

车联网场景联合缓存及内容请求策略^①

余 意^{②*} 李 松^{③***} 王艳芬*

(* 中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116)

(** 徐州市智能安全与应急协同工程研究中心 徐州 221008)

摘 要 面向智能网联汽车场景下的大数据量和海量连接等特点,为实现安全高效的行驶以及降低的数据流量,本文构建了车联网(IoV)场景下的内容共享模型,建模了基于车辆社交关系的内容获取代价最小化问题,并将优化问题转化为车辆的局部协作缓存博弈问题。通过分析博弈的纳什均衡,提出基于社交关系的局部协作缓存算法求得优化问题的最优解。仿真结果表明,本文提出的基于社交关系的局部协作缓存算法可有效降低整个系统的内容获取代价,并有较好的收敛性。

关键词 车联网(IoV); V2V; 内容共享; 协作缓存; 博弈论

0 引言

车联网(Internet of vehicle, IoV)使用无线通信、传感探测等技术将服务器、路边单元(road side unit, RSU)和车载单元等设备连接,采集车辆、道路、环境等信息,通过车与车、车与路、车与人之间的信息交互和共享,使车与基础设施之间智能协同与配合,最终实现车辆智能化控制、智能交通管控和智能动态信息服务的一体化网络^[1-2]。

随着智能网联汽车数量的快速增长^[3],交通信息的不及时传输会导致更高频次的交通拥堵和交通事故,从而降低人们的出行效率^[4]。作为 5G 通信中的关键技术,V2V(vehicle-to-vehicle)通信使得道路上的邻近车辆可直接建立连接^[5],实现车辆在道路上的信息共享,如车辆自身状态信息、道路预警和事故调查的信息等。通过在车联网中引入缓存,车辆将交通状态等信息缓存到本地,并经由 V2V 通信与其他邻近车辆共享,既可以实现安全高效的行驶,

也能够有效降低车联网基础设施的通信数据量^[6]。

文献[7]将 V2V 通信与缓存结合,来有效控制车联网多跳中的数据流量,减少车辆出行和数据通信的成本;为缓解车联网下多媒体业务广泛应用而给系统带来的流量负担和能源消耗,文献[8]针对 V2V、V2R(vehicle-to-RSU)的混合通信模式,提出一种用于信息娱乐服务的能量感知缓存方案,实现了更高的节能效果和更低的平均访问延迟。文献[9]通过评估车辆的社区相似性和隐私等级设计了一种动态概率缓存方案并提出了基于内容流行度的缓存部署车辆选择方案,有效减少平均时延并增加缓存命中率。

随着智能物联网设备数量的急剧增长,设备间的社交关系的挖掘与利用逐渐成为无线通信研究中的热点^[10-12]。社交网络将网络信息空间与现实信息空间相连接,并产生包含了传播信息和社交行为等维度的数据,这些数据可用于辅助 IoT 设备间的通信。文献[13]将车联网与在线社交网络相结合提出一种用于社交车联网的信任感知通信架构以保

① 国家自然科学基金(61902404, 51734009, 51504255, 51734009, 61771417, 62001475),国家重点研发计划(2016YFC0801403),江苏省重点研发计划(BE2015040)和江苏省自然科学基金青年项目(BK20180640)资助。

② 男,1996年生,硕士生;研究方向:物联网,社交通信;E-mail: yuyi@cumt.edu.cn。

③ 通信作者,E-mail: lisong@cumt.edu.cn。

(收稿日期:2021-06-03)

证车辆提供信息的准确度。文献[14]则基于社交关系提出一种物联网场景下的安全内容共享方案,避免共享内容被不受信任的用户拦截,实现内容分发安全性和用户体验的折中。文献[15]将社交关系应用于车联网中来预测车辆移动轨迹,从而有效减少了交通堵塞。

车联网中内容缓存可有效减小RSU的服务压力以及节省车辆的通信资源,但却增大了车辆的存储资源消耗;利用社交关系和缓存联合优化车联网中通信资源和存储资源消耗的研究相对较少。

受以上研究启发,本文构建了车联网场景下的基于社交关系的内容共享模型以权衡车辆的通信资源和存储资源消耗,在满足车辆内容获取请求下,最小化系统的内容获取代价。将内容获取代价最小化问题构建成车辆的内容获取的策略选择问题,并将策略选择转化成一个局部合作博弈,通过分析该博弈的纳什均衡,进而提出基于社交关系的局部协作缓存算法(social-based local cooperative caching algorithm, SLCCA)求得系统的内容获取代价最小下的博弈策略。

1 系统模型

本文构建了车联网场景下的基于社交关系的内容共享模型,本节从物理域和社交域2个维度描述该模型。

1.1 物理域

如图1所示的车联网系统中,该区域部署有单个RSU,区域中有 N 辆车,车辆集合可记为 $\mathcal{N} = \{1, 2, 3, \dots, N\}$,编号0表示RSU。车辆 $i \in \mathcal{N}$ 的最大存储空间记为 K_i ,系统中的车辆都具备V2V通信能力。车辆请求获取的内容包括其他车辆的状态信息、路况信息等,这些信息既可以通过V2R通信链路获取,也可以通过V2V通信链路获取。为避免V2V链路和V2R链路之间产生同频干扰,车联网系统中的V2V通信使用专有频谱。

