

# 基于网络效用最大化理论的分布式车联网拥塞控制策略

谭国真<sup>1</sup>, 韩国栋<sup>1</sup>, 张福新<sup>2</sup>, 丁男<sup>1</sup>, 刘明剑<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学计算机与科学技术学院, 辽宁 大连 116024; 2. 山东科技大学计算机科学与工程学院, 山东 青岛 266590;  
3. 大连海洋大学信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 协同车辆安全系统依靠周期性广播的单跳数据分组来追踪周围车辆, 车辆密度过高会导致信道拥塞, 严重影响协同车辆安全系统的性能。现有的拥塞控制策略仅保证网络层的性能, 没有考虑车辆不同交通场景下的微观服务需求。为解决该问题, 提出了一种基于网络效用最大化理论的分布式拥塞控制策略。该策略首先提出了车联网信道资源分配的网络效用最大化模型, 并且提出了反映车辆安全需求的效用函数; 然后基于该模型, 建立了传输功率固定条件下无线信道资源分配的优化问题; 最后为求解该优化问题, 设计了分布式拥塞控制算法 UBRCC, 该算法通过更新车辆的拥塞“价格”求解最优数据分组发送速率, 实现了面向单个车辆安全需求的信道资源分配。仿真实验结果表明, UBRCC 算法在控制信道拥塞的同时, 能够有效地减小传输时延, 确保数据分组可靠发送, 满足车辆安全应用的服务需求。

**关键词:** 协同车辆安全系统; 车联网; 拥塞控制; 公平性; 网络效用最大化

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019040

## Distributed congestion control strategy using network utility maximization theory in VANET

TAN Guozhen<sup>1</sup>, HAN Guodong<sup>1</sup>, ZHANG Fuxin<sup>2</sup>, DING Nan<sup>1</sup>, LIU Mingjian<sup>3</sup>

1. The Computer Science Institute, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

3. College of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

**Abstract:** Cooperative vehicle safety system (CVSS) rely on periodical beacons to track neighboring vehicles. High traffic density often causes channel congestion, seriously damaging the performance of CVSS. Existing congestion control strategies aim to ensure the performance in network layer, without considering the service requirements of vehicles in different driving contexts. To solve the problem, a distributed congestion control strategy using network utility maximization (NUM) theory was proposed. First of all, the NUM model for channel resource allocation was introduced. A utility function reflecting vehicle's safety requirements was proposed in the model. Then under the condition of fixed transmit powers, a optimization problem of channel resource allocation was proposed. Lastly, to solve the optimization problem, a distributed congestion control algorithm named utility-based rate congestion control (UBRCC) algorithm was designed, the algorithm worked out the optimal beaconing rate by updating vehicle's congestion price, realizing the resource allocation according to vehicle's safety requirements. Simulation results validate that UBRCC algorithm can efficiently control channel congestion, reduce transmission delay, ensure reliable data transmission and satisfies the requirements of safety applications.

**Key words:** cooperative vehicle safety systems, VANET, congestion control, fairness, network utility maximization

收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-04-10

基金项目: 国家高科技基金资助项目 (No.2012AA111902); 国家自然科学基金资助项目 (No.61471084); 山东省自然科学基金资助项目 (No. ZR201709210163); 山东科技大学人才引进科研启动基金资助项目 (No.2017RCJJ044)

**Foundation Items:** The National High-Tech Projects (No.2012AA111902), The National Natural Science Foundation of China (No.61471084), The Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR201709210163), The Scientific Research Foundation of Shandong University of Science and Technology for Recruited Talents (No. 2017RCJJ044)

## 1 引言

协同车辆安全性系统 (CVSS, cooperative vehicle safety system)<sup>[1]</sup>作为车联网中最具挑战性的车辆安全应用之一, 依赖周期性广播的单跳数据分组来追踪周围车辆。数据分组中包含车辆的基本状态信息 (如速度、加速度、位置等信息), CVSS 依赖这些数据分组追踪邻居车辆的位置, 从而避免车辆之间的碰撞<sup>[2]</sup>。由 IEEE 设计的 802.11p 协议和 1609.x 协议组成的 WAVE 通信架构专门用于车联网通信, 被美国和欧洲所采用<sup>[3]</sup>。基于这些协议, CVSS 能够通过车车通信探测到潜在的危险, 并且通过及时告警避免车辆之间的碰撞。协同车辆安全系统在车联网安全应用中发挥着重要作用, 据统计, 该系统可以减少一个国家 75% 的交通事故<sup>[4]</sup>。

能否精确地追踪车辆的位置决定了 CVSS 的性能。本文用追踪精度来表示车辆的真实位置和通过数据分组信息计算得到的上一次车辆的位置之间的误差<sup>[5]</sup>。当数据分组的数量超过信道最大负载时, 数据分组间的碰撞将会增加, 从而导致数据分组的接受率下降<sup>[6]</sup>。由于车辆追踪依赖于周期性广播的数据分组, 信道拥塞会严重影响 CVSS 的追踪性能。为了解决该问题, 需要相应的信道拥塞控制策略避免信道拥塞。信道拥塞控制策略主要有 3 种: 1) 调节数据分组的发送速率; 2) 调节传输功率; 3) 同时调节数据分组发送速率和传输功率<sup>[7]</sup>。上述的 3 种方式都可以将信道负载降到最大信道负载 (MBL, maximum beaconing load) 以下。由于 CVSS 中的每辆车依赖周期性数据分组追踪邻居车辆, 因此必须满足信道资源分配的公平性, 公平性确保每辆车均可以获取有限的信道资源与周围车辆进行有效通信<sup>[8]</sup>。传统的信道拥塞控制策略<sup>[9-15]</sup>致力于为每辆车分配相同的信道资源, 并没有考虑单个车辆在不同交通场景下的服务需求, 因此无法做到信道资源的按需分配。文献[16-17]在信道拥塞控制中考虑了车辆的安全需求, 但是所提出的安全权重无法准确描述车辆的安全需求, 同样无法做到信道资源的按需分配, 且在真实的交通场景下, 每辆车的安全需求并不相同。为了保证 CVSS 能够精确追踪车辆, 应该为危险的交通场景下的车辆分配更多的信道资源, 否则由于信道资源分配的不合理, 车辆之间可能会因无法及时有效通信而发生碰撞。

