

基于 DEEC 车载分簇的交通灯改进配时方案



杨紫伊¹, 翟捷萍², 肖海林^{1,2*}

(1. 湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062; 2. 桂林电子科技大学 认知无线电与信号处理教育部重点实验室, 桂林 541004)

摘要 针对城市道路中十字交叉路口处车辆拥堵、排队等待的问题, 在 C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) 车载通信系统中, 利用改进 DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering) 分簇算法, 选择剩余节点能量较高的车辆节点作为簇头, 提高簇的生存时间, 并通过中继车辆进行信息传输以降低车辆通信时延。同时, 利用韦伯斯特 (Webster) 交通灯改进配时算法进行相应的信号灯相位调度和周期的配时, 减少车辆等待时间。通过 VISSIM 交通仿真建模软件验证 Webster 交通灯改进配时算法能够减少交叉路口处车辆等待时间, 缓解城市道路中的交通拥堵。数值仿真结果表明: 该方案降低了车辆通信时延, 减少了车辆等待时间, 改善了交通拥堵问题。

关键词 C-V2X; 交通灯配时算法; 车载通信; 车辆分簇

中图分类号 TN929.5 文献标志码 A DOI 10.12178/1001-0548.2023127

An Improved Traffic Light Timing Scheme with DEEC Vehicular Clustering Algorithm

YANG Ziyi¹, ZHAI Jieping², and XIAO Hailin^{1,2*}

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China;

2. Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract In cellular vehicle-to-everything (C-V2X) system, aiming at the problems of vehicle congestion and queuing at intersections in urban roads, the improved distributed energy efficient clustering (DEEC) clustering algorithm is presented to select the vehicle node with higher energy of remaining node as the cluster head for improving the survival time of the cluster and utilize the relay vehicle to transmit information for reducing vehicle communication delay. At the same time, the improved Webster traffic light timing algorithm is used to conduct the corresponding signal phase scheduling and cycle timing, and thus reducing the waiting time of vehicles. Finally, the VISSIM traffic simulation modeling software verifies that Webster traffic light improved timing algorithm can reduce vehicle waiting time at intersections and alleviate traffic congestion on urban roads. Numerical simulation results show that the proposed scheme can decrease the communication delay, reduce the waiting time of vehicles and alleviate the urban traffic congestion.

Key words C-V2X; traffic light control; vehicular communication; vehicle clustering

随着城市环境下人口和车辆密度的不断增大, 交通拥堵已成为城市交通面临的重大问题。特别是在一些大城市的十字交叉路口处, 车辆数量更多, 拥堵情况尤为突出^[1-2]。很多城市出台了对车辆的一系列出行限制措施^[3-4], 如对道路通行时段进行划分, 对交通情况有一定改善, 但拥堵情况仍然存在。此时若从车辆间的实时通信出发, 让车载用户在较短时间内得知前方路况, 可根据实际情况做好

应对措施或提前变更行驶路线。然而, 在复杂场景下车载通信网络有着更加复杂的资源调度方式, 对车辆的分簇管理是能够最大化利用有限通信资源的一种行之有效的方法。采用分簇方法可以使簇内成员将车辆自身状况、附近突发交通路况等信息传递给簇头, 簇头将簇内成员各信息汇总后传递给基站 (Base Station, BS)。同样地, 各个簇内成员接收簇头转发的 BS 接收到的前方其他路况信息。近年

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金 (61872406); 广西自然科学基金 (2018GXNSFBA281057); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划 (T2021001)

作者简介: 杨紫伊, 主要从事车载通信技术方面的研究。

*通信作者 E-mail: xhl_xiaohailin@163.com

来相关学者对不同的车载分簇方法也展开了相应研究^[5-10]。文献 [5] 提出基于时分策略设计和最优分簇长度的车载分簇机制, 该算法需要输入集群的长度才能进行分簇。但是, 为动态道路交通预先估计不同车辆集群的长度既复杂又不方便。文献 [6] 通过迭代优化 k-means 分簇算法实现车辆的动态分类, 且快速选择出计算复杂度较低、合适的簇头车辆。文献 [7] 提出一种两级聚类方案, 用于 5G 中 V2X 通信的高效数据传播, 旨在减少 LTE (Long Term Evolution) 基站网关选择的迭代次数, 不仅降低了计算成本, 而且调整了 LTE 基站的网关数量。但是, 系统的稳定性仍需进一步提升。文献 [8] 设计了一种基于谱聚类算法和改进的力导向算法的新型聚类算法, 以所有簇的平均寿命为优化条件, 从而增强整个系统的稳定性。同时, 网络生命周期的延长有利于提高信息的传输效率。文献 [9] 利用一种高效的簇头选择方案选择最合适的簇头, 由此保证网络中适当的聚类分布, 提高簇头及簇成员的寿命, 降低了系统的整体开销和数据包延迟。文献 [10] 提出基于车联网动态分簇的路由协议, 以最大限度延长网络使用寿命, 提高数据包传输效率。但仍需要有效优化车辆间的通信时延, 进而提高车载通信系统的整体性能。

同时, 城市十字路口处交通状况错综复杂, 通过获取实时交通流信息, 利用交通信号灯控制机实现对信号灯变化的控制, 完成对车流的有效疏导, 减少车辆排队等待及空等的现象^[11], 在世界城市化进程中城市交通拥堵的问题也引起了广泛关注^[12-14]。文献 [12] 利用车路协同技术, 在单向道路上对交通信号灯进行协调控制, 仅实现了对单向道路的协调控制。文献 [13] 提出了一种深度强化学习模型来控制红绿灯周期, 提高信号灯控制效率。文献 [14] 通过提出的 TSC (Traffic Signal Control) 系统实现对交通信号灯的控制, 并且利用 Q-Learning 对各道路间的信号进行平衡, 有效缓解了交通拥堵的状况, 但忽略了道路交通状况的时变性以及车辆间的信息交互。

