

车联网中基于信息年龄价值的边缘缓存策略

林志坚, 侯 映, 曹晓晓, 吴文浩, 陈小培, 陈平平

(福州大学电子信息工程系, 福建福州 350108)

摘要: 随着第五代移动通信(5G)技术的快速发展,车联网(Internet of Vehicles, IoV)已成为 5G 的重要应用场景之一. 针对 IoV 应用对即时性内容缓存的迫切需求,本文研究了支持动态内容缓存的移动边缘缓存方案以确保动态内容的时效性,该方案允许车辆从边缘缓存接入点(Caching-enabled Access Point, CAP)获得具有新鲜度约束的缓存内容. 此外,本文基于协作缓存,利用概率论建立了 CAP 缓存刷新和交付的随机模型. 同时,以基于信息年龄(Age of Information, AoI)的缓存命中率为 IoV 缓存的服务质量(Quality of Service, QoS)指标,建立了系统缓存命中的价值模型. 为确保缓存内容的有效性,本文在分层切片框架中考虑了两种具有不同 AoI 要求的车辆内容请求. 最后,本文提出了一个基于协作内容放置的系统内容缓存命中价值最大化的优化问题,这是一个 NP-hard 多目标多维选择背包问题. 因此,本文将其划分为若干个相互独立的优化问题并设计了一种基于内容年龄价值的最大增量算法进行求解. 仿真结果表明,本文采用的 CAP 协作内容放置策略的性能优于其他传统方法.

关键词: 缓存放置;软切片;信息年龄;动态内容交付;移动边缘缓存;车联网

基金项目: 国家自然科学基金(No.62171135, No.62001117);福建省杰青项目(No.2022J06010)

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)12-3410-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221409

Edge Caching Scheme Based on Value of Information Age in the Internet of Vehicles

LIN Zhi-jian, HOU Ying, CAO Xiao-xiao, WU Wen-hao, CHEN Xiao-pei, CHEN Ping-ping

(Department of Electronic Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: With the rapid development of the fifth generation (5G) mobile communications technology, Internet of vehicles (IoV) has become one of the important scenarios for 5G applications. Due to the urgent requirements of these applications for timely content caching, a dynamic content caching-enabled edge caching scheme is investigated to ensure timeliness, which allows vehicles to obtain cache content with freshness constraints from an edge caching-enabled access point (CAP). Furthermore, based on the idea of collaborative cache, a random model of CAP cache refreshing and delivery is established by probability theory. Meanwhile, considering the metric of hit rate with age of information (AoI) as the quality of service (QoS) index of IoV cache, a system model of caching performance value is developed. To ensure the effectiveness of content caching, two types of vehicular content requests with different AoI requirements are considered in a hierarchical slicing framework. Finally, the optimization problem to maximize the content caching value of cooperative content placement is formulated, which is a multi-objective, multi-dimensional and multi-choice knapsack problem and is proved to be NP-hard. Therefore, the problem is divided into several independent optimization problems, and a maximum incremental algorithm based on the age value of the content is designed to solve it. Simulation results show that the CAP cooperative content placement strategy outperforms other traditional methods.

Key words: cache placement; soft slice; age of information; dynamic content delivery; mobile edge cache; Internet of vehicles

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62171135, No.62001117); Distinguished Young Scholars Program of Fujian Province, China (No.2022J06010)

1 引言

近年来,随着第五代移动通信(5G)的发展,车联网(Internet of Vehicles, IoV)有望在未来智能交通系统发挥关键作用. 它支持新兴车辆应用,例如智能导航和位置感知视频广告等,旨在提供更为完善的道路安全驾驶体验^[1]. 然而,这些应用需要大量的网络缓存资源^[2],且 IoV 通常通信具有链路连通性弱和动态拓扑等特点^[3],这对 IoV 网络带来了巨大的挑战. 幸运的是,可以实现关键任务应用的高效处理、交互式娱乐的低延迟内容交付的移动边缘缓存技术(Mobile Edge Caching, MEC)为车联网通信环境中的上述问题提供了解决思路^[4]. 具体来说,MEC将内容主动缓存在边缘缓存接入点(Caching-enabled Access Point, CAP),如路侧单元(Road Side Unit, RSU)和具有缓存能力的车辆(Caching-enabled Vehicles, CVs),请求车辆可就近获取所请求的内容.

然而,针对智能驾驶辅助服务(Intelligent Driving Assistance Service, IDAS)等特殊应用,CAP中存储的内容会随时间和环境的变化而过时^[5],从而影响用户安全和体验. 为研究此问题,研究学者提出信息年龄(Age of Information, AoI)^[6-8]的概念来量化信息的新鲜度,即从当前版本在缓存节点生成到被车辆接收所经过的时间. 在智能网联领域,面对车联网差异化 AoI 需求,高效利用 CAP 的异构资源满足内容服务的差异化 AoI 需求是个亟需解决的问题. 然而,由于 IoV 环境下多内容刷新与请求到达的耦合效应、流量到达与无线传输的多维随机性,使得对于当前 AoI 的分析存在较大挑战. 基于以上分析,本文考虑了两种具有不同 AoI 要求的内容请求,即 IDAS 和驾驶娱乐服务(Driving Entertainment Service, DES).

基于 AoI 的 IoV 缓存的相关工作主要分为移动边缘缓存策略和差异化缓存服务策略两个方面.

MEC 可有效降低端到端延迟,更好地支持时延敏感型应用. 然而,传统的适用于静态网络的方案存在很多局限性^[9],比如,随时变化的拓扑结构、带宽限制和资源竞争等. 复杂的内容交付和车辆的高移动性给动态环境中的边缘缓存带来了新的挑战. 文献[10,11]引入了协作缓存,利用缓存节点之间的协作来达到不同 CAP 的缓存命中率、内容访问延迟等要求. 相关研究还进一步优化了不同的网络性能指标以解决缓存内容放置问题,例如提高体验质量(Quality of Experience, QoE)^[12]、提高移动性支持能力^[13]. 另一方面,机器学习已被广泛应用于车辆边缘缓存管理. 如文献[14]将人工智能赋能缓存和计算部署到智能车辆的附近区域. 然而,以上这些研究并未考虑处理动态内容时的 AoI 要求.

