

# 基于亲和传播算法的车辆自组织网络分簇组网方法

李 军<sup>1</sup>, 周舒雨<sup>2</sup>, 甄 越<sup>1</sup>, 肖 喜<sup>2</sup>, 彭泳卿<sup>✉1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076

2 清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘要:** 随着 5G 通信和自动驾驶汽车的发展, 车辆自组织网络 VANET (Vehicular Ad Hoc Network) 作为一种新型的移动自组织网络, 因其在改善道路安全、为驾驶员和乘客提供便利方面的潜力, 而引起学术界和工业界的广泛关注。它可以通过提供交通流量、事故通知、危险警告、可能存在的定位偏差、天气等信息来增强道路安全, 从而提高交通效率。由于车辆的高速移动会经常引起网络拓扑中断, 因此一个设计良好的路由协议至关重要。提出了一种适用于车辆自组织网络环境的基于分簇的路由协议, 设计并实现了一种基于亲和传播算法的分簇组网模型 V-APC (VANET-Affinity Propagation Clustering)。通过重新定义亲和传播算法的相似函数, 设计了簇头的选择过程、簇的形成过程还有簇的维护过程。结果表明: 采用上述方法形成的簇, 在簇内的通信性能和簇稳定性方面具有显著优势, 使得该协议在路由延迟和数据包转发成功率方面表现优异。

**关键词:** 车辆自组网; 路由协议; 分簇算法; 亲和传播算法

中图分类号: TN915 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)06-0136-11

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220714001

**引用格式:** 李军, 周舒雨, 甄越, 等. 基于亲和传播算法的车辆自组织网络分簇组网方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 136-146.

## A clustering networking method based on affinity propagation algorithm in VANET

LI Jun<sup>1</sup>, ZHOU Shuyu<sup>2</sup>, ZHEN Yue<sup>1</sup>, XIAO Xi<sup>2</sup>, PENG Yongqing<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Dept. Computer Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Intelligent transportation systems have received extensive attention in recent years by dealing with the complex relationships between vehicles, roads, pedestrians and other objects. Vehicle ad hoc networks (VANET) play an important role in intelligent transportation systems because they can provide accurate status data for all participants in real time, especially with the rise of autonomous vehicles and 5G communications. Vehicle ad hoc network is a new autonomous dynamic topology network, a special sub-category of mobile ad hoc network (MANET), it can enhance road safety and improve traffic efficiency by providing information about traffic flow, accident notification, danger warning, possible deviation or weather. Considering the mobility of road traffic, these networks have aroused widespread concern in academia and industry because of their potential to improve road safety and provide convenience for drivers and passengers. Due to the high-speed movement of vehicles in the vehicle ad hoc network, the network topology is frequently interrupted. Therefore, a well-designed routing protocol is essential. After a lot of literature research and analysis, we have concluded that the routing protocol based on clustering is suitable for the vehicle ad hoc network environment. Therefore, this paper proposes a routing protocol based on clustering. A clustering networking model based on affinity propagation algorithm is proposed. By reconstructing the similarity function of the affinity propagation algorithm, the cluster head selection process, cluster formation process and cluster maintenance process are designed. The formed cluster performs better in terms of stability and communication performance within the cluster. This protocol performs well in terms of routing delay and packet forwarding success rate.

✉通信作者: 彭泳卿 (pengyongqing1980@163.com)

收稿日期: 2022-07-12 收修改稿日期: 2022-08-09

**Key words:** VANET; Routing protocol; Cluster algorithm; Affinity propagation algorithm

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20220714001

**Citation:** LI Jun, ZHOU Shuyu, ZHEN Yue, et al. A clustering networking method based on affinity propagation algorithm in VANET[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 136–146.

## 引 言

随着全球经济的快速发展,汽车保有量迅速增长。安全驾驶、交通拥堵和环境污染成为当前困扰交通领域的三大问题。VANET 因其可实时为客户提供准确的状态数据,具有改善道路安全性以及为司机和乘客提供便利的潜力,在学术界和工业界均引起了广泛关注<sup>[1]</sup>。但目前关于 VANET 的研究都集中在数据分布和聚合、通道访问管理、交通安全、拓扑发现和路由协议等特定问题和应用上。

VANET 将道路上的各汽车视为移动节点,并使用这些节点创建了一个移动动态网络。其目的是为车辆提供无线连接,并部署智能交通系统规定的防碰撞预警、安全分析、紧急预警和提高交通效率等各种应用<sup>[2]</sup>。

近年来,智能城市的提出让更多的人对 VANET 关注, VANET 提供的服务也向着更可靠、更全面的娱乐和生活需求转变,对有效的 VANET 路由协议的需求也日益强烈。为了适应 VANET 的特点,并使路由协议在最小丢包率和负载控制的情况下达到最大的吞吐率<sup>[3-6]</sup>,有必要针对 VANET 开发适合自身网络特点的路由协议。

由于 VANET 具有高移动性、动态的拓扑结构,易受建筑物遮挡、网络节点随机分布、无线传输间歇性中断和阴影效应等限制<sup>[7]</sup>,将数据包传输到最终目的节点存在许多挑战。

考虑到道路上车辆的复杂移动和动态拓扑结构,设计高效的路由协议是车辆自组网中不可忽视的重要问题。首先, VANET 有别于其他类型自组织网络和无线网络的高移动性<sup>[8]</sup>,车速因路况而定,速度变化直接影响网络的稳定性并导致网络拓扑动态变化;其次, VANET 区域中车辆节点的密度不均匀,呈现出时空变化<sup>[9]</sup>,当车辆密度低且不规则时,通常会发生网络碎片化;最后,车辆在断开的 VANET 中行驶,会导致端到端通信极其困难<sup>[10]</sup>。