车辆可请求的内容集合记为 $F = \{1, 2, 3, \dots, L\}$,内容 $f \in F$ 大小为 Z_f ,RSU有集合 F 中的所有内容的缓存。在包含 τ 个时隙的时间段 $T = \{t_1, t_2,$

$\dots, t_k, \dots, t_\tau\}$ 内,集合 \mathcal{N} 中车辆会针对不同内容发起请求,并且一辆车最多只对一则内容发起请求。车辆的内容请求状态矩阵记为 $\mathbf{R}_{t_k} = [r_{i,f,t_k}]_{N \times L}$,其中 $r_{i,f,t_k} \in \{0, 1\}$, $r_{i,f,t_k} = 0$ 表示在时隙 t_k 车辆 i 没有对内容 f 发起请求,反之则表示车辆 i 对内容 f 发起了请求。根据历史记录,车辆本地缓存有集合 F 中的一部分,车辆在时隙 t_k 的内容缓存状态矩阵记为 $\mathbf{C}_{t_k} = [c_{i,f,t_k}]_{N \times L}$,其中 $c_{i,f,t_k} \in \{0, 1\}$, $c_{i,f,t_k} = 0$ 表示车辆 i 在时隙 t_k 未缓存内容 f ,反之则表示车辆 i 缓存有内容 f 。

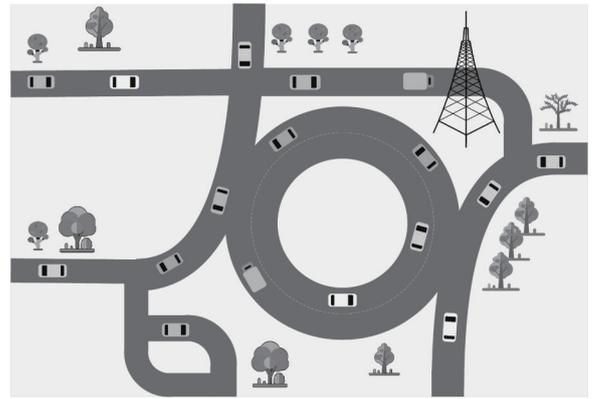


图1 物理域系统模型图

假设车辆在时间段 T 内不会出现大幅度位置变化,时隙 t_k 内车辆 i 的地理位置坐标记为 (x_{i,t_k}, y_{i,t_k}) ,车辆 i 和车辆 j 间地理距离 d_{ij,t_k} 由式(1)计算。

$$d_{ij,t_k} = \sqrt{(x_{i,t_k} - x_{j,t_k})^2 + (y_{i,t_k} - y_{j,t_k})^2} \quad (1)$$

V2V的最大通信距离记为 d_{th} ,若 $d_{ij,t_k} \leq d_{th}$,称车辆 i 和车辆 j 互为邻居车辆,则车辆 i 可与车辆 j 建立V2V连接。时隙 t_k 下车辆 i 的邻居车辆中缓存有内容 f 的车辆集合记为 $V_{i,t_k,f}$,一个时隙里一辆车至多只能与一辆车建立V2V连接。

如果车辆 i 缓存有内容 f ,则车辆无需向其他车辆或RSU请求该内容;如果车辆 i 未缓存内容 f ,车辆 i 可从缓存有该内容的邻居车辆或RSU处获取该内容。

1.2 社交域

车辆获取到请求内容需要付出一定的代价,包括通信资源和存储资源消耗。由于自身资源的有限

性,车辆的使用者具有理性和自私的特点,并不会主动贡献自己的通信资源或存储资源。将社交关系引入到车联网中可激励具有紧密社交关系的车辆间建立连接并进行内容共享,还能通过分析车辆间的社交行为实现信任管理,以保证内容共享过程的可靠性。本文系统模型中的车辆社交属性包括内容偏好程度、亲密度、路径相似度和信誉度。

车辆获取到请求内容付出的代价与车辆对内容的偏好程度有关,若车辆 i 对内容 f 感兴趣,则车辆 i 认为获取到内容 f 更有价值。车辆 i 在时隙 t_k 内对内容 f 的偏好程度 p_{i,f,t_k} 服从齐夫分布,即式(2),车辆对内容的偏好程度记为矩阵 $\mathbf{P}_{t_k} = [p_{i,f,t_k}]_{N \times L}$ 。

$$p_{i,f,t_k} = \frac{i_{f,t_k}^{-\gamma}}{\sum_{l=1}^L l^{-\gamma}} \quad (2)$$

式(2)中, i_{f,t_k} 表示时隙 t_k 下内容 f 在车辆 i 中的偏好排名,车辆 i 对集合 F 中内容的偏好排名根据喜好程度由高到低依次为 $1, 2, \dots, L$; γ 描述了内容分布的差异性, γ 越大表示内容分布的差异性越大,车辆对不同内容的偏好程度差异性越大。