为了根据车辆安全需求按需分配信道资源, 本文提出了一种基于网络效用最大化理论的分布式信道拥塞控制策略。首先, 针对 CVSS 提出了 VANET 下信道资源分配的网络效用最大化模型, 并且在该模型中提出了反映车辆安全需求的效用函数; 然后基于该模型建立了发送功率固定条件下无线信道资源分配的优化问题, 该优化问题以实现所有车辆的效用之和最大化为目标; 最后为了求解该优化问题, 设计了分布式拥塞控制 UBRCC。UBRCC 算法在避免信道拥塞的同时, 实现了面向单个车辆安全需求的信道资源分配。本文的工作主要体现在以下 3 个方面。

1) 针对 CVSS 提出了 VANET 下无线信道资源分配的网络效用最大化模型, 并在该模型中提出了反映车辆安全需求的效用函数。

2) 基于该模型建立了发送功率固定条件下无线信道资源分配的优化问题, 该优化问题以实现所有车辆的效用之和最大化为目标, 即最大化满足所有车辆的安全需求。

3) 设计了分布式拥塞控制算法 UBRCC, 解决了无线信道资源的优化问题, 在避免信道拥塞的同时满足车辆的安全需求。

## 2 信道拥塞策略相关研究

对于传统的信道拥塞控制策略, Torrent-Moren 等<sup>[9]</sup>提出了轻量级信道拥塞控制算法 D-FPAV。该算法中优先级高的数据分组会被优先发送, 可以有效地避免信道拥塞。但是信道最大负载不能自适应于特定的网络环境, 且该算法不能根据车辆的安全需求调整传输功率。Khorakhun 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于信道占有率的功率调节算法, 每辆车根据所测量到的信道占有率调节其传输功率。如果信道占有率超过了门限值, 传输功率会被调低, 但是准确测量信道占有率非常困难, 如果信道占有率测量不准确, 算法的可靠性和性能会受到严重影响。Guan 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于反馈的功率调节算法, 该算法中每辆车根据其邻居车辆的传输功率来调节自身的传输功率。Bansal 等<sup>[12]</sup>提出了基于线性调节的拥塞控制算法 LIMERIC, 该算法中, 每辆车根据单跳传输范围内邻居车辆的数据分组发送速率对自身的传输功率进行线性调整。Tielert 等<sup>[13]</sup>提出了拥塞控制算法 PULSAR, 该算法根据单跳及两

跳传输范围内邻居车辆的数据分组发送速率调节其发送速率,从而实现全局公平性。Bansal 等<sup>[14]</sup>提出了基于车辆追踪精度的拥塞控制算法 EMBARC,当追踪精度超过门限值时,数据分组发送速率将会被提高,然后再根据 LIMERIC 算法将信道负载控制在 MBL 以内。Sepulcre 等<sup>[15]</sup>提出了拥塞控制算法 INTERN,该算法将数据分组发送速率跟传输功率结合起来,首先将传输功率设置为所需的最小值,当信道负载超过门限值时根据 LIMERIC 算法降低数据分组的发送速率。

上述拥塞控制算法<sup>[9-15]</sup>主要依赖信道的状态信息调节数据分组发送速率或者传输功率来控制信道拥塞,然而这些算法存在 2 个缺点:1) 只有检测到信道拥塞之后才能够采取措施控制信道拥塞,信道拥塞控制存在一定的滞后性,在信道负载从拥塞状态恢复之前, CVSS 追踪车辆的误差可能会很大,导致 CVSS 的性能受到严重影响;2) 这些算法主要关注网络层的性能,没有考虑单个车辆的安全需求,因此信道不拥塞时,无法确保每辆车的安全需求得到满足。

近年来,国内外学者对于控制信道拥塞时考虑车辆的安全需求也进行了一定研究。Zhang 等<sup>[16]</sup>引入车辆安全权重的概念来描述交通场景的危险级别,并设计了拥塞控制算法 DNUM,其中,安全权重通过两辆车之间的相对速度和相对位移来计算。该算法基于安全权重还提出了效用函数,通过网络效用最大化理论计算最优数据分组发送速率,但该效用函数没有考虑车辆的驾驶方向,无法准确描述车辆的安全需求,例如两辆车行驶在不同的车道上,虽然安全权重很大,但实际中的交通场景并不危险,因此无法保证车辆的安全需求得到满足。Joerer<sup>[17]</sup>建立了交叉口场景下的车辆碰撞概率模型,该模型使用两辆车的位移、速度、加速度等来计算碰撞概率,如果碰撞概率超过某个门限值,数据分组发送速率将会增加。然而两辆车之间的碰撞概率很难被精确计算,且文献<sup>[17]</sup>中提出的计算方法是否精确有待验证。

针对上述拥塞控制策略存在的问题,本文提出了分布式拥塞控制算法 UBRCC。UBRCC 算法将单个车辆的安全需求考虑在内,在避免信道拥塞的同时公平地按需分配信道资源。与传统的拥塞控制策略相比, UBRCC 算法可以保证在危险的交通场景下车辆与周围邻居车辆之间的有效通信。

### 3 CVSS 下的网络效用最大化模型

#### 3.1 VANET 网络效用最大化模型

车联网中,每辆车发送数据分组占用的信道资源被该车传输范围的所有车辆共享。本文使用数据分组的发送速率表示每辆车分配的信道资源,通过调节数据分组的发送速率来控制信道拥塞,将信道负载控制在 MBL 以内。文献<sup>[18]</sup>表明,当信道占有率(CBP, channel busy percentage)达到 0.6~0.7 时, CVSS 的吞吐量最大,网络性能最佳,因此将 CBP 设置为 0.6。

用  $V$  表示车辆集合,每辆车  $v$  以每秒传输  $r_v$  个数据分组的发送速率广播数据分组,用  $n(v)$  表示车辆  $v$  的所有邻居车辆,信道负载为每辆车及其邻居车辆的数据分组发送速率之和,通过将该值控制在  $C_{\max}$  (MBL) 之下来避免信道拥塞。