对差异化服务的研究在 IoV 中仍处于起步阶段,大多数相关研究都集中在单一的服务类型上. 如文献[15]在以内容为中心的车辆网络架构下提出了一个应用感知的内容放置框架. 文献[16]在 IoV 中提出了一种新的 QoS 感知分层 Web 缓存方案,用以解决异构网络中网络资源管理困难和 QoS 不匹配的问题. 网络虚拟化技术和切片技术可通过抽象网络资源、基础设施等方法来实现不同用户之间的资源共享,以此节省成本和降低能耗^[17]. 但是,目前还缺乏对异构车载网络资源管理的详细设计,以保证不同切片的需求. 此外,现有的蜂窝网络切片研究无法捕捉车辆的动态特性,难以直接应用于 IoV 场景. 本文的主要贡献总结如下:(1)利用概率论建立 CAP 缓存刷新和缓存交付的随机模型. 此外,将具有 AoI 的命中率定义为缓存命中价值,并建立了系统缓存命中价值模型;(2)在处理差异化 AoI 需求方面,本文考虑了两种类型的车载内容请求,并提供了基于 VoA 的内容缓存命中价值的理论分析;(3)对协作缓存内容放置问题进行建模,以最大化系统长期内容缓存价值. 本文设计了一个内容价值最大增量算法进行求解内容缓存命中价值优化.

2 系统模型

这一部分阐述了本文所研究的车联网系统场景和 CAP 分层切片框架下的缓存刷新和内容分发策略. 此外,提出了信息年龄价值模型以评估所提策略对缓存命中价值的影响.

2.1 系统场景

图 1 所示的城市交通环境中的移动边缘缓存系统中道路段及区域被划分为 z 个区域,表示为 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_z\}$. 第 t 个周期第 z 个区域内有 I_z 个 RSU,第 $i(i \in \mathcal{I} = \{0, 1, \dots, I\})$ 个 $RSU_{z,i}$ 的通信半径记为 $D_{z,i}$,设其配备大小为 C_R 的缓存空间, $RSU_{z,i}$ 所覆盖的道路记为 $l_{z,i}$,道路由 $u_z(u_z \in \mathcal{U} = \{1, 2, \dots, U\})$ 条单向车道且长度为 c 的一维道路构成, $l_{z,i}$ 的车道集合用 $\mathcal{L}_{z,i,u} = \{l_{z,i,1}, l_{z,i,2}, \dots, l_{z,i,u}, l_{z,i,U}\}$ 表示. $o_{z,i,u,k}$ 表示道路 $l_{z,i}$ 的车道 u 上第 k 个移动车辆,车辆 $o_{z,i,u,k}$ 的行驶速度用 $v_{z,i,u,k}$ 表示. 车辆分布遵循车道上密度为 ρ_u 的一维齐次泊松点过程(One-Dimensional Homogeneous Poisson Point Process, 1D HPPP),其中配备大小为 C_{cv} 的缓存空间的 CV 比例为 P_{cv} ,车道上 CV 的分布也遵循密度为 $P_{cv}\rho_u$ 的一维 PPP. 设车辆到车辆(Vehicle-to-Vehicle, V2V)通信半径为 R_{v2v} ,则 V2V 通信范围内 CV 的数量和所有车辆的数量遵循 $2R_{v2v}P_{cv} \sum_{u=1}^U \rho_u$ 和 $2R_{v2v} \sum_{u=1}^U \rho_u$ 的泊松分布. 考虑一个离散时间系统,一个网络周期时间以 T 为基本单

位,第 t 个周期区域 z 中的车辆集合为 $\mathcal{V}_z(t)$.

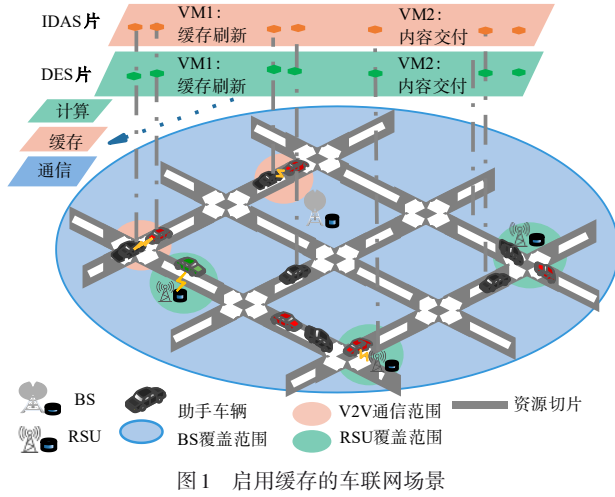


图1 启用缓存的车联网场景

为表征真实的城市道路环境, $l_{z,u}(t)$ 对应于第 t 个周期车道 u 上移动车辆的平均行驶速度, 其中 $l_{z,u}(t) \in [\min(v_{z,u}(t)), \max(v_{z,u}(t))]$, 第 t 个周期所有道路的第 u 条车道上移动车辆的到达率为 $a_u(t)$. 应用流体流量模型来描述车辆速度的演变, $o_{z,u,k}$ 速度的平均值与交通密度(即 $\rho_u(t)$)有关, 表示为

$$\bar{v}_{z,u,k}(t) = \left[\min(v_{z,u}(t)), \max(v_{z,u}(t)) \left(1 - \frac{\rho_u(t)}{\rho_u^{\max}(t)} \right) \right]^+ \quad (1)$$

其中 $[x, y]^+ = \max(x, y)$, $\rho_u^{\max}(t)$ 是第 t 个周期所有道路的第 u 条车道上最大移动车辆密度, $\min(v_{z,u}(t))$ 和 $\max(v_{z,u}(t))$ 分别是第 u 条车道上移动车辆的最小和最大速度.

2.2 CAP分层切片框架下的缓存刷新和内容分发

如图1所示, 本文考虑 IDAS 和 DES 两种类型的车载内容服务请求, 并构造两种满足差异化 AoI 需求的内容服务.