亲密度描述了车辆间的联系强度,根据历史记录,在过去 δ 个时间段里,车辆 i 和车辆 j 之间的连接次数记为 $CT_{ij,\delta}$,第 q 次连接所持续的时长记为 $CD_{ij,\delta,q}, q \leq CT_{ij,\delta}$ 。时隙 t_k 内,车辆 i 和车辆 j 间的亲密度 $Tie_{ij,t_k}(\delta)$ 由式(3)计算^[16]。

$$Tie_{ij,t_k}(\delta) = 1 - e^{-\frac{CT_{ij,\delta}}{CD_{ij,\delta}}} \quad (3)$$

式(3)中 $\frac{CT_{ij,\delta}}{CD_{ij,\delta}}$ 表示车辆 i 和车辆 j 之间的平均联系时长,由式(4)计算。

$$\frac{CT_{ij,\delta}}{CD_{ij,\delta}} = \frac{\sum_{q=1}^{CT_{ij,\delta}} CD_{ij,\delta,q}}{CT_{ij,\delta}} \quad (4)$$

路径相似度可用于表示车辆感兴趣内容之间的相似性。车辆的路径由一系列按时间排序的位置组成, δ 个时间段里车辆 i 的路径记为 $Tr_{i,\delta} = \{(L_{i,1}, t_1), (L_{i,2}, t_2), \dots, (L_{i,h}, t_h), \dots, (L_{i,\delta}, t_\delta)\}$, $(L_{i,h}, t_h)$ 表示车辆 i 在时刻 t_h 时的位置 $L_{i,h}$ 。时隙 t_k 内,车辆 i 和车辆 j 间的路径相似度 $Sim_{ij,t_k}(\delta)$ 由式(5)计算^[17]。

$$Sim_{ij,t_k}(\delta) = \frac{1}{\sum_{h=1}^{\delta} \|L_{i,h} - L_{j,h}\|} \quad (5)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为两点坐标的欧氏距离。

信誉度描述了车辆之间可信任程度,为提高获取内容的安全性以及内容共享成功率,车辆通常选择与信誉度高的车辆建立 V2V 连接。时隙 t_k 内,车辆 i 对车辆 j 的信誉度 $Tru_{ij,t_k}(\delta)$ 通过式(6)计算^[16]。

$$Tru_{ij,t_k}(\delta) = \frac{1 + e^{-1}}{1 - e^{-1}} \left(\frac{2}{1 + e^{-SR_{ij,\delta}}} - 1 \right) \quad (6)$$

其中, $SR_{ij,\delta}$ 表示过去 δ 个时间段内车辆 j 向车辆 i 传输内容的成功率,可用式(7)描述。

$$SR_{ij,\delta} = \frac{CS_{ij,\delta}}{CT_{ij,\delta}} \quad (7)$$

其中, $CS_{ij,\delta}$ 表示车辆 j 成功将车辆 i 请求的内容发送给车辆 i 的次数。

综合考虑上述 3 个维度的社交属性,车辆 i 和车辆 j 之间的社交强度 s_{ij} 由式(8)定义。

$$s_{ij,T} = \omega_1 Tie_{ij,T}(\delta) + \omega_2 Sim_{ij,T}(\delta) + \omega_3 Tru_{ij}(\delta) \quad (8)$$

其中, ω_1, ω_2 和 ω_3 分别是 3 个维度社交属性的权重,且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

2 问题构建

在上述车联网内容共享模型中,由于在内容获取时需要占用相应通信资源和存储资源,每辆汽车在获得内容时需要付出一定的代价,系统中车辆的内容获取总代价取决于车辆社交属性、车辆的内容缓存状态以及获取内容方式。在上述模型中,车辆 i 有 3 种内容请求方式。

(1) 车辆 i 本地缓存有内容 f , 其无需建立通信链路请求该内容,内容获取代价 $cost_{i,f,t_k} = 0$ 。

(2) 车辆 i 与 RSU 建立 V2R 连接,车辆 i 需要付出从 RSU 获取内容的通信代价,若车辆 i 选择将内容缓存在本地,则还需要付出内容存储代价。

车辆与 RSU 间的地理距离越小,意味着车辆获取内容的通信代价越低。为了简单起见,本节中的通信代价可认为是由于路径损耗带来的代价,记通信距离 d 带来的路径损耗为 $\mathcal{F}(d)$,单位路径损耗下的通信成本记为 B_L ,那么通信距离 d 带来的通信代价可记为 $\mathcal{F}(d) \cdot B_L$ 。在该方式下,车辆 i 从 RSU

获取内容的通信代价可以建模为 $\mathbb{F}(d_{i0,t_k}) \cdot B_L$ 。

车辆 i 对内容 f 的缓存选择记为 $C_{i,f,t_k} \in \{0, 1\}$, $C_{i,f,t_k} = 0$ 表示车辆 i 选择不缓存内容 f 到本地, 反之表示缓存到本地。记单位容量大小内容的缓存放置成本为 α , 车辆 i 将内容 f 缓存至本地的存储代价表示为 $Z_f \alpha$ 。

考虑到上述车辆对不同内容有不同的偏好, 车辆 i 的内容获取代价 $cost_{i0,f,t_k}$ 可用式(9)计算。

$$cost_{i0,f,t_k} = e^{-p_{i,f,t_k}} (\mathbb{F}(d_{i0,t_k}) B_L + C_{i,f,t_k} Z_f \alpha) \quad (9)$$