鉴于上述问题和挑战,本文针对性地开展了以下研究:

首先,通过引入与通信相关的三个参数来重新定义亲和传播 AP (Affinity Propagation) 分簇算法中的相似度函数,使得相对机动性低、通信性能好的车辆很容易被选为簇头,这些健壮的簇头有助于在簇形成阶段提高簇的稳定性。

其次,基于速度函数、位置函数和通信性能函数三个子函数,设计了一种加权机制,定量评估车辆加入对簇稳定性的影响。这有助于从多个候选簇头中选择最佳簇头。

最后,在 VANET 的混合分布式系统模型中定义了车辆的三种状态,并设计了与之相关的完整转换过程。在此基础上,本文提出了一种 V-APC (基于亲和传播算法的分簇组网模型) 算法,该算法负责聚类过程的四个不同阶段。V-APC 算法的显著特点是:当车辆选择加入簇时,簇中的所有车辆都将参与。与其他聚类算法相比,该算法不仅可以实现更好的聚类稳定性,而且可以提高 VANET 的吞吐量,降低丢包率。大量的仿真可以验证该算法的有效性。

本文的后续章节组织如下:第一节介绍了 VANET 路由协议领域的相关工作和成果。第二节详细阐述了所提出的框架。第三节给出了所提出的 V-APC 模型和相关研究中常用的几种聚类网络模型的实验。第四节对于工作进行了总结,并讨论了未来工作的方向。

## 1 VANET 相关工作和成果

### 1.1 VANET 通信模式

在本文所提出的车辆自组织网络分簇组网模型中,采用了混合式通信模式,如图 1 所示,其采用车-车通信长期演进 LTE-V (Long Term Evolution-Vehicle) 通信协议<sup>[11]</sup>。LTE-V 包括集中式和分布式两种

工作模式。集中式使用基站来控制网络中的车辆节点, 该模式覆盖范围大、带宽大, 但是传输时延相对较高, 不利于安全性信息在车辆间的传输; 分布式则是车辆节点与车辆节点之间的直接通信, 其优点是无基站、成本低<sup>[12]</sup>。

本文将 V-APC 模型中的车辆分为三类: 非簇 (UN) 节点、簇头 (CH) 节点和簇成员 (CM) 节点。每辆车状态可以在本文提出的分簇组网模型<sup>[13-15]</sup>中互换。

① UN 节点可能是每个车辆在车辆自组织网络启动之初的状态, 也可能是分簇过程中某些车辆脱离网络的状态, UN 节点是簇外节点, 不属于任何簇。

② CH 节点负责管理簇及簇成员节点, 一个 CH 节点只存在于一个簇中, 一个簇中也只含有一个 CH 节点。CH 节点可以使用 LTE-V 的分布式模式与同一簇中的每个 CM 节点以及其它相邻簇的 CH 节点进行通信。此外, 它还可以使用 LTE-V 的集中式模式与基站通信。

③ CM 节点是簇中大多数车辆所处的状态, CM 节点只存在于一个簇中, 它可以使用 LTE-V 的分布式模式与同一簇中的其它 CM 节点和 CH 节点进行通信。

### 1.2 VANET 路由协议

目前, 分簇路由是业界针对 VANET 的特点推出的一种新型路由协议。该类协议将网络中的车辆节点划分为簇。因此, 车辆位置相对较近的节点容易形成一个簇, 选择其中一个车辆节点作为簇头。簇的大小根据用于形成簇的标准而有所不同<sup>[16]</sup>, 例如车辆的数量、地理位置、移动方向和速度可以作为将网络划分为簇的度量。在此之后, 簇内节点选举一个簇头节点负责管理簇, 以完成簇间通信<sup>[17]</sup>。然后, 在簇间通信中选择最佳邻居簇来转发数据。基于分簇的路由协议比较适合车辆自组织网络环境, 其数据包转发成功率相对较高, 并且其路由开销在合理范围内。

为了解决高速公路上快速行驶的车辆之间的数据交互问题, Santos 首次将移动自组织网络中的分簇思想应用到 VANET 中, 但是他设计的基于簇的位置路由分簇算法 CBLR (Cluster-based Location Routing) 仅根据簇成员的数量选择簇头, 在簇的稳定性和簇的规模方面都存在不足<sup>[18]</sup>。Gunter 将与速度相关的参数引入到分簇过程中, 提出了一种基于平均速度差和与相邻节点距离的加权和来选择簇头的机制, 有效避免了规模较大的簇<sup>[19]</sup>。针对城市十字路口对簇稳定性的影响, Hadded 提出了自适应加权分簇算法 AWCP (Adaptive Weighted Clustering Protocol), 在簇生成过程和簇维护过程中考虑了与相邻车辆具有相同公路 ID 和相同方向的车辆, 并利用多目标遗传算法对算法的参数进行了优化<sup>[20]</sup>。但是由于上述分簇算法只考虑单个时间点的指标值, 因此簇的稳定性容易受到车辆运动的随机性和瞬时性的影响。

## 2 方法论

### 2.1 亲和传播算法

亲和传播算法<sup>[21-23]</sup>是一种基于节点间消息传递的聚类算法。选择该算法具有以下优点: ① 不需要预先确定分簇组网模型的簇数, 可以根据模型中的车辆节点数量自适应确定簇数; ② 在基于亲和传播算法的分簇组网模型中选择的 CH 是网络中实际存在的车辆节点; ③ 通过维护责任度矩阵和可信度矩阵, 采用互评机制来改善簇稳定性。

