

车载自组织网络中基于车辆密度的双簇头路由协议

杨羽琦 章国安 金喜龙

(南通大学电子信息学院 江苏 南通 226019)

摘 要 为了降低城市环境下对转发范围内的单个车辆节点运动的感知敏感度,减少源节点到目的节点的平均跳数和传输时延,提出一种车载自组织网络中基于车辆密度的双簇头路由协议(Dual-Cluster-Head Routing Protocol Based on Vehicle Density,DCHPBD)。该路由协议根据车辆密度设置簇的大小,在同一路段簇内左右车道分别选出一个簇头,根据最大化生存期原则选择用于转发数据分组的主簇头,另外一个作为备选簇头。仿真结果表明,与 CBRP 和 EG-RAODV 协议相比,所提出的协议簇头生存期较长,平均跳数和平均时延较小,通信性能更好。

关键词 路由协议,双簇头,平均时延,平均跳数

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.020

Dual-cluster-head Routing Protocol Based on Vehicle Density in VANETs

YANG Yu-qi ZHANG Guo-an JIN Xi-long

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract In order to reduce the sensitivity of single vehicle node movements in forwarding area of the urban environment and reduce the average number of hops and transmission delay from source node to destination node, a dual-cluster-head routing protocol based on vehicle density in vehicular Ad-hoc networks was proposed. This routing protocol sets the size of cluster according to the vehicle density, one cluster head is respectively selected in the left and right lanes of the same section, the primary cluster head for forwarding data packets is selected according to the maximization life-time, and the other cluster head is used as an alteration. Simulation results show that the proposed protocol has longer lifetime, smaller average number of hop and average delay, and better communication performance compared with CBRP and EG-RAODV.

Keywords Routing protocol, Double cluster head, Average delay, Average number of hops

1 引言

车载自组织网络(Vehicular Ad-Hoc Network, VANET)是一种特殊的基于车辆与车辆(Vehicle-to-Vehicle V2V)、车辆与路边基础设施(Vehicle-to-Roadside, V2R)通信的移动自组织网络(Mobile Ad-Hoc Network, MANET)。道路上的车辆通过配备的无线通信设备与其他车辆或者路边基础设施交换信息,达到通信的目的。车载自组织网络应用广泛,如道路安全应用、查询信息服务、集中控制交通信息系统、车内办公服务等。其中道路安全应用包括电子制动警告、相向车辆警告、车辆稳定性警告、并线警告、交叉路口违规警告等。这些安全应用都基于源车辆将即将到来的交通信息和它所收集的交通警示信息发送给目的车辆,从而使目的车辆司机对接收到的交通信息和可能出现的安全问题作出及时反应。因此, VANET 环境下一个高效稳定的路由协议对于传输即时信息十分重要。

如何寻找和维护从源节点到目的节点的路由以保证数据传输的实时性、完整性和有效性^[1]是 VANET 路由协议研究的重点。基于簇的路由协议降低对单个车辆节点运动感知的要求,是管理和稳定 VANET 拓扑的有效方式。

目前,在 VANET 中已经提出了很多基于簇的算法。文献[2]利用区域块的概念设计了一个高效的紧急消息传播机制。该方法将数据分组转发到特定区域,但是由于城市环境下障碍物较多,该方法难以保证网络拓扑的高可靠性。文献[3]提出了基于目标位置的自适应移动感知聚类算法。该算法通过考虑节点当前位置、目标位置、节点之间的相对速度来选择簇头(Cluster Head, CH)的方法增加了簇头生存期,减少了全局开销,但是该算法不适合簇成员之间存在较大速度差的情况。文献[4]是基于位置和群集提出的一种路由协议。该协议中的源节点直接根据地理位置信息将数据包发送到最佳邻居簇头,由簇头转发分组,但是该协议容易出现路由环路问题。文献[5]提出了一种基于混合骨干的聚类路由算法,具

收稿日期:2017-02-22 返修日期:2017-05-13 本文受国家自然科学基金资助项目(61371113,61401241),南通市科技项目(BK2012024)资助。