2.2.1 CAP分层切片框架

CAP 的带宽资源均被四个虚拟机 (Virtual Machine, VM) 切分和共享, 记为 VM1、VM2、VM3、VM4. 在 IDAS 片中, CAP 利用 VM1 以请求自适应 (Request Adaptive, RA) 的方式通过上行链路更新缓存的 IDAS 内容, 如图2所示, 当车辆提出对 IDAS 内容 a 的请求时, 将在 CAP 以概率 p_a 触发请求更新内容 a , 即 CAP 需要从基站 (Base Station, BS) 那里获取内容 a 的新版本, 然后再利用 VM2 通过下行链路完成交付. 否则, 即内容请求没有触发更新, CAP 分别利用 VM2 通过车辆与路侧单元 (Roadside to Vehicle, R2V) 或 CV2V (Caching-enabled Vehicle to Vehicle) 单播将内容 a 在先进先出 (First In First Out, FIFO) 的方式下交付给车辆.

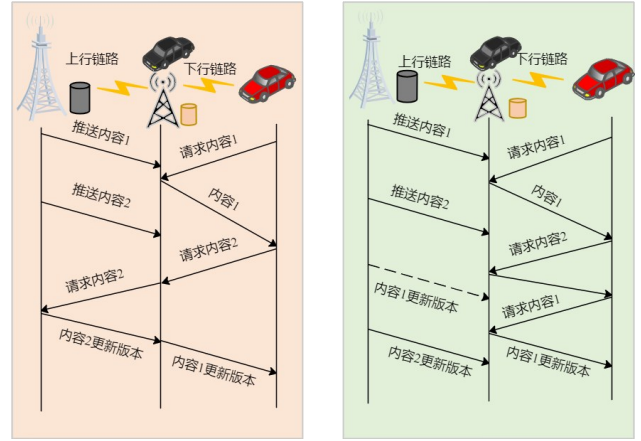


图2 CAP中缓存刷新和内容交付

VM3 和 VM4 属于 DES 片区, CAP 利用 VM3 以循环 (Round Robin, RR) 的方式更新 DES 内容 e , 如图2所示, RR 方案是基于推送的, BS 在用户请求之前将 DES 内容项和更新版本发送到 CAP, 然后在 VM3 上 CAP 使用上行链路进行缓存更新. 同时, 在 VM4 上使用下行链路将缓存的 DES 内容版本按需通过一跳传输直接发送给车辆, VM3 和 VM4 正交带宽独立工作. 假设每个 VM 的服务时间服从指数分布. 应用香农公式, 可以得到 RSU 的 VM 的平均服务率, 如式 (2) 所示.

$$\begin{aligned} \alpha_{RA} &= \frac{\beta_{RA} B_R}{s_a} \log_2 \left(1 + \frac{P_B d_{BR}^{-\alpha}}{I_{\text{intf}} + \chi^2} \right) \triangleq \beta_{RA} \bar{\alpha}_{RA}, \\ \alpha_{AR2V} &= \mathbb{E}_{d_{RV}} \left[\frac{\beta_{AR2V} B_R}{s_a} \log_2 \left(1 + \frac{P_R d_{RV}^{-\alpha}}{I_{\text{intf}} + \chi^2} \right) \right] \\ &\triangleq \beta_{AR2V} \bar{\alpha}_{AR2V}, \\ \alpha_{RR} &= \frac{\beta_{RR} B_R}{s_e} \log_2 \left(1 + \frac{P_B d_{BR}^{-\alpha}}{I_{\text{intf}} + \chi^2} \right) \triangleq \beta_{RR} \bar{\alpha}_{RR}, \\ \alpha_{ER2V} &= \mathbb{E}_{d_{RV}} \left[\frac{\beta_{ER2V} B_R}{s_e} \log_2 \left(1 + \frac{P_R d_{RV}^{-\alpha}}{I_{\text{intf}} + \chi^2} \right) \right] \\ &\triangleq \beta_{ER2V} \bar{\alpha}_{ER2V} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 s_a 为 IDAS 内容大小, s_e 为 DES 内容大小. B_R 表示 RSU 的可用带宽, β_{RA} 、 β_{AR2V} 、 β_{RR} 和 β_{ER2V} 分别表示 RSU 资源被虚拟机 VM1、VM2、VM3、VM4 分片的分片率, 其中 $\beta_{RA} + \beta_{AR2V} + \beta_{RR} + \beta_{ER2V} = 1$, α 是路径损耗因子, I_{intf} 是干扰功率, χ^2 是加性高斯噪声功率. P_B 和 P_R 分别是 BS 和 RSU 的发射功率, d_{BR} 代表 BS 和 RSU 的距离, d_{RV} 是随机变量, 代表 R2V 单播通信模式下的通信距离. $\bar{\alpha}_{RA}$ 、 $\bar{\alpha}_{AR2V}$ 、 $\bar{\alpha}_{RR}$ 和 $\bar{\alpha}_{ER2V}$ 分别表示分配 RSU 所有带宽时四个虚拟机的归一化平均服务速率.

CV 的 VM 的平均服务率如式(3)所示.

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{RA}}^{\text{cv}} &= \mathbb{E}_{d_{\text{bcv}}} \left[\frac{\beta_{\text{RA}}^{\text{cv}} B_{\text{cv}}}{S_a} \log_2 \left(1 + \frac{P_B d_{\text{BCV}}^{-\mu}}{I_{\text{Inf}} + \theta^2} \right) \right] \triangleq \beta_{\text{RA}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}^{\text{cv}}, \\ \alpha_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} &= \mathbb{E}_{d_{\text{cvv}}} \left[\frac{\beta_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} B_{\text{cv}}}{S_a} \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{cv}} d_{\text{CVV}}^{-\mu}}{I_{\text{Inf}} + \theta^2} \right) \right] \\ &\triangleq \beta_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}}, \\ \alpha_{\text{RR}}^{\text{cv}} &= \mathbb{E}_{d_{\text{bcv}}} \left[\frac{\beta_{\text{RR}}^{\text{cv}} B_{\text{cv}}}{S_e} \log_2 \left(1 + \frac{P_B d_{\text{BCV}}^{-\mu}}{I_{\text{Inf}} + \theta^2} \right) \right] \triangleq \beta_{\text{RR}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{RR}}^{\text{cv}}, \\ \alpha_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}} &= \mathbb{E}_{d_{\text{cvv}}} \left[\frac{\beta_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}} B_{\text{cv}}}{S_e} \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{cv}} d_{\text{CVV}}^{-\mu}}{I_{\text{Inf}} + \theta^2} \right) \right] \\ &\triangleq \beta_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}}\end{aligned}\quad (3)$$