基于上述考虑, 本文在 C-V2X 车载通信系统中, 利用改进 DEEC 分簇算法, 选择剩余节点能量较高的车辆节点作为簇头, 提高簇的生存时间, 再通过中继车辆进行信息传输以降低交叉路口处车辆的通信时延, 交通信号控制机根据 BS 收集到的路况信息, 利用 Webster 交通灯改进配时算法, 进行相应的信号灯相位调度和周期的配时以减少车辆等

待时间, 从而解决当前亟待处理的城市道路中的交通拥堵问题。

1 模型建立

1.1 模型描述

本文选取城市中拥堵的十字路口场景, 如图 1 所示, 交叉路口正中心处有一交通信号灯, 在此交通信号灯上设置一个小型 BS, 路口处有众多行驶的车辆, 各车道的车辆按照道路的方向行驶。其中, 黑色虚线圈出的车辆处于同一个车辆集群, 白色车辆为簇头车辆。整个车载通信网络的通信包括: 簇内成员与簇头间进行 V2V (Vehicle-to-Vehicle) 通信, 簇内成员将自身车辆信息、周边重要交通路况信息等信息通过 V2V 通信传递给簇头; 簇头将信息汇总后通过 V2I (Vehicle-to-Infrastructure) 通信传递给 BS, 通过与 BS 的信息交互可以及时得知前方道路的拥堵、畅通或有事故发生预警等主要情况; 簇头通过广播的形式将信息传递给簇内成员。之后, 交通信号控制机根据簇头收集各道路的交通情况后对交通信号灯进行相应调度。

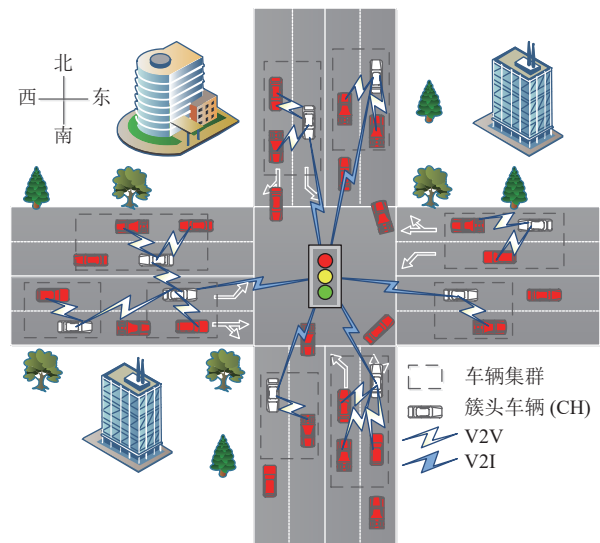


图 1 城市十字路口处车辆分簇场景

1.2 系统总初始能量分析

假设 N 个车辆节点随机地分布在以交通信号灯为原点的 $m \times m$ 大小区域内的十字路口处, 车载网络中的车辆节点以自身的剩余能量高低被选取为簇头或者簇内成员, 进而形成车载簇形网络结构。车载网络中各个车辆节点 n_i 的初始能量设为 $E_0(1+a_i)$, 随机分布于 $[E_0, E_0(1+a_{\max})]$ 区间内, 且不完全相同, $a_i \in [0, a]$, E_0 、 $E_0(1+a_{\max})$ 分别是车辆节点初始能量的最小值和最大值。整个车载网络

中所有车辆节点的总初始能量表示为:

$$E_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N E_0(1+a_i) = E_0 \left(N + \sum_{i=1}^N a_i \right) \quad (1)$$

2 改进的 DEEC 车载分簇算法

2.1 车辆节点能耗分析

在车载网络中, 作为簇头的车辆节点在簇头选举的每轮运作周期内, 会消耗相应的能量, 包括: 与 BS 通信所消耗的能量 E_c , 与簇内车辆节点间的通信能耗 E_c , 簇头收集簇内车辆节点的相应信息进行融合所需要的能耗 E_m 。簇头车辆节点的总能耗可以表示为:

$$E_v = \left(\frac{N}{u} - 1 \right) E_c + \frac{N}{u} E_m + E_e = \begin{cases} \left(\frac{N}{u} - 1 \right) l E_{e_0} + \frac{N}{u} l E_{m_0} + l E_{e_0} + l \varepsilon_f \bar{d}^2 & \bar{d} \leq d_0 \\ \left(\frac{N}{u} - 1 \right) l E_{e_0} + \frac{N}{u} l E_{m_0} + l E_{e_0} + l \varepsilon_{mp} \bar{d}^2 & \bar{d} > d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, u 为簇头车辆的数量; E_{e_0} 为发送或接收单位比特电路的能耗; E_{m_0} 为簇头对收集到的信息进行融合的单位比特信息的能耗; l 为数据包的长度; \bar{d} 为簇头车辆节点与 BS 间的平均距离; d_0 为通信距离的阈值, $d_0 = \sqrt{\varepsilon_f / \varepsilon_{mp}}$; ε_f 、 ε_{mp} 为数据在传输时的不同功率放大倍数。当 $d < d_0$, 车辆节点的功率放大模型采用自由空间能耗模型; 当 $d \geq d_0$, 采用多路径能耗模型。

