

一种适用于城市环境的 VANET 成簇算法

李炳圻, 梅中辉

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 因为车辆节点的移动方向与速度大小均存在差异, 节点间通信链路的持续时间短暂, 通信质量难以满足车载自组织网络 (VANET) 中传递消息的要求。利用成簇算法来提高通信链路的稳定性是解决上述问题的有效途径, 但目前成簇算法的设计主要针对高速公路环境, 没有考虑车辆节点方向、速度变化频繁的城市环境。在经典成簇算法的基础上提出了一种更加稳定且可靠的 VANET 成簇算法。该算法针对城市环境对成簇算法的多个稳定性条件进行改进, 同时考虑信道质量对通信服务质量的影响。最后利用 SUMO 仿真平台模拟真实的城市交通环境, 并通过 NS-2 仿真平台验证该算法的各项指标。仿真结果表明, 对比 LID 算法和 MOBIC 算法, 提出的算法具有更高的稳定性和可靠性, 且端到端的数据传输时延更低。

关键词: 车载自组织网络; 成簇算法; 稳定性条件; 服务质量

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2019)01-0154-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2019.01.032

A Stable Clustering Algorithm Applied in VANETs on Urban Road Environment

LI Bing-qi, MEI Zhong-hui

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Due to the differences in the moving direction and speed of vehicle nodes, the duration of communication link between nodes is short, and the communication quality is difficult to meet the requirements of message delivery in vehicular ad hoc network (VANET). To improve the stability of communication link with clustering algorithm is an effective way to solve the above problems, but the current design of clustering algorithm is mainly aimed at the expressway environment, not taking into account the urban environment with direction of vehicle nodes, speed changes frequently. Based on the classical clustering algorithm, we propose a more stable and reliable VANET clustering algorithm which improves several stability conditions of clustering algorithm for the urban environment and considers the influence of channel quality on communication service quality. Finally, SUMO simulation platform is used to simulate the real urban traffic environment, and NS-2 simulation platform to verify the indexes of the algorithm, which shows that the proposed algorithm has higher stability and reliability and lower end-to-end data transmission delay compared with LID algorithm and MOBIC algorithm.

Key words: vehicular ad-hoc network; clustering algorithm; stability condition; quality of service

0 引言

作为智能交通系统 (intelligent transport system, ITS) 的重要组成部分, 车载自组织网络 (vehicular ad-hoc network, VANET), 一种由车载单元 (on-board unit, OBU) 组成的移动自组织网络 (mobile ad-hoc network, MANET) 正在快速发展。在 VANET 中, OBU 通过单跳或多跳无线通信实现车辆间通信 (vehicle to

vehicle, V2V), 路边单元 (roadside unit, RSU) 通过向 OBU 收发数据实现车路间通信 (vehicle to infrastructure, V2I), 同时 RSU 通过光纤相互连接并接入骨干网络 (Internet, 4G) 实现整个交通系统与外界网络的信息交互^[1]。

目前, 普遍通过 MANET 路由协议实现车载单元间的物理连接, 但带来的可靠性和扩展性问题仍未找

收稿日期: 2018-02-11

修回日期: 2018-06-14

网络出版时间: 2018-11-15

基金项目: 国家科技重大专项 (2010zx03003-003); 国自基金孵化项目 (NY217034); 中兴通讯产学研项目 (2016 外 83)

作者简介: 李炳圻 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为车载自组织网络、网络编码等; 梅中辉, 博士, 副教授, 研究方向为网络编码技术、协作通信技术等。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181114.1556.032.html>

到有效的解决办法。为了提高路由的可靠性和扩展性,在 MANET 成簇算法的基础上,一系列针对 VANET 高速移动场景的成簇算法被提出^[2]。研究表明一个稳定且可靠的成簇算法可以有效节省路由开销,部分算法还能作为交通事故或拥塞检测的基础,为智能交通系统提供数据支持^[3-4]。

文中探讨并提出了针对 VANET 的成簇算法 SQ-WCA,该算法在几种经典成簇算法的基础上,考虑了城市环境中成簇的稳定性(stability)条件和节点间通信的服务质量(quality),并对其进行了仿真。

