头为同一停车簇中紧邻簇头的停放车辆,备用簇头始终保持簇头收集信息的复本.当簇头要离开停车簇时(汽车引擎发动),会触发新簇头的选举以及旧簇头把收集的簇信息转发给新簇头.可见,备用簇头增强了整个停车簇的鲁棒性。

簇内信息的传输按以下方式进行:对于与簇头相互连通的成员节点,在确定簇头后,簇成员首次报告自己的

信息给簇头时采取广播方式进行.在进行信息广播时,令这些广播信息每经过一跳就记录所经过该跳节点的 ID 号.对于不能与簇头直接通信的成员节点,簇头在接收它们的广播消息时,对源节点相同的广播消息,接收最先到达的  $n$  个该广播消息的复本,并把该  $n$  个复本的传输路径按照这些复本到达簇头的先后顺序标记为最佳路径,次佳路径,...,第  $n$  佳路径.簇头在收到  $n$  个广播消息复本后沿最佳路径回复一个带有该  $n$  条路径信息的 ACK 消息给这个成员节点.上述过程如图 3 所示,图中节点  $i$  为簇成员节点, $H1$  为簇头节点,路径  $(i,j,k,H1)$  为  $i$  到簇头的最佳路径.

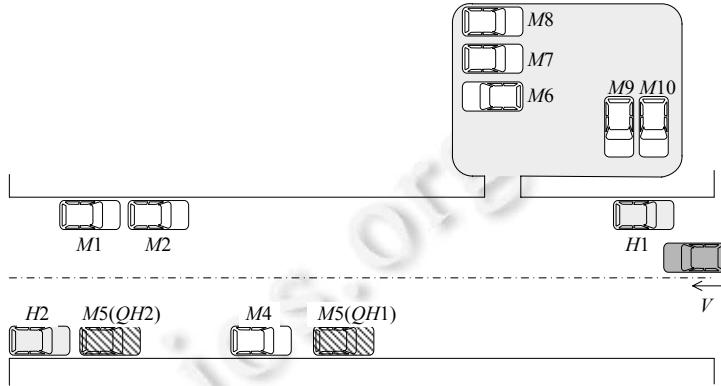


Fig.2 A typical road cluster

图 2 停车簇

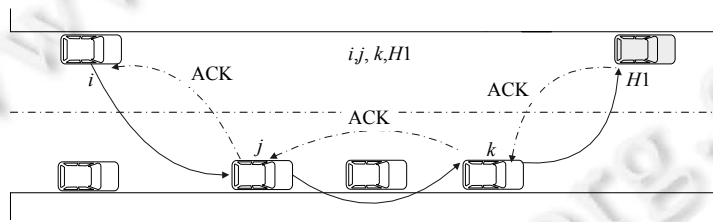


Fig.3 Data transmission in a cluster

图 3 簇内传输

为了减小簇内数据传输的开销,以后成员节点周期性地报告信息给簇头以及簇头向成员节点发送消息首先选择最佳路径进行,最佳路径若不存在(最佳路径上的停放车辆开走),则选择次佳路径传输消息.只有当  $n$  条路径均不存在时,该成员节点才发起新一轮广播过程,寻找新的传输路径.此外,对于极个别不能与其他簇内成员连通的孤立簇成员节点,数据传输需要移动车辆辅助.这些节点在与簇头进行消息通信时,会选择移动方向朝向数据传输方向的车辆作为下一跳传输节点,由该车辆通过存储转发方式把数据传输给目的点.若簇头隔一段时间收不到某个成员节点的报告消息,则认为该成员已经驶出簇并删除相应成员的路径信息.具体路径数目  $n$  的取值与网络的规模和簇的稳定程度有关.当网络规模较小或簇结构越稳定时, $n$  应取小一些.相反,当网络规模较大且簇较不稳定时(进出停车簇的车辆频繁), $n$  应取大一些.此外,由于广播消息很小,在停车簇内广播成员的信息并不会带来很大的网络开销.实验结果表明,当簇的大小为 200 时,所有车辆广播一次的消息大小将近 1KB.

### 3.2 骨干网的构建

为了实现数据消息的传输,首先要建立一个车载自组织网络上的虚拟停车骨干网.本文的停车骨干网是建立在停车簇基础上的,具体构建步骤如下:

1. 首先,每个停车簇发起一个邻居发现过程.例如,停车簇  $J$  的簇头节点把一个带有簇头地理位置和该簇

ID号信息的 *Nei.REQ* 消息广播给簇外 2,3 跳内的其他停车簇(即把生存时间 TTL 设定为 2 或 3)。另一个停车簇(如停车簇 *J*)收到此 *Nei.REQ* 消息后,把停车簇 *J* 设为自己的邻居簇。如果两个邻居簇之间能够直接连通,则上述邻居发现过程可以直接完成;若两个簇之间不能连通,就需要通过移动车辆协助完成消息的广播。经过一段时间的邻居发现,每个停车簇都知道自己周围一定范围内的邻居停车簇分布情况。另外可能会存在没有任何邻居簇的孤立停车簇,其主要原因是,某些停车簇可能位于相对较远的城市区域,该区域附近没有其他停放车辆;另外一个原因可能是城市的某些主要干道不允许路边停车。如果某一停车簇被这些主要干道包围,就可能造成该停车簇相距其他停车簇的距离较远,那么上述邻居发现过程就很可能发现不到其他停车簇节点。

2. 为了把所有停车簇(孤立停车簇除外)组织成停车骨干网络,我们让每个停车簇与它所有的邻居停车簇建立虚拟连接。通过此过程,停车覆盖网络形成了一个连通图  $G(V;E)$ ,其中, $V$  作为成员节点是停车簇的集合, $E$  作为边节点是相邻停车簇的虚拟路径集合(每条路径可能包含多个路段或不包含任何路段。组织成的停车骨干网络结构如图 4 所示。
3. 假设骨干网络中的每个成员均了解所有其他成员的存在信息和地理位置。这可以通过一个简单的机制来实现,例如,各成员簇节点周期性地将自身掌握的停车簇信息(编号和位置)以 Hello 消息的方式广播到邻居停车簇,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[15]中提出的链路更新机制)。此过程一直进行,直到每个成员节点掌握的其他成员信息不再更新为止。由于簇的位置固定不变且停车簇在全天的利用率都很高,每个停车簇周围有哪些停车簇基本上是固定不变的,也就是说,覆盖网络结构很稳定。完成上述成员信息更新后,在某个成员停车簇为空(停放的车辆全部开走)或空停车簇中驶入车辆的情况下,会再以刚才所述的 Hello 消息形式通知它的邻居停车簇,邻居停车簇再以上述类似链路更新形式更新其他成员停车簇掌握的成员信息。