本文以十字路口正中心处的交通信号灯为原点, 建立直角坐标系, 即 BS 在原点处, 坐标为 (0,0), 则可得簇头车辆节点与 BS 间的平均距离为:

$$\bar{d} = \int \sqrt{x^2 + y^2} \frac{1}{A} dA \quad (3)$$

式中, (x,y) 表示簇头车辆的位置坐标; A 表示整个车载网络区域的面积大小, 且 $A = m^2$ 。

簇内成员将自身的数据信息、周边重要路况信息等通过 V2V 通信发送给簇头车辆节点, 簇内成员与簇头节点间的平均距离 d_c 应小于通信距离阈值 d_0 , 每轮运作周期内簇内成员与簇头间通信的能耗表示为:

$$E_{CH} = l E_{e_0} + l \varepsilon_f d_c^2 \quad (4)$$

$$d_c = \iint ((x-x')^2 + (y-y')^2) \rho(x,y) dx dy = \iint (r^2 \rho(r,\theta)) r dr d\theta = \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{m}{\sqrt{m\pi}}} r^3 dr d\theta = \frac{m^2}{2\pi u} \quad (5)$$

式中, (x',y') 为簇内车辆节点的位置坐标; ρ 表示

簇头车辆节点的密度, $\rho = u/m^2$ 。

综上, 可得单个车辆簇在平均每轮选举周期内的总能耗为:

$$E_c = E_v + \left(\frac{N}{u} - 1 \right) E_{CH} \approx E_v + \frac{N}{u} E_{CH} \quad (6)$$

平均每轮周期整个车载网络的总能耗为:

$$E = u E_c = \begin{cases} l(2N E_{e_0} + N E_{m_0} + \varepsilon_f (u \bar{d}^2 + N d_c^2)) & \bar{d} \leq d_0 \\ l(2N E_{e_0} + N E_{m_0} + \varepsilon_{mp} (u \bar{d}^2 + N d_c^4)) & \bar{d} > d_0 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 簇头车辆节点的选举

整个车载网络的分簇过程是以“轮”为工作周期, 各个车辆节点的初始能量各不相同, 在每个选举周期之后, 剩余的能量也不相同, $E_{n_i}(r)$ 、 $\bar{E}(r)$ 分别表示第 r 轮时车辆节点 n_i 的剩余能量和整个车载网络的平均剩余能量。则车辆节点 n_i 成为簇头车辆的平均概率为:

$$p_{n_i} = \frac{p_{\text{opt}} N (1+a_i) E_{n_i}(r) \left(\frac{d_s}{A} \right)^2}{\left(N + \sum_{i=1}^N a_i \right) \bar{E}(r)} \quad (8)$$

式中, p_{opt} 表示簇头车辆节点占有所有车辆节点的比例; r 表示当前选举过程的轮次; d_s 表示车辆节点 n_i 与汇聚节点间的距离。

改进后的分簇方案为了均衡车载网络的整体能耗, 使拥有较高剩余能量的车辆节点能够优先成为簇头, 将车辆节点自身剩余能量与车载网络的平均能量之比以及最佳簇头数量因子添加到阈值公式中^[15]。改进后的阈值公式为:

$$T(n_i) = \begin{cases} \frac{p_{n_i}}{1 - p_{n_i} \left(r \bmod \frac{1}{p_{n_i}} \right)} \frac{E_{n_i}(r)}{\bar{E}(r)} u_{\text{opt}} & n_i \in V \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中, V 表示所有车辆节点中上一轮未被选中为簇头的车辆节点。最佳簇头数量表示为:

$$u_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{N}{2\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{mp}}} \frac{A}{d^2} \quad (10)$$

由式 (9) 可以看出拥有较高剩余能量的车辆节点被选举为簇头的概率增大, 整个车载网络的能量利用率有所提高, 生存周期得以延长。车载通信网络中的簇头车辆节点一旦确定后, 就会向周围车辆节点广播自身的簇头信息, 非簇头车辆节点收到各簇头车辆的信息后, 会发送自身想要加入簇的请求

信息给簇头，以便加入相应的簇内。当然，能够收到该消息的簇头便是非簇头车辆收到的信号最强的簇头，以此形成车载网络的簇形结构，使车辆节点间的信息传递更加及时。

2.3 通信时延分析

车载通信网络中，车辆信息及重要路况信息的传输分为等待和传输两个不同阶段，相应的时延分别为 T_w 和 T_t 。得到总时延 T_D ：

$$T_D = T_w + T_t \quad (11)$$

簇头车辆节点在广播时，信息到达率为 λ ，在一个时间段 τ 内，发出 k 条信息，分布率可以表示为^[16]：

$$P(K(t+\tau) - K(t) = k) = \frac{e^{-\lambda\tau}(\lambda\tau)^k}{k!} \quad (12)$$

式中， $K(t)$ 表示广播信息时发出信息的数量。

信息的广播有着对应的周期，而 $E(k)$ 是单个周期里所包含信息个数的均值，信息广播的单个周期内包含的信息总量有以下对应关系：

$$C_k E(k) \leq \frac{C}{10} \quad (13)$$

式中， C_k 表示每条信息所含的信息量； C 表示信道容量。信息从 BS 通过簇头车辆节点转发，广播给其他车辆节点，相应信道忙时的概率为：

$$p_b = \frac{10C_k E(k)}{CV_i} \quad (14)$$

式中， V_i 表示簇内车辆节点的数目。

在信息广播周期内，平均等待时延为：

$$T_w = \frac{p_b}{(1-p_b)\mu_f} \quad (15)$$

式中， μ_f 表示平均服务率。

当 BS 收到各簇头收集到的各簇内车辆的车况、道路交通拥堵或交通事故等重要路况信息，再将汇总的信息及各道路的具体情况发送给簇头车辆节点，簇头车辆节点收到信息后，立即向簇内车辆节点广播信息，此时接收到簇头信息的车辆都在簇头车辆能够进行 V2V 通信的有效半径 R 内。在此期间，簇头车辆对消息进行转发从而产生的传输时延为：