1 经典的成簇算法

车载自组织网络(VANET)的基本框架从移动自组织网络(MANET)发展而来,现有的框架结构主要包括两种:平面(flat)结构和分级(hierarchical)结构。平面结构在复杂网络中很难实现,因为路由开销限制了其网络规模的扩充。分级结构则可以有效降低路由开销,提高网络的可扩充性,从而降低网络管理和同步的难度^[5]。如图1所示,在分级结构中,成簇算法需要实现将所有节点划分成簇的目标。每个生成的簇包含唯一的簇头节点(cluster header, CH)和多个成员节点(cluster member, CM),部分处于边缘位置的成员节点同时承担着网关节点的工作^[6]。

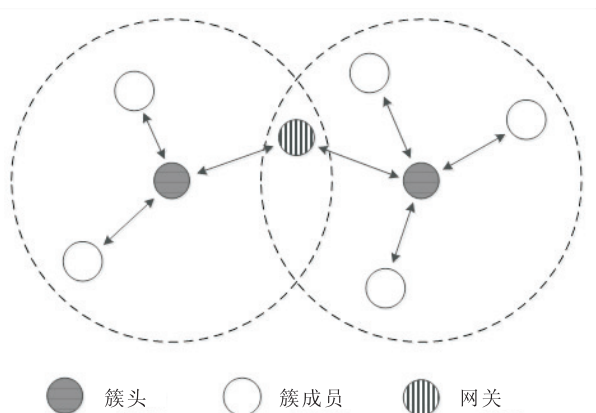


图1 分级结构

1.1 最小 ID 算法

最小 ID(lowest-id, LID)算法^[7]是由 Grela 和 Tsai 提出的成簇算法。该算法参照节点的空间位置或者物理地址(media access control, MAC),为所有节点分配唯一的 ID 标识。区域中的节点周期性地接收来自邻居节点发送的 HELLO 数据包,并记录在自己的邻居节点列表中,默认最小 ID 标识对应的节点为 CH 节点,该节点的单跳邻居节点为该簇的 CM 节点。最小 ID 算法计算简单、实现方便、更新周期长、维护开销小,网络吞吐量高于最高节点度(highest-degree, HD)算法^[8]。但该算法忽略了节点的移动性和负载平衡问

题,不适用于高速移动的场景。

1.2 最小相对移动算法

最小相对移动(MOBIC)算法^[9]是由 Basu 和 Khan 提出的一种计算节点移动差异性的成簇算法。该算法依据式1对 X 节点接收到的邻居节点 Y 两次传输信号的强度作差,估计两节点之间的移动差异性,再依据式2计算节点 Y 与所有邻居节点的移动差异性的方差。通过比较方差的大小选择相对周围邻居节点有着较低移动差异性的节点作为 CH 节点,降低 CH 节点发生变化的次数。MOBIC 算法相对简单,对成簇的稳定性条件作了改进,但不适用于节点速度和方向快速变化的场景。

$$M_Y^{\text{rel}}(X) = 10 \lg \frac{R_x P_{X \rightarrow Y}^{\text{new}}}{R_x P_{X \rightarrow Y}^{\text{old}}} \quad (1)$$

$$M_Y = \text{var} \{M_Y^{\text{rel}}(X_j)\}_{j=1}^m \quad (2)$$

1.3 加权成簇算法

加权成簇算法(weighted clustering algorithm, WCA)^[10]是由 Chatterjee 和 Das 提出的一种按需加权的成簇算法。该算法同时考虑了多个影响成簇的因素,其中包括移动性、节点密度和节点能量。算法会根据不同需求,依据式3调节加权系数 w,对多个优化目标进行均衡。WCA 算法复杂度较高,且成簇和维护的开销较大,同样不适用于高速移动场景。

$$W_v = w_1 \Delta_v + w_2 M_v + w_3 D_v + w_4 P_v \quad (3)$$

依据式4计算节点 v 的节点度 d_v,其中 dist(v, v') 表示节点 v 和 v' 之间的欧氏距离,tx_range 表示节点的最大传输距离,Δ_v 表示节点度 d_v 与节点度的期望值 δ 差的绝对值。再依据式5计算节点 v 与所有邻居节点的距离之和 D_v。最后依据式6估算时间 T 内节点 v 的平均速度 M_v,其中 (x_t, y_t) 和 (x_{t-1}, y_{t-1}) 分别表示节点 v 在 t 和 t-1 时刻的位置。此外,式3中的 P_v 表示节点 v 作为 CH 节点持续的时间。