其中 B_{cv} 表示 CV 的可用带宽, $\beta_{\text{RA}}^{\text{cv}}$ 、 $\beta_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}}$ 、 $\bar{\alpha}_{\text{RR}}^{\text{cv}}$ 和 $\bar{\alpha}_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}}$ 分别表示 CV 资源被虚拟机 VM1、VM2、VM3、VM4 分片的分片率, 其中 $\beta_{\text{RA}}^{\text{cv}} + \beta_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} + \beta_{\text{RR}}^{\text{cv}} + \beta_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}} = 1$, μ 是路径损耗因子, I_{Inf} 是干扰功率, θ^2 是加性高斯噪声功率. d_{CVV} 和 d_{BCV} 是随机变量, $\bar{\alpha}_{\text{RA}}^{\text{cv}}$ 、 $\bar{\alpha}_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}}$ 、 $\bar{\alpha}_{\text{RR}}^{\text{cv}}$ 和 $\bar{\alpha}_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}}$ 分别代表 CV2V 单播通信模式和 B2CV (Base station to Caching-enabled Vehicle) 单播通信模式下的传输距离, 分别表示分配 CV 所有带宽时四个虚拟机的归一化平均服务速率.

2.2.2 缓存刷新和内容交付

通过分析 CAP 缓存更新和内容交付, 分别得出了 RA 和 RR 方案的平均 AoI. 定义第 t 个周期, 区域 z 内车辆感兴趣的内容为 $q (q \in \{a, e\})$, 其内容集合表示为 $\mathcal{Q}_z^q(t)$, $|\mathcal{Q}_z^q(t)|$ 表示区域 z 内车辆感兴趣的内容 q 所对应的内容库中内容数量, $\mathbf{C}_{R,z}^q(t)/\mathbf{C}_{\text{cv},z}^q(t)$ 表示第 t 个周期区域 z 内 RSU/CV 所缓存内容 q 的集合.

定理 1 第 t 个周期, IDAS 片上 CAP 以 RA 方式交付车辆的请求 IDAS 内容 a , 车辆接收内容 a 的平均 AoI 由下式给出:

$$\bar{\delta}_a^{\text{R}}(t) = \frac{p_a}{\beta_{\text{RA}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}} + \frac{1}{\beta_{\text{AR2V}} \bar{\alpha}_{\text{AR2V}}} + \frac{1-p_a}{p_a \lambda_a} \quad (4)$$

$(1 \leq t \leq T)$

$$\bar{\delta}_a^{\text{cv}}(t) = \frac{p_a}{\beta_{\text{RA}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}^{\text{cv}}} + \frac{1}{\beta_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}}} + \frac{1-p_a}{p_a \lambda_a} \quad (5)$$

$(1 \leq t \leq T)$

证明 以 RSU 交付为例证明式(4)(式(5)同理). 将 IDAS 内容 a 的更新交付建模为一个更新过程. 内容 a 的更新频率由 $p_a \lambda_a$ 给出. 更新的时间间隔 $T_{a,\text{update}} = \sum_{j=1}^{\text{Ac}_a} \text{Time}_j$, 其中 Ac_a 表示内容 a 的两次连续更新之间服务的请求数, Time_j 是第 $j-1$ 个和第 j 个请求离开之间的持续时间. Time_j 符合 $1/\lambda_a$ 的指数分布, 应用 M/G/1 队列的特性, Ac_a 遵循几何分布:

$$P[\text{Ac}_a = n] = p_a (1-p_a)^{n-1} \quad (6)$$

因此,

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[T_{a,\text{update}}] &= \sum_{n=1}^{\infty} p_a (1-p_a)^{n-1} \frac{n}{\lambda_a} = \frac{1}{p_a \lambda_a}, \\ \mathbb{E}[T_{a,\text{update}}^2] &= \sum_{n=1}^{\infty} p_a (1-p_a)^{n-1} \frac{n^2+n}{\lambda_a^2} \\ &= \frac{2}{\lambda_a^2 p_a^2}\end{aligned}\quad (7)$$

内容在 CAP 上停留的时间 T_{Spe} 由式(8)给出:

$$\mathbb{E}[T_{\text{Spe}}] = \frac{\mathbb{E}[T_{a,\text{update}}^2]}{2\mathbb{E}[T_{a,\text{update}}]} = \frac{1}{p_a \lambda_a} \quad (8)$$

如果内容 a 的请求触发更新, 则请求车辆接收内容 a 的平均 AoI 由上行链路和下行链路的传输时间之和 $1/(\beta_{\text{RA}} \cdot \bar{\alpha}_{\text{RA}}) + 1/(\beta_{\text{AR2V}} \cdot \bar{\alpha}_{\text{AR2V}})$ 给出. 否则, 请求车辆接收内容 a 的平均 AoI 由内容在 RSU 的停留时间和下行链路的传输时间之和 $\mathbb{E}[T_{\text{Spe}}] + 1/(\beta_{\text{AR2V}} \cdot \bar{\alpha}_{\text{AR2V}})$ 给出. 则请求车辆接收内容 a 的总体平均 AoI 为

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_a^{\text{R}}(t) &= p_a \left(\frac{1}{\beta_{\text{RA}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}} + \frac{1}{\beta_{\text{AR2V}} \bar{\alpha}_{\text{AR2V}}} \right) \\ &\quad + (1-p_a) \left(\mathbb{E}[T_{\text{Spe}}] + \frac{1}{\beta_{\text{AR2V}} \bar{\alpha}_{\text{AR2V}}} \right) \\ &= \frac{p_a}{\beta_{\text{RA}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}} + \frac{1}{\beta_{\text{AR2V}} \bar{\alpha}_{\text{AR2V}}} + \frac{1-p_a}{p_a \lambda_a}, \quad (1 \leq t \leq T)\end{aligned}\quad (9)$$

定理 2 在 DES 片, CAP 以 RR 方式交付车辆的请求 DES 内容 e , 在第 t 个周期内, 车辆接收内容 e 的平均 AoI 由下式给出:

$$\bar{\delta}_e^{\text{R}}(t) = \frac{|\mathbf{C}_{R,z}^e(t)| + 3}{2\beta_{\text{RR}} \bar{\alpha}_{\text{RR}}} + \frac{1}{(1-\beta_{\text{ER2V}}) \bar{\alpha}_{\text{ER2V}}} \quad (10)$$