$$T_t = \frac{s}{v_e} + \frac{\sigma}{\bar{C}_v} \quad (16)$$

式中， σ 表示信息传输过程中信息量的大小； s 表示簇头车辆节点传输信息到接收的车辆节点间的距离； v_e 表示信道中信息传输时的电磁波传播速率；

\bar{C}_v 表示车辆节点间进行信息传输的平均传输速率，为：

$$\bar{C}_v = \frac{1}{u_i} \sum_{n_1, n_2 \in u_i} \left(B_{n_1 n_2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{n_1 n_2} L(d_{n_1 n_2}, f_{n_1 n_2}) h_{n_1 n_2}}{\sigma_{n_1 n_2}^2} \right) \right) \quad (17)$$

式中， u_i 表示两个通信车辆节点间路段内的车辆数； L 表示自由空间中信息传输的路径损耗；下标 $n_1 n_2$ 表示车辆 n_1 到车辆 n_2 ； $B_{n_1 n_2}$ 为信道带宽； $P_{n_1 n_2}$ 表示发射功率； $d_{n_1 n_2}$ 表示两车间的车距； $h_{n_1 n_2}$ 表示对应的信道增益； $f_{n_1 n_2}$ 表示车辆 n_1 向车辆 n_2 发射的信号中心频率； $\sigma_{n_1 n_2}^2$ 表示对应信道的噪声干扰功率。

车辆节点与簇头车辆间的 V2V 通信是在有效半径内，如果对应通信距离 S 满足 $R \leq S \leq 2R$ 时，利用与信息发送端及接收端间距离之和最小的一辆中继车辆来转发路况信息；如果对应通信距离 $2R \leq S \leq 3R$ ，需要通过两辆中继车辆传输路况信息，即利用首辆中继车辆接收信息后，寻找第二辆中继车辆继续转发信息，选择中继车辆的方式与之前相同。

为了降低车载通信时延，加快交通拥堵、交通事故等情况下的重要路况信息的传递效率，利用一辆中继车辆进行信息传输的示意图如图 2 所示，白色的簇头车辆 O_x 是信息的发送端，那么将 O_x 视为圆心，对应的有效通信半径为 R ，同时将 R 视为车辆簇的半径，车辆 O_y 为信息接收端，接收到信息立即在其通信范围内广播重要路况信息给其他车辆，此时能够接收到信息的车辆全都可以看成是车辆簇半径内的中继车辆。若 O_x 与邻近簇头车辆间的距离 $2R \leq S \leq 3R$ 时，发送信息的簇头车辆也可被视为车辆 O_y 。

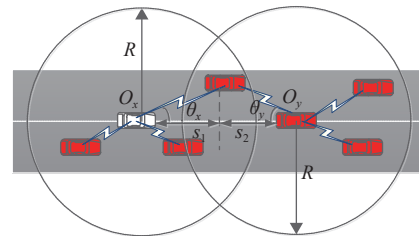


图 2 一辆中继车辆信息传输示意图

在相邻的车辆簇间进行信息传输的过程中，为了降低信息的传输时延，通过一辆中继车辆进行信息传输的总路径为：

$$s_{\text{once}} = \frac{s_1}{\cos \theta_x} + \frac{s_2}{\cos \theta_y} \quad (18)$$

$$\text{s.t. } s \in (R, 2R)$$

$$\theta_x, \theta_y \in \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$$

式中, s_1 、 s_2 分别表示 O_x 与中继车辆、 O_y 与中继车辆在平行道路方向上的投影距离; θ_x 、 θ_y 分别表示 O_x 与中继车辆间的连线、 O_y 与中继车辆间的连线同平行于道路方向间的夹角。

通过信息传输所经过的路程与信息传输速率的比值计算信息传输的时间, 进而可得一辆中继车辆传输情况下的时延为:

$$t_{\text{once}} = \frac{s_{\text{once}}}{v_e} + \frac{\sigma}{\bar{C}_v} = \frac{(s_1 \tan \theta_x + s_2 \tan \theta_y) \bar{C}_v + v_e \sigma}{v_e \bar{C}_v} \quad (19)$$

同理可知, 当图 2 中信息接收车辆 O_y 为簇头车辆时, 同样能够满足利用一辆中继车辆进行传输的条件, 即可以与信息发送车辆 O_x 利用同样的中继传输方式, 将重要路况信息通过广播的方式传递给其他簇内车辆节点。

当信息发送与接收车辆节点间的距离 $2R \leq S \leq 3R$ 时, 利用两辆中继车辆进行信息传输, 发送端 O_x 将信息传输给第一辆中继车辆后, 再将信息转发至第二辆中继车辆, 通过第二辆中继车辆将信息最终传递给信息接收端 O_z 。若作为发送端的簇头车辆与相邻的另一簇头车辆间满足两辆中继车辆信息传输的距离时, 那么与之相邻的另一簇头车辆即可作为信息接收车辆 O_z , 如图 3 所示。