相似度传播算法的输入是一个相似度矩阵。矩阵中的元素  $s(i, j)$  表示节点  $i$  和节点  $j$  的相似度, 矩阵元素可以通过一定的方法计算出来。本质上,  $s(i, j)$  代表节点  $j$  是否适合作为节点  $i$  的簇头节点。特

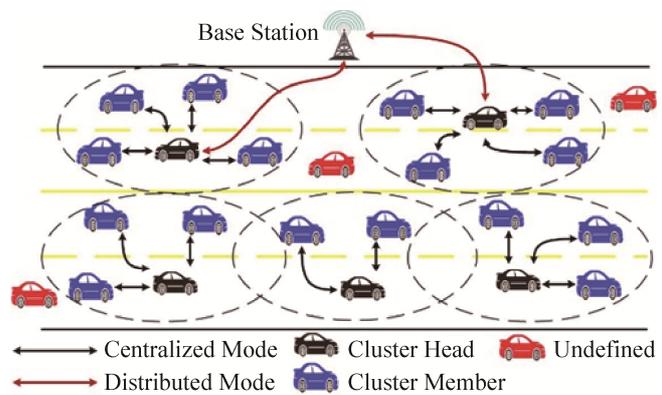


图 1 车辆自组织网络基于分簇的混合式系统模型  
Fig. 1 Hybrid system model based on clustering for VANET

别地,对于任何节点 $j$ ,自相似度 $s(j,j)$ 代表选择节点 $j$ 作为簇头的偏好,而不是与自身的相似度。 $s(j,j)$ 越大,表示越有可能选择节点 $j$ 作为簇头节点。最初,亲和传播算法将所有节点都视为可能的簇头节点,并将它们自己的相似度设置为相同的值。

在分簇过程中,节点之间交换两种信息,分别为可信度信息和责任度信息,通过交换这两种信息来选择合适的簇头节点。责任度 $r(i,j)$ 是从节点 $i$ 发送到节点 $j$ ,表示从节点 $i$ 的角度来看,节点 $j$ 是否适合作为节点 $i$ 的簇头节点。 $r(i,j)$ 定义如下:

$$r(i,j) = s(i,j) - \max_{j' \neq j} \{a(i,j') + s(i,j')\} \quad (1)$$

可信度 $a(i,j)$ 是从节点 $j$ 反向发送给节点 $i$ 的信息,表示从节点 $j$ 的角度来看,节点 $j$ 是否适合作为节点 $i$ 的簇头节点。可信度 $a(i,j)$ 和自身可信度 $a(j,j)$ 的定义如下:

$$a(i,j) = \min \left\{ 0, r(j,j) + \sum_{i' \neq i, j} \max \{0, r(i',j)\} \right\} \quad i \neq j \quad (2)$$

$$a(j,j) = \sum_{i' \neq j} \max \{0, r(i',j)\} \quad (3)$$

亲和传播算法在责任度 $r(i,j)$ 和可信度 $a(i,j)$ 两种信息的影响下迭代运行。分簇启动时,对于每个节点 $i$ ,将节点 $i$ 的自身可信度 $a(i,i)$ 和节点 $i$ 与其他节点 $j$ 的可用性 $a(i,j)$ 设置为0,并将自身相似度 $s(i,i)$ 设置为节点之间相似度的平均数或最小值,在一定程度上减少了信息的泛滥。

因此,在第一次迭代过程中,对于每个节点 $i$ ,其自身责任度 $r(i,i)$ 和节点 $i$ 与其他节点 $j$ 的责任度 $r(i,j)$ 可以通过式(1)计算得到。对于节点 $i$ 和节点 $j$ ,责任度 $r(i,j)$ 等于相似度 $s(i,j)$ 和节点 $i$ 与除节点 $j$ 以外的其他节点最大相似度之差。这表示如果有其他更合适的节点,节点 $j$ 成为节点 $i$ 的簇头节点的可能性不大。在后续的迭代过程中,节点之间相互传递信息,所有的责任度(包括自身责任度)都可以通过公式(1)计算出来。

通过公式(2)和公式(3)可以计算节点间的可信度和节点的自身可信度。对于节点 $i$ 和节点 $j$ ,两节点之间的可信度 $a(i,j)$ 由两部分组成:自责任度 $r(j,j)$ ;节点 $j$ 和所有节点 $i'$ (节点 $i$ 除外)的正责任度 $r(i',j)$ 之和。然后取这两部分之和。如果结果为正,则可信度 $a(i,j)$ 设置为0;否则,结果设置为可信度 $a(i,j)$ 。这表示选择节点 $j$ 作为其簇头节点的其他节点越多,节点 $j$ 就越有可能成为节点 $i$ 的簇头节点。此后节点之间不断交换信息来计算责任度(包括自责任度)和可信度(包括自可信度),直至算法收敛。

最后,为了避免信息更新过程中产生数值振荡,亲和传播算法采用了阻尼消息更新机制,如下所示:

$$m_{\text{new}} = \lambda m_{\text{old}} + (1 - \lambda) m_{\text{new}} \quad (4)$$

其中, $\lambda \in (0,1)$ 表示阻尼因子, $m_{\text{old}}$ 表示前一时刻的信息, $m_{\text{new}}$ 表示当前时刻的信息。