$(1 \leq t \leq T)$

$$\bar{\delta}_e^{\text{cv}}(t) = \frac{|\mathbf{C}_{\text{cv},z}^e(t)| + 3}{2\beta_{\text{RR}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{RR}}^{\text{cv}}} + \frac{1}{(1-\beta_{\text{ER2V}}^{\text{cv}}) \bar{\alpha}_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}}} \quad (11)$$

$(1 \leq t \leq T)$

证明 以证明式(10)为例, 式(11)同理, 内容 e 在 RSU 被更新时, 用 $T_{e,\text{update}} = \sum_{e=1}^{\mathbf{C}_{R,z}^e(t)} t_e$ 表示更新间隔, 其中 t_e 是更新内容 e 时的上行链路传输时间, $|\mathbf{C}_{R,z}^e(t)|$ 是 RSU 所缓存的 DES 内容数量. 假设周期长度 t_1, t_2, \dots, t_e 服从参数为 $1/(\beta_{\text{ER2V}} \cdot \bar{\alpha}_{\text{ER2V}})$ 的指数分布, 因此, 更新周期 $T_{e,\text{update}} = \sum_{e=1}^{\mathbf{C}_{R,z}^e(t)} t_e$ 服从参数为 $|\mathbf{C}_{R,z}^e(t)|$ 的爱尔朗分布:

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[T_{e,\text{update}}] &= \frac{|\mathbf{C}_{R,z}^e(t)|}{2\beta_{\text{RR}} \bar{\alpha}_{\text{RR}}}, \\ \mathbb{E}[T_{e,\text{update}}^2] - \mathbb{E}^2[T_{e,\text{update}}] &= \frac{|\mathbf{C}_{R,z}^e(t)|}{(1/2\beta_{\text{RR}} \bar{\alpha}_{\text{RR}})^2}\end{aligned}\quad (12)$$

车辆请求内容 e , 如图 3 所示, 请求车辆收到内容的 AoI 由 RSU 对内容 e 的缓存时间和内容交付的下行链路传输时间构成. RSU 所缓存的内容 e 的 AoI 由最后一次更新 e 的上行链路传输时间和持续到下一次更新的所停留的时间构成. 车辆接收内容的平均 AoI 为

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_e^R(t) &= \frac{1}{\beta_{RR}\bar{\alpha}_{RR}} + \frac{1}{(1-\beta_{ER2V})\bar{\alpha}_{ER2V}} + \frac{E[T_{e,update}^2]}{2E[T_{e,update}]} \\ &= \frac{1}{\beta_{RR}\bar{\alpha}_{RR}} + \frac{1 + |C_{R,z}^e(t)|}{2\beta_{RR}\bar{\alpha}_{RR}} + \frac{1}{(1-\beta_{ER2V})\bar{\alpha}_{ER2V}} \\ &= \frac{|C_{R,z}^e(t)| + 3}{2\beta_{RR}\bar{\alpha}_{RR}} + \frac{1}{(1-\beta_{ER2V})\bar{\alpha}_{ER2V}} \quad (1 \leq t \leq T)\end{aligned}\quad (13)$$

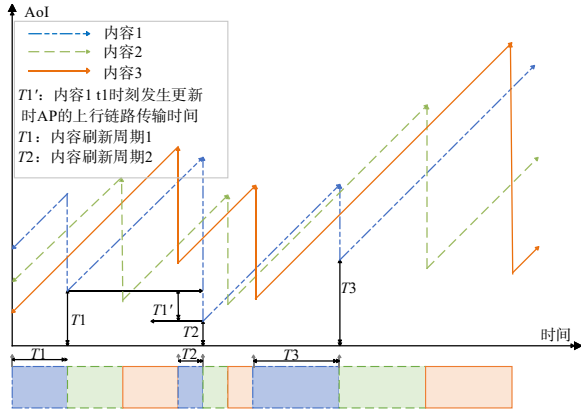


图 3 RR 方案下内容 AoI 变化

2.3 内容请求模型

车辆按照泊松过程随机提出内容请求. 因此, 在 CAP 上 IDAS 片和 DES 片第 t 个周期的聚合请求到达过程也遵循泊松过程, 速率分别为

$$\begin{aligned}H_a^R(t) &= 2D_{z,i}\lambda_a(t) \sum_{u=1}^U \rho_u(t) \\ H_a^{CV}(t) &= 2R_{v2v}\lambda_a(t) \sum_{u=1}^U \rho_u(t) \\ H_e^R(t) &= 2D_{z,i}\lambda_e(t) \sum_{u=1}^U \rho_u(t) \\ H_e^{CV}(t) &= 2R_{v2v}\lambda_e(t) \sum_{u=1}^U \rho_u(t)\end{aligned}\quad (14)$$

其中 $\lambda_a(t)$ 和 $\lambda_e(t)$ 分别表示第 t 个周期 IDAS 内容 a 和 DES 内容 e 的请求到达速率.

假定同类内容的大小相同, 内容有不同的请求概率. 假设在第 t 个周期区域 z 的内容流行度分布为 Zipf 分布 $\Gamma_z(t)$, 其中区域 z 内第 t 个周期内容 q 的流行度为 $\hat{\eta}_{z,q}(t)$, 即车辆请求内容的概率为

$$\hat{\eta}_{z,q}(t) = \frac{1}{\left(\sum_{q=1}^{|\mathcal{Q}_z^e(t)|} 1/q^\phi\right) q^\phi} \quad (15)$$

其中 ϕ 是反映请求集中程度的偏度因子. 较大的 ϕ 意味着内容请求显示出更高的相似性.