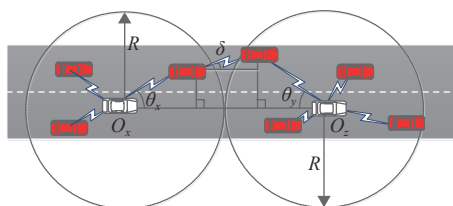


图 3 两辆中继车辆信息传输示意图

由此可得, 通过两辆中继车辆进行信息传输时的传输总路径为:

$$s_{\text{twice}} = \frac{R(2 \cos \delta + 2 - \cos \theta_x - \cos \theta_y)}{\cos \delta} \quad (20)$$

$$\text{s.t. } s \in (2R, 3R)$$

式中, δ 表示第一辆中继车辆与第二辆中继车辆间的连线同行驶方向间的夹角。

利用两辆中继车辆进行信息传输情况下的时延为:

$$t_{\text{twice}} = \frac{s_{\text{twice}}}{v_e} + \frac{\sigma}{\bar{C}_v} = \frac{(2 \cos \delta + 2 - \cos \theta_x - \cos \theta_y) R \bar{C}_v + v_e \sigma \cos \delta}{v_e \bar{C}_v \cos \delta} \quad (21)$$

3 交通信号灯改进配时算法

在稳定的车载分簇网络的基础上, BS 通过与簇头的实时通信, 可以收集路口处各道路的重要路况信息, 根据 BS 汇总的路况信息, 通过十字交叉路口的交通信号控制机进行实时调度, 路口处各道路的交通流量利用改进配时算法进行相应的信号灯相位显示时间和周期的配时, 进而减少路口处车辆通行的延误时间及等待红绿灯时的排队长度, 缓解交通拥堵。

本文考虑的十字交叉路口处有东、南、西、北 4 个方位的道路, 每一个方位的道路都包含车辆进口道和出口道, 分别都有直行和转弯的车辆, 右转弯车辆默认不受限 (所以在图 4 中未出现右转信号)。根据交叉路口的实际交通情况, 采用定时控制交通信号灯, 将十字交叉路口处 4 个方向上不同的交通信号组合起来, 设置 4 相位配时方案, 组合设置后的 4 个相位如下图 4 所示。

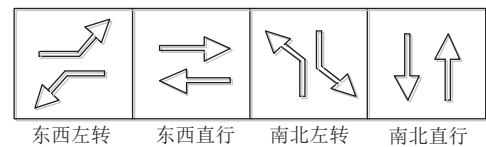


图 4 交通信号相位设置

本文改进后的交通信号灯配时算法优化了信号灯的最佳信号周期时长和 4 个不同信号相位分别对应的显示时长。BS 通过 V2I 通信从簇头处收到路口实时车流量信息, 进而统计出各个交通灯相位车流量与十字交叉路口处总车流量之比之和 Y_s :

$$Y_s = \sum_{p=1}^n y_p = \sum_{p=1}^n \frac{q_p}{s_p} \quad (22)$$

式中, q_p 、 s_p 分别表示交通信号灯第 p 交通信号相位的车流量和对应的饱和车流量; $n=4$ 表示有 4 个交通信号相位。

十字交叉路口处的交通信号灯, 通过对来自东、南、西、北 4 个方向车辆的行进或停止等状态进行调控, 使车辆有次序地通过路口, 从而避免交通意外的发生。当一部分车辆在交叉路口通行时, 会有一部分车辆在停车线内等待通行, 以避免行驶方向的冲突, 停止线内各个车辆的平均等待时延

d_v 可以表示为^[17]:

$$d_v = \frac{c(1-\varphi)^2}{2(1-\varphi x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65\left(\frac{c}{q^2}\right)^{0.5} x^{(2+5\varphi)} \quad (23)$$

式中, c 表示交通信号灯的总周期时长; q 表示十字交叉路口处车辆的到达率; x 表示车流量的饱和度和, 是道路的实际车流量与十字交叉路口处所能通过的最大车流量之比; φ 表示信号相位的绿信比, 即对应某一相位车辆可通行时的绿灯时间与 c 的比值。

在十字交叉路口处, 车辆因为信号灯颜色的变换, 红灯亮起时会停止前进, 绿灯时会起步通行。而在传统的 Webster 算法中, 对车辆在停止线内的等待时间进行计算时, 当红灯变换为绿灯时, 车辆从等待红灯时的停车点处到行驶过停止线的时间未被考虑^[18-19], 将这一时间考虑到车辆平均等待时间的公式中, 改进后的各车辆平均等待时间为:

$$d_v = \frac{c(1-\varphi)^2}{2(1-\varphi x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65\left(\frac{c}{q^2}\right)^{0.5} x^{(2+5\varphi)} + \frac{s_t + s_c}{v_v} \quad (24)$$

式中, s_t 表示车辆等待红灯时的停车点与路口处停止线间的距离; s_c 表示车辆的车身长度; v_v 表示车辆行驶过十字交叉路口时的速度。

经过交通信号灯相位配置后的十字交叉路口处, 4 个相位的车流量在停止线内的总等待时间 D 的最小值表示为式 (25), 此时, c 需要最小阈值的限制表示为式 (26):

$$D_{\min} = \sum_{p=1}^n d_p q_p \quad (25)$$

$$c \geq \frac{L_T}{1 - y_{\max}} \quad (26)$$

式中, d_p 表示交通信号灯第 p 相位车辆的平均等待时延; y_{\max} 表示路口处的四相交通信号灯中某一相车流量的最大值; L_T 表示在经过配置后的各相交通信号灯的损失时间之和。