杨羽琦(1993—),女,硕士生,主要研究方向为车载自组织网络,E-mail:1725371867@qq.com;章国安(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为认知车联网、无线通信网络理论与技术等,E-mail:gzhang@ntu.edu.cn(通信作者);金喜龙(1992—),男,硕士生,主要研究方向为认知车联网,E-mail:979238584@qq.com。

有相对较高的程度连接性的节点先形成骨干簇头群,利用车辆相对速度的重量函数在骨干簇头群中确定用于转发数据分组的簇头。该方法增加了网络的整体稳定性,但是簇头的寿命有待提高。文献[6]在城市环境下运用高效双簇头路由方案。该方案使用双簇头进行转发,保障了网络服务质量,但是在延迟不理想。文献[7]提出了本地移动性度量函数聚类算法,该算法使用车辆移动性矩阵确定簇头,延长了聚类寿命,但是在该算法下,当两个簇头进入彼此的通信范围时,聚类过程将变得不稳定。

通常情况下,城市环境十字路口多,车辆在车道上分布复杂,往往导致在转发范围内对单个车辆节点的运动感知不敏感,继而增加了在转发范围内找到最优或者次优转发节点的复杂度。为了解决该问题,本文首先将道路按照一定规则分割成若干块,每一个块就是一个分簇;然后在每个簇中选出簇头,并将簇头作为数据转发节点。这就需要明确两个问题:1)如何确定簇的大小;2)如何选择簇头。因为道路上的车辆数目是不断变化的,而车辆数目又与车辆传输范围相联系,所以本文根据车辆节点的密度来确定簇的大小。簇头作为数据转发节点,被保持的时间越久则路由越稳定,本文根据最大化簇生命期的原则选择簇头。根据以上思路,本文提出一种基于车辆密度的双簇头路由协议。

2 路由协议

2.1 路段模型

本文使用的路段模型是城市环境含十字路口的双向双车道模型。假设车辆可以从全球定位系统(Global Positioning System, GPS)接收器^[8]或车载导航系统里的区域数字地图确定其相邻道路十字路口的位置,街道地图被抽象成一个图 $G(V, E)$ ^[9]。图1为包含6个十字路口、3条主路段的双向双车道模型。区域位置服务管理协议(Remote Location Service Management Protocol, RLSMP)^[8]保存并交换附近所有车辆的当前位置信息。此时网关充当位置服务器,具有本地网络拓扑的一个实时视图,须提供源节点将数据分组转发到目的节点的路径。具体来说,每个车辆往前移动距离当前位置一个传输范围时报告其位置信息给网关,网关根据这些位置信息,在源节点和目的节点之间构建包含中间节点和道路十字路口的多条骨干路由。

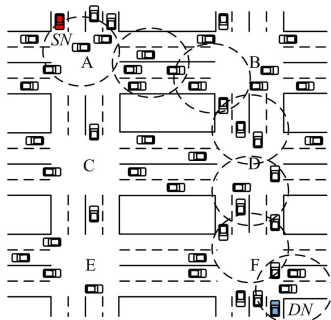


图1 双向双车道模型

Fig. 1 Two-way two-lane model

图1给出了源节点SN到目的节点DN的3条骨干路由: A-B-D-F、A-C-D-F和A-C-E-F。但是,由于这些路由包括动态移动的中间节点,因此这些路由是不稳定的。为了增加

转发路径的稳定性,网关基于构建的骨干路由,将选择有足够车流量来保证网络连通性最佳的路段。如图1所示,网关将选择A-B-D-F这条骨干路由。选定路由将被发送到源节点并存储在数据分组报头,以允许中间节点在十字路口之间转发数据分组。只有当网络中的节点密度显著变化时,才需要重新计算骨干路由和传输半径。

2.2 转发策略

基于车辆密度的双簇头路由协议中,假设每辆车都配备GPS和至少一个无线收发器,并且周期性地向网关发送自己的位置信息和速度信息。当源节点需要转发数据分组时,应使用DCHPBD,其步骤如下:

1) 令源节点为当前节点。

2) 根据网关提供的位置信息,DCHPBD协议建立包含当前节点、中间节点、道路十字路口和目的节点的骨干路由,基于构建的骨干路由,网关将选择有足够车流量来保证网络连通性最佳的路段进行数据转发。