3 缓存内容 VoA 分析及目标函数构造

3.1 信息年龄价值

将车辆 $o_{z,u,k}$ 获取的内容 q 的 AoI 定义为 $\bar{\delta}_q^{o_{z,u,k}}(t)$, 表示在第 t 个周期内 $o_{z,u,k}$ 获取的内容 q 的平均 AoI. 若 $o_{z,u,k}$ 的请求由 $r_{z,i}$ 交付, 那么内容 q 的 AoI 为两部分之和: 第一部分是刷新内容 q 到车辆提起请求的等待时间, 第二部分是通 RSU 的 VM2 进行内容交付的时间, 记为 $\delta_{q,r_{z,i}}(t)$. 若内容请求被 CV 交付, 那么 $o_{z,u,k}$ 获取的内容 q 的 AoI 为两部分之和: 第一部分是 CV 所缓存的内容 q 的时间, 第二部分是 CV 通过 VM4 交付内容的时间, 记为 $\delta_{q,cv}(t)$. 对于车辆没有缓存的内容, 其 AoI 为一个无穷大的常数. 根据以上描述, 车辆 $o_{z,u,k}$ 接收到的内容 q 的 AoI 可以写作:

$$\bar{\delta}_q^{o_{z,u,k}}(t) = \begin{cases} \delta_{q,cv}(t), & \text{CV 交付内容} \\ \delta_{q,r_{z,i}}(t), & \text{r}_{z,i} \text{ 交付内容} \end{cases} \quad (16)$$

信息年龄价值 (VoA) 就是信息的实时认知价值, 信息年龄越大, 信息的新鲜度越低, 信息年龄价值也就越低. 根据文献 [18], 对 VoA 定义如下:

$$\zeta(\delta) = \begin{cases} \kappa \frac{e^{\delta_0-\delta} - e^{-(\delta_0-\delta)}}{e^{\delta_0-\delta} + e^{-(\delta_0-\delta)}}, & 0 < \delta < \delta_0 \\ 0, & \delta = \delta_0 \\ -\kappa \frac{e^{\delta_0-\delta} - e^{-(\delta_0-\delta)}}{e^{\delta_0-\delta} + e^{-(\delta_0-\delta)}}, & \delta > \delta_0 \end{cases} \quad (17)$$

其中, δ 表示车辆获取内容的 AoI, δ_0 为内容的 AoI 阈值, κ 为 VoA 系数, 超过 AoI 阈值的内容将对请求车辆产生负的价值.

考虑车辆发出请求时分为在 CAP 通信范围内与不在 CAP 通信范围内两种情况, 本文对此建模为通断服务 (ON/OFF) 过程, 如图 4 所示. 接通时间与 CAP 接入可用的持续时间相对应, 而断开时间则对应于车辆未在 CAP 通信范围. 本文通过 R2V 和 CV2V 两种网络连接来分析缓存命中价值 (VAH), 即所缓存命中的内容的年龄信息价值.

假设第 t 周期第 z 个区域中的道路合计长度为 l_z , 在区域 z 中 ON 状态下车辆发出请求时的概率为 $i_{p_z} = D_{z,i} \cdot I_z \cdot u_z / l_z$. 相应地, OFF 过程车辆发起请求的概率为 $n_{p_z} = (l_z - D_{z,i} \cdot I_z \cdot u) / l_z$.

此外, 由于 CAP 缓存容量有限, 所以需要判断 CAP

是否缓存数据内容. 因此有以下定义:

$$h_{r_{z,i}}^q(t) = \begin{cases} 1, & \text{内容 } q \text{ 缓存在 } r_{z,i} \text{ 中} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

$$w_{cv}^q(t) = \begin{cases} 1, & \text{内容 } q \text{ 缓存在 CV 中} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

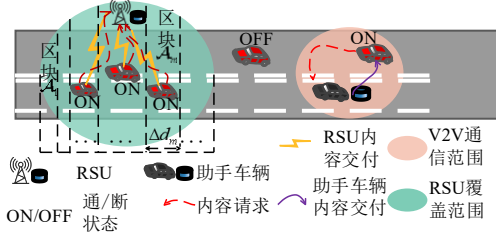


图4 R2V 和 CV2V 通信

3.2 RSU 的 VAH 分析

根据车辆到 RSU $r_{z,i}$ 的传输速率, 移动车辆 $o_{z,i,u,k}$ 与其连接的 RSU 之间的通信覆盖区域被划分为 M 个区块, 如图 4 所示, 表示为 $\mathcal{A} = \{\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2, \dots, \mathcal{A}_m, \dots, \mathcal{A}_M\}$, 区块 \mathcal{A}_m 的长度为 Δd_m , 移动车辆 $o_{z,i,u,k}$ 在区块 \mathcal{A}_m 与其相连的 $r_{z,i}$ 之间的传输速率为 $\varepsilon_{r_{z,i}}^m$. 基于区域模型, 假设当移动车辆 $o_{z,i,u,k}$ 与 RSU 的距离小于或等于 $\hat{d}_{z,i,u,k,q}(t)$ 才能完整获取内容 q , 并假设此时车辆位于区域 \mathcal{A}_{m+1} 内, 则满足以下条件:

$$\sum_{x=m+2}^M \Delta d_x \cdot \varepsilon_{r_{z,i}}^x / \bar{v}_{z,i,u,k} \quad (19)$$

$$+ \left(\hat{d}_{z,i,u,k,q}(t) - \sum_{x=m+2}^M \Delta d_x \right) \varepsilon_{r_{z,i}}^m / \bar{v}_{z,i,u,k} = s_q$$

$$\sum_{x=m+1}^M \Delta d_x < \hat{d}_{z,i,u,k,q}(t) < \sum_{x=m}^M \Delta d_x \quad (20)$$

因此, 区域 z 中车辆 $o_{z,i,u,k}$ 请求内容 q 时从 RSU 的获取内容的 VAH 可表示为

$$\Psi_{z,q}^R(t) = i_p \left(D_{z,i} - \hat{d}_{z,i,u,k,q}(t) \right) \left[\zeta(\bar{\delta}_q^R(t)) \cdot h_{r_{z,i}}^q(t) \right] / D_{z,i} \quad (21)$$

($z \in Z, i \in I, u \in \mathcal{U}, k \in \mathcal{V}_z(t), q \in \mathcal{Q}_z^q(t), 1 \leq t \leq T$)

则车辆在所有区域内从 RSU 获取内容的 VAH 为

$$\Psi_q^R(t) = \frac{\sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \sum_{q=1}^{\mathcal{Q}_z^q(t)} \Psi_{z,q}^R(t) \hat{\eta}_{z,q}(t)}{\sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \sum_{q=1}^{\mathcal{Q}_z^q(t)} \hat{\eta}_{z,q}(t)} \quad (22)$$

($1 \leq t \leq T$)