通过对式 (24) 中的总周期时长 c 求导, 其中第二、三项忽略不计 (是车辆行驶到达停止线的到达率随机产生的误差), 可得车辆行驶在十字交叉路口处时延最小时的最佳信号周期 c_0 为:

$$c_0 = \frac{1.5L_T + 5}{1 - Y_s} \quad (27)$$

在式 (24) 中, 交通信号灯相位的饱和度 x 趋近于 1 时的时延结果并不准确。由于信号灯的变换,

车辆在向路口行进的过程中可能会停车。此时, 将停车的因素以及停车次数考虑进车辆在路口处通行所产生的延误时间中, 同时引入停车补偿系数 ν ^[20], 以此建立起能够评价信号灯周期配时方案的综合性指标 G , 即:

$$G = D + \nu H \quad (28)$$

式中, H 表示第 p 相位路口处的实际车流量与该相位所对应的饱和车流量间的比值。

经推导可得改进后的车辆时延最小时的最佳信号周期 c_0 为:

$$c_0 = \frac{(1.4 + \nu)L_T + 6}{1 - Y_s} \quad (29)$$

式中, ν 作为停车补偿系数, 可以按照交通灯配时改进的不同需求分别取不同的值。通常考虑当 $\nu = 0.2$ 时车辆行驶过程中平均运营消耗 (包括车辆的延误、停车等待等) 最小的情况, 这样使得改进后的配时方案在实际运用中呈现的效果更好, 在数值仿真过程中得出更为真实的数据结果。

第 p 相位的绿灯所显示的时间 T_p 为^[21]:

$$T_p = (c_0 - L_T) \frac{y_p}{Y_s} - T_{NG} + l_{T_p} \quad (30)$$

式中, T_{NG} 表示对应交通信号灯周期内红灯和黄灯的显示时间; l_{T_p} 表示信号灯的单相信号所损失的时间。

为了方便后续的计算, 第 p 相位信号灯绿信比的公式可简化为:

$$\varphi_p = \frac{T_p}{c} \approx \frac{(c_0 - L_T)y_p}{cY_s} \quad (31)$$

各个相位的总绿信比为:

$$\varphi = \sum_{p=1}^n \lambda_p = \frac{c_0 - L_T}{c} \quad (32)$$

车流量的饱和度 x 可以表示为:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n x_p = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n \frac{q_p}{Q_p N_v} \quad (33)$$

式中, x_p 、 Q_p 分别表示第 p 相位所对应的道路上车辆的饱和度、通行能力; N_v 表示交叉路口行驶车辆的平均数。

第 p 相位所对应道路的车辆通行能力 Q_p 为:

$$Q_p = (c_0 - L_T) \frac{y_p s_p}{Y_s c} \quad (34)$$

综合以上, 改进后的交通灯配时算法步骤如下。

1) BS 从各个簇头车辆处收集东、南、西、北 4 个方向车流量的信息并进行汇总, 进而设计路口处对应信号相位的配时方案, 并估算出东、南、西、北 4 个方向车道的饱和流量 s_p ;

2) 通过交通信号灯设计方案的每个相位对应的车流量之比 $y_p = \frac{q_p}{s_p}$, 得出十字交叉路口各相位车流量之比的和 Y_s ;

3) 对十字交叉路口每个相位对应的车流量之比的和与道路通行能力的阈值进行比较, 若 $Y_s \leq 0.9$, 则进行步骤 4), 否则回到步骤 1), 重新设计路口的交通信号灯配时方案;

4) 计算改进配时方案后信号灯的最佳信号周期 c_0 , 以及车辆通行时对应 4 个相位信号绿灯的实际显示时间 T_p ;

5) 得到改进后的十字交叉路口处交通信号灯整体配时时间。

4 数值仿真分析

首先分析了改进的 DEEC 分簇算法与其他分簇算法中簇头存活的数量、传输的数据量及信息传输时延的影响。并利用微观交通仿真平台 VISSIM 所建模的桂林市某十字交叉路口处的交通仿真场景, 模拟不同交通灯配时方案下车流经过十字路口的情况, 以验证本文基于改进的 DEEC 车载分簇的交通灯改进配时方案的有效性。具体数值仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名	设定值
场景覆盖范围	400 m×400 m
轮数	8 000
初始能量 E_0/J	0.5
电磁波在信道上的传播速率/ $m \cdot s^{-1}$	3×10^8
多径衰落系数 $\epsilon_{mp}/pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^2$	0.001 3
自由空间传播损耗系数 $\epsilon_f/bit \cdot m^{-2}$	10
能量消耗系数/ $nJ \cdot bit^{-1}$	50
信息服务率	0.7
车载终端发射功率/dBm	20
信道带宽/MHz	40

图 5 所示, 将改进的 DEEC 分簇算法与传统的 DEEC、SEP (Stable Election Protocol)、LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)、LEACH-E (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Extension) 4 种分簇算法进行对比。通过相同的循环轮数后, 改进的 DEEC 分簇算法相

于其余 4 种分簇算法整体生命周期得以延长。这是由于在选举簇头车辆节点时, 阈值公式中考虑了车载网络中车辆的剩余能量, 还考虑了车载网络的平均能量, 调整了车辆节点选举成为簇头的概率, 使车载网络的整体能耗更加均衡, 延长了车载网络的整个生命周期。

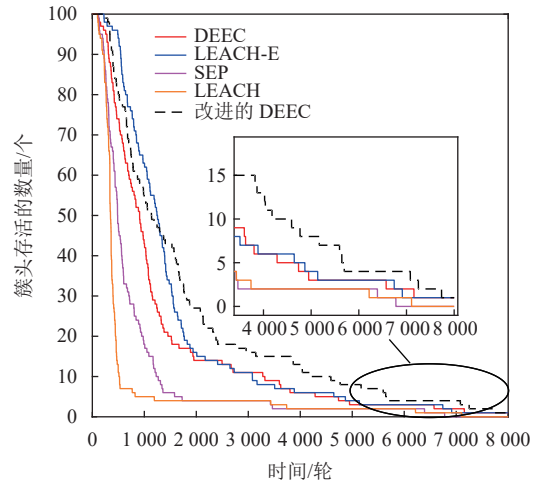


图 5 对应的分簇算法下生命周期对比

如图 6 所示, 将改进的 DEEC 分簇算法与传统的 DEEC、SEP、LEACH、LEACH-E 这 4 种分簇算法的传输数据量进行对比。改进的 DEEC 分簇算法相较于其余 4 种分簇算法传输数据量明显增大, 这是由于车载网络在分簇过程中, 通过更新后的簇头车辆节点与簇内其他车辆节点进行广播通信, 利用中继车辆转发进行信息传输, 扩大了车载网络的通信范围, 减少了 BS 与车辆节点间通信时的信息传递次数和通信时延。