$$d_v = |N(v)| = \sum_{v' \in N(v)} \{ \text{dist}(v, v') < \text{tx_range} \} \quad (4)$$

$$\Delta_v = |d_v - \delta| \quad (5)$$

$$D_v = \sum_{v' \in N(v)} \{ \text{dist}(v, v') \} \quad (5)$$

$$M_v = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{(x_t - x_{t-1})^2 + (y_t - y_{t-1})^2} \quad (6)$$

2 SQ-WCA 成簇算法

2.1 假设条件

(1)假设所有的车辆节点可以通过全球定位系统(global positioning system, GPS)获取自己实时的位置、速度和方向。

(2)假设所有的车辆节点均配备有全向天线,可

以实现节点间的双向链路通信,最大传输距离为固定值 R 。

(3) 假设所有的车辆节点的发射功率为固定值 P_i , 且节点的接收功率可以获取和记录。

2.2 准备阶段

首先对 VANET 网络进行初始化,将所有的节点设置为普通节点,这些节点向通信范围内的其他节点周期性地广播 HELLO 数据包。HELLO 数据包记录了该节点自身的 ID、位置、速度、方向以及权重值 W 等信息。所有节点在接收到邻居节点发送的 HELLO 数据包的同时,将发送数据包的节点 ID 记录到自己的邻居列表(neighbor list, NL)之中^[11]。

算法需要考虑节点的移动性相似度,这取决于节点的位置和速度。式 7 定义了节点 i 的坐标 \mathbf{X}_i 和单位时间 τ 之后的坐标 \mathbf{X}'_i , 其中 x_i 和 y_i 分别对应 X 坐标和 Y 坐标, $v_{x,i}$ 和 $v_{y,i}$ 分别表示节点 i 的速度在 X 轴和 Y 轴上的分量。

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}, \mathbf{X}'_i = \begin{bmatrix} x_i + v_{x,i}\tau \\ y_i + v_{y,i}\tau \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\theta_{i,j} = \arccos \frac{v_{x,i}v_{x,j} + v_{y,i}v_{y,j}}{\sqrt{v_{x,i}^2 + v_{y,i}^2} \sqrt{v_{x,j}^2 + v_{y,j}^2}} \quad (8)$$

首先,节点 i 利用式 8 计算它与邻居列表中的节点 j 的运动方向夹角 $\theta_{i,j}$, 如果满足 $\theta_{i,j} \geq \pi/4$ 这个条件,则文中认为这两个节点的运动方向不同。如果同时节点 j 的速度绝对值大于 60 km/h,则节点 i 自动将节点 j 从邻居列表中剔除。通过这个步骤可以剔除邻居列表中高速移动的不同向节点,处于低速或者静止状态的车辆节点对运动方向不敏感,则保留在邻居列表中。邻居列表中的节点个数用 n_i 表示。

在 IEEE802.11p 协议中,不断广播重复的消息会造成严重的数据碰撞并导致过高的信道接入延时^[12]。针对这个问题,一旦出现车辆节点密度过大,簇内节点过多的情况时,可以修改上述的速度条件的阈值,减少对应的邻居列表中的节点个数,从而降低信道接入延时。

2.3 簇的生成

选择合适的簇头节点可以提高成簇算法的稳定性。文中根据式 9 得到的权重值 W_i 表示节点 i 作为簇头节点的能力。

$$W_i = w_1 D_i + w_2 V_i + w_3 C_i \quad (9)$$

其中, D_i 表示节点 i 的距离因子; V_i 表示节点 i 的速度因子; C_i 表示节点 i 的信道因子; w_1, w_2, w_3 是加权系数,且满足 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

2.3.1 距离因子

根据式 10 计算节点 i 与邻居节点 j 的距离权重值

$d_weight(i, j)$ 。

$$d_weight(i, j) = \frac{\|\mathbf{X}_i - \mathbf{Y}_j\| + \|\mathbf{X}'_i - \mathbf{X}'_j\|}{2R} \quad (10)$$