3.3 CV 的 VAH 分析

CV2V 实现近距离的内容共享, 车辆 $o_{z,i,u,k}$ 在其传输范围内从能够连接的其他车辆 $CV_{o_{z,i,u,k,j}}(j=1, \dots, cv_{z,i,u,k})$ 获取内容的延迟表示为

$$\text{del}_a^{\text{cv}}(t) = \frac{1}{\beta_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} + \frac{P_{\text{upr}} H_a^{\text{cv}}}{\left(\beta_{\text{RA}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}^{\text{cv}} \right)^2}} + \frac{P_{\text{upr}}}{\beta_{\text{RA}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}^{\text{cv}}},$$

$$1 - H_a^{\text{cv}} \left(\frac{P}{\beta_{\text{RA}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{RA}}^{\text{cv}}} + \frac{1}{\beta_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{ACV2V}}^{\text{cv}}} \right) \quad (23)$$

$$\text{del}_e^{\text{cv}}(t) = \frac{1}{\beta_{\text{ER2V}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}} - H_e^{\text{cv}}}$$

$$= \frac{1}{\beta_{\text{ER2V}}^{\text{cv}} \bar{\alpha}_{\text{ECV2V}}^{\text{cv}} - 2R_{v2v} \lambda_e(t) \sum_{u=1}^U \rho_u(t)}$$

其中 $P_{\text{upr}}(t) = (p_a \lambda_a(t)) / \sum_{a=1}^{|\mathcal{C}_a^z(t)|} \lambda_a(t)$ 表示第 t 个周期的内容请求触发缓存更新的平均概率, 并且 $cv_{z,i,u,k}(t) = 1 / (e^{-\sum_u \frac{a_u(t)}{l_z(t)} R_{v2v}})$. 如果上述延迟小于 $o_{z,i,u,k}$ 和 $CV_{o_{z,i,u,k,j}}$ 之间的可能连接时间 $ct_{k,j}$, 则表示在车辆 $o_{z,i,u,k}$ 和 $CV_{o_{z,i,u,k,j}}$ 之间的接触时间内内容 q 成功传输, 即缓存命中. 则有:

$$ct_{k,j}(t) = \frac{1 - e^{-\sum_u \frac{a_u(t)}{l_z(t)} R_{v2v}}}{\sum_u \frac{a_u(t)}{l_z(t)}} \cdot e^{-\sum_u \frac{a_u(t)}{l_z(t)} R_{v2v}} \quad (24)$$

$$\text{ch}_{z,k,j,q}(t) = \begin{cases} 1, & \text{del}_a^{\text{cv}}(t) \leq ct_{k,j}(t) \\ 0, & \text{del}_a^{\text{cv}}(t) > ct_{k,j}(t) \end{cases} \quad (25)$$

当请求截止到第 t 个周期开始之前, 请求车辆 $o_{z,i,u,k}$ 一跳范围内的车辆中满足 $\text{ch}_{z,k,j,q}(t) = 1$ 且缓存了符合要求的内容的 CV 总数为 $N_{z,\text{ch}}^{\text{cv}}(t)$. 假设这些内容的版本共有 $F_{z,i,u,k,q}$ 个小于 $\bar{\delta}_{z,i,u,k,q}(t)$ 的 AoI 值, 对应的内容 AoI 由大到小分布为

$$\bar{\delta}_{z,i,u,k,q,f}^{\text{cv}}(t) = \left\{ \bar{\delta}_{q,1}^{\text{cv}}(t), \bar{\delta}_{q,2}^{\text{cv}}(t), \dots, \bar{\delta}_{q,f}^{\text{cv}}(t), \dots, \bar{\delta}_{q,F_{z,i,u,k,q}}^{\text{cv}}(t) \right\}$$

其中元素 $\bar{\delta}_{q,f}^{\text{cv}}(t)$ 对应一个车群缓存内容的 AoI 值. 车辆中的缓存副本数表示为 $\hat{y}_f(t)$. $\hat{y}_{z,q}(t)$ 表示区域 z 中的车辆缓存助手集合, $C_{\text{cv},z}^q(t)$ 表示第 t 个周期区域 z 内 CV 缓存内容 q 的集合, 并且满足条件 $C_{\text{cv},z}^q(t) \subset \mathcal{Q}_z^q(t)$. 假设车辆从一跳范围内的车辆中获取内容的概率相同, 则车辆 $o_{z,i,u,k}$ 获取内容的 AoI 是 $\bar{\delta}_{q,f}^{\text{cv}}(t)$ 的概率为

$$p_{z,i,u,k,q,f}^{\text{cv}}(t) = \frac{\hat{y}_f(t)}{N_{z,\text{ch}}^{\text{cv}}(t)} \quad (26)$$

$$(z \in Z, i \in I, u \in \mathcal{U}, k \in \mathcal{V}_z(t), q \in \mathcal{Q}_z^q(t), 1 \leq t \leq T)$$

其中 $|\mathcal{V}_z(t)|$ 表示第 t 个周期区域 z 内车辆数量.

在 RSU 覆盖范围外, 当 $o_{z,i,u,k}$ 请求内容时以 CV2V 方式获取内容的 VAH 为

$$\Psi_{z,q}^{cv}(t) = \left[i_{p_z} \left(1 - \left(D_{z,i} - \hat{d}_{z,i,u,k,q}(t) \right) w_{cv}^q(t) / D_{z,i} \right) + n_{p_z} \right] \times \sum_{j=1}^{F_{z,i,u,k,q}} p_{z,i,u,k,q,f}^{cv}(t) \zeta \left(\bar{\delta}_{q,f}^{cv}(t) \right) \quad (z \in Z, i \in I, u \in \mathcal{U}, k \in \mathcal{V}_z(t), q \in \mathcal{Q}_z^q(t), 1 \leq t \leq T) \quad (27)$$

在所有区域内RSU覆盖范围外 $o_{z,i,u,k}$ 请求内容 q 时以CV2V方式获取内容的VAH为

$$\Psi_q^{cv}(t) = \frac{\sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \sum_{q=1}^{C_z^q(t)} \hat{\gamma}_{z,q}(t) \Psi_{z,q}^{cv}(t)}{\sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \sum_{q=1}^{C_z^q(t)} \hat{\gamma}_{z,q}(t)}, \quad (1 \leq t \leq T) \quad (28)$$