车联网下的网络效用最大化问题可以用式(1)来表示。

$$\max_{r_v} \sum_v U_v(r_v) \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum_{v' \in n(v)} r_{v'} \leq C_{\max}, \forall v \in V \quad (2)$$

$$R_v^{\min} \leq r_v \leq R_v^{\max} \quad (3)$$

其中,  $U_v(r_v)$  表示车辆  $v$  的效用函数。式(1)代表每辆车的效用函数之和的最大值。为了实现比例公平性,单个车辆的效用函数如式(4)所示<sup>[19]</sup>。

$$U_v(r_v) = w_v \log r_v \quad (4)$$

其中,权重  $w_v$  表示车辆  $v$  的安全需求,式(2)将信道负载限制在  $C_{\max}$  (MBL) 以下,式(3)将数据分组的发送速率限制在  $R_v^{\min}$  和  $R_v^{\max}$  之间。通过求解式(1)满足最大值时的数据分组发送速率,实现按照车辆的安全需求公平地按需分配信道资源。

#### 3.2 车辆安全需求

为了表示安全权重  $w_v$ ,需要计算两辆车之间的预计碰撞时间,本文考虑车辆在 3 种交通场景下的碰撞时间<sup>[20]</sup>,这 3 种交通场景分别是车辆跟随场景、车辆相向场景和交叉口场景,基本包含了现实中所有可能的交通场景。针对这 3 种场景分别给出了车辆可能发生碰撞的条件以及预计发生碰撞的时间。

##### 1) 车辆跟随场景

该场景下两辆车 A 和 B 相互跟随,如图 1 所示。 $\theta_A$  和  $\theta_B$  分别为车 A 与车 B 的驾驶角度,  $\delta$  表示车

A 与车 B 驾驶角度差值的绝对值，当  $\delta$  足够小时，可以认为  $\theta_A \approx \theta_B$ 。通过  $|\theta_A - \theta_B| < \delta$  判断车 A 与车 B 是否按照相同方向行驶，两车之间的安全距离为

$$d_{\text{safe\_follow}} = d_{\text{min}} + v_f t_r + \frac{1}{2} \left( \frac{v_f^2}{a_f} - \frac{v_l^2}{a_l} \right) \quad (5)$$

其中， $d_{\text{min}}$  表示两辆车之间的预计最小可接受距离， $t_r$  为人的反应时间， $v_f$ 、 $v_l$  为车 A 和车 B 的速度， $a_f$ 、 $a_l$  为车 A 和车 B 减速时的最大加速度。

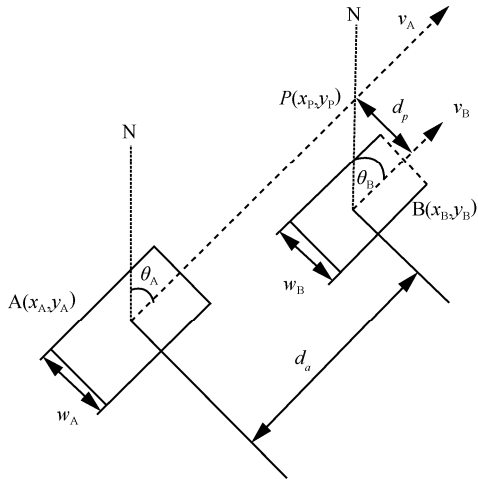


图 1 车辆跟随场景

2) 车辆相向场景

该场景下两辆车 A 和 B 驶向对方，如图 2 所示。 $\theta_A$  和  $\theta_B$  分别为车 A 与车 B 的驾驶角度，通过  $|\theta_A - \theta_B| - \pi < \delta$  判断两车是否往相反的方向行驶，当  $\delta$  足够小时，可以认为车 A 和车 B 驶向对方，车 A 与车 B 之间的安全距离可以表示为

$$d_{\text{safe\_opposite}} = d_{\text{min}} + v_A t_{r_A} + \frac{1}{2} \left( \frac{v_A^2}{a_A} \right) + v_B t_{r_B} + \frac{1}{2} \left( \frac{v_B^2}{a_B} \right) \quad (6)$$

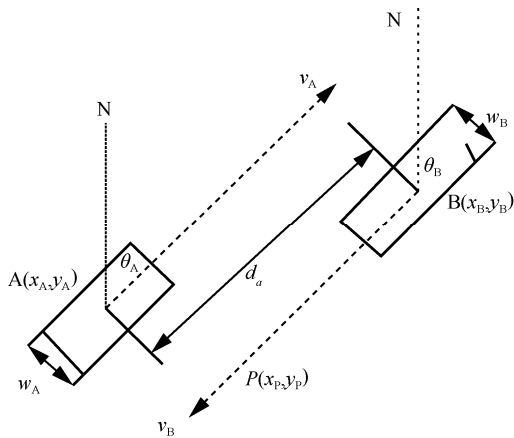


图 2 车辆相向场景

3) 交叉口场景

该场景下两辆车 A 和 B 通过交叉口， $\theta_A$  和  $\theta_B$  分别为车 A 与车 B 的驾驶角度， $v_A$  和  $v_B$  分别为车 A 和车 B 的速度，如图 3 所示，首先通过碰撞预测法<sup>[21]</sup>判断两辆车 A 和 B 的行驶路径是否平行，如果不平行，则两辆车的行驶路径存在交叉点 P。通过交叉点 P 来计算两辆车预计到达交叉点 P 的时间如式(7)和式(8)所示。