其中, $\|\mathbf{X}_i - \mathbf{Y}_j\|$ 是节点 i 与邻居节点 j 的欧氏距离; $\|\mathbf{X}'_i - \mathbf{X}'_j\|$ 是单位时间 τ 后节点 i 与邻居节点 j 的欧氏距离,并通过最大传输距离 R 将该值归一化。 $d_weight(i, j)$ 的计算同时考虑了节点当前的位置和单位时间 τ 后的位置,从而区分相互靠近和远离的节点。距离权重值越小,节点间的距离越近,链路持续的时间越长。最后根据式 11 对节点 i 所有邻居节点的距离权重值累加取平均得到距离因子 D_i 。

$$D_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} d_weight(i, j) \quad (11)$$

2.3.2 速度因子

根据式 12 计算节点 i 与邻居节点 j 的速度权重值 $v_weight(i, j)$, 用来度量两节点的移动相似度。首先计算两个节点速度大小的差值并取绝对值,然后利用最大行驶速度 v_{\max} 对其进行归一化。对于运动方向相同的节点,速度权重值越小,节点的移动相似度越高,成簇也就越稳定。对于运动方向不同的节点,因为处于低速或者静止状态,不会对成簇的结构稳定性造成太大影响。与式 11 类似,根据式 13 得到了速度因子 V_i 。

$$v_weight(i, j) = \frac{|\sqrt{v_{x,i}^2 + v_{y,i}^2} - \sqrt{v_{x,j}^2 + v_{y,j}^2}|}{v_{\max}} \quad (12)$$

$$V_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} v_weight(i, j) \quad (13)$$

2.3.3 信道因子

根据式 14 计算节点 i 与邻居节点 j 的功率权重值 $c_weight(i, j)$, 通过接收功率和发射功率的比值表示链路的信道质量。 $\frac{p_r(i, j)}{P_i}$ 的值越大,说明信道质量越好,节点间的链路越可靠。接收信噪比 SINR 的引入可以避免复杂无线环境下劣质链路对整个网路的影响,使得网络整体的端到端时延降低,提高通信服务质量。与式 11 类似,根据式 15 对功率权重值累加取平均得到功率因子 C_i 。

$$c_weight(i, j) = \begin{cases} 1, \text{SINR} < M \\ 1 - \frac{P_r(i, j)}{P_i}, \text{SINR} \geq M \end{cases} \quad (14)$$

$$C_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} c_weight(i, j) \quad (15)$$

周期更新邻居列表,节点 i 对邻居列表中的节点进行遍历分析:

(1) 节点 i 的邻居列表中不存在 CH 节点,则节点 i 自动比较自身权重值 W_i 和邻居列表中所有节点的权

重值 W , 若 W_i 小于任意节点的 W 值, 节点 i 就默认为 CH 节点。

(2) 节点 i 的邻居列表中只有一个 CH 节点, 则节点 i 自动发送一个包含自身 ID 的 Cluster_JOIN 包给该 CH 节点, 并成为它的 CM 节点。

(3) 节点 i 的邻居列表中有不止一个簇头, 则节点 i 自动选择拥有最小 W 值的节点作为 CH 节点, 发送 Cluster_JOIN 包给该节点并且加入该簇。

(4) 节点 i 成为 CH 节点的同时会广播一个包含自身 ID 和 W_i 值的 Cluster_INVITE 包给自己的邻居节点。

(5) 邻居列表中的其他节点收到 Cluster_INVITE 包, 若节点 i 发送的 Cluster_INVITE 包中的 W_i 值比该节点收到的其他 Cluster_INVITE 包小, 则回复给节点 i 一个 Cluster_JOIN 包。

2.4 簇的维护

(1) 簇生成后, CH 节点拥有所在簇的簇信息、CM 节点信息以及相邻簇的 CH 节点信息, CM 节点拥有

所在簇的相关信息及 CH 节点信息。CH 节点开始周期性广播 Cluster_LEAD 包, Cluster_LEAD 包中不仅包含了 CH 节点的信息, 还包含邻居列表中拥有最小权重 W 的次优节点的信息。