3) 根据网关提供的信息判断目的节点是否在当前节点所在簇内,若在,则直接转发并结束本次通信;若不在,则启动路由请求过程。

4) 转发路段根据当时的车辆密度设置合适的簇。根据当时每个簇内每个车辆的速度和簇头切换预定义方向性阈值点,计算出每个车辆的生存期 T ,每个簇中拥有最大 T 的车辆被选为簇头。当前节点将数据分组发送到本节点所在的簇的簇头,接收到数据分组的簇头将数据分组发送到邻居簇头,同时向当前节点发送包括簇ID、簇头速度和簇头位置的确认信息。若在一定时间内当前节点没有收到确认信息,则认为网络发生冲突或者故障导致传输失败,此时启动路由恢复策略;否则,收到数据分组的邻居簇头也根据该策略转发,直至数据分组转发到目的节点。

2.3 簇的形成

城市道路为双向双车道模型,将城市路段按照车辆传输范围的一半划分集群,即每个车辆基于其位置在每个时间单位属于某个簇,每个簇具有唯一的ID。车辆传输范围随着道路上节点密度的改变而改变。传输半径的计算式为:

$$R = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - P^{\frac{1}{N-1}}) \quad (1)$$

其中, R 是传输范围, λ 是车辆节点密度, N 是路段上的车辆数, P 为路段连通概率。图2给出了不同连通概率下节点密度与传输半径的关系。

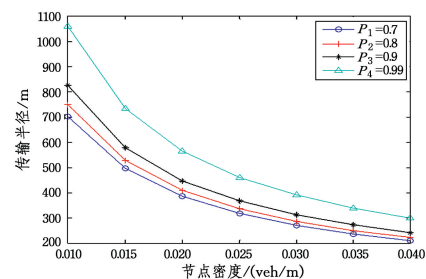


图2 节点密度与传输半径的关系

Fig. 2 Relationships between node density and transmission radius

由图2可知,当连通概率一定时,节点密度越大,传输半径越小;当节点密度较小时,可以适当增加传输半径以保证一

定的网络连通概率。

网关获取到最新的节点密度,根据高连通概率原则计算出最大传输半径 R ,将城市路段以传输范围的一半划分簇。以这样的方法划分簇能够保证相邻的两个簇只要有车辆存在,选出的簇头就能在对方的传输范围内,簇头间可以相互通信。考虑最极限的情况,如图 3 所示。簇 1 内只有车辆 A 可选为簇头,簇 2 内只有车辆 A' 可选为簇头, A 和 A' 之间距离一个传输范围,满足通信要求。注意,当节点密度变化时,理论上传输半径可以设置到很小或者很大,但是综合考虑发射器的功率,传输半径的设置上限和下限。

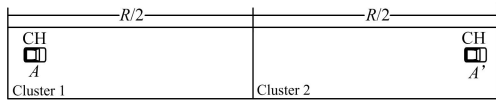


图 3 极限情况

Fig. 3 Extreme situation

2.4 簇头选择

簇头选择示意图如图 4 所示。每个簇中的方向性阈值点 (Threshold point, T_p) 被定义为在车辆前进方向上到簇边缘的距离为 d 的点。距离 d 必须足以使当前 CH 的车辆将 CH 功能切换到另外一辆车辆而不失去通信,即保证每个簇中的车辆可以成功完成 CH 的重新选择和切换。假设 CH 的重新选择和将 CH 信息转发到新的 CH 的切换时间 t 为 0.5 s,城市路段限速为 $v_{\max}$,则 d 的计算式如下:

$$d = v_{\max} * t \quad (2)$$

车辆到 T_p 的距离为 D 。网关周期性地计算每个车辆在各自所在簇的生存期 T 。每个车辆的 T 取决于车辆的当前速度 v 以及 D ,且有 $T = \frac{D}{v}$ 。为了增加 CH 的 T ,具有最大 T 的车辆被选择为 CH,并且保持为 CH 状态直至到达方向性阈值点。当被选为 CH 的车辆到达方向性阈值点时,进行 CH 重选。