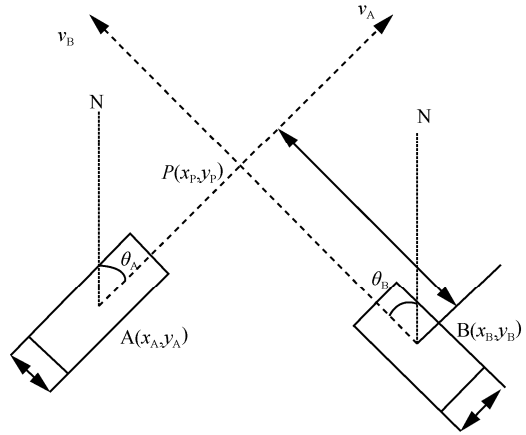


图 3 交叉口行驶场景

$$TX_A = \frac{|r_x - r_A|}{|v_A|} \text{sign}((r_x - r_A)v_A) \quad (7)$$

$$TX_B = \frac{|r_x - r_B|}{|v_B|} \text{sign}((r_x - r_B)v_B) \quad (8)$$

其中， $r_n$  代表向量  $(x_n, y_n)$ ，函数  $\text{sign}(\cdot)$  用来判断一辆车是否已经驶离交叉点。如果  $|TX_A - TX_B| < \lambda$ ，则两辆车 A 和 B 预计大约同时到达交叉点，A 与 B 之间将会发生碰撞，其中， $\lambda$  取决于车的尺寸、速度或者其他因素<sup>[21]</sup>。A 与 B 之间的安全距离可以表示为

$$d_{\text{safe\_intersect}} = d_{\text{min}} + v_n t_r + \frac{1}{2} \left( \frac{v_n^2}{a_n} \right) \quad (9)$$

其中， $d_{\text{min}}$  表示两辆车之间的预计最小可接受距离， $t_r$  为人的反应时间， $v_n$  为车 A 和车 B 的速度， $a_n$  为车 A 或车 B 减速时的最大加速度。

对于每辆车  $v$ ， $C_v = \{c_1, c_2, c_3 \dots\}$  表示可能与车  $v$  发生碰撞的车辆集合。在车辆跟随场景下，对于  $\hat{v} \in C_v$ ， $\hat{v}$  必须满足以下条件：1) 车  $\hat{v}$  与车  $v$  同方向行驶；2) 车  $\hat{v}$  与车  $v$  行驶路径有重叠；3) 车  $\hat{v}$  与车  $v$  之间的距离小于  $d_{\text{safe\_follow}}$ ；4)  $v_f > v_l$ ，其中， $v_f$  为车  $\hat{v}$  的速度， $v_l$  为  $v$  的速度， $d_a$  为两车间的距离。

该场景下车  $\hat{v}$  与车  $v$  的预计碰撞时间为

$$T_{\text{col}} = \frac{d_a}{v_f - v_l} = \frac{\sqrt{(x_p - x_a)^2 - (y_p - y_a)^2}}{v_f - v_l} \quad (10)$$

在车辆相向行驶场景下, 对于  $\hat{v} \in C_v$ ,  $\hat{v}$  必须满足以下条件: 1) 车  $\hat{v}$  与车  $v$  反方向行驶; 2) 车  $\hat{v}$  与车  $v$  行驶路径有重叠; 3) 车  $\hat{v}$  与车  $v$  之间的距离小于  $d_{\text{safe\_opposite}}$ 。该场景下车  $\hat{v}$  与车  $v$  的预计碰撞时间为

$$T_{\text{col}} = \frac{d_a}{v_f + v_l} = \frac{\sqrt{(x_p - x_a)^2 - (y_p - y_a)^2}}{v_f + v_l} \quad (11)$$

在交叉口场景下, 对于  $\hat{v} \in C_v$ ,  $\hat{v}$  必须满足以下条件: 1) 车  $v$  与交叉点  $P$  之间的距离小于  $d_{\text{safe\_intersect}}$ ; 2)  $|TX_v - TX_{\hat{v}}| < \lambda$ 。该场景下车  $\hat{v}$  与车  $v$  的预计碰撞时间为

$$T_{\text{col}} = \min(TX_v, TX_{\hat{v}}) \quad (12)$$

对于每辆车  $v$ , 使用车  $v$  与车  $\hat{v}$  的最小预计碰撞时间来描述车辆在该交通场景下的安全需求, 显然碰撞时间越小, 交通场景越危险, 车辆的安全需求也就越大。

### 3.3 效用函数

如 3.2 节所述, 对于每辆车  $v$ , 存在一个集合  $C_v$  表示可能与车  $v$  发生碰撞的车。假设集合  $C_v$  存在  $x$  辆车, 用  $T_{v\hat{v}} = \{T_{\text{col}1}, T_{\text{col}2}, \dots, T_{\text{col}x}\}$  表示车  $v$  与车  $\hat{v}$  之间的预计碰撞时间, 用  $w_v = \frac{1}{\min(T_{v\hat{v}})}$  作为安全权重表

示交通环境的危险程度。显然对于每辆车  $v$ ,  $w_v$  越大则交通场景越危险。为了保证 CVSS 能够精确地追踪邻居车辆, 如果  $w_v$  越大则应该分配给车辆  $v$  更多的信道资源。根据比例公平性<sup>[19]</sup>, 每辆车的效用函数如式(13)所示。

$$U_v(r_v) = w_v \log r_v = \frac{1}{\min(T_{v\hat{v}})} \log r_v, \hat{v} \in C_v, v \in V \quad (13)$$

其中,  $r_v$  为车辆  $v$  的数据发送速率,  $w_v$  为车辆  $v$  的安全权重,  $V$  为所有车辆的集合,  $C_v$  为可能与车  $v$  发生碰撞的车辆集合。

由式(13)可知, 对于车辆  $v$  来说, 显然数据分组发送速率  $r_v$  越大,  $U_v(r_v)$  越大。因此根据 CVSS 信道资源分配的网络效用最大化模型, 得到如式(14)~式(16)所示的优化问题。

$$\max_{r_v} \sum_v \frac{1}{\min(T_{v\hat{v}})} \log r_v, \hat{v} \in C_v, v \in V \quad (14)$$

$$\sum_{v' \in n(v)} r_{v'} \leq C_{\text{max}}, \forall v \in V \quad (15)$$

$$R_v^{\text{min}} \leq r_v \leq R_v^{\text{max}} \quad (16)$$

式(14)是车辆  $v$  与其邻居车辆的效用函数之和的最大值, 本文优化的目标是求解每辆车的最优数据分组发送速率, 满足所有车辆的效用函数之和最大, 从而满足车辆的安全需求, 使得每辆车在危险的交通场景下可以有效地与周围邻居车辆进行通信, 从而精确地追踪邻居车辆并及时发起碰撞预警, 确保 CVSS 的性能。式(15)中的  $C_{\text{max}}$  表示车辆  $v$  与其传输范围内邻居车辆的数据分组发送速率之和, 用  $C_{\text{max}}$  表示当前的信道负载,  $r_v$  为每辆车的数据分组发送速率,  $n(v)$  为车辆  $v$  传输范围内的邻居车辆的集合。式(15)作为约束条件, 将任意车辆  $v$  所处无线网络的信道负载限制在  $C_{\text{max}}$  之下, 从而避免信道拥塞。为了避免车辆间的数据分组发送速率相差太大, 式(16)作为约束条件将数据分组的发送速率限制在  $R_v^{\text{min}}$  与  $R_v^{\text{max}}$  之间。