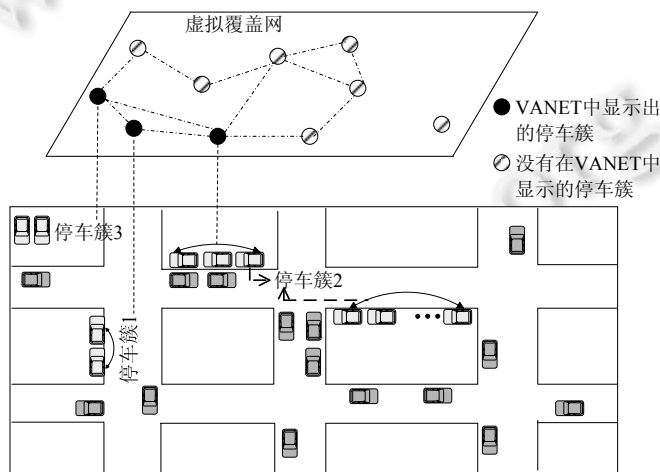


Fig.4 Virtual overlay network

图 4 虚拟覆盖网络

文献[14]对路边停车的调查显示,路边停车位一天的平均利用率达到了 93%。文献[16]对西安市的停车状况进行了调查统计,结果显示,西安市路边停车位一天的平均利用率高达 70%,路边车辆的平均停放时间为 57 分钟。报告<sup>[17]</sup>提供了 2013 年武汉市停车调查情况,调查结果表明,路边和非路边停车位利用率非常高,相对于地下停车,车主更愿意把车辆停放于地上。这些调查结果均表明了停车覆盖网络的稳定性。

此外,文献[18]提供了加拿大蒙特利尔市(市中心)面积为 5 500km<sup>2</sup> 区域的停车状况统计,表明一天内广泛的停放车辆资源。通过该统计数据还可以得出该市路边停放车辆的密度为 7.58m/每停放车辆。文献[19,20]分别提供了新加坡 2013 年路边停放车辆总量统计和道路建设情况统计,据此推断,新加坡地上停放车辆的平均密度为

52.63m 道路长度/每停放车辆. 另有报告<sup>[16]</sup>显示,西安市建成区地面停放车辆密度为 29.164m<sup>2</sup>/每停放车辆,具体见表 1.如此高的停放车辆密度表明,移动车辆在整个运动过程中遇到停放车辆的概率很大,且遇到停放车辆的数量会很多.基于这些事实,我们认为停车骨干网络辅助移动车辆进行数据传输是一个可行方案.该覆盖网络有如下优点:

(1) 停车覆盖网络能够在底层车载自组织网络拓扑结构不断变化的情况下保持一个相对稳定的网络拓扑结构.

(2) 作为覆盖网的成员节点,我们可以像类似因特网的静态 IP 地址一样给每个停车簇指定一个静态网络地址,在此基础上设计类似于因特网的链路状态路由协议完成数据的高效路由.

(3) 消息捆绑,即发往同一目的地的数据消息可以在停车簇内捆绑成一个消息,以便降低消息处理的开销和网络带宽消耗.

Table 1 On-Street parking in three cities

表 1 3 个城市的路边停车状况

Area	Total parking space	Total road length (m) or total area (m <sup>2</sup> )	Density
蒙特利尔市	4 399	26 660 m	7.58 m/veh
新加坡	16 900	9 045 000 m	52.63 m/veh
西安市	17 350	505×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	29 164 m <sup>2</sup> /veh

### 3.3 覆盖网络的连通性分析

我们采用渗透理论来分析停车骨干网的连通性.作为传统理论模型,渗透理论<sup>[21]</sup>曾被用来分析很多临界现象,首先,如图 5 所示,假设整个城市区域被划分成大小相同的格子区域,每一格子代表一个社区(block),相邻两个格子的边代表一个路段.根据 squarebond 渗透模型,我们把图中每一路段定义为一个 bond,规定当路段被一系列连通车辆覆盖时,bond 为开放(open)状态,否则该 bond 为关闭(close)状态.此外,设概率  $p$  为路段被车辆连通的概率.

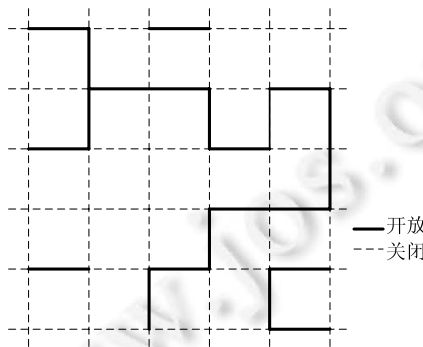


Fig.5 Bond percolation theory in square area

图 5 平方区域的 bond 渗透理论

渗透理论证明 bond 的连通性与  $p$  密切相关,若  $p \geq 0.5$ ,则网络的连通性强;若  $p < 0.5$ ,则网络的连通性很差.当  $p$  值从小于 0.5 逐渐接近 0.5 时,网络的连通性发生极大的变化<sup>[22]</sup>.为了分析网络的连通性,首先假设路段上只存在停放车辆.文献[23]证明移动车辆经过停车场遇到停放车辆的数目服从参数为  $\lambda_1$  的泊松分布.因此,移动车辆遇到停放车辆的时间间隔服从参数为  $\lambda_1$  的指数分布.我们假设车辆进入停车场的速度为  $v$ ,令  $\mu = \lambda_1 v$ ,则停放车辆之间的间距  $d$  服从参数为  $\mu$  的指数分布,该分布的概率密度函数为

$$f(d, \mu) = \begin{cases} \mu e^{-\mu d}, & d \geq 0 \\ 0, & d < 0 \end{cases} \quad (1)$$

假设车辆的通信半径为  $R$ ,因此,车辆可以通信的概率为

$$p(d < R) = \int_0^R f(d, \mu) dd = \int_0^R \mu dd = 1 - e^{-\mu R} \tag{2}$$

设道路总长度为  $l$ ,每个通信单元的车辆密度为  $\rho$ ,此时  $bond$  为 open 的概率  $p$  为

$$p = \prod_{k=1}^m p(d < R) = (1 - e^{-\rho R})^m \tag{3}$$

其中,  $m = \left\lceil \frac{l}{R} \right\rceil$ . 根据渗透理论,当且仅当

$$p = (1 - e^{-\rho R})^m \geq 0.5 \tag{4}$$

时,网络呈强连通状态.根据公式(4)可知,网络呈现强连通的密度  $\rho$  需满足:

$$\rho \geq \frac{-\ln(1 - \sqrt[1/2]{1/2})}{R} \tag{5}$$

图 6 描述了当通信半径  $R=250\text{m}$  时,网络连通性与通信单元密度的关系.如图所示,当车辆密度增加时,网络连通性同时也在增强;当道路长度增加时,网络达到强连通状态所需要的车辆密度同时要增加.例如,对于道路长度  $l=5R=1250\text{m}$ ,当通信单元密度  $\rho=10$  车辆/每千米时,网络的连通性为 65.2%;当  $\rho=14$  车辆/每千米时,网络连通性增加到 85.8%;当道路长度  $l=3R$  时,网络达到强连通,通信单元车辆密度为 7 车辆/每千米;当道路长度  $l=5R$  时,网络达到强连通,通信单元车辆密度为 9 车辆/每千米.