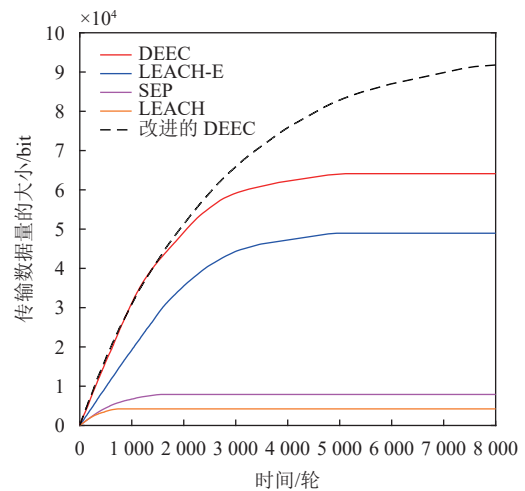


图 6 改进的 DEEC 算法与其他算法传输数据量的对比

图 7 为不同的车载信息到达率下, 信息传递过程中所产生的平均等待时延关系。在改进的

DEEC 分簇算法中, 车辆簇内不同的成员数量会影响车载通信的平均等待时延。在簇内成员数不变时, 随着信息到达率的增大, 车载信息传递过程中所产生的平均等待时延会更高。因此, 车辆簇内的成员数量会影响车辆在信息传递过程中的通信时延。

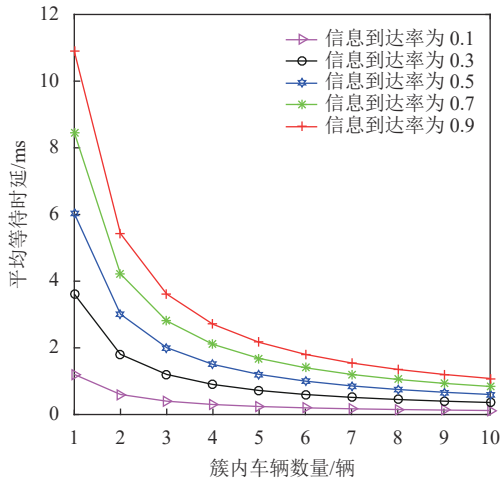


图 7 分簇情况不同时对应的平均等待时延

将基于改进的 DEEC 分簇算法中车载信息传输所产生的通信时延与文献 [22]5G 虚拟小区中利用分簇对不同信息传输所产生的时延进行对比, 如图 8 所示。可以看出, 在 800 m 的车辆通信距离内, 基于改进 DEEC 算法所产生的信息传输时延比文献 [22] 中发送紧急信息和非紧急信息时的传输时延都小, 在车辆间通信距离为 800 m 时, 信息传输时延减少了 3.1 ms。

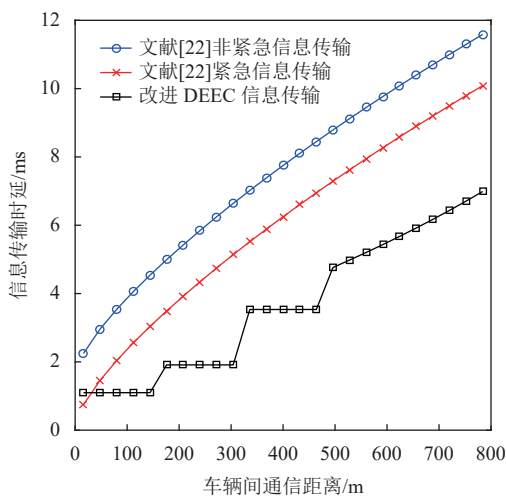


图 8 车辆间通信距离与信息传输时延关系曲线

在 VISSIM 中对交通信号灯改进配时算法与传统 Webster 算法进行仿真后, 将各个方向道路车辆的延误时间以及平均排队长度进行对比, 如图 9 和

图 10 所示。由图可知, 两种配时算法相比之下, 基于改进配时算法产生的东、南、西、北 4 个进口道的车辆延误时间均有所减少, 平均排队长度皆有所下降, 提高了十字交叉路口车辆的通行效率, 改善了路口车流量大时的交通拥堵状况。