(3) 车辆 i 与车辆 $j \in V_{i,t_k,f}$ 建立 V2V 通信, 车辆 i 需要付出与车辆 j 进行 V2V 通信的代价, 若车辆 i 选择将内容缓存在本地, 则还需要付出存储代价。在该方式下, 车辆 i 的 V2V 通信代价与车辆之间的地理距离和社交强度相关。根据式(1)和式(8), 结合车辆地理距离和社交关系, 车辆 i 和车辆 j 之间的社交加权距离 D_{ij,t_k} 可由式(10)计算。

$$D_{ij,t_k} = \frac{d_{ij,t_k}}{s_{ij,t_k}} \quad (10)$$

由式(10)可知, 当车辆间的地理距离越小或社交关系越紧密时, D_{ij,t_k} 越小, 意味着车辆获取内容的通信代价越小。根据前面分析, 车辆 i 从 RSU 获取内容的通信代价建模为 $\mathbb{F}(D_{ij,t_k}) \cdot B_L$ 。

考虑到车辆对不同内容有不同的偏好, 车辆 i 的内容获取代价 $cost_{ij,f,t_k}$ 可用式(11)计算。

$$cost_{ij,f,t_k} = e^{-p_{i,f,t_k}} (\mathbb{F}(D_{ij,t_k}) \cdot B_L + C_{i,f,t_k} Z_f \alpha) \quad (11)$$

依据式(9)、(11), 车辆 i 获取到内容 f 的内容获取代价 $cost_{i,f,t_k}$ 可用式(12)计算。

$$cost_{i,f,t_k} = r_{i,f,t_k} \cdot (1 - c_{i,f,t_k}) \cdot cost_{iG_{i,f,t_k},f,t_k} \quad (12)$$

式(12)中 G_{i,f,t_k} 表示车辆 i 获取内容 f 时选择的设备的编号, $G_{i,f,t_k} \in V_{i,t_k,f} \cup \{0\}$ 。

本文的优化问题定义为最小化时间 T 内系统的总内容获取代价, 用式(13)表示。

$$\min \sum_{C_{i,f,t_k}, G_{i,f,t_k}}^{t_r} \sum_{i \in N} \sum_{f \in F} cost_{i,f,t_k} \quad (13)$$

$$\text{s. t. } C_{i,f,t_k} \in \{0, 1\} \quad (13.1)$$

$$G_{i,f,t_k} \in V_{i,t_k,f} \cup \{0\} \quad (13.2)$$

$$\sum_{f \in F} (c_{i,f,t_k} + C_{i,f,t_k}) Z_f \leq K_i \quad (13.3)$$

$$1 \leq i \leq N, 1 \leq f \leq L \quad (13.4)$$

其中限制条件式(13.3)表示所有内容占用的存储空间不得超过车辆自身的存储空间大小。如果自身的存储空间不足以容纳请求的新内容, 则通过最近最少使用(least recently used, LRU)算法进行内容更新^[18]。

由式(12)可知, 邻居车辆的缓存状态会影响车辆 i 在时隙 t_k 的选择。若有较多的邻居车辆有内容 f 的缓存, 车辆 i 可以选择与更多不同的车辆建立 V2V 通信, 相应可减少系统的内容获取代价; 反之车辆 i 在 t_k 时的策略也会影响其他车辆的选择, 从而影响系统的内容获取代价。为最小化车辆在时间段 T 内的内容获取代价之和, 车辆之间需要进行协作缓存, 部分车辆贡献自身的存储资源将请求的内容缓存在本地, 使得其他车辆可经由 V2V 通信获取到请求的内容, 以权衡系统下车辆的通信资源消耗和存储资源消耗。

优化问题式(13)是一个 NP-hard 问题^[19]。本文将上述基于社交属性的车辆间协作缓存问题建模成基于社交属性的协作缓存博弈问题, 并将时间段 T 分为博弈过程、内容获取与共享过程, 车辆作为博弈的参与者决定获取请求内容的途径以及是否将请求的内容保存到本地, 在时间段 T 的前若干个时隙里通过多轮博弈得到优化问题式(13)的最优策略集。

3 局部协作缓存方案

3.1 协作缓存博弈

由上述分析可知, 车辆 i 获取内容 f 时的决策既包含从何处获取, 也包含是否将内容缓存到本地。记该博弈为 $G = \{N, S, u\}$, 其中 N 是参与博弈的所有车辆的集合; S 是所有参与博弈的车辆的策略集合, 车辆 i 获取内容 f 的策略记为 $s_{i,f} = (C_{i,f}, G_{i,f})$, $S = \{s_i \mid i \in N\}$, $s_i = \{s_{i,f} \mid f \in F\}$; u 是参与博弈车辆的效用函数。

由式(12)可知, 在决策 s_i 下, 车辆 i 的内容获取代价之和 $cost_i$ 可用式(14)表示。

$$cost_i(s_i, s_{-i}) = \sum_{f \in F} cost_{i,f} \quad (14)$$

考虑到车辆间的协作,对于车辆 i 、策略为 s_i 下的效用函数 u_i 定义为自身的内容请求代价和其邻居车辆的内容请求代价之和。

$$u_i(s_i, s_{-i}) = cost_i(s_i, s_{-i}) + \sum_{j \in V_i} cost_j(s_j, s_{-j}) \quad (15)$$