亲和传播算法根据责任度信息和可信度信息,通过两种方式选择簇头节点。在簇头节点选择过程中,对于任何节点 $i$ ,如果 $r(i,i) + a(i,i) > 0$ ,则选择它作为簇头节点。在簇形成过程中,节点 $i$ 的簇节点选择公式定义如下:

$$CH_i = \operatorname{argmax}_j \{a(i,j) + r(i,j)\} \quad (5)$$

其中, $CH_i$ 表示节点 $i$ 的簇头节点, $j$ 表示簇头节点。当所选的簇头节点不再更改时,亲和力传播算法将收敛。

## 2.2 簇头选择过程

本文提出的基于亲和传播算法的分簇组网模型中的簇头节点不仅与其所管理的簇的簇成员节点进行通信,而且还与其他簇头节点或基站进行数据和信息的交换。因此,簇头节点应具有良好的通信能力。为此,本文提出的基于亲和传播算法的分簇组网模型通过引入通信性能参数来重构亲和传播算法的相似

度函数。重构的相似度函数使得相对移动性低、通信性能好的车辆节点更容易被选为网络中的簇头节点。相对于节点  $V_i$  和节点  $V_j$ , 相似度函数计算公式如下式所示:

$$s(i, j) = -\min \left\{ \frac{\| (x_i, y_i) - (x_j, y_j) \|}{ER}, 1 \right\} - \frac{|v_i - v_j|}{v_{\max}} - \min \left\{ \frac{MTR_i}{MTR_j}, 1 \right\} \quad (6)$$

其中,  $v_i$  和  $v_j$  分别表示为节点  $V_i$  和节点  $V_j$  的速度值,  $v_{\max}$  为车辆所在道路的限速值,  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  代表节点  $V_i$  和  $V_j$  的地理位置。  $ER$  表示节点  $V_i$  的单跳有效距离,  $MTR_i$  和  $MTR_j$  分别表示节点  $V_i$  和  $V_j$  各自的最大传输速率。

此外, 在责任更新、可信度更新和簇头节点选择策略方面, 本文提出的分簇组网模型与原亲和传播算法一致。综上所述, 通过对分簇组网模型的簇头节点选择过程的分析可以看出, 相对移动性低、MTR 值高的车辆节点更容易被选为簇头节点。

### 2.3 簇形成过程

在分簇组网模型经过簇头节点的选择过程后, 车辆自组织网络中会出现一个或多个簇头节点。未定义节点将选择其中一个簇头节点作为自己的簇头节点, 并成为由簇头节点管理的簇的簇成员节点。未定义节点添加到簇后, 将变为簇成员节点状态, 这就是簇的形成过程。该过程如图 2 所示。

对于未定义节点  $V_i$ , 从其正常邻居列表  $NNL_i$  中选择所有满足条件的簇头节点, 建立候选簇头节点列表  $CCHL_i$ 。然后通过一定的机制从候选簇头列表  $CCHL_i$  中选出最优簇头节点作为节点  $V_i$  的簇头节点。由式 (5) 可知, 原始亲和传播算法的机制是选择责任度和可信度之和最大的簇头节点。虽然从两个车辆节点相互评价的角度选择了最优簇头节点, 但忽略了未定义节点加入簇时, 对簇的稳定性和簇头节点通信性能的影响。因此, 当一个新节点加入集群时, 可能会对集群的稳定性产生负面影响。因此, 在本文提出的分簇组网模型中选择了一种新的加权机制, 该机制的核心是综合评价函数。定义综合评价函数是为了定量评价节点加入簇时, 对簇的稳定性和簇头节点通信性能的影响。首先对提出的综合评价函数的三个子函数进行论述。

定义速度函数来定量评价节点加入到簇时速度对簇的稳定性的影响。对于第  $k$  个簇  $C_k$ , 当节点  $V_i$  加入时, 新的簇被标记为  $C'_k$ , 即  $C'_k - C_k = \{V_i\}$ 。节点  $V_i$  与簇  $C_k$  相关的速度函数定义公式如下:

$$v_{F_i, C_k} = \frac{1}{CMN_{C'_k}} \left( \sum_{V_j \in C'_k} (v_j - \overline{v_{C'_k}})^2 \right) \quad (7)$$

其中,  $CMN_{C'_k}$  表示集群  $C'_k$  中簇成员节点的数量,  $\overline{v_{C'_k}}$  表示簇  $C'_k$  中节点的平均速度。  $\overline{v_{C'_k}}$  计算公式如下所示:

$$\overline{v_{C'_k}} = \frac{1}{CMN_{C'_k}} \sum_{V_j \in C'_k} v_j \quad (8)$$

从式 (7) 可以看出, 速度函数的值越小, 对簇的稳定性的负面影响越小。

定义位置函数来定量评价节点加入到簇时位置对簇的稳定性的影响。节点  $V_i$  与簇  $C_k$  相关的位置函

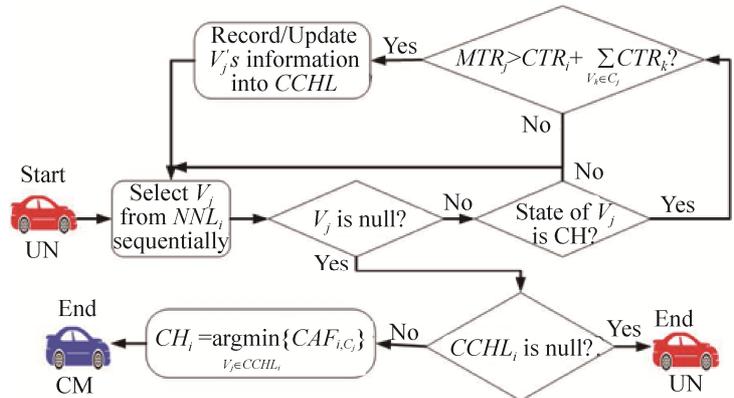


图 2 UN 与 CM 之间的状态转换过程

Fig. 2 Conversion process between UN and CM

数定义公式如下:

$$PF_{i,C_k} = \frac{1}{CMN_{C_k}} \left( \sum_{V_j \in C_k} \left\| (x_j, y_j) - (\overline{x_{C_k}}, \overline{y_{C_k}}) \right\|^2 \right) \quad (9)$$