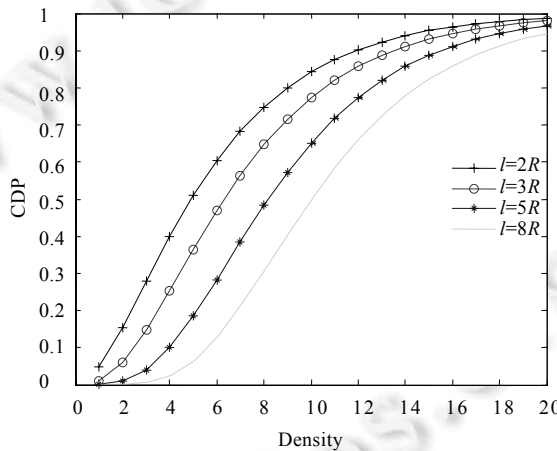


Fig.6 Connectivity probability of road

图 6 道路连通概率

若停放车辆的密度不满足公式(5),则需要移动的车辆辅助才能实现停车簇的连通性.假设到达停车簇的移动车辆数服从参数为  $\lambda_2$  的泊松分布,则停车簇内的移动车辆数目  $N$  为

$$N = \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \frac{1}{v} i e^{-\lambda_2 t} \frac{(\lambda_2 t)^i}{i} dt = \frac{l}{v} \lambda_2 \tag{6}$$

根据公式(6)可以得出移动车辆密度  $\rho_m$  为  $N/l$ ,设停放车辆密度为  $\rho_s$ ,则  $\rho_s = \mu$ ,根据公式(5),网络呈强连通性必须满足:

$$\rho_s + \rho_m = \mu + \frac{N}{l} = \rho \geq \frac{-\ln(1 - \sqrt[1/2]{1/2})}{R} \tag{7}$$

由公式(7)得到:

$$\lambda_2 \geq \left( \frac{-\ln(1 - \sqrt[1/2]{1/2})}{R} - \mu \right) v \tag{8}$$

即当停车簇内的停放车辆不能连通时,移动车辆的到达率需满足公式(8),网络呈强连通性.



## 4 PBBD 的路由实现

PBBD 的路由设计由移动车辆和停车覆盖网间的数据传输,以及数据在停车覆盖网上的路由两个主要部分组成.下面将分别进行介绍.

### 4.1 PBBD路由的基本思想

PBBD 路由实现具体思想如图 7 所示.假设移动车辆  $S$  想把数据消息  $P$  路由给车辆  $D$ ,则数据传输过程如下:

- (1) 源车辆到停车簇的传输:当源车辆  $S$  产生消息  $P$  后, $S$  首先按照一定的数据传输算法把  $P$  传输给地理位置上距离自己最近的停车簇(设为  $R1$ ).
- (2) 存储: $R1$  收到消息  $P$  后,向簇头发送包含消息  $P$  的 ID、大小和目的地的特殊消息,簇头查看  $D$  是否自己的成员节点,若是,则通过簇内数据传输把  $P$  传送给车辆  $D$ ;否则,由簇头决定消息  $P$  在簇  $R1$  内的存储位置.
- (3) 骨干网络的传输: $R1$  经由停车骨干网络把  $P$  传输给距离目的车辆  $D$  最近的停车簇成员节点(设为  $R2$ ).
- (4) 停车簇到目的车辆的传输: $R2$  最终把数据消息传输给目的车辆  $D$ .

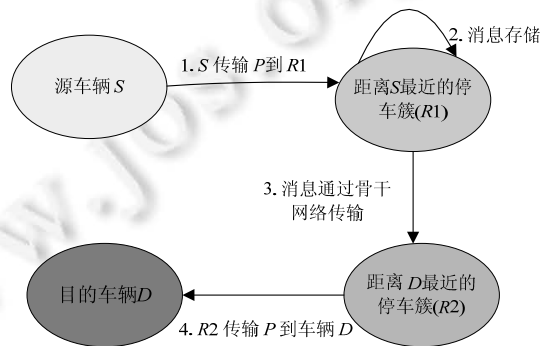


Fig.7 Transmission process of PBBD

图 7 PBBD 的传输过程

由于停车骨干网络中每个成员节点均了解其他成员节点的情况,因此利用停车骨干网把数据传输给距离目的车辆最近的停车簇节点是可行的.另外,停车簇的拓扑结构相对稳定,相对于移动车辆组成的高度动态网络拓扑结构,停车骨干网络结构更易于获取和维护,相对于源和目的车辆之间直接利用移动车辆进行通信,利用停车骨干网络辅助车辆间进行数据传输更加可行.

### 4.2 移动车辆和停车覆盖网络的数据传输

当源车辆有数据要传输时,为了通过停车覆盖网进行数据路由,首先要把数据传输给覆盖网络所有簇节点中距离自己最近的的停车簇节点.如果源车辆当前所行使的街道存在路边停放车辆,也就是说,源车辆正在通过一个停车簇,此时源车辆直接把要传输的数据传递给路边停放车辆即可.相反,如果源车辆当前所行使的道路不存在停车簇,源车辆就需要把数据消息路由到距离自己最近的停车簇.通过配置的电子地图,车辆了解距离自己最近的停车簇的地理位置.在目的位置已知的情况下,若采用传统的扩散协议,如 Epidemic Routing,对无线信道和节点缓存等网络资源的消耗很大.若采用传统 GPSR 协议,虽然 GPSR 协议在公路环境下性能较高,但应用到城市场景中会无法适应复杂的街道拓扑,所以我们拟对传统的 GPSR 协议进行改进,通过有电子地图协助的改进 GPSR 协议完成源车辆到目的停车簇的数据传递.在图 8 所示的城市环境中,在直路模式实行贪婪传输,将数据消息发送给下一跳中继车辆.当消息到达路口时,如果按照 GPSR 以距离目的点距离最近为依据选择下一跳车辆,所选的车辆并不一定是最佳的中继车辆.例如在图 8 所示的路口,根据 GPSR 协议应该选择车辆  $A$  作为下一跳车辆,因为  $A$  车辆距离目的地最近.但显然此时选择车辆  $B$  能够更快地把消息传输到目的地.

为此,路口模式:

- (1) 首先查看当前携带消息的车辆是否与消息所需传输方向一致,若是,则让该车辆携带消息继续前进.
  - (2) 否则,在所有通过路口的车辆中,我们首先查看是否有运动方向与消息需要传输的方向一致的车辆,如果有就选择这样的车辆作为下一跳车辆,因为这样的车辆能够以更快的速度把消息往前传输.
  - (3) 如果路口没有条件(2)的车辆,则选择把消息传输给运动方向与消息所需传输方向相反的车辆.因为此类车辆在运动过程中能够以很高的概率遇到并把消息转发给同一道路上运动方向与消息所需传输方向一致的车辆,令该车辆继续携带消息通过路口向最佳传输方向传输.
  - (4) 如果上述条件均不满足,才按照 GPSR 协议选择下一跳中继车辆.
- 这种改进的 GPSR 协议兼顾了路由的性能和开销,能够较好地适应城市复杂的街道拓扑结构.