式(15)中等号右侧第2部分表示车辆 i 的邻居车辆的内容请求代价之和。

优化问题式(13)可转化为在博弈阶段求得一个策略集合,使得所有车辆的效用函数之和最小,即优化如下问题:

$$\min_S \sum_{i \in N} u_i(s_i, s_{-i}) \quad (16)$$

$$\text{s.t. } C_{i,f} \in \{0,1\} \quad (16.1)$$

$$G_{i,f} \in N \cup \{0\} \quad (16.2)$$

$$\sum_{f \in F} (c_{i,f} + C_{i,f}) Z_f \leq K_i \quad (16.3)$$

$$1 \leq i \leq N, 1 \leq f \leq L \quad (16.4)$$

3.2 纳什均衡分析

在上述博弈 G 中,对于任意车辆 $i \in N$, 优化问题式(16)下整体最优策略中车辆 i 的策略记为 s_i^* , 如果车辆 i 单方面将自己的策略由 s_i^* 改为 s_i^+ 而无法提升自己的效用,即式(17)无法成立,则博弈 G 的策略是一个纯策略的纳什均衡。

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i^+, s_{-i}^*), \quad \forall i \in N, \forall s_i \in S, s_i^* \neq s_i^+ \quad (17)$$

满足式(18)的博弈称为严格势力场博弈,其中 $\Phi(\cdot)$ 是博弈的势函数,文献[20]表明严格势力场博弈至少存在一个纯策略的纳什均衡点。

$$\Phi(s_i^*, s_{-i}^*) - \Phi(s_i^+, s_{-i}^*) = u_i(s_i^*, s_{-i}^*) - u_i(s_i^+, s_{-i}^*), \quad \forall s_i^* \in S, s_i^* \neq s_i^+ \quad (18)$$

对于上述博弈 G , 构造势函数 $\Phi(\cdot)$, 用式(19)表示。

$$\Phi(s_i^*, s_{-i}^*) = \sum_{i \in N} cost_i(s_i^*, s_{-i}^*) \quad (19)$$

车辆 i 将其策略由 s_i^* 改为 s_i^+ , 且 $s_i^* \neq s_i^+$, 那么势函数的变化量可用式(20)表示。

$$\begin{aligned} & \Phi(s_i^+, s_{-i}^*) - \Phi(s_i^*, s_{-i}^*) \\ &= \sum_{i \in N} cost_i(s_i^+, s_{-i}^*) - \sum_{i \in N} cost_i(s_i^*, s_{-i}^*) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{j \in i \cup U_i} cost_j(s_i^+, s_{-i}^*) - \sum_{j \in i \cup U_i} cost_j(s_i^*, s_{-i}^*) \\ &= u_i(s_i^+, s_{-i}^*) - u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \end{aligned} \quad (20)$$

由式(18)可知,上述博弈 G 是一个严格势力场博弈,因此该博弈至少存在一个纳什均衡点,且在有限策略集合下,势函数最小值点就是纯策略纳什均衡。

3.3 求解算法

根据上述讨论与分析,针对建模的基于社交属性的协作缓存博弈,受文献[21]启发,本文提出基于社交关系的局部协作缓存算法。在初始化阶段,所有的车辆先默认自己的策略为从RSU获取到请求内容并且不缓存请求内容,且将 t_1 时隙的相关参数作为初始化参数,具体为 $d_{ij} = d_{ij, t_1}, s_{ij} = s_{ij, t_1}, \mathbf{P} = \mathbf{P}_{t_1}, \mathbf{R} = \mathbf{R}_{t_1}, \mathbf{C} = \mathbf{C}_{t_1}$ 。决策迭代过程分为3个阶段:第1阶段为车辆选择,在这一阶段中车辆 i 都是按照 $1/N$ 的概率随机选择,选择车辆后计算车辆 i 在第 l 次博弈中的代价 $cost_i(l)$ 和效用函数值 $u_i(l)$; 第2阶段为策略探索阶段,车辆 i 主动随机产生新策略 s_i^{new} , 其他车辆被动更改策略,若车辆 i 在新策略下不缓存内容到本地,那么其他从车辆 i 获取内容的车辆将策略更改为从RSU获取且不缓存到本地,根据式(12)和式(15),车辆 i 确定新策略下的效用函数值 u_i^{new} ; 第3阶段为策略更新阶段,在这一阶段中,车辆 i 按照式(21)、式(22)和式(23)对其策略进行更新,式中 β 为调节因子,并更新本次迭代时的缓存状态矩阵 \mathbf{C}^l 。

$$\Pr[s_i(l+1) = s_i^{\text{new}}] = \frac{\exp\{\beta u_i^{\text{new}}\}}{Y} \quad (21)$$

$$\Pr[s_i(l+1) = s_i(l)] = \frac{\exp\{\beta u_i(l)\}}{Y} \quad (22)$$

$$Y = \exp\{\beta u_i^{\text{new}}\} + \exp\{\beta u_i(l)\} \quad (23)$$

上述算法描述如算法1所示。

算法1 SLCCA 算法

输入: $N, F, K_i, Z_f, d_{th}, d_{ij}, s_{ij}, \alpha, B_L, \mathbf{P}, \mathbf{R}, \mathbf{C}$;