其中,  $(\overline{x_{C_k}}, \overline{y_{C_k}})$  为簇  $C_k$  的中心位置, 计算公式如下:

$$(\overline{x_{C_k}}, \overline{y_{C_k}}) = \left( \frac{1}{CMN_{C_k}} \sum_{V_j \in C_k} x_j, \frac{1}{CMN_{C_k}} \sum_{V_j \in C_k} y_j \right) \quad (10)$$

从式(9)可以看出, 位置函数的值越小, 对簇稳定性的负面影响越小。

定义通信性能函数来定量评价节点加入到簇时对簇头节点通信性能的影响。节点  $V_i$  和簇  $C_k$  相关的通信性能函数定义公式和约束公式如下:

$$CRF_{i,C_k} = \frac{CTR_i + \sum_{V_j \in C_k} CTR_j}{MTR_k} \quad (11)$$

$$MTR_k > CTR_i + \sum_{V_j \in C_k} CTR_j \quad (12)$$

其中,  $CTR_i$  和  $CTR_j$  分别代表节点  $V_i$  和节点  $V_j$  所需的通信性能要求(节点每秒需要传输的最大数据量)。参数  $MTR$  是车辆通过其簇头节点进行数据传输的通信性能要求, 可以用在指定时间前完成数据传输的传输速率来表示。对于分簇组网模型中的任何节点,  $CTR$  的值是其簇头节点传输的数据量与数据传输时间的商。一般情况下, 为保证数据传输成功,  $CTR$  的最大值不大于  $MTR$  的最小值。

通过对式(11)和式(12)分析可以看出, 对于分簇组网模型中的某个车辆节点, 其通信性能函数的值在 0~1 之间。该函数的值越小, 对簇头节点通信性能的负面影响越小。

综合评价函数是基于上述三个函数(速度函数、位置函数、通信性能函数)的线性加权和来定量评价节点加入簇时对该簇的整体影响。综合评价函数定义公式如下:

$$CAF_{i,C_k} = w_1 VF_{i,C_k} + w_2 PF_{i,C_k} + w_3 CRF_{i,C_k} \quad (13)$$

其中,  $w_1, w_2, w_3$  是满足  $w_1, w_2, w_3 \in [0, 1]$  且  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$  的权重因子。由于在现实的交通环境中, 车速受到多方面的影响, 且对簇的性能有重要影响, 所以  $w_1$  值需要远大于  $w_2$  和  $w_3$  的值。 $w_2$  和  $w_3$  的值取决于车辆的性能。综上, 通过式(13)可以得出: 对于集群组网模型中的节点, 综合评价函数的值越小, 对集群的影响越小。

通过上述的综合评价函数分析, 在簇头节点选择过程中, 需要保持簇良好的稳定性, 对节点  $V_i$  的簇头节点选择方式如下所示:

$$CH_i = \operatorname{argmin}_{V_k \in CCHL_i} \{CAF_{i,C_k}\} \quad (14)$$

### 3 实验和评估

在本节中, 全面评估了所提出的 V-APC 模型。首先使用城市交通仿真平台 SUMO (Simulation of Urban Mobility) 生成车辆移动数据, 使用 OMNET++ 网络模拟器来模拟车辆自组织网络环境, Veins 提供了车辆自组织网路由的相关模块。然后, 对涉及簇稳定性和通信性能的指标进行了阐述, 最后, 将提出的 V-APC 模型的性能与经典的分簇算法, 移动度量分簇算法 MOBIC (Mobility Metric Clustering) 和平均精度均值算法 MAP (Mean Average Precision) 进行了比较, 并根据仿真结果对不同的车流量场景进行了详细分析<sup>[24]</sup>。

#### 3.1 车载自组网交通场景

为了使仿真具有客观性, 使用数据集 TAPASCologne 来仿真车辆自组织网络交通场景, 并选择该数

据集一平方公里作为仿真区域<sup>[25]</sup>。为了与现有研究保持一致, 根据所选区域的车辆行驶数据, 构建了分别对应 40 辆、80 辆、120 辆、160 辆和 200 辆车辆的五个交通流量仿真场景。在这些场景中, 道路的最高限速是一个常数。本次仿真实验的主要参数设置见表 1。

### 3.2 实验评价指标

在仿真实验中, 为了系统地评估本文提出的基于亲和传播算法的分簇组网模型 (V-APC) 的性能, 从稳定性和通信性能的角度给出了车辆自组织网络分簇研究中常用的 8 项性能指标:

#### ① 稳定性指标

簇的稳定性由簇头节点的稳定性和簇成员节点的稳定性组成, 可以从簇的生存时间和簇的规模两个方面评价<sup>[26-28]</sup>。在此基础上, 本文采用了四个可以描述簇稳定性的参考指标。