为了减小端到端时延,路由协议选择双簇头的方式。在车道 1 上,根据最大 T 原则在簇 1 和簇 1' 中分别选出拥有寿命为 T_1 和 T_1' 的簇头 A 和 B ,取两者中拥有更大的 T 的簇头作为该路段的主簇头,另外一个作为备选簇头。假设簇 1 中 A 当选,则 A 传输数据给簇 2 中的簇头,若此时簇 2 中无车辆可选,则 A 将数据发送到簇 1' 中的备选簇头 B ,由 B 在簇 2' 中选择下一跳簇头。否则,由 A 在簇 2 中选择下一跳簇头。

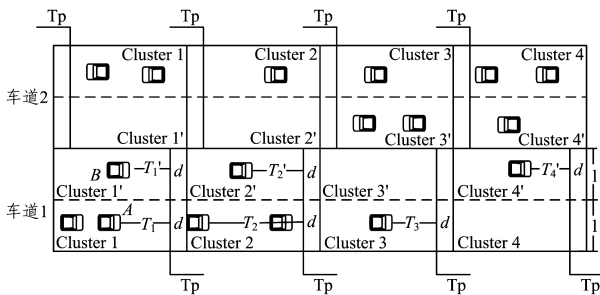


图 4 簇头选择示意图

Fig. 4 Cluster head selection

2.5 路由恢复策略

路由协议是在事先确定好的簇内寻找中继节点,簇范围有限,簇内可供选择为转发数据分组的簇头的转发节点也有

限,有时甚至无法找到转发节点。如果在簇内找不到任何一辆车辆节点,则启动携带转发的路由恢复策略。如图 4 所示, A 将数据包发送给簇 1' 中的备选簇头 B 后,若 B 在簇 2' 中仍无法找到用于转发数据分组的簇头,为避免发生路由环路, B 不会再把数据分组发送给簇 1 中的簇头,而是由 B 携带数据分组前进,直到遇到簇 3' 中可以转发的簇头。

3 路由协议分析

3.1 可行性分析

在 VANET 中,一般情况下,数据分组从源节点转发到目的节点的距离很远,因此在源节点与目的节点之间通常需多跳路由协议。如果一种协议下车辆的转发范围内能够找到至少一辆车或者更多的车作为下一跳的车辆节点,则该路由协议支持多跳路由协议。本文所提出的 DCHPBD 协议也是一种多跳路由协议。其可行性分析如下。

首先, l 表示路段宽度,每个簇内的转发区域面积 S_c 为:

$$S_c = (\frac{R}{2} - d) * l \quad (3)$$

令 X 代表簇内转发区域节点数的随机变量,则转发区域有 n 个节点的概率为:

$$P(X=n) = \frac{(\lambda S_c)^n e^{-\lambda S_c}}{n!} \quad (4)$$

在转发区域至少可以选出 k 个节点的概率为:

$$P(X \geq k) = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda S_c)^i e^{-\lambda S_c}}{i!} \quad (5)$$

图 5 给出了在城市道路上,当车辆密度不同时簇内转发区域至少可以找到 k 个节点的概率。从图 5 可以看出,当节点密度 λ 大于或等于 0.002 时,在转发区域能够找到一辆或者更多的车的概率接近于 1,即此时簇内可以找到一辆车作为转发数据分组的簇头,能够支持多跳路由协议;当节点密度小到一定程度时,如图 5 中当节点密度小于 0.002 时,在转发区域能够找到一辆或者更多的车的概率小于 1,即簇内可能找不到转发数据分组的簇头,因此需要启用路由恢复策略。