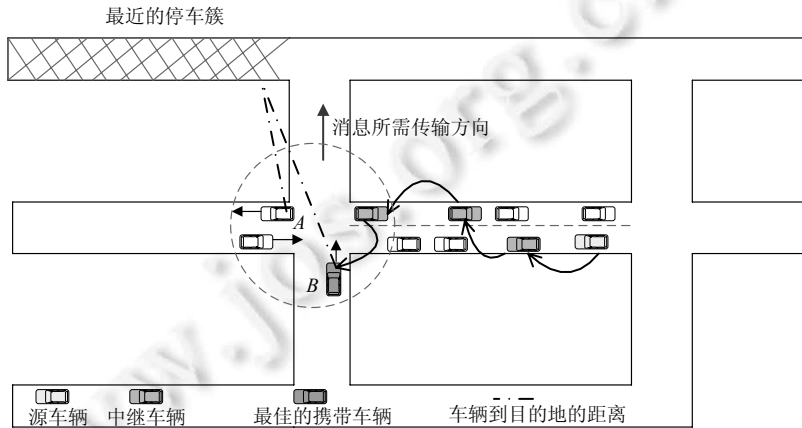


Fig.8 Data delivery from vehicle to its nearest parking cluster  
图 8 车辆到最近停车簇的数据传输

### 4.3 骨干网络上的路由传输

如前所述,整个停车骨干网组织成了一个带权的连通图  $G(V;E)$ ,其中,  $V$  为停车簇的集合,  $E$  为相邻停车簇的路径集合(每条路径可能包含多个路段或不包含任何路段),  $E_{ij}$  的权重  $D_{ij}$  表示相邻节点  $i$  和  $j$  的传输延迟,图 9 显示了该带权连通图的结构.

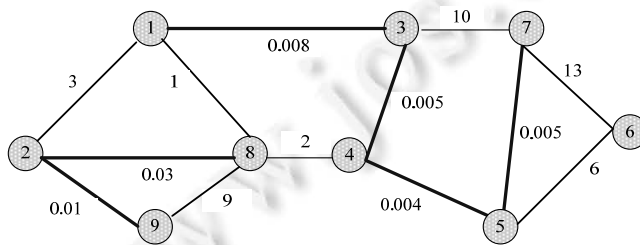


Fig.9 Weighted connected graph  
图 9 带权的连通图

由于停车簇本身就是一条道路,所以数据在骨干网络上的传输分为在停车簇节点上的传输和在路径上的传输两部分.设数据消息在每个簇节点  $i$  上的传输延迟为  $d_i$ ,假设停车簇节点  $i$  要向停车簇  $k$  发送数据,则节点  $i$  到  $k$  的传输延迟表示为

$$T_{ik} = \sum_{i=1}^m d_i + \sum_{(i,j)=1}^n D_{ij} \tag{9}$$

其中,  $m$  和  $n$  分别表示节点  $i$  通过停车骨干网向节点  $k$  发送数据所要经过的节点个数(包括节点  $i$  本身)和路径条数.根据第 3.3 节的连通性分析,当停放车辆的密度满足公式(5)时,停车簇  $i$  内部呈强连通性.此时,  $d_i$  为

$$d_i = \sum_{f=1}^t \frac{P_{size}}{S} \tag{10}$$

其中, $S$ 为网络的吞吐量, $P_{size}$ 为数据消息的大小, $t$ 为消息在停车簇*i*内被传输的跳数.相反地,若停放车辆的密度不满足公式(5),则有:

$$d_i = \sum_{i=1}^t \frac{P_{size}}{S} + \frac{l_i - t \int_0^R x \lambda e^{-\lambda x} dx}{v} \tag{11}$$

其中, $l_i$ 表示停车簇*i*的长度, $v$ 为车辆的行驶速度, $R$ 为车辆的通信范围.当停车簇*i*呈强连通性时, $d_i$ 会很小(数据直接通过无线链路进行传输);当停车簇内部不连通时,由于需要移动车辆进行数据消息的携带,所以  $d_i$  相对较大.我们令

$$D'_{ij} = \begin{cases} D_{ij}, & \mu \geq -\frac{\ln(1-\sqrt[3]{1/2})}{R} \\ D_{ij} + d_i, & \mu < -\frac{\ln(1-\sqrt[3]{1/2})}{R} \end{cases} \tag{12}$$

$\mu$ 为簇*i*内停放车的密度.经过公式(12)的变化,此时,停车簇节点*i*到*k*的传输延迟主要取决于  $\sum_{(i,j)=1}^n D'_{ij}$ . 为此需要

$$\min \left\{ \sum_{(i,j)=1}^n D'_{ij} \right\}.$$

相邻节点*i,j*路径上的传输延迟  $D_{ij}$  按如下方式计算:

(1) 首先停车簇*i* 查看是否在地理位置上与相邻停车簇*j* 直接相连(不需要通过其他道路,能够直接相通).由于车辆的通信范围为 200m~250m 且停车位占用率很高,大多数情况下地理位置直接相连的两停车簇能够通过路边的停放车辆直接完成通信,即使它们之间不能够直接通信,也可以通过道路上的若干移动车辆辅助完成通信,因此与不能直接相连的两停车簇节点相比,直接相连的两相邻停车簇通常  $D_{ij}$  较小.如图 9 中,粗线段的端点为地理位置直接相通的停车簇节点,通常它们之间的传输延迟为

$$D_{ij} = \sum_{i=1}^c \frac{P_{size}}{S} \tag{13}$$

其中, $c$ 为消息从簇*i*到簇*j*的传输跳数.

(2) 若簇*i*和簇*j*地理位置上不直接相连,传输延迟为

$$D_{ij} = \sum_{R_{xy} \in R_{ij}} d_{xy} \tag{14}$$

其中, $d_{xy}$ 为簇*i*和簇*j*之间路段  $R_{xy}$  的传输延迟,该传输延迟为

$$d_{xy} = \frac{l_{xy}}{v_{xy}} - \frac{h \int_0^R x \lambda e^{-\lambda x} dx}{v_{xy}} + \sum_{i=1}^h \frac{P_{size}}{S} \tag{15}$$

其中, $l_{xy}$ 为路段  $R_{xy}$  的长度, $v_{xy}$ 表示路段  $R_{xy}$  上车辆的平均速度, $h$ 表示消息在路段  $R_{xy}$  连通的部分被传递的跳数.令  $\rho_{xy}$ 表示路段  $R_{xy}$  上车辆的密度,设移动车辆驶入  $R_{xy}$  服从参数为  $\lambda$  的泊松分布,我们有:

$$h = \rho_{xy} l_{xy} \int_0^R \lambda e^{-\lambda x} dx \tag{16}$$

将公式(16)带入公式(15)得:

$$d_{xy} = \frac{l_{xy} \left( 1 - \lambda^2 \rho_{xy} l_{xy} \int_0^R e^{-\lambda x} dx \int_0^R x e^{-\lambda x} dx \right)}{v_{xy}} + \sum_{i=1}^{\rho_{xy} l_{xy} \int_0^R \lambda e^{-\lambda x} dx} \frac{P_{size}}{S} \tag{17}$$

根据历史统计结果,参数  $\lambda$  一般在 0.5 左右变动.由于每辆车都具备各条道路不同时间段的交通流量统计数据,可以根据公式(17)计算得到  $d_{xy}$  的值.把公式(17)代入公式(14),得:

$$D_{ij} = \sum_{R_{xy} \in R_{ij}} \left[ \frac{l_{xy} \left( 1 - \lambda^2 \rho_{xy} l_{xy} \int_0^R e^{-\lambda x} dx \int_0^R x e^{-\lambda x} dx \right)}{v_{xy}} + \sum_{i=1}^R \frac{\rho_{xy} l_{xy} \int_0^R \lambda e^{-\lambda x} dx}{S} P_{size} \right] \quad (18)$$