CH 节点平均生存时间: 分簇组网模型中所有 CH 节点的平均生存时间为所有 CH 节点生存时间之和除以 CH 节点个数。

CM 节点平均生存时间: 分簇组网模型中所有 CM 节点的平均生存时间为所有 CM 节点生存时间之和除以 CM 节点个数。

CH 节点变化率: 分簇组网模型中所有 CH 节点在单位时间内的状态变化的次数。通过用所有 CH 节点的状态变化总数除以分簇周期的总时间计算。

分簇效率: 是衡量分簇过程中有效状态车辆程度的稳定性指标。通过用所有 CH 节点和 CM 节点的数量占分簇组网模型中节点总数的百分比计算。

#### ② 通讯性能指标

吞吐量、丢包和包延迟一直是车辆自组织网络的三个主要通信问题。本文使用了四个通信性能指标。

CH 节点平均吞吐量: 指定时间内所有 CH 节点的平均吞吐量。通过用仿真时间内所有 CH 节点的簇内吞吐量与簇间吞吐量之和除以 CH 节点数计算。

簇的平均吞吐量: 指定时间内所有簇的平均吞吐量。通过用仿真时间内簇中所有 CM 节点的簇内吞吐量之和除以簇数量计算。

簇的平均丢包率: 指定时间内所有簇的平均丢包率。通过用簇中所有节点的丢包率之和除以这些节点的总数计算。其中, 节点的丢包率通过用仿真时间内失败的数据包数除以数据包总数的商来计算。

簇的平均包时延: 指定时间内所有簇的平均包延迟。通过用簇内所有节点的包延迟之和除以这些节点总数计算。其中, 车辆的数据包延迟通过用数据包发送和接收的时间间隔之和除以仿真时间内的数据包总数计算。

### 3.3 仿真结果分析

为了消除仿真误差对性能分析的影响, 每个仿真进行了 100 次<sup>[29]</sup>。基于这些仿真结果, 对两类性能指标进行了详细的对比分析如下。

#### 3.3.1 稳定性分析

图 3 比较了这三种算法在五种交通流量条件下的生存时间稳定性。具体而言, 图 3(a) 显示 V-APC 模型在 CH 节点平均生存时间方面, 比 MOBIC 算法和 MAP 算法分别长 15% 和 20%。图 3(b) 显示 V-APC

表 1 主要仿真参数设置

Table 1 Main simulation parameter settings

参数	数值
仿真时间	100 s
仿真面积	1 000 m×1 000 m
车辆单跳通信半径	300 m
信标帧间隔	1.0 s
信标帧大小	300 bytes
电磁环境质量系数	0.2
$v_{\max}$ (车辆速度最大值)	20 m/s
$Th_v$ (两节点速度差阈值)	5 m/s
$Th_{az}$ (两节点方位角差阈值)	90
MTR	10 Mbit/s~50 Mbit/s
CTR	1 Mbit/s~10 Mbit/s
自相似度	median
$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	0.8, 0.1, 0.1
$\lambda$ 值	0.5
$CMN_{\max}$	100
迭代次数	100

模型与 MOBIC 算法和 MAP 算法对于 CM 节点的平均生存时间相似。图 3 (c) 显示 V-APC 模型得到的 CH 节点变化率分别比 MOBIC 算法和 MAP 算法低 83%和 82%，并且几乎不随车流量的变化而变化。图 3 (d) 显示在分簇效率方面，V-APC 模型接近 MAP 算法，并比 MOBIC 算法高 20%。

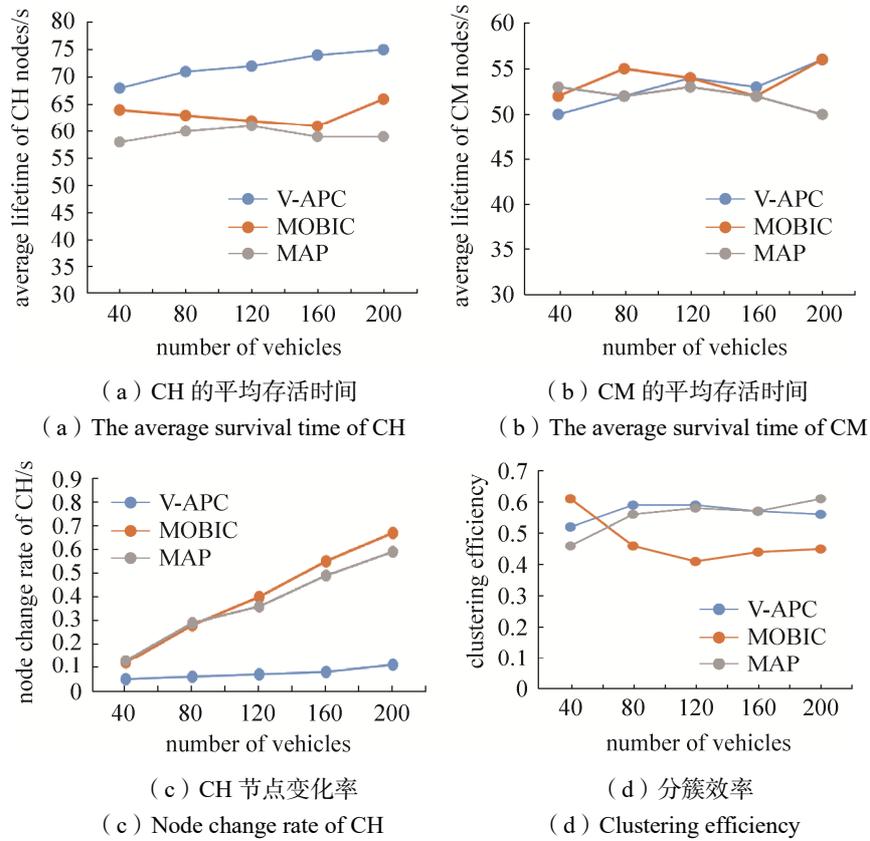


图3 三种分簇算法的稳定性比较

Fig. 3 Comparison of the stability of three clustering algorithms

综上所述，在簇的稳定性方面，V-APC 模型在五种车流量场景下的性能指标均优于 MOBIC 算法和 MAP 算法。分析如下：

- ① V-APC 模型解决了异常邻居节点对簇稳定性的干扰。而 MOBIC 算法和 MAP 算法并没有考虑到这一点；
- ② V-APC 模型引入了节点的单跳有效距离，使得与其他节点相对移动性较低的节点作为簇头；
- ③ 在簇形成过程中，V-APC 模型通过选择综合评价函数值最小的簇来减少新增节点对簇稳定性的负面影响。相比之下，MOBIC 算法和 MAP 算法只考虑了新增节点对 CH 节点的负面影响，没有考虑新增节点对簇的负面影响。