输出: s_i

初始化: 迭代次数 $l=0$, 车辆的策略均从RSU获取请求内容且不缓存内容到本地,本次内容缓存矩阵 $\mathbf{C}^0 = \mathbf{C}$;

loop for $l = 0, 1, 2, \dots$

1. 车辆选择

随机选择车辆 $i \in N$, 其他所有车辆坚持自己的策略, 车辆 i 可以计算其代价 $cost_i(l)$ 和效用函数值 $u_i(l)$;

2. 策略探索

车辆 i 随机产生新策略 s_i^{new} ;

if $C_{i,f} = 1$

 令 C^d 中 $c_{i,f} = 1$;

else

 令 C^d 中 $c_{i,f} = 0$, 其他从车辆 i 获取内容的车辆将策略更改为从 RSU 获取且不缓存到本地;

end if

根据式(12)和式(15), 车辆 i 确定新策略下的效用函数值 u_i^{new} ;

3. 策略更新

车辆 i 根据式(21)、式(22)和式(23)更新其策略, 在车辆 i 更新策略过程中, 其他车辆被动更新策略, 并更新本次迭代时的缓存状态矩阵 C^d ;

if $\sum_{f \in F} (c_{i,f} + C_{i,f}) Z_f \geq K_i$

 通过 LRU 算法进行缓存内容更新;

end if

end loop

本文 SLCCA 算法的复杂度取决于单个车辆的邻居车辆数量。最差的情况下, 所有的车辆都互相为邻居车辆, 且对于任意车辆 $i, c_{i,f} = 0, r_{i,f} = 1, \forall f \in F$, 在最多有 N 辆汽车和 L 个请求内容的情况下, 车辆 i 请求的内容最多有 $2N$ 种策略, 上述算法的最差时间复杂度为 $O(LN^2)$; 最好的情况下, 对于任意车辆 i , 其邻居车辆集合为空, 即没有邻居车辆, 那么上述算法的最好时间复杂度为 $O(LN)$; 平均情况下, 对于任意车辆 i , 有 $\lfloor (N-1)/2 \rfloor$ 辆车是其邻居车辆, 在有 L 个请求内容情况下, 车辆 i 请求的内容最多有 $2N$ 种策略, 那么上述算法的平均时间复杂度也为 $O(LN^2)$ 。

4 仿真结果与分析

本节对上述提出的 SLCCA 算法进行了仿真实验和性能分析。仿真实验中, 路径损耗模型简化为 $F(d) = d^{-\alpha}$, α 为路径损耗指数并设置为 4, RSU 的覆盖半径为 300 m, 车辆总数量为 20 ~ 50 辆, 车辆

存储空间均为 100 MB, 单个请求内容大小均为 5 MB, 最大 V2V 通信距离为 90 ~ 150 m, 3 个维度社交属性的权重均为 1/3, 单位路径损耗的通信成本为 0.1, 内容缓存放置成本为 0.5。仿真过程中将本文策略与 RSU 策略、随机缓存和贪婪缓存等方案进行对比。

RSU 策略: 若车辆的本地没有请求内容的缓存, 则与 RSU 建立 V2R 连接获取请求内容, 并且获取的内容不缓存到本地。

随机策略: 所有车辆等概率随机选择获取请求内容的策略, 可以选择 V2V 通信获取到请求的内容, 也可以从 RSU 获取到请求的内容, 车辆是否将请求内容缓存到本地也是等概率随机的。

贪婪策略: 所有车辆只考虑最小化自身的请求代价而不考虑系统整体的请求代价。

图 2 描述了不同策略下车辆的平均内容获取代价与不同车辆数量之间的变化关系, 其中 V2V 最大通信距离 $d_{th} = 120$ m。在 RSU 策略下, 车辆只能与 RSU 建立 V2R 连接获取到请求内容并且不缓存到本地, 随着车辆数量的增加, 车辆的平均内容获取代价也会增加。在随机策略下, 车辆对获取内容途径和内容缓存的选择都是随机的, 但车辆选择到整体最优策略概率较小, 车辆平均内容获取代价整体随着车辆数量的增加而增加。在贪婪策略下, 每辆车仅针对自身的内容获取代价做出最优选择, 部分车辆选择从 RSU 获取, 部分车辆从邻居车辆经由 V2V 获取, 且获取的内容不缓存到本地。随着车辆数量的增加, 本地有请求内容缓存的车辆数量会增加, 车

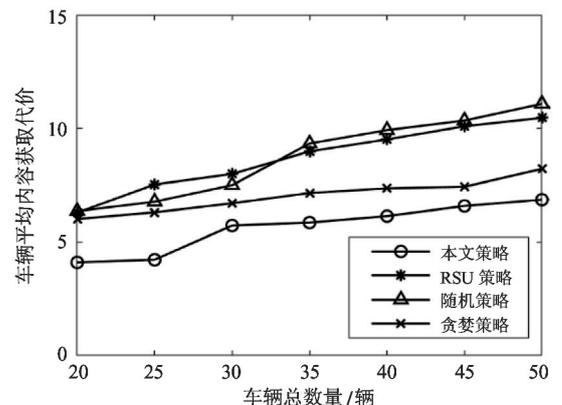


图 2 车辆平均内容获取代价-车辆数量

辆平均请求代价整体以较缓趋势增加。在本文策略下,车辆不仅会考虑自身的内容获取代价,也会考虑整体内容获取代价而选择性地将内容缓存到本地,其他车辆可经由 V2V 通信获取到请求内容。随着车辆的增加,选择缓存请求内容到本地的车辆会增加,因此车辆平均内容获取代价随着车辆数量的增加而增加。仿真结果表明,在相同车辆数量下,相较于其他 3 种策略,本文策略的性能有优势。