## 4 分布式拥塞控制算法 UBRCC

本节介绍基于效用函数最大化理论避免信道拥塞的 UBRCC 算法, 该算法使用对偶分解来求解方程式(14)中的效用函数最大化问题, 为了消除式(15)和式(16)中的约束, 首先构造如式(17)所示的拉格朗日方程。

$$F(r, \lambda) = \sum_v U_v(r_v) + \sum_v \lambda_v (C_{\text{max}} - \sum_{v' \in n(v)} r_{v'}) = \sum_v (U_v(r_v) - r_v \sum_{v' \in n(v)} \lambda_{v'}) + C_{\text{max}} \sum_v \lambda_v \quad (17)$$

其中,  $\lambda_v$  是用于消除约束的拉格朗日乘子, 可以被看作车  $v$  占用信道资源支付的拥塞“价格”。在车联网中, 该拥塞“价格”反映了信道的拥塞状态, 如果车辆  $v$  所处网络的信道负载超过  $C_{\text{max}}$ , 则拥塞“价格”  $\lambda_v$  增大, 反之拥塞“价格”减小。给定一组非负价格, 最优的信道资源分配可以表示为

$$r_v(\lambda) = \arg \max_{R_v^{\text{min}} \leq r_v \leq R_v^{\text{max}}} (U_v(r_v) - r_v \sum_{v' \in n(v)} \lambda_{v'}) \quad (18)$$

从式(18)可以看出, 对于每辆车  $v$ , 为了计算其最优数据分组发送速率, 需要该车的效用函数  $U_v(r_v)$  以及其邻居车辆的拥塞价格  $\lambda_{v'}$ 。显然式(17)是带有线性约束的凹函数, 根据库恩-塔克条件<sup>[22]</sup>可知, 该方程一定存在最优解, 因此一定存在一组最优价格对应式(12)中的最优解。如果能找到最优

价格，由式(13)可以根据最优价格求解最优的数据分组发送速率。寻找最优价格的问题可以用如式(19)所示的对偶问题表示。

$$\min_{\lambda \geq 0} p(\lambda) = \min_{\lambda \geq 0} \left\{ \max_{R_{\min} \leq r \leq R_{\max}} F(r, \lambda) \right\} \quad (19)$$

式(19)被称为对偶方程。由于式(17)是严格的凹函数，所以式(19)也是严格的凹函数，根据库恩-塔克条件存在唯一的一组最优价格。对于唯一的一组最优拥塞价格，存在唯一的一组数据分组发送速率的最优解，此求解最优数据分组发送速率的问题转化为求解最优拥塞价格的问题。

为了计算最优的数据分组发送速率，每辆车需要向其单跳传输范围内的邻居车辆广播拥塞价格。每辆车根据单跳传输范围内邻居车辆的拥塞价格更新数据分组发送速率和拥塞价格。通过梯度下降法反复迭代更新车辆的拥塞价格，直到得到最优的拥塞价格，从而得到最优的数据分组发送速率，如式(20)所示。

$$r^*(\lambda) = \left[ \frac{w_v}{\sum_{v' \in n(v)} \lambda_{v'}} \right]_{R_v^{\min}}^{R_v^{\max}} \quad (20)$$

基于式(20)，本文设计了 UBRCC 算法，用来描述拥塞“价格”与数据分组发送速率迭代更新至最优的过程，具体如算法 1 所示。

#### 算法 1 UBRCC 算法

**步骤 1** 迭代次数  $k=0$ ：设定每辆车的初始价格为  $\lambda_v^0$ ，数据分组的发送速率为  $R_v^{\text{init}}$ 。

**步骤 2** 第  $k$  次迭代：每辆车接收到邻居车辆的拥塞“价格”  $\lambda_{v'}$ ， $v' \in n(v)$ ，然后更新数据分组的发送速率为

$$r_v^k = \left[ \frac{w_v}{\sum_{v' \in n(v)} \lambda_{v'}} \right]_{R_v^{\min}}^{R_v^{\max}} \quad (21)$$

其中，算子的分子为车辆  $v$  的安全权重，分母为车辆  $v$  传输范围内所有邻居车辆的拥塞价格之和。

**步骤 3** 对于第  $k$  次迭代：每辆车  $v$  更新其拥塞价格为

$$\lambda_v^{k+1} = \left[ \lambda_v^k + \beta(C_{\max} - \sum_{v' \in n(v)} r_{v'}^k) \right]_0 \quad (22)$$

**步骤 4** 反复进行步骤 2 和步骤 3，直到步骤 3 中拥塞“价格”不再更新时，则得到最优拥塞“价格”，进而根据式(20)得到最优数据分组发送速率，迭代终止。

UBRCC 算法中  $\lambda_v$  表示车辆  $v$  的拥塞“价格”，用来表示信道的拥塞状态，如果当前的信道负载大于信道最大负载  $C_{\max}$ ，则拥塞“价格”变大，反之则减小。通过应用梯度下降法反复迭代更新车辆的拥塞“价格”和数据分组发送速率，直到得到最优的拥塞“价格”时，通过式(15)得到最优的数据分组发送速率。 $w_v$  将数据分组的发送速率与单个车辆的安全权重关联，用来描述交通场景下车辆  $v$  的安全需求。选用  $\frac{1}{\min(T_{v,v'})}$  作为  $w_v$ ，即本文只关注车辆  $v$  与  $v' \in C_v$  的最小碰撞时间，并用  $w_v$  表示车辆  $v$  所处交通环境的危险级别， $w_v$  越大则表示车辆  $v$  所处的交通环境越危险。为了保证 CVSS 能够准确追踪邻居车辆，车  $v$  的  $w_v$  越大则应该分配更多的信道资源。为了避免车辆的数据分组发送速率差别太大，在仿真实验中将车辆的碰撞时间限制为  $[1, 10]$  之间，因此安全权重  $w_v$  被严格限制为  $[0.1, 1]$  之间。参数  $\beta$  用来控制数据分组发送速率的收敛速度。在 UBRCC 算法中， $\beta$  必须被设置得足够小，否则可能导致拥塞价格  $\lambda$  为负值；如果  $\beta$  过大则会导致数据分组发送速率发生振荡。 $\beta$  的界限值在文献[23]中进行了指定。