求得  $D_{ij}$  后把  $D_{ij}$  代入公式(12)即求得  $D'_{ij}$  的值.求得  $D'_{ij}$  值之后,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,可以求得源到目的停车簇的最短延迟路径:

$$MSD = \min \left( \sum_{(i,j) \in E} D'_{ij} \right) \quad (19)$$

求解最短延迟路径的算法如算法 1.该算法采用了 Dijkstra 算法的核心思想,可以保证两个停车簇之间的最短路径唯一.各停车簇周期性地根据当前的交通统计数据值来估算到各邻居停车簇的传输延迟,并构建基于传输延迟的最短路径.有了最短路径后,数据在目标区域内的路由沿着最短路径进行.基于最短路径的路由代价较小,可以在较短的时间内将数据发送到目标停车簇.另外,为了确保数据消息成功地到达目标停车簇,可以在消息到达后向源停车簇发送确认消息,如果在规定时间内,源停车簇没有收到目标停车簇的确认消息,会进行消息重发.并且每个数据消息都规定一个在网络上的生存时间 TTL,超过生存时间的消息被丢弃.

#### 算法 1. Generate MSD.

1.  $S = \{s\}; D(s) = 0;$  //设置初始点集和最短距离,  $s$  为源点
2. for (all  $i \in V - s$ ) do
3. {
4.  $D[i] = D_{si};$  //设置  $s$  到节点  $i$  初始的估计距离
5. for ( $i = 0; i < V - 1, i++$ ) do
6.  $D[k] = \min \{D[i]; \text{all } i \in V - S\};$  //选取距离最短的顶点  $k$
7. if  $D[k] = \infty$
8. return  $S;$
9. else
10.  $S = S \cup k;$  //扩充  $k$  到  $S$
11. For (all  $j \in V - S$ ) do
12. If ( $D[j] > D[k] + D_{sj}$ )
13.  $D[j] = D[k] + D_{sj};$  //调整  $s$  到剩余节点的估计距离
14. }

此外,当与目的车辆最近的停车簇收到源车辆发送的数据消息  $P$  后,首先查看目的车辆  $D$  是否是自己的成员节点,若是则通过簇内消息传输机制把  $P$  传给  $D$ ,否则通过第 4.2 节的数据传输方法把  $P$  传输给目的车辆.另外,数据消息在簇中的存储可以通过簇头进行管理.当有新的数据  $p$  到达簇时,接收  $p$  的簇成员车辆(如车辆  $L$ )向簇头发送包含新消息大小的到达通知消息,簇头接收到该通知消息后检查每个簇成员的存储空间,然后将可提供存储服务的簇成员节点的 ID 和位置返回给车辆  $L$ .

总之, PBBD 始终把数据消息尽量沿着有路边停放车辆的路段传递,在没有停放车辆辅助传输时才把消息传递给移动车辆,由移动车辆沿着延迟尽可能小的道路进行传输.由于城市范围内路边停放车辆具有分布范围广泛、停车位全天的占用率高和平均停车时间较长的特点,相对于现有的数据路由策略不考虑停放车辆,基于路边停放车辆进行数据传输更加可靠,数据传输延迟受交通流量和当前交通状况的影响较小,更能实现稳定高效的数据传输.

## 5 性能模拟

本节我们首先对城市环境的停车情况实际进行调查,然后对 PBBD 进行性能分析.

## 5.1 调查

我们对中国成都的城市区域进行了为期6周的调查,调查区域如图10所示.该区域是大小为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7860m的双行道.该区域总共包含8个非路边停车场.

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.在3类有不同停车限制的街道中,停放车辆的密度有很大的区别.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~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40~80km/h之间.



Fig.10 Road topology used in the simulation

图10 仿真采用的街道拓扑

Table 2 Roadside parking survey result

表2 路边停车调查结果

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

## 5.2 仿真环境

我们用NS-2.33工具实现仿真,同时,为了准确地刻画车辆的移动,我们使用开源软件VanetMobiSim-1.1<sup>[24]</sup>来生成真实的城市车辆移动轨迹.在默认情况下,我们在图8所示的仿真地图上设置车辆的数量为200辆,车辆的传输范围设为250m,且车辆的平均移动速度在40km/小时~80km/小时.底层的MAC协议采用2M的802.11.在仿真中,停放车辆随机分布于路边停车位或者非路边停车场,对于分布在路边停车位的停放车辆,它们严格按照表2中的密度随机分布于各道路.每辆车的平均停放时间约为41.40分钟(标准差为27.17)<sup>[25]</sup>.车辆平均每30s产生一个消息,且每辆车均随机选择一辆车作为消息的目的地.假设停车簇在仿真之前就已建立,并以60s为周期进行维护.其他默认参数设置见表3.

Table 3 Simulation parameters

表3 模拟参数

Parameter	Default value
Size of data message	1KB
Interval of beacon message	1s
Data survival time	20mins
Simulation time	1hour
$n$	3

我们把 PBBD 与 CAN DELIVER<sup>[9]</sup>,RBVT<sup>[7]</sup>协议和 VADD 协议进行了分析对比.为了提高 RBVT 的性能,我们在实验中对 RBVT 协议进行了修改,令中间车辆发现下一跳传输路径损坏时继续携带保持数据 10s.在对 CAN DELIVER 协议进行性能仿真时,我们在仿真区域中设置 4 个平均分布的 RSU 节点,每个 RSU 节点的通信范围为 250m.我们关注如下 3 个性能:(1) 数据平均传输成功率:在规定的模拟时间内被目的车辆成功收到的数据占车辆发送数据的比值的均值.(2) 数据平均传输延迟:目的车辆收到消息所需时间的均值.(3) 车辆传输开销:规定的模拟时间内车辆为了进行数据传输产生的平均通信开销.

### 5.3 默认参数下的结果比较

默认参数下,PBBD,CAN DELIVER,VADD 和 RBVT 的性能对比如图 11 和表 4 所示.

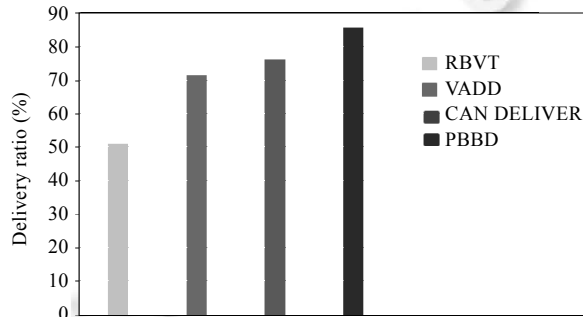


Fig.11 Average delivery ratio under default parameters

图 11 默认参数下的平均传输成功率

Table 4 Simulation results comparison with default parameters

表 4 默认参数下仿真结果的对比

	PBBD	VADD	CAN DELIVER	RBVT
Average delivery ratio (%)	85.7	71.5	76.2	51.1
Average delivery delay (s)	14.6	25.8	21.5	40.5
Network traffic overhead (KB/s)	8.3	19.7	15.4	11.2