### 3.3.2 通信性能分析

图 4 比较了三种算法在五种车辆流量条件下的通信性能。具体而言，图 4 (a) 显示 V-APC 模型的 CH 节点的平均吞吐量比 MOBIC 算法和 MAP 算法分别高 57%和 64%。对于簇的平均吞吐量，图 4 (b) 显示 V-APC 模型比 MOBIC 算法和 MAP 算法分别高 26%和 102%。图 4 (c) 显示 V-APC 模型的簇平均丢包率比 MOBIC 算法和 MAP 算法分别低 82%和 74%。图 4 (d) 显示 V-APC 模型的平均包延时比 MOBIC 算法多 39%，比 MAP 算法少 14%。

综上所述，在簇的通信性能方面，V-APC 模型在五个车流量场景下的性能值（除簇平均包时延外）和所有性能值的数值稳定性均优于 MOBIC 算法和 MAP 算法。分析如下：

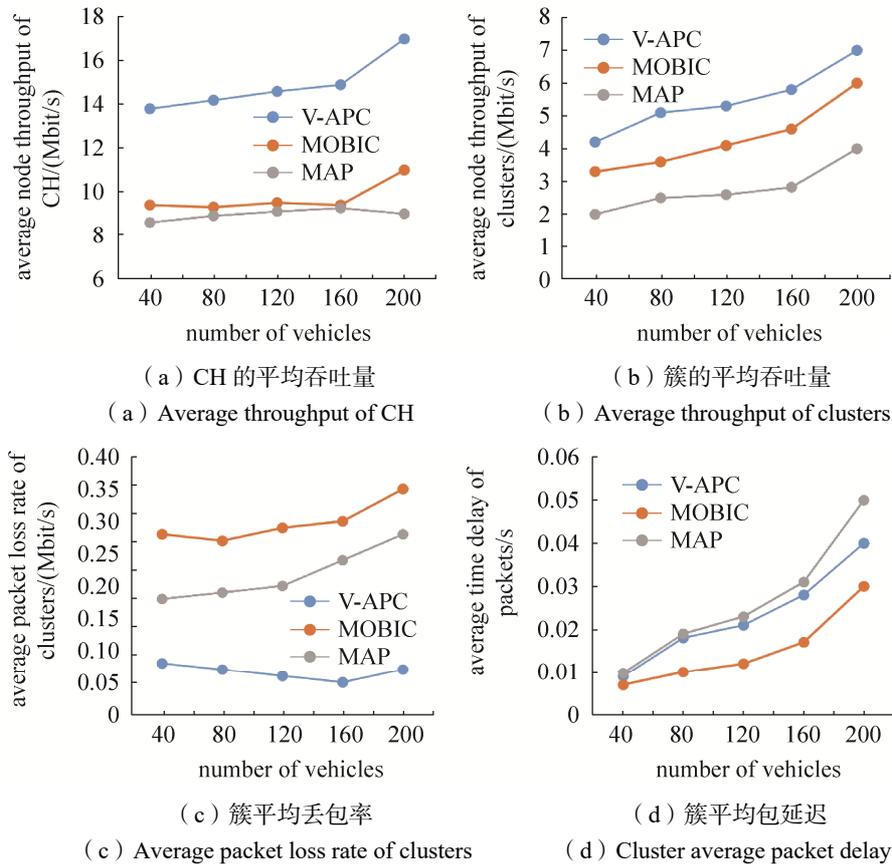


图 4 三种分簇算法的通信性能比较

Fig. 4 Comparison of communication performance of three clustering algorithms

- ① V-APC 模型较好的存活时间稳定性使其具有比 MOBIC 算法和 MAP 算法更好的通信性能;
- ② V-APC 模型相对较好的规模稳定性也使其比 MOBIC 算法和 MAP 算法具有更好的通信性能;
- ③ V-APC 模型考虑了 CH 节点的 MTR 参数, 并通过相似度函数选择 MTR 值最大的车辆作为 CH 节点, 而 MOBIC 算法和 MAP 算法忽略了与通信相关的参数。

#### 4 结束语

针对车辆高机动性对车辆自组织网络通信的影响, 本文提出一种 V-APC 模型。与传统的分簇算法相比, 该模型具有更好的分簇稳定性和通信性能。一方面, V-APC 模型利用信标帧识别单跳距离内的异常车辆, 并为每辆车建立正常邻居列表, 避免了异常车辆对簇稳定性的负面影响。另一方面, V-APC 模型在原亲和传播算法的相似度函数基础上重新定义了新的相似度函数, 引入了与通信相关的参数。并设计了簇的 CH 节点选择流程、簇的形成流程、簇的维护流程。在此基础上, V-APC 模型采用加权机制来定量评价车辆对簇稳定性的影响, 通过选择综合评价值最低的簇改进了原亲和传播算法的簇形成过程。在五中车流量场景下的仿真结果表明: V-APC 模型在簇稳定性和通信性能以及模型的鲁棒性方面均优于 MOBIC 算法和 MAP 算法。

#### 参考文献

[1] CHENG J J, CHENG J L, ZHOU M C, et al. Routing in internet of vehicles: A review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2339-2352.