图 3 描述了不同策略下车辆的平均内容获取代价与不同的 V2V 通信距离之间的变化关系,其中车辆数量 $N = 50$ 。在 RSU 策略下,车辆只与 RSU 建立 V2R 连接获取请求内容,在车辆数量固定下,车辆的平均内容获取代价不随 V2V 通信距离变化而变化。在随机策略下,车辆的请求内容获取途径和请求内容的缓存都是随机的,车辆平均请求代价本没有明显变化规律,但随着 V2V 通信距离的增加,向其他车辆请求建立连接时有更高几率获取到请求内容,车辆的平均内容获取代价随之减少。在贪婪策略下,车辆仅针对自身内容获取代价做出最优选择,随着 V2V 通信距离的增加,可与其他车辆共享本地缓存内容的车辆的数量也会增加,车辆的平均内容获取代价随之减少。在本文策略下,车辆的策略选择同时考虑自身内容获取代价和整体内容获取代价,部分车辆通过选择缓存请求内容到本地,随着 V2V 通信距离增加,可共享给其他车辆,车辆的平均内容获取代价随着 V2V 通信距离增加而减小。仿真结果表明,在相同 V2V 通信距离限制下,相较于其他 3 种策略,本文策略的性能有优势。

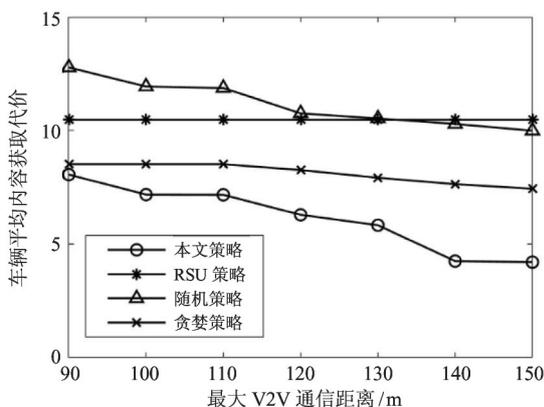


图 3 车辆平均内容获取代价-最大 V2V 通信距离

图 4 描述了本文策略下车辆的平均内容获取代价与博弈次数之间的变化关系,其中车辆数量 $N = 50$, V2V 最大通信距离 $d_{th} = 120$ m。随着博弈次数的增加,车辆逐步做出更有利于减小车辆平均内容获取代价的策略,一定次数博弈后,车辆的平均内容获取代价不会随着博弈次数的增加而改变。理论分析和仿真结果表明本文策略有较好的收敛性。

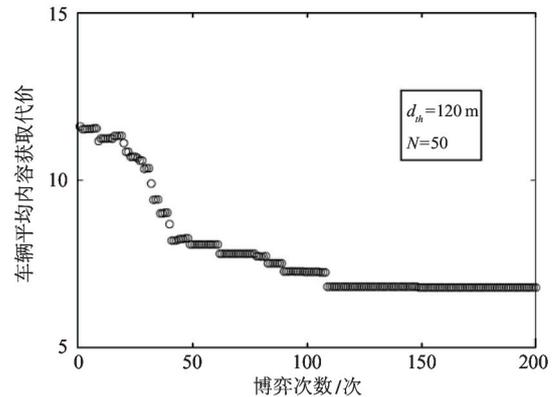


图 4 车辆平均内容获取代价-博弈次数

表 1 描述了不同策略的平均时间耗费,其中测试环境为 AMD Ryzen 7 4800U Windows10,软件版本为 Matlab 2021a, V2V 最大通信距离 $d_{th} = 120$ m, 车辆数量 $N = 20$, 测试次数为 50 次。在 RSU 策略下,车辆只与 RSU 建立 V2R 连接获取请求内容,因此得到结果只需要耗费极少的时间。在随机策略下,车辆的请求内容获取途径和请求内容的缓存都是随机的,因此得到结果只需要耗费较少的时间。在贪婪策略下,车辆仅针对自身内容获取代价做出最优选择,因此得到结果也只需要耗费较少的时间。在本文策略下,车辆的策略选择需要同时考虑自身内容获取代价和整体内容获取代价,得到结果需要耗费较多的时间。但由图 2 和图 3 仿真结果可知,本文策略是在时间耗费和性能上的折中。

表 1 不同策略的平均时间耗费

| 策略名称 | 策略平均耗费时间/s |
|--------|------------|
| 本文策略 | 1.30 |
| RSU 策略 | 0.01 |
| 随机策略 | 0.20 |
| 贪婪策略 | 0.62 |