可以看出,PBBD 的平均传输成功率比其他 3 个协议要高,传输延迟和传输开销比其他 3 个协议要小.这主要因为 PBBD 依靠稳定且广泛分布的地上停放车辆进行数据的传输和存储,稳定且广泛分布的地上停放车辆可以使数据消息以较快的速度和较高的概率被传输给目的车辆.虽然极少的路段不允许路边停车,数据消息仍会通过移动车辆,选择沿着延迟最小的路段传输,因此仍然能够保证消息传输的效率,此外,消息传输的确认机制也保证了数据消息传输的可靠性.由于 CAN DELIVER 协议配置的 RSU 数量有限(4 个),车辆与距离最近的 RSU 通信花费的时间较长,致使车辆和 RSU 通信的概率不高,车辆携带的消息在传输给 RSU 之前可能已经过期或被丢弃,所以 CAN DELIVER 协议的平均传输成功率低于 PBBD,平均传输延迟较大.RBVT 的平均传输成功率最低,平均传输延迟最大,因为只有当路径连通时 RBVT 才进行数据的传输.对于 VADD,其主要依靠历史数据选择数据递交路径,并依靠移动节点进行数据维持和数据传输,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,因此数据传输代价和传输延迟均较大.此外,由于依靠历史记录选择路径并不准确,且在个别路段可能存在携带数据的车辆在其通信范围内没有邻居节点,数据被携带的时间较长导致数据消息过期,因此数据递交成功率低于 PBBD.

### 5.4 车辆数量对性能的影响

本组实验主要研究车辆数量对协议性能的影响.我们把移动车辆节点的总数从 50 增加到 300,各种算法的性能变化如图 12(a)~图 12(c)所示.

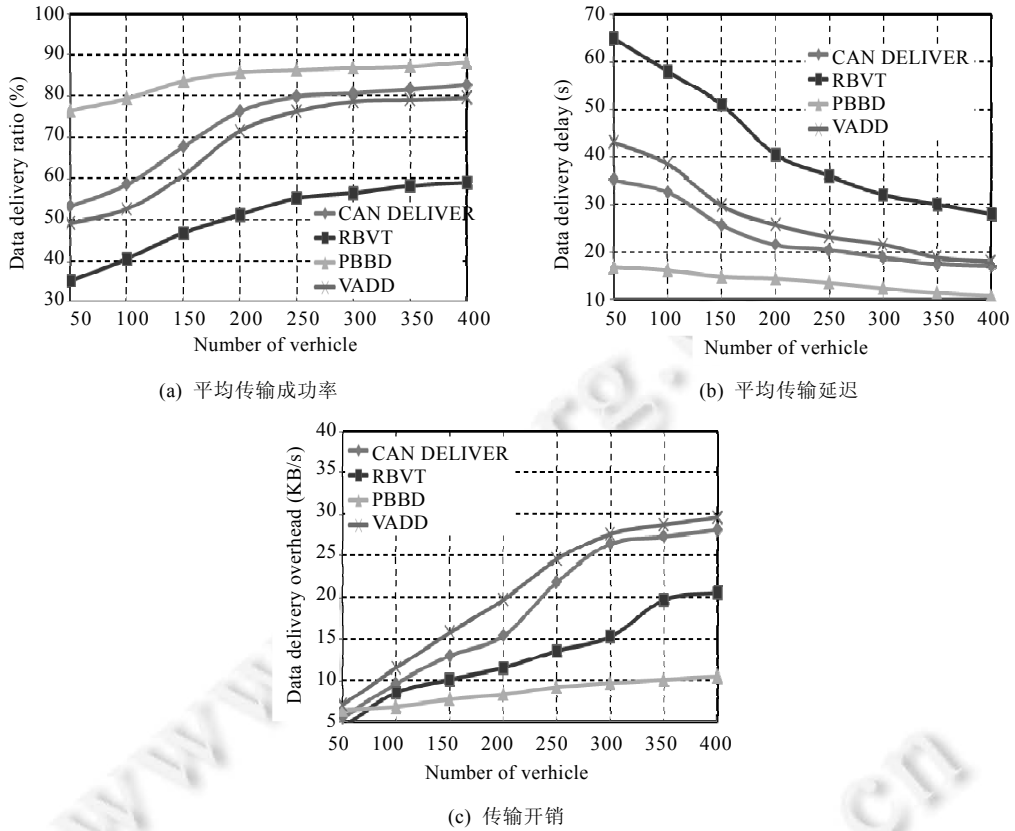


Fig.12 Impact of vehicle number

图12 车辆数量的影响

图 12(a)显示,随着车辆密度的增大,4 种算法的传输成功率均提高,尤其是 CAN DELIVER,VADD 和 RBVT 协议.这是因为车辆的增多可以在一定程度上增大网络的连通性.并且随着车辆数量的增多,网络连通性越来越好且可供选择的下一跳传输车辆的数量增大,此时能够以更大的概率找到最佳的中继车辆,把数据消息传递给目的车辆.从车辆密度变化过程中可以看出,PBBD 的传输成功率略有增长并始终高于其他 3 个协议,尤其是当车辆比较稀疏时,PBBD 仍能保持较高的数据传输成功率.其原因是,PBBD 主要依靠城市范围内广泛且稳定分布的地面停放车辆进行数据消息的传输,这些停放车辆组成了一个具有稳定通信几率的停车覆盖网络.由于较少依靠移动车辆进行路由,所以移动车辆数量的变化对 PBBD 的影响不是特别大.此外,如图 12(b)所示,随着车辆密度的增加,PBBD 的传输延迟变化不大而其他 3 种协议的平均延迟均减小.当车辆数量较多时,CAN DELIVER 协议的平均传输延迟低于 VADD 和 RBVT,显示了利用固定基础设施节点进行消息传输的速度更快.从图 12(c)中还可以看出,车辆数量的增加导致 CAN DELIVER 和 VADD 的车辆传输开销增大,主要是参与扩散消息的车辆数量增多了,消息之间的传递会造成更大的开销.而 PBBD 主要利用停放车辆传输数据,所以车辆传输开销变化不大且具有最合理的网络负载.

5.5 车辆产生消息的速率对性能的影响

本组实验研究车辆产生数据消息的速率对协议性能的影响.当其他参数保持默认值时,数据产生速率从每分钟 1 个包到每分钟 60 个包变化.如图 13 所示.