(2) 当 CH 节点停止工作并需更换 CH 节点时, 次优节点成为临时簇头, 并且同一个簇的其他 CM 节点发送 Cluster_LEAVE 包, 接着各节点检查在自己通信范围内的其他节点, 更新邻居列表, 重复簇的生成步骤。如果不在任何节点通信范围内, 则该节点自动成为 CH 节点直到收到其他节点发送的数据包。

3 仿真结果与分析

通过 NS2 仿真平台^[13]对 LID、MOBIC、SQ-WCA 算法进行仿真, 主要分析城市环境中车辆节点的速度、节点的个数对算法性能的影响, 主要是从成簇的稳定性和端到端时延这两个方面分析算法的性能, 具体的参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

仿真参数	参数值	仿真参数	参数值
仿真区域	1 000 m×1 000 m	最大传输距离/m	250
仿真时间/s	200	数据包类型	CBR
节点数目	50 ~ 150	数据包大小/bytes	512
节点速度/(km/h)	10 ~ 60	权重(w_1, w_2, w_3)	(0.4, 0.4, 0.2)

为了模拟更加真实的城市环境, 验证算法在城市环境中的性能, 文中采用的是 SUMO 仿真平台生成的曼哈顿模型。SUMO 是德国宇航中心开发的交通仿真软件, 可以用来描述和构建交通路网、管理信号灯、分配车辆节点的行驶路径和速度。

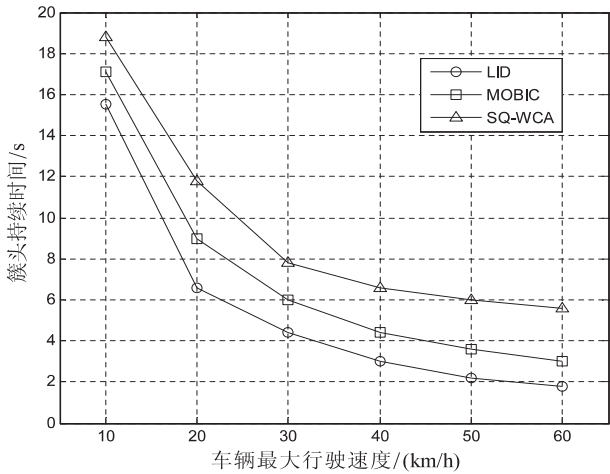


图 2 簇头持续时间随节点速度变化曲线

图 2 所示为不同算法的簇头节点持续时间随节点

速度变化的情况。可以看出, 各算法簇头持续时间均随节点速度的提高而变短, 因为速度越大, 网络的拓扑结构变化越频繁。簇头持续时间减少会导致链路频繁断开, ad-hoc 网络的连通性变差, 算法的稳定性降低。在相同的节点速度下, SQ-WCA 算法的簇头持续时间最长, 因为与 LID 和 MOBIC 相比, SQ-WCA 在选择簇头时不仅考虑了节点的位置和速度, 还考虑了节点方向和信道质量, 使得生成的簇更加稳定。

图 3 表明各算法平均簇头变化次数随节点速度变化的关系。如图所示, 三种算法对应的平均簇头变化次数均随节点速度的提高而增加, 这是因为平均簇头变化次数和前面的簇头持续时间成反比。SQ-WCA 算法对应的平均簇头变化次数最小, 再次验证了该算法在稳定性上的优越性。

图 4 给出了三种算法端到端时延随节点数目变化的情况。可以看出, 交通流量的密度会影响车辆节点的端到端时延。城市环境会导致部分节点信道访问长时间的延迟。具有更好信道质量的簇头节点可以增加数据包传输的有效时间, 降低端到端时延。当节点的

最大速度设置为 60 km/h 时, SQ-WCA 算法与 LID 算法和 MOBIC 算法相比, 端到端的时延分别降低了 22.4% 和 30.7% 左右。降低端到端时延实现了对通信服务质量的提升, 为事故救援和自然灾害信息的及时传达提供保障。