5 结 论

为应对智能网联汽车场景下的大数据量和海量连接等特点,实现安全高效的行驶以及降低核心网的数据流量,本文构建了车联网场景下的内容共享模型。建模了基于车辆社交关系的内容获取代价最小化问题,通过优化车辆选择获取请求内容的途径以及是否将请求内容缓存到本地来减小车辆的平均内容获取代价。将建模的优化问题转化为车辆间的局部协作缓存博弈问题,通过分析博弈的纳什均衡,提出基于社交关系的局部协作缓存算法求得优化问题的最优解。仿真结果表明,本文提出的基于社交关系的局部协作缓存算法可有效降低系统的平均内容获取代价。

参考文献

- [1] YANG F, WANG S, LI J, et al. An overview of Internet of vehicles[J]. *China Communications*, 2014, 11(10): 1-15
- [2] 韩淑君,李俊,董谦,等. 车联网中基于服务的虚拟网络功能放置算法[J]. *高技术通讯*, 2021,31(4):341-349
- [3] KASANA R, KUMAR S. A geographic routing algorithm based on cat swarm optimization for vehicular ad-hoc networks[C]//2017 4th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, Noida, India, 2017: 86-90
- [4] HARTNAB K, STRASSER J. Saving Lives Through Advanced Vehicle Safety Technology: Intelligent Vehicle Initiative[R]. Federal Highway Administration: FHWA-JPO-05-057, 2005
- [5] MASINI B M, BAZZI A, ZANELLA A. A survey on the roadmap to mandate on board connectivity and enable V2V-based vehicular sensor networks [J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2207
- [6] SUNG J, KIM M, LIM K, et al. Efficient cache placement strategy in two-tier wireless content delivery network [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2016, 18(6): 1163-1174
- [7] LIU T, ABOUZEID A A, JULIUS A A. Traffic flow control in vehicular multi-hop networks with data caching [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 19(1): 231-244
- [8] WU H, ZHANG J, CAI Z, et al. Towards energy-aware caching for intelligent connected vehicles [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020,7(9): 8157-8166
- [9] ZHAO W, QIN Y, GAO D, et al. An efficient cache strategy in information centric networking vehicle-to-vehicle scenario[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 12657-12667
- [10] WANG B, SUN Y, LI S, et al. Hierarchical matching with peer effect for latency-aware caching in social IoT [C]//2018 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT), Xi'an, China, 2018: 255-262
- [11] 弭宝瞳,梁循,张树森. 社交物联网研究综述[J]. *计算机学报*, 2018,41(7):1448-1475
- [12] 陈言良,张凤元. 移动社交网络中的无线资源分配算法研究[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2018, 30(1):141-146
- [13] KERRACHE C A, LAGRAA N, HUSSAIN R, et al. TACASHI: trust-aware communication architecture for social Internet of vehicles [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 6(4): 5870-5877
- [14] WANG B, SUN Y, DONG T Q, et al. Security enhanced content sharing in social IoT: a directed hypergraph-based learning scheme [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4412-4425
- [15] NITTI M, GIRAU R, FLORIS A, et al. On adding the social dimension to the Internet of vehicles: friendship and middleware [C] // International Black Sea Conference on Communications and Networking, Odessa, Ukraine, 2014: 134-138
- [16] WU D, LIU B, YANG Q, et al. Social-aware cooperative caching mechanism in mobile social networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, 149: 102457
- [17] SAKURAI Y, YOSHIKAWA M, FALOUTSOS C. FTW: fast similarity search under the time warping distance [C] // Proceedings of the 24th ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems, Baltimore, USA, 2005: 326-337
- [18] HASSLINGER G, NTOUGIAS K, HASSLINGER F, et al. Performance evaluation for new web caching strategies

- combining LRU with score based object selection [J]. *Computer Networks*, 2017, 125: 172-186
- [19] HOCHBAUM D S. Heuristics for the fixed cost median problem [J]. *Mathematical Programming*, 1982, 22 (1): 148-162
- [20] ZHANG Y, XU Y, WU Q, et al. A game-theoretic approach for optimal distributed cooperative hybrid caching in D2D networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(3): 324-327
- [21] XU Y, WU Q, SHEN L, et al. Opportunistic spectrum access with spatial reuse: graphical game and uncoupled learning solutions [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(10): 4814-4826

Joint caching and content request strategy for Internet of vehicle

YU Yi^{*}, LI Song^{**}, WANG Yanfen^{*}

(^{*} School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

(^{**} Xuzhou Engineering Research Center of Intelligent Industry Safety and Emergency Collaboration, Xuzhou 221008)

Abstract

In order to reduce the data traffic of core network and ensure safe and efficient driving with requirements of high data volume and massive connections under Internet-intelligent vehicles, this paper presents a content sharing model in an Internet-of-vehicle (IoV) system and formulates a content sharing cost minimization problem based on social attributes between vehicles. The problem is transformed into a local cooperative caching game and a social-based local cooperative caching algorithm is proposed after analyzing the Nash equilibrium of the game. The simulation results show that the proposed scheme can effectively reduce content requesting cost of the IoV system and has good convergence.

Key words: Internet of vehicle (IoV), vehicle-to-vehicle, content sharing, cooperative caching, game theory