[2] RAYENI M S, HAFID A. Routing in heterogeneous vehicular networks using an adapted software defined networking approach[C]// Fifth International Conference on Software Defined Systems (SDS), Barcelona, Spain, 2018: 25-31.

- [3] CAO Z, SHI K, SONG Q, et al. Analysis of between vehicle density and network congestion in vanets[C]// 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), Macau, China, 2017: 409–412.
- [4] SENOUCI O, ALIOUAT Z, HAROUS S. A review of routing protocols in internet of vehicles and their challenges[J]. *Sensor Review*, 2019, 39(1): 58–70.
- [5] AL-SULTAN S, AL-DOORI M M, AL-BAYATTI A H, et al. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 37: 380–392.
- [6] BALI R S, KUMAR N, RODRIGUES J. Clustering in vehicular ad hoc networks: Taxonomy, challenges and solutions[J]. *Vehicular Communications*, 2014, 1(3): 134–152.
- [7] YANG P, WANG J, ZHANG Y, et al. Clustering algorithm in VANETs: A survey[C]// IEEE 9th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID), Xiamen, China, 2015: 166–170.
- [8] COOPER C, FRANKLIN D, ROS M, et al. A comparative survey of VANET clustering techniques[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 657–681.
- [9] HOSMANI S, MATHPATI B. Survey on cluster based routing protocol in VANET[C]//International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT), Mysuru, India, 2017: 1–6.
- [10] PAL R, PRAKASH A, TRIPATHI R, et al. Analytical model for clustered vehicular ad hoc network analysis[J]. *ICT Express*, 2018, 4(3): 160–164.
- [11] EPHREMIDES A, WIESELTHIER J E, BAKER D J. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1987, 75(1): 56–73.
- [12] LIN C R, GERLA M. Adaptive clustering for mobile wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(7): 1265–1275.
- [13] 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.
- [14] ZHANG Y, NG J M. A distributed group mobility adaptive clustering algorithm for mobile ad hoc networks[C]// IEEE International Conference on Communications, Beijing, China, 2008: 3161–3165.
- [15] KONSTANTOPOULOS C, GAVALAS D, PANTZIOU G. Clustering in mobile ad hoc networks through neighborhood stability-based mobility prediction[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(9): 1797–1824.
- [16] SOOD M, KANWAR S. Clustering in MANET and VANET: A survey[C]// International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA), Mumbai, India, 2014: 375–380.
- [17] HAFEZ K A, ZHAO L, LIAO Z, et al. A fuzzy-logic-based cluster head selection algorithm in VANETs[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, Canada, 2012: 203–207.
- [18] ALSUHLI G, KHATTAB A, FAHMY Y. Double-head clustering for resilient VANETs[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019: 1–17.
- [19] SULISTYO S, ALAM S, ADRIAN R J. Coalitional game theoretical approach for VANET clustering to improve SNR[J]. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2019: 4573619.
- [20] RAWASHDEH Y, MAHMUD S. A novel algorithm to form stable clusters in vehicular ad hoc networks on highways[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, (1):15.
- [21] CHENG X, HUANG B. A center-based secure and stable clustering algorithm for vanets on highways[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019: 1–10.
- [22] SENOUCI O, HAROUS S, ALIOUAT Z. An efficient weight-based clustering algorithm using mobility report for IoV[C]// 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference(IEEE UEMCON 2018), New York, USA, 2018.
- [23] SENOUCI O, ALIOUAT Z, HAROUS S. Mca-v2i: A multi-hop clustering approach over vehicle-to-internet communication for improving vanets performances[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 96: 309–323.
- [24] SENOUCI O, HAROUS S, ALIOUAT Z. A new heuristic clustering algorithm based on RSU for internet of vehicles[J]. *Computer Engineering and Computer Science*, 2019, 44(11): 9735–9753.
- [25] MEHTA S, SHARMA P, KOTECHA K. A survey on various cluster head election algorithms for MANET[C]// Nirma

- University International Conference on Engineering, Ahmedabad, Gujarat, India, 2011: 1–6.
- [26] MAIZATE A, KAMOUN N E. A new metric based cluster head selection technique for prolonged lifetime in wireless sensor networks[J]. International Review on Computers and Software (IRECOS), 2013, 3(4): 227–236.
- [27] NGUYEN V, KIM O, DANG D, et al. Application of the lowest-id algorithm in cluster-based tdma system for vanets[C]// International Conference on Information Networking (ICOIN), Cambodia, 2015: 25–30.
- [28] FAN W, SHI Y, CHEN S, et al. A mobility metrics based dynamic clustering algorithm for vanets[C]// IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011), 2011: 752–756.
- [29] AADIL F, AHSAN W, REHMAN Z, et al. Clustering algorithm for Internet of vehicles (IOV) based on dragonfly optimizer (cavdo)[J]. The Journal of Supercomputing, 2018, 74(9): 4542–4567.

#### [作者简介]

李 军 1963 年生, 工程师, 主要研究方向为特种元器件测试。

周舒雨 1994 年生, 硕士, 主要研究方向为计算机技术。

甄 越 1999 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器。

肖 喜 1976 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为信息安全。

彭泳卿 1980 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天特种传感器与传感系统技术。

(本文编辑: 傅 杰)