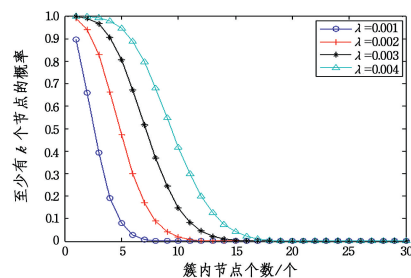


图 5 在转发区域内至少找到 k 个节点的概率

Fig. 5 Probability of finding at least k nodes in forwarding area

3.2 性能参数分析

为了评估提出的 DCHPBD 路由协议的性能,我们分析了 3 个性能参数。

1) 簇头平均生存期 T_{avg} : 簇头平均生存期定义为节点充当簇头 CH 的平均持续时间。该值越高表示该簇越稳定。

$$T_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{cn} \quad (6)$$

其中, T_i 表示第 i 个簇的生存期, cn 表示簇的总个数。

2) 平均端到端时延 D : 平均端到端时延定义为从源节点

发出去的数据分组到达目的节点所需的时间。该值越小说明数据分组转发得越快。为了估计延迟 D , 定义 $\alpha = L / \frac{R}{2}$ 。

如果路段长度 L 小于或等于传输范围的一半 $\frac{R}{2}$, 即该路段在路由协议设置的一个簇内, 则该段的数据分组转发策略为单跳转发, 延迟为 t_p 。为了方便处理, 我们设 t_p 是一个常数。

如果路段长度 L 大于节点转发范围的一半 $\frac{R}{2}$, 即该路段包含了路段上设置的多个簇。设 k_{12} 表示车道 1 双车道簇转发区域 $2S_c$ 内车辆的数目, γ_1 和 γ_2 分别表示两个车道的节点空间密度。因为泊松分布适合描述单位时间或空间内随机事件发生的次数, 车辆进入车道 1 双车道簇转发区域是一个随机事件, 且进入簇转发区域的车辆满足泊松过程的独立增量性说, 则可假设 k_{12} 遵循以下概率密度函数的泊松分布^[10]:

$$f(k_{12}) = \frac{((\gamma_1 + \gamma_2)2S_c)^{k_{12}}}{k_{12}!} e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)2S_c} \quad (7)$$

如果在簇内能够找到转发数据分组的簇头, 即簇头逐跳转发数据分组, 则每一跳的延迟为 t_p 。如果路段上没有任何车辆节点可被选择为簇头, 则数据分组采用路由恢复策略即车辆携带转发, 此时平均时延等于车辆携带数据分组的时间, 可以使用路段上节点的平均速度 S 计算。路段上没有任何车辆节点的概率 β 为:

$$\beta = e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)2S_c} \quad (8)$$

该路段的平均时延为:

$$D = \begin{cases} t_p, & \text{if } L \leq \frac{R}{2} \\ \alpha(1-\beta)t_p + \beta \frac{L'}{S}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

其中, L' 是车辆携带传输的距离。

3) 平均跳数 H : 平均跳数定义为数据分组从源节点转发到目的节点所需的总跳数。数据分组在路段传输所需要的跳数取决于路段长度 L 和节点在该路段的传输半径的一半 $\frac{R}{2}$ 。

如果 L 小于 $\frac{R}{2}$, 表示数据分组是在单簇内进行传输, 一跳就能完成。如果 L 大于 $\frac{R}{2}$, 根据簇内能否找到用于转发数据分组的簇头而决定采用多跳传输还是携带转发。因此, 路段上的平均跳数为:

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } L \leq \frac{R}{2} \\ \alpha(1-\beta) + \beta N, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

4 性能仿真与分析

本文使用 MATLAB 仿真软件对 DCHPBD 的性能指标进行仿真, 并将其与单簇头的 CBRP^[11] 和基于图论的 EG-RAODV^[12] 协议进行比较。仿真参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
路段长度/m	2000
路段宽度/m	2 * 5
节点空间密度/(veh/m ²)	0.01~0.04
车辆平均速度/(km/h)	60
一跳所需要时间/s	0.02

图 6 给出了 DCHPBD 协议和 CBRP 协议的传输半径与簇头生存期的关系曲线。由图 6 可知, DCHPBD 协议和 CBRP 协议的簇头生存期都随着传输半径的增加而增加。当传输半径一样时, DCHPBD 协议的簇头生存期大于 CBRP 协议的簇头生存期。这是因为两种协议分簇的大小都与传输半径有关, 传输半径增加, 分簇的大小增加, 所以簇头的生存期增加。DCHPBD 协议是选择每个簇内生存期最大的车辆节点作为簇头, 而 CBRP 协议是根据车辆节点到簇中心的距离来选择簇头, 并不考虑节点生存期。因此, 对于簇头生存期, DCHPBD 协议的性能更佳。