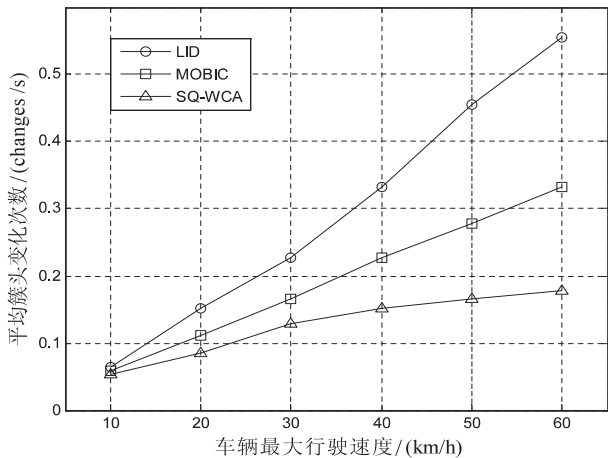


图 3 平均簇头变化次数随节点速度变化曲线

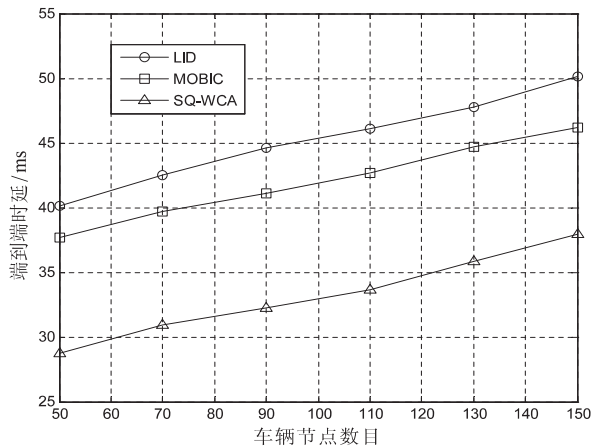


图 4 端到端时延随节点数目变化曲线

4 结束语

VANET 网络在城市交通中的应用能够提高道路交通的安全性及高效性, 同时能够缓解蜂窝移动网络的压力, 具有很高的商业应用前景。文中提出的算法 SQ-WCA 充分考虑了节点的位置、速度和方向对成簇稳定性的影响, 同时考虑了节点间通信的服务质量。通过仿真对比验证了该算法在稳定性和可靠性上的优

越性, 并且具有相对较低的端到端传输时延。

参考文献:

- [1] 常促宇, 向 勇, 史美林. 车载自组网的现状与发展[J]. 通信学报, 2007, 28(11): 116-126.
- [2] COOPER C, FRANKLIN D, ROS M, et al. A comparative survey of VANET clustering techniques[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 657-681.
- [3] MA Xiaomin, ZHANG Jinsong, YIN Xiaoyan, et al. Design and analysis of a robust broadcast scheme for VANET safety related services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(1): 46-61.
- [4] MCHERGUI A, MOULAH T, ALAYA B, et al. A survey and comparative study of QOS aware broadcasting techniques in VANET[J]. Telecommunication Systems, 2017, 66(2): 253-281.
- [5] 付珍珍. Ad Hoc 网络中分簇路由算法的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [6] 于海宁, 张宏莉. VANETs 路由协议的研究进展[J]. 电子学报, 2011, 39(12): 2868-2879.
- [7] GERLA M, TSAI J T C. Multiclustet, mobile, multimedia radio network[J]. Wireless Networks, 1995, 1(3): 255-265.
- [8] 苏 晓, 于 洪. 移动自组织网中一种平均节点度分簇算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2010, 22(2): 237-241.
- [9] BASU P, KHAN N, LITTLE T D C. A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of 21st international conference on distributed computing systems workshops. Mesa, AZ, USA: IEEE, 2001: 413-418.
- [10] CHATTERJEE M, DAS S K, TURGUT D. WCA: a weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks[J]. Cluster Computing, 2002, 5(2): 193-204.
- [11] YU J Y, CHONG P H J C, ZHANG Mingyang. Performance of efficient CBRP in mobile ad hoc networks[C]//IEEE 68th vehicular technology conference. Calgary, BC, Canada: IEEE, 2012.
- [12] 黄家玮, 钟少华, 刘联海, 等. 车载自组网中基于车辆密度的多跳广播协议[J]. 通信学报, 2016, 37(12): 32-41.
- [13] 黄化吉, 冯穗力, 秦丽姣, 等. NS 网络模拟和协议仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 3-6.