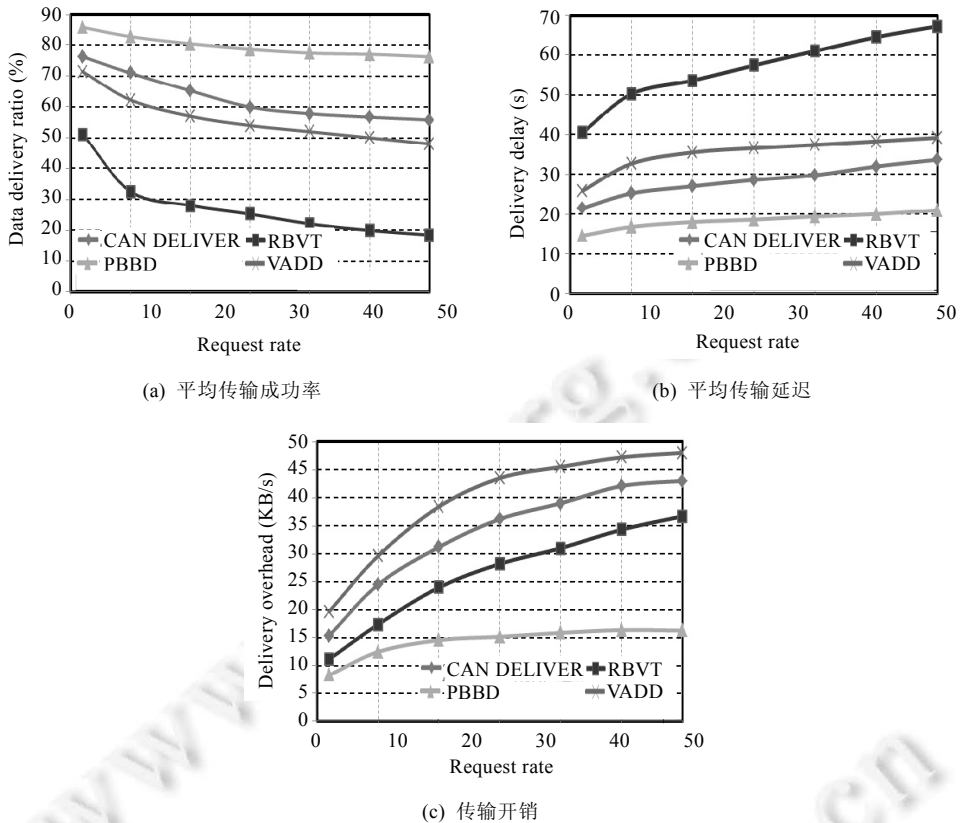


Fig.13 Impact of vehicle' message generation rate

图13 车辆产生消息速率的影响

图 13(a)显示车辆产生消息的速率变化时,PBBD 协议的数据传输成功率始终高于其他 3 个协议.随着产生消息速率的增大,PBBD 协议的传输成功率稍有下降,而其他 3 个协议的平均传输成功率下降趋势大于 PBBD.其原因是,对于 CAN DELIVER,VADD 和 RBVT 协议,网络中产生的消息增多,数据移交占用的带宽增大,同时加大了无线传输冲突的可能性,导致数据传输率降低.此外,由于 RBVT 只沿着特定的路径发送,当单位时间产生的消息增多时,路径不可用会导致丢弃的消息增多,所以成功率下降最快.而 PBBD 在进行消息传输时尽量选择停放车辆,由于尽量将数据维持在静止的停放车辆节点并只把消息发送给邻近的停车簇节点,从而降低了无线传输的冲突.图 13(b)显示随着车辆产生消息的速率增大,4 种协议的延迟均有所增大,由于主要利用地上分布广泛的停放车辆传输数据,PBBD 的延迟增长较慢且低于其他 3 个协议.此外,如图 13(c)所示,随着消息产生率的增加,VADD 的传输开销增长最大,因为需要频繁地进行数据移交.由于 CAN DELIVER 限制了消息传输的范围,传输开销的增长比 VADD 稍慢.

### 5.6 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协议性能的影响,数据包越大,消耗的网络带宽相应地越多.图 14(a)~图 14(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,PBBD,VADD, CAN DELIVER 和 RBVT 随数据包大小变化均相对稳定,且 PBBD 明显优于其他 3 种协议.原因是它们对带宽资源的要求相对较小且都有各自的数据扩散控制策略,因而受数据包大小变化的影响也很小.图 14(c)是网络传输代价与数据包大小的关系,显示随着数据包的增大,由于传输的数据量相对增大,4 种协议的网络传输代价稍有上升.



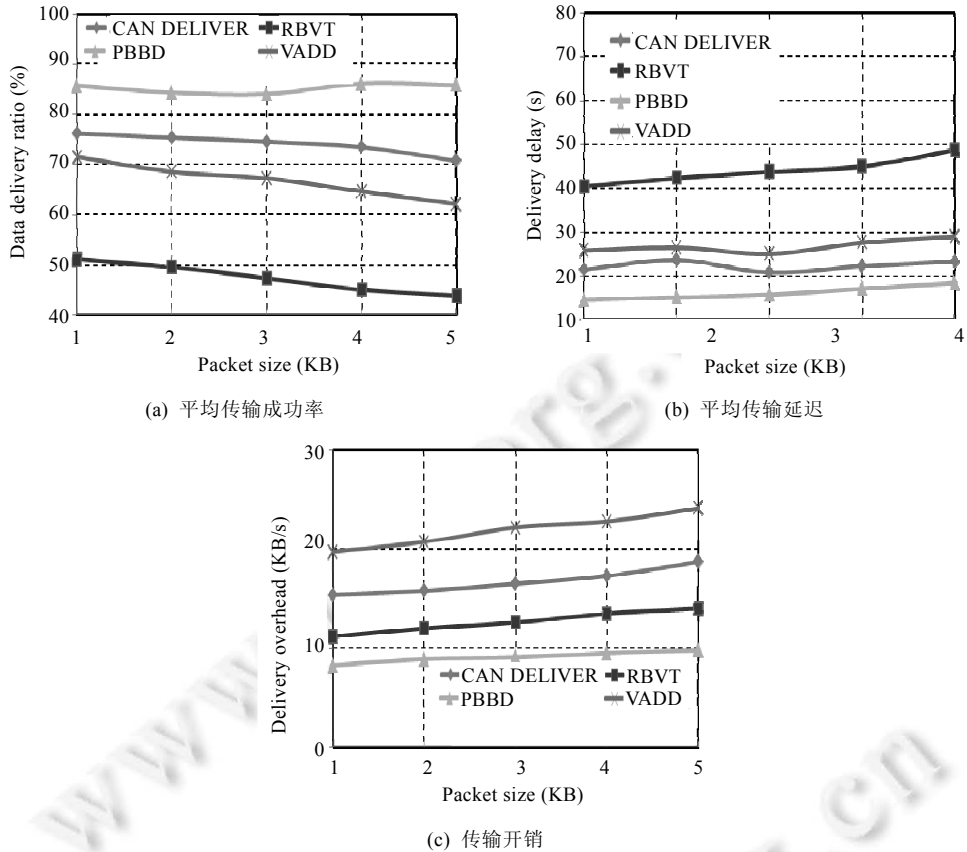


Fig.14 Impact of packet size  
图14 数据包大小的影响

5.7 配置RSU的数量对性能的影响

固定基础设置节点 RSU 的数量决定 CAN DELIVER 的性能.所以本实验中,我们把固定基础设置节点的总数量分别设置为 1,4,10 和 20 个,并测试不同 RSU 节点数目对 CAN DELIVER 协议的影响,实验结果如图 15 所示. PBBD 协议的性能高于 RSU 配置 4 个时 CAN DELIVER 协议的性能,却低于 RSU 节点 10 个和 20 个时 CAN DELIVER 的性能.这是合理的,因为对于基于 RSU 的车载路由协议 CAN DELIVER,仿真区域内配置的基础设施节点数量越多,车辆在移动过程中遇到 RSU 节点的概率就越大,也就越容易把数据传输给 RSU 节点.当 RSU 节点数量增大到一定程度时,仿真区域内的所有车辆在移动过程中均能很容易地遇到与之通信的 RSU 节点并通过 RSU 节点之间的交互直接完成数据路由,此时 CAN DELIVER 的数据平均传输成功率将显著增长,数据的传输延迟将显著降低.