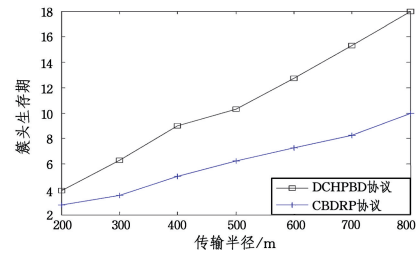


图 6 传输半径与簇头生存期的关系曲线

Fig. 6 Relation curves between transmission radius and cluster head's lifetime

图 7 给出了 3 种协议的节点密度与平均跳数的关系曲线。由图 7 可知, DCHPBD 协议和 EG-RAODV 协议的平均跳数随着节点密度的增加而增加, CBRP 协议的平均跳数基本不随节点密度变化, 当节点密度一定时, DCHPBD 协议的平均跳数最小。这是因为 DCHPBD 协议分簇的大小是随着节点密度的增加而减小的, 且分簇的大小有限。CBRP 协议未考虑节点的密度变化对分簇大小的影响。可见 DCHPBD 协议在平均跳数方面的性能更好。

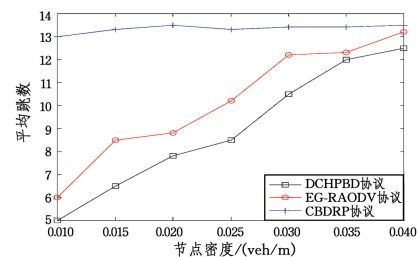


图 7 节点密度与平均跳数的关系曲线

Fig. 7 Relation curves between node density and average number of hops

图 8 给出了 3 种协议的节点密度与平均时延的关系曲线。由图 8 可知, EG-RAODV 协议和 CBRP 协议的平均时延随着节点密度的增加而增加, 但 CBRP 协议的平均时延增加的幅度较小。DCHPBD 协议的平均时延先随着节点密度的增加而增加, 后趋于平缓, 这是因为节点密度增大, 路由控制信息将增加, 导致端到端时延增加^[13-14]。DCHPBD 协议分簇的大小与节点密度有关, 采用双簇头传输数据分组, 且分簇的大小有限, 因此平均时延最小, 且节点密度增加时, 时延不会一直增大。而 CBRP 协议未考虑节点密度变化对分簇大小的影响。可见 DCHPBD 协议在平均时延方面的性能表现更佳。

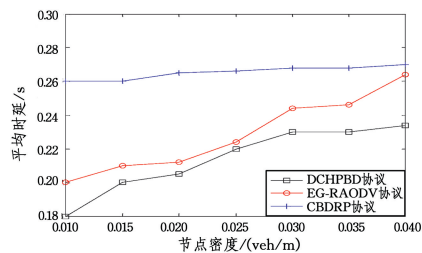


图8 节点密度与平均时延的关系曲线

Fig. 8 Relation curves between node density and average delay

结束语 本文针对城市环境下的数据分组转发问题,提出一种车载自组织网络中基于车辆密度的双簇头路由协议。该路由协议主要考虑两个重要问题:簇的形成和簇头的选择。簇的形成降低了对单个车辆节点的运动感知。选择的簇头作为中继节点转发数据分组,簇头的生存期越大,则网络重新选择中继节点的次数越少,网络越稳定。仿真结果表明,DCHPBD 协议延长了簇头生存期,同时减少了数据传输的平均跳数并降低了时延,通信性能更佳。