## 5 实验仿真与性能分析

### 5.1 实验条件设定

本节通过在 NS3<sup>[24]</sup> 中进行仿真实验以验证 UBRCC 算法的性能。在仿真实验中，车辆的速度每 2 s 变化一次，所以两辆车之间可能会发生碰撞。

在仿真实验中，车辆均匀分布在 500 m 长的四车道公路上。如图 4 所示，初始车辆数为 100 辆，在第 20 s 时车辆数由 100 辆增加到 200 辆，即车辆密度由 0.2 辆/m 增加到 0.4 辆/m。每辆车使用 80 dBm（传输距离为 500 m）的恒定传输功率发送数据分组，所以每辆车都在彼此的传输范围之内。最大信道负载设置为 3 Mbit/s，数据分组的大小为 512 B，所以信道最大负载可以表示为  $C_{\max}=732$  数据分组/s。仿真参数的设置和算法参数的设置分别如表 1 和表 2 所示。

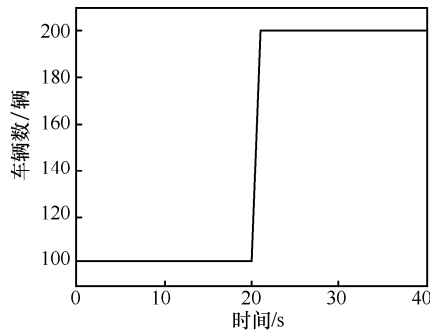


图 4 车辆密度的变化

### 5.2 实验结果及分析

本节通过对比 UBRCC 算法与 DNUM 算法的实验结果以验证算法的性能。DNUM 算法首先通过车辆的相对位置  $x_{i,j}$  和相对速度  $v_{i,j}$  计算出安全权重  $w$ ，如式(23)所示。

$$w_{i,j} = \left(1 - \frac{x_{i,j}}{x_{\max}}\right) \left(1 - \frac{v_{i,j}}{v_{\max}}\right) \quad (23)$$

表 1 仿真参数

参数	值
发送速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	4.5
MBP	0.6
竞争窗口大小	32
数据分组大小/B	512
信噪比 SINR/dB	4
传输功率/dBm	80
车速更新时间/s	2
车辆初始速度/(m·s <sup>-1</sup> )	30
司机反应时间/s	0.5
最小期望碰撞车距 $d_{\min}$ /m	10
可接受横向车距 $d_{\text{gap}}$ /m	1
车流密度	由 0.2 辆/m 变化到 0.4 辆/m

表 2 算法参数

参数	值
最大数据分组发送速率 $R_v^{\max}$ / (个·s <sup>-1</sup> )	12
最小数据分组发送速率 $R_v^{\min}$ / (个·s <sup>-1</sup> )	4
初始数据分组发送速率 $R_v^{\text{ini}}$ / (个·s <sup>-1</sup> )	4
收敛速度控制参数 $\beta$	$1 \times 10^{-6}$
初始拥塞价格 $\lambda_v^0$	$2.5 \times 10^{-3}$
算法迭代次数/次	20

然后基于该安全权重通过网络效用最大化理论计算出最优的数据分组发送速率。

#### 1) 信道占有率

信道占有率的收敛过程如图 5 所示，2 种算法均可以有效控制信道拥塞。在仿真初期由于数据分组发送速率较低，因此信道占有率也较低。在算法的调节下，数据分组的发送速率增大，信道占有率逐渐保持在 0.6 左右，信道资源得到充分利用。在第 20 s 时，由于车辆密度由 0.2 辆/m 增大到 0.4 辆/m，信道占有率迅速增长，在算法的调节下数据分组的发送速率降低，信道占有率逐渐降低到 0.6 左右。从图 5 可以看出，UBRCC 算法的稳定性优于 DNUM 算法，且信道占有率略高于 DNUM 算法，因而信道资源能够得到更充分的利用。

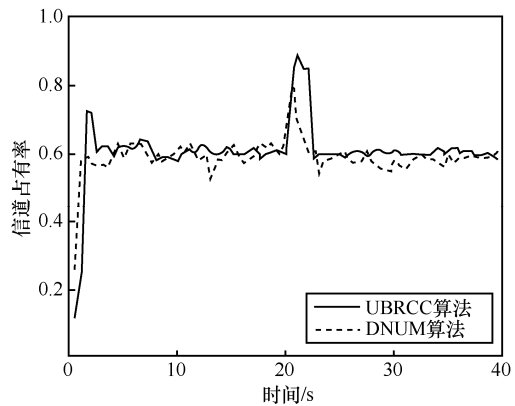


图 5 信道占有率的收敛过程

#### 2) 追踪精度

本文通过所有车辆追踪其邻居车辆的平均追踪精度来衡量安全应用的性能。2 种算法下的跟踪精度如图 6 所示。从图 6 可以看出，从 0 s 到 20 s，车辆密度为 0.1 辆/m，UBRCC 算法与 DNUM 算法均可以将追踪误差保持在 0.25 m 以下，可以满足安全应用的需求。第 20 s 时，车辆密度由 0.1 辆/m 增加到 0.2 辆/m，DNUM 算法的追踪误差迅速变大至 1 m 以上，安全应用的性能受到严重影响；而 UBRCC 算法始终将追踪误差保持在 0.25 m 左右。另外，DNUM 算法中的安全权重没有考虑车辆的行驶方向，无法准确描述车辆的安全需求，因而无法保证信道资源按照车辆的安全需求公平分配；而 UBRCC 算法中的安全权重充分考虑了车辆的行驶方向；安全距离等因素，能够更加准确描述车辆的安全需求，因而可以实现信道资源的按需分配，满足车辆的安全需求。