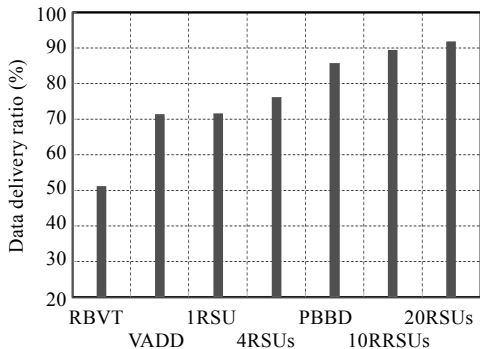


Fig.15 Impact of RSU number  
图 15 RSU 数量的影响

## 6 结论与下一步工作

车载自组织网络是以数据为中心的网络,数据的路由传输是 VANETs 的基本功能.VANETs 具有节点高速移动、拓扑结构高度动态变化等特点,使得如何有效地解决移动车辆间的数据传输问题成为挑战.针对城市范围内天然存在、广泛分布且结构稳定的地面停车场资源,本文提出了停车覆盖网络方案 PBBD,即把一条道路的路边和非路边停放车辆组织成停车簇,再把众多停车簇组成停车骨干网,利用停车骨干网完成源车辆到目标车辆的数据路由.本文通过现实的停车调查和大量的仿真实验对提出的 PBBD 策略进行了验证.仿真结果表明,PBBD 以较小的传输代价和传输延迟实现了较高的数据传输成功率.为了更加准确地分析网络的连通性,下一步将根据实际的停车调查数据进一步完善停放车辆的具体分布.此外,如何实现目的地未知情况下的数据路由,也是下一步我们的研究工作的重点.

### References:

- [1] Zhao J, Cao G. Vadd: Vehicle-Assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2008, 57(3):1910–1922. [doi: 10.1109/TVT.2007.901869]
- [2] Tom HL, Shen XM, Bai F. Integrity-Oriented content transmission in highway vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Infocom*. Turin: IEEE Press, 2013. 2562–2570. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6567063]
- [3] Song C, Liu M, Gong HG, Chen GH, Wang XM. Distributed real-time information based routing protocol in vehicular ad-hoc networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22(3):466–480 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3808.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.003808]
- [4] Wang Y, Wu H. Delay/Fault-Tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): A new paradigm for pervasive information gathering. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,6(8):1021–1034. [doi: 10.1109/TMC.2007.1006]
- [5] Tan XP. Sichuan fight “2013.7.9” storm flood. *Journal of China Flood Control and Drought*, 2013;23(5):1–2.
- [6] Liu NB, Liu M, Lou W, Chen G, Cao J. PVA in VANETs: Stopped cars are not silent. In: *Proc. of the IEEE Infocom*. Shanghai: IEEE Press, 2011. 431–435. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935198]
- [7] Nzouonta J, Rajgure N, Wang G, Borcea C. Vanet routing on city roads using real-time vehicular traffic information. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2009,58(7):3609–3626. [doi: 10.1109/TVT.2009.2014455]
- [8] Skordylis A, Trigoni N. Efficient data propagation in traffic-monitoring vehicular networks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2011,13(3):680–694. [doi: 10.1109/TITS.2011.2159857]
- [9] Mershad K, Artaif H, Gerla M. We can deliver messages to far vehicles. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3):1099–1115. [doi: 10.1109/TITS.2012.2183124]
- [10] Hsieh YL, Wang K. Road layout adaptive overlay multicast for urban vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of IEEE the 73rd on VTC*. Yokohama: IEEE Press, 2011. 1–5. [doi: 10.1109/VETECS.2011.5956505]
- [11] Olariu S, Khalil I, Abuelela M. Taking vanet to the clouds. *Int'l Journal of PCC*, 2011,7(1):7–21.
- [12] Eltoweissy M, Olariu S, Younis M. Towards autonomous vehicular clouds. In: *Proc of the Ad Hoc Nets*. Victoria: ACM Press, 2010. 1–16. [doi: 10.1007/978-3-642-17994-5\_1]
- [13] Schonfelder S, Samaga U. Where do you want to go today—More observations on daily mobility. In: *Proc. of the 3rd Swiss Transport Research Conf*. 2003. 1–11.
- [14] Adiv A, Wang W. On-Street parking meter behavior. *Transportation Quarterly*, 1987,(41):81–307.
- [15] Kurose JF, Ross KW. *Computing Network: A Top-Down Approach Featuring the Internet*. 2nd ed., New York: Pearson Education, 358–369.
- [16] Nie TT, Wang XL, Cai He. Parking behavior survey and analysis of Xi'an. *Architectural Engineering Technology and Design*, 2014, 13:7–11.[doi: 10.3969/j.issn.2095-6630.2014.13.673]
- [17] Cheng B. Research on the solutions to the parking problem in Wuhan. *Building Materials World*, 2011,32(3):135–140. [doi:103963/j.cn.42-1783.TU.2011.03.037]
- [18] Zhu JQ, Liu M, Wen YG, Ma CM, Liu B. Parking backbone: Toward efficient overlay routing in VANETs. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014,2014:1–13.[doi:10.1155/2014/291308]

- [19] <http://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/publications-and-research.html>
- [20] <http://www.onemotoring.com.sg>
- [21] Stauffer D, Aharony A. Introduction to Percolation Theory. 2nd ed., Lewiston: Taylor and Francis, 1991. 1–20.
- [22] Shioda S. Connectivity of vehicular ad hoc networks in downtown scenarios. Ad Hoc Networks, 2012,89:177–192. [doi: 10.1007/978-3-642-29096-1\_13]
- [23] Liu NB, Liu M, Chen GH, Cao JN. The sharing at roadside: Vehicular content distribution using parked vehicles. In: Proc. of the IEEE INFORCOM. Urlando: IEEE Press, 2012. 2641–2645. [doi: 10.1109/INFCOM.2012.6195670]
- [24] Filali F, Bonnet C, Fiore M. Vanetmobisim: Generating realistic mobility patterns for vanets. In: Proc. of the VANET 2006. Los Angeles: ACM Press, 2006. 96–97. [doi: 10.1145/1161064.1161084]
- [25] Albanese B, Matlack G. Utilization of parking lots in Hattiesburg, Mississippi, USA, and impacts on local streams. Environmental Management, 1999,24(2):265–271. [doi: 10.1007/s002679900231]

#### 附中文参考文献:

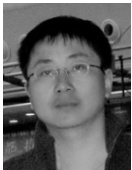
- [3] 宋超,刘明,龚海刚,陈贵海,王晓敏.基于分布式实时信息的车载网络路由协议.软件学报,2011,22(3):466–480. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3808.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.003808]



朱金奇(1980—),女,天津人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,车载自组织网络.



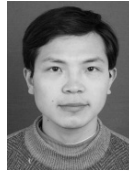
马春梅(1985—),女,博士,CCF 学生会员,主要研究领域为车载自组织网络,移动计算.



刘明(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,车载自组织网络,移动计算.



陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为无线网络,移动计算.



龚海刚(1974—),男,博士,副教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为无线传感器网络,车载自组织网络,移动计算.



刘斌(1986—),男,硕士,主要研究领域为无线网络,人工智能.