参考文献

- [1] CAI R, ZHANG G A, JI Y C. Adaptive Routing Protocol Based on Directional Transmission in VANETs[J]. Computer Science, 2016, 43(5): 62-66. (in Chinese)
蔡蓉, 章国安, 季彦呈. 车载自组织网络中基于定向传播的自适应路由协议[J]. 计算机科学, 2016, 43(5): 62-66.
- [2] CHUANG M C, CHEN M C. DEEP: density-aware emergency message extension protocol for VANETs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 4983-4993.
- [3] MILDRED M, HONG C S, BANG Y. An adaptable mobility-aware clustering algorithm in vehicular networks[C]// Network Operations and Management Symposium (APNOMS). IEEE, 2011: 1-6.
- [4] LUO Y, ZHANG W, HU Y. A new cluster based routing protocol for VANET[C]// 2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. Wuhan, China, 2010: 176-180.
- [5] SINGHA J P, BALI R S. A hybrid backbone based clustering algorithm for vehicular Ad Hoc networks[C]// IEEE International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT), Procedia Computer Science. Kochi, India, 2014: 1005-1013.
- [6] IDJ MAYYEL H, QAZI B R. Energy efficient double cluster head routing scheme in a city vehicular network[C]// 2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Barcelona, Spain, 2013: 1594-1599.
- [7] SOUZA E, NIKOLAIDIS I, GBURZYNSKI P. A new aggregate local mobility(ALM) clustering algorithm for VANETs[C]// IEEE 2010 International Conference on Communications (ICC). Cape Town, South Africa, 2010: 1-5.
- [8] SALEET H, BASIR O, LANGAR R, et al. Region-based location service-management protocol for VANETs [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2010, 59(2): 917-931.
- [9] LI G, BOUKHATEM L. An Intersection-based delay sensitive routing for VANETs using ACO algorithm[C]// IEEE International Conference on Computer Communication and Networks. Shanghai, China, 2014: 1-8.
- [10] RAW S R, DAS S. Performance Analysis of P-GEDIR Protocol for Vehicular Ad Hoc Network in Urban Traffic Environments [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 68(1): 65-78.
- [11] SONG T, XIA W, SHEN L, et al. A cluster-based directional routing protocol in VANET[C]// 2010 IEEE 12th International Conference on Communication Technology (ICCT). Nanjing, China, 2010: 1172-1175.
- [12] EIZA M H, NI Q. An evolving graph-based reliable routing scheme for VANETs[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1493-1504.
- [13] MEHRA R, BALI R S, KAUR P. Efficient Clustering based OLSR Routing Protocol for VANET[C]// 2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN). Indore, India, 2016: 1-7.
- [14] CHEN P J, TANG L, CHEN Q B. Clustering Protocol Based on Motion State in VANETs[J]. Computer Engineering, 2013, 39(3): 87-98. (in Chinese)
陈培菊, 唐伦, 陈前斌. 车载自组织网络中基于运动状态的簇路由协议[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 87-98.
- [15] (上接第 105 页)
- [16] SHAO Y H, CHEN W J, WANG Z, et al. Weighted linear loss twin support vector machine for large-scale classification[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 73(1): 276-288.
- [17] KHEMCHANDANI R, SAIGAL P, CHANDRA S. Improvements on ν -Twin Support Vector Machine[J]. Neural Netw., 2016, 7(79): 97-107.
- [18] KUMAR M A, GOPA M. Application of smoothing technique on twin support vector machines[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29: 1842-1848.
- [19] YE Q L, ZHAO C X. A Feature Selection Method for TWSVM via a Regularization Technique[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(6): 1029-1037. (in Chinese)
业巧林, 赵春霞. 基于正则化的 TWSVM 特征选择算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(6): 1029-1037.
- [20] KUMAR M A, GOPAL M. Least squares twin support vector machines for pattern classification[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 7535-7543.
- [21] WANG H X, LU X S, HU Z L, et al. Fisher discriminant analysis with L1-norm[J]. IEEE Trans. Cybern., 2014, 44(4): 828-842.
- [22] LI C N, SHAO Y H, DENG N Y. Robust L1-norm non-parallel proximal support vector machine[J]. Optimization, 2016, 65(1): 1-15.
- [23] ZHENG W M, LIN Z C, WANG H X. L1-norm distance Kernel Discriminant Analysis via Bayes Error Bound Optimization for Robust Feature Extraction[J]. IEEE Trans. Neural Netw., 2014, 4(24): 793-805.
- [24] WANG H, TANG Q, ZHENG W M. L1-Norm-Based Common Spatial Patterns[J]. IEEE Trans. Biomed. Engineering, 2012, 59(3): 653-662.