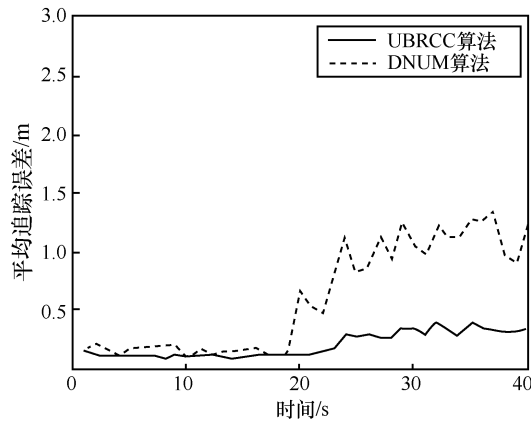


图 6 2 种算法下的平均追踪精度

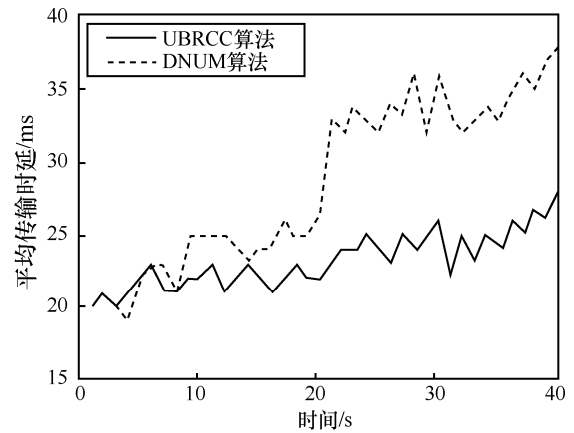


图 8 2 种算法下的消息传输时延

### 3) 数据分组递送率

从图 7 可以看出在仿真初期，由于车辆密度不是很大，2 种算法下的数据分组递送率均保持在 90% 以上。在第 20 s 时，由于车辆密度的增加，数据分组的递送率开始下降。对于 DNUM 算法，数据分组递送率降至 90% 之下，无法保证数据分组的可靠传输，安全应用的性能受到影响。而本文的 UBRCC 算法始终将数据分组递送率保持在 90% 之上，能够保证数据分组的可靠发送，确保车辆能够将状态信息实时广播给邻居车辆，从而满足车辆的安全需求。

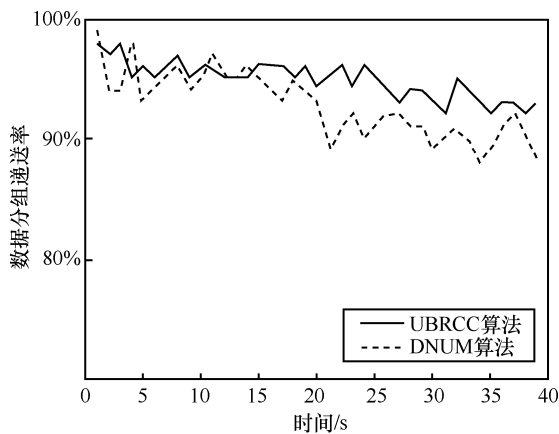


图 7 2 种算法下的数据分组递送率

### 5) 消息产生率

如图 9 所示，在 2 种算法的调节下，信道资源根据车辆的安全需求按需分配，数据分组产生率最终收敛至最优。从 0 s 到 20 s，数据分组产生率收敛为 7 packet/s。第 20 s 时，由于车辆密度增大，为避免信道拥塞，消息产生率最终收敛为 4 packet/s。从图 9 可以看出，与 DNUM 算法相比，在 UBRCC 算法调节下，数据分组产生率能够更快地收敛至最优，因此性能略优于 DNUM 算法。

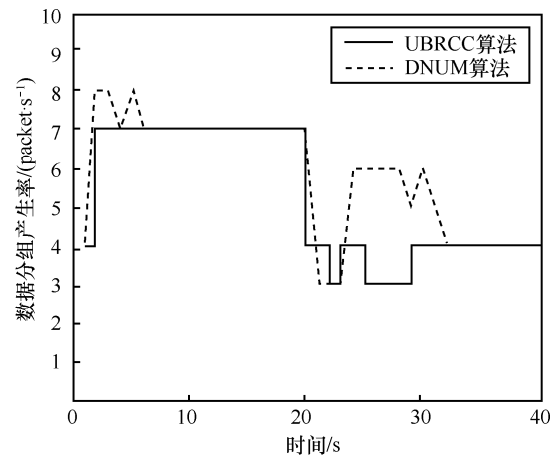


图 9 2 种算法下的消息产生率

### 4) 消息传输时延

从图 8 可以看出，在仿真初期由于车辆密度不是很大，2 种算法下的消息传输时延均保持在 25 ms 以下，从而满足安全应用的需求。在第 20 s 时，由于车辆密度变大，消息传输时延随之增加。与 DNUM 算法相比，UBRCC 算法始终将消息传输时延保持在 30 ms 以下，从而保证车辆能及时接收到邻居车辆的数据分组，确保车辆安全应用的性能不受影响。

### 6) 算法的收敛性

根据网络效用最大化理论，当目标函数值即效用函数之和最大时，可以求得每辆车的最优数据分组发送速率，从而满足每辆车的安全需求。从图 10 可以看出，对于 DNUM 算法，目标函数值大约在 13 次迭代之后收敛至最优，而在 UBRCC 算法下，目标函数值大约在 8 次迭代之后收敛至最优，因而性能优于 DNUM 算法。