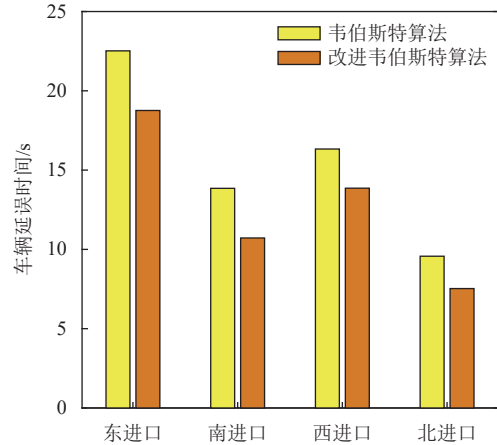


图 9 各个方向进口道的车辆延误时间对比图

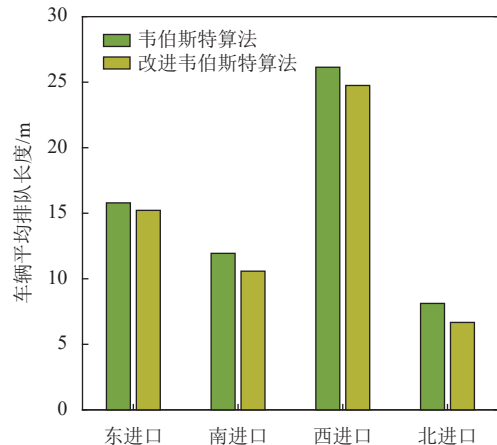


图 10 各个方向进口道的车辆平均排队长度对比图

5 结束语

本文针对城市道路中十字路口处的车辆拥堵与排队等待问题, 提出了基于 DEEC 车载分簇的交通灯改进配时方案。首先, 通过对拥堵十字交叉路口处的车辆进行动态分簇, 簇头车辆通过 V2X 通信分别与 BS 和簇内车辆进行信息交互, 利用中继车辆进行信息传输以降低通信时延; 再利用簇头车辆整合收集到的信息以及 BS 中来自各簇头收集的各道路重要路况信息, 通过交通信号灯配时算法实现交通信号控制机对信号灯的实时调控。数值仿真结果表明: 本文方案减少了车辆通信时延以及车辆等待时间, 改善了交通拥堵的问题。

参考文献

- [1] GUIDONI D L, MAIA G, SOUZA F S H, et al. Vehicular traffic management based on traffic engineering for vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 45167-45183.
- [2] 李波, 刘雪, 冯菁翠, 等. 5G 蜂窝网辅助的车载自组网数据传输机制与路由算法[J]. *电子科技大学学报*, 2021, 50(3): 321-331.
- LI B, LIU X, FENG J C, et al. V2V data transmission mechanism and routing algorithm in 5G cellular network-assisted vehicular ad-hoc networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2021, 50(3): 321-331.
- [3] ZHENG X J, ZHENG R H, NING S D. Parking space allocation model of intelligent parking lot under peak demand[C]//Proceedings of the IEEE 25th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. New York: IEEE, 2022: 543-547.
- [4] GE X H, XIAO S Y, HAN Q L, et al. Dynamic event-triggered scheduling and platooning control co-design for automated vehicles over vehicular ad-hoc networks[J]. *CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(1): 31-46.
- [5] WANG J H, LIU K, XIAO K, et al. Dynamic clustering and cooperative scheduling for vehicle-to-vehicle communication in bidirectional road scenarios[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(6): 1913-1924.
- [6] XIAO H L, CHEN Y H, ZHANG Q Y, et al. Joint clustering and power allocation for the cross roads congestion scenarios in cooperative vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(6): 2267-2277.
- [7] KHAN Z, FAN P Z, ABBAS F, et al. Two-level cluster based routing scheme for 5G V2X communication[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 16194-16205.
- [8] LIU G, QI N, CHEN J X, et al. Enhancing clustering stability in VANET: A spectral clustering based approach[J]. *China Communications*, 2020, 17(4): 140-151.
- [9] BANIKHALAF M, AHMAD K M. A simple and robust clustering scheme for large-scale and dynamic VANETs[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 103565-103575.
- [10] SENNAN S, RAMASUBBAREDDY S, BALASUBRAMANIAM S, et al. MADCR: Mobility aware dynamic clustering-based routing protocol in Internet of Vehicles[J]. *China Communications*, 2021, 18(7): 69-85.
- [11] WANG H, ZHU M X, HONG W S, et al. Optimizing signal timing control for large urban traffic networks using an adaptive linear quadratic regulator control strategy[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(1): 333-343.
- [12] GAO K, HAN F R, WEN M F, et al. Coordinated control method of intersection traffic light in one-way road based on V2X[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(9): 2516-2527.
- [13] LIANG X Y, DU X S, WANG G L, et al. A deep reinforcement learning network for traffic light cycle control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(2): 1243-1253.
- [14] JOO H, AHMED S H, LIM Y. Traffic signal control for smart cities using reinforcement learning[J]. *Computer Communications*, 2020, 154: 324-330.
- [15] BAGGA S, CHAWLA N, SHARMA D K, et al. Fuzzy logic based clustering algorithm to improve DEEC protocol in wireless sensor networks[C]//2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). New Delhi: IEEE, 2019: 212-216.
- [16] 孙健, 李宏智, 郭灵波, 等. VANET 中一种安全消息拥塞控制机制[J]. *通信学报*, 2014, 35(5): 134-140.
- SUN J, LI H Z, GUO L B, et al. Congestion control mechanism in VANET for safety messaging[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(5): 134-140.
- [17] PANDIT K, GHOSAL D, ZHANG H M, et al. Adaptive traffic signal control with vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(4): 1459-1471.
- [18] ADEKE P T, ATOO A A, ZAVA A E. Traffic signal design and performance assessment of 4-leg intersections using webster's model: A case of 'srs' and 'b-division' intersections in makurdi town[J]. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2018, 5(5): 1253-1260.
- [19] WEBSTER F V. Traffic signal settings[EB/OL]. [2023-02-23]. <https://trid.trb.org/view/113579>.
- [20] RAHMI A. Traffic signals: Capacity and timing analysis[J]. *Australian Road Research Board*, 1981, 15(6): 505.
- [21] ALKANDARI A, AL-SHAIKHLI I F, ALHADDAD A. Optimization of traffic control methods comparing with dynamic webster with dynamic cycle time (DWDC) using simulation software[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Natural Computation. New York: IEEE, 2014: 1071-1076.
- [22] SAHIN T, KLUGEL M, ZHOU C, et al. Virtual cells for 5G V2X communications[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(1): 22-28.