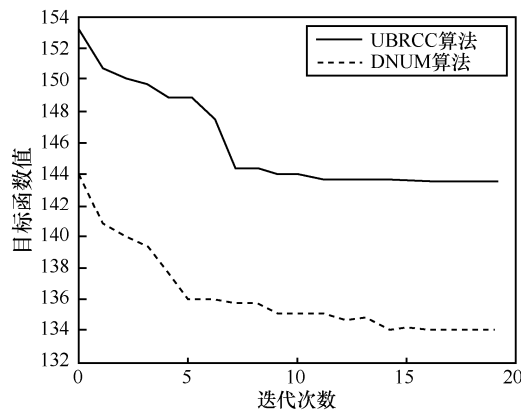


图10 目标函数值的迭代过程

## 6 结束语

在VANET中,信道拥塞会严重影响CVSS的性能。传统的拥塞控制算法依赖信道状态信息将信道负载控制在理想范围之内,没有考虑车辆的安全需求,因而无法做到根据车辆的安全应用需求按需分配信道资源。为了解决这个问题,本文提出了基于网络效用最大化理论的分布式拥塞控制策略。首先,提出了车联网下信道资源分配的网络效用最大化模型,并在该模型中提出了反映车辆安全需求的效用函数;然后,基于该模型,建立了在传输功率固定条件下无线信道资源分配的优化问题,该优化问题以实现所有车辆的效用之和最大化为目标;最后,为了求解该优化问题设计了分布式拥塞控制算法UBRCC。

与控制信道拥塞算法相比,UBRCC算法更加看重单个车辆的安全需求,所以实际信道负载与理想负载之间有时可能会发生偏差。未来工作是设计一种更加顽健的算法来避免这些偏差。另外,下一步的工作会将数据分组发送速率调节与传输功率调节结合起来,重构网络效用最大化模型,提出一种更加综合的信道拥塞控制策略。

## 参考文献:

- [1] YANG X, LIU J, VAIDYA N F, et al. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning[C]// International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. 2004:114-123.
- [2] STANDARDS D. Intelligent transport systems (ITS) - access layer specification for intelligent transport systems operating in the 5 GHz frequency band: ETSI EN 302 663-2-2013[S]. European Telecommunications Standards Institute, 2013.
- [3] KENNEY J B. Dedicated shortrange communications (DSRC) standards in the United States[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1162-1182.
- [4] SENGUPTA R, REZAEI S, SHLADOVER S E, et al. Cooperative collision warning systems: concept definition and experimental implementation[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2007, 11(3):143-155.
- [5] HUANG C L, FALLAH Y, SENGUPTA R, et al. Information dissemination control for cooperative active safety applications in vehicular ad-hoc networks[C]// Global Telecommunications Conference. 2009:1-6.
- [6] LE L, FESTAG A, BALDESSARI R, et al. Vehicular wireless shortrange communication for improving intersection safety[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11):104-110.
- [7] SEPULCRE M, MITTAG J, SANTI P, et al. Congestion and awareness control in cooperative vehicular systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 99(7):1260-1279.
- [8] ZHANG F, TAN G, YU C, et al. Dynamic feedback power control for cooperative vehicle safety systems[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 90(1):1-24.
- [9] TORRENT-MORENO M, MITTAG J, SANTI P, et al. Vehicle-to-vehicle communication: fair transmit power control for safety-critical information[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7):3684-3703.
- [10] KHORAKHUN C, BUSCHE H, ROHLING H. Congestion control for VANETs based on power or rate adaptation[C]//The International Workshop on Intelligent Transportation. 2008.
- [11] GUAN X, SENGUPTA R, KRISHNAN H, et al. A feedback-based power control algorithm design for VANET[C]// Mobile Networking for Vehicular Environments. 2007:67-72.
- [12] BANSAL G, KENNEY J B, ROHRS C E. LIMERIC: a linear adaptive message rate algorithm for DSRC congestion control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(9):4182-4197.
- [13] TIELERT T, JIANG D, CHEN Q, et al. Design methodology and evaluation of rate adaptation based congestion control for vehicle safety communications[C]// Vehicular Networking Conference. 2011: 116-123.
- [14] BANSAL G, KENNEY J B, KENNEY J B, et al. EMBARC: error model based adaptive rate control for vehicle-to-vehicle communications[C]//The Tenth ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking, Systems, and Applications. 2013:41-50.
- [15] SEPULCRE M, GOZALVEZ J, ALTINTAS O, et al. Adaptive beaconing for congestion and awareness control in vehicular networks[C]// Vehicular Networking Conference. 2014:81-88.
- [16] ZHANG L, VALAEE S. Congestion control for vehicular networks with safety-awareness[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(6):3290-3299.
- [17] JOERER S, BLOESSL B, SEGATA M, et al. Enabling situation

awareness at intersections for IVC congestion control mechanisms[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(7): 1674-1685.

- [18] FALLAH Y P, HUANG C L, SENGUPTA R, et al. Congestion control based on channel occupancy in vehicular broadcast networks[C]// Vehicular Technology Conference Fall. 2010:1-5.
- [19] MO J, WALRAND J. Fair end-to-end window-based congestion control[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(5): 556-567.
- [20] SEBASTIAN A, TANG M, FENG Y, et al. Multi-vehicles interaction graph model for cooperative collision warning system[C]// Intelligent Vehicles Symposium. 2009:929-934.
- [21] MILLER R, HUANG Q. An adaptive peer-to-peer collision warning system[C]// Vehicular Technology Conference. 2002:317-321.
- [22] BORWEIN J M, LEWIS A S. Convex analysis and nonlinear optimization[M]. New York: Springer, 2000.
- [23] LOW S H, LAPSLEY D E. Optimization flow control. I. Basic algorithm and convergence[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(6):861-874.
- [24] HENDERSON T R, LACAGE M, RILEY G F. Network simulations with the NS-3 simulator[C]//The ACM SIG-COMM. 2008: 28-30.

#### [作者简介]



谭国真(1960-),男,辽宁大连人,博士,大连理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为智能交通和车联网等。



韩国栋(1992-),男,山东淄博人,大连理工大学硕士生,主要研究方向为车联网信道拥塞控制。



张福新(1981-),男,山东莱州人,博士,山东科技大学讲师,主要研究方向为车联网、无线网络资源分配、跨层优化。



丁勇(1978-),男,辽宁沈阳人,博士,大连理工大学副教授,主要研究方向为传感网络。



刘明剑(1984-),男,辽宁大连人,博士,大连海洋大学讲师,主要研究方向为车联网环境下车辆安全预警技术与车联网消息调度器。