4 边缘缓存部署策略

本文将最大化长期VAH作为优化目标,并将其定义为一个周期内车辆请求的内容中,能在CAP获得的平均VAH. BS根据区域内车群变化决策CAP的缓存部署策略,每个周期之间的决策相互独立. 因此,最大化长期VAH的问题等效为最大化每个周期的平均VAH. 用 $C_{R,z}(t)$ 表示区域 z 在第 t 个周期内容的缓存决策列向量,共有 $|C_{R,z}(t)|$ 行,其中第 c 行的元素为 $h_{r_{z,i}}^c(t)$. 根据以上所述,边缘缓存内容总的VAH为

$$\Psi(t) = \Psi_a^R(t) + \Psi_a^{cv}(t) + \Psi_e^R(t) + \Psi_e^{cv}(t) \quad (29)$$

本文的最大化内容价值的目标函数建模为

$$\begin{aligned} \text{P1:} \quad & \min_c \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \Psi(t) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{e=1}^{|C_{z,R}^e(t)|} h_{r_{z,i}}^e(t) s_e + \sum_{a=1}^{|C_{z,R}^a(t)|} h_{r_{z,i}}^a(t) s_a \leq C_{r_{z,i}} \\ & (z \in Z, i \in I, 1 \leq t \leq T) \\ & \sum_{e=1}^{|C_{z,cv}^e(t)|} w_{cv}^e(t) s_e + \sum_{a=1}^{|C_{z,cv}^a(t)|} w_{cv}^a(t) s_a \leq C_{cv} \\ & (z \in Z, i \in I, 1 \leq t \leq T) \\ & 0 \leq p_q \leq 1, \quad q \in \mathcal{Q}_z^q(t) \\ & 0 \leq \eta_q \leq 1, \quad q \in \mathcal{Q}_z^q(t) \end{aligned} \quad (30)$$

为了求解上述优化问题,可以将问题P1划分为 T 个相互独立的优化问题. 在每个周期 t 中,分别求解优化问题.

$$\begin{aligned} \text{P2:} \quad & \min_c \Psi(t) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{e=1}^{|C_{z,R}^e(t)|} h_{r_{z,i}}^e(t) s_e + \sum_{a=1}^{|C_{z,R}^a(t)|} h_{r_{z,i}}^a(t) s_a \leq C_{r_{z,i}} \\ & (z \in Z, i \in I, 1 \leq t \leq T) \\ & \sum_{e=1}^{|C_{z,cv}^e(t)|} w_{cv}^e(t) s_e + \sum_{a=1}^{|C_{z,cv}^a(t)|} w_{cv}^a(t) s_a \leq C_{cv} \\ & (z \in Z, i \in I, 1 \leq t \leq T) \\ & 0 \leq p_q \leq 1, \quad q \in \mathcal{Q}_z^q(t) \\ & 0 \leq \eta_q \leq 1, \quad q \in \mathcal{Q}_z^q(t) \end{aligned} \quad (31)$$

由于每个区域的决策是独立的,因此,可以将问题P2视为优化单个区域CAP缓存部署策略的问题. 首先假设区域 z 中所有的请求都通过CV2V通信服务,则所有车辆获取到的VAH为

$$\begin{aligned} \Omega_z^{cv}(t) = & \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \sum_{q=1}^{C_z^q(t)} \hat{\gamma}_{z,q}(t) \sum_{f=1}^{F_{z,i,u,k,q}} p_{z,i,q,f}^{cv}(t) \zeta \left(\bar{\delta}_{q,f}^{cv}(t) \right)}{\sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \sum_{q=1}^{C_z^q(t)} \hat{\gamma}_{z,q}(t)} \quad (1 \leq t \leq T) \end{aligned} \quad (32)$$

当RSU缓存了内容 q 时,车辆中在R2V范围内可以通过从RSU下载内容的方式来满足对内容 q 的请求,这一部分请求的VAH为

$$\begin{aligned} \Omega_{z,q}^R(t) = & \frac{\frac{1}{D_{z,i}} \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} i_{p_z} \zeta \left(\bar{\delta}_q^R(t) \right) \left(D_{z,i} - \hat{d}_{z,i,u,k,q}(t) \right) \hat{\gamma}_{z,q}(t)}{\sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \hat{\gamma}_{z,q}(t)} \quad (1 \leq t \leq T) \end{aligned} \quad (33)$$

相应地,在式(31)中通过CV2V通信产生的命中因为RSU缓存了内容 q 的行为被抵消掉,则这部分VAH可以表示为

$$\Omega_{z,q}^{cv}(t) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \hat{\gamma}_{z,q}(t) \sum_{f=1}^{F_{z,i,u,k,q}} p_{z,i,q,f}^{cv}(t) \zeta \left(\bar{\delta}_{q,f}^{cv}(t) \right)}{\sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{\mathcal{V}_z(t)} \hat{\gamma}_{z,q}(t)} \quad (1 \leq t \leq T) \quad (34)$$

因此,RSU缓存了内容 q 之后整体VAH可表示为

$$\Delta \Omega_q^R(t) = \Omega_z^{cv}(t) + \Omega_{z,q}^R(t) - \hat{\Omega}_{z,q}^{cv}(t) \quad (35)$$

为了使网络边缘整体提供的内容价值最大,设计策略应选择RSU中缓存那些能使VAH增加值最多的内容集合. 定义集合 $\omega_z(t)$ 满足:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_z^q(t) | \omega_z^q(t) \subset Q_z^q(t), \\ \sum_{q \in \omega_z^q(t)} s_q \leq C_{r_z, i}, 0 \leq p_q \leq 1, 0 \leq \eta_q \leq 1 \end{array} \right\}, \text{标记 } \omega_z^*(t) \text{ 为能使}$$

VAH增加最多的内容集合,则有:

$$\omega_z^*(t) \in \arg \max_{\omega_z(t)} \left(\sum_{q \in \omega_z(t)} \Delta \Omega_q^R(t) \right) \quad (36)$$

算法1详细描述了缓存部署过程. 车辆缓存内容 $C_{z,v}^q(t)$ 是一个 $|\mathcal{V}_z(t)|$ 行、 $|Q_z^q(t)|$ 列的矩阵, 第 v 行第 q 列的元素 $c_{v,q}$ 表示内容为车辆 v 缓存内容 q 的年龄, 如果车辆 v 没有缓存内容 q , 则元素 $c_{v,q} = 0$. 车辆相邻关系 $\mathcal{E}_z(t)$ 是一个维数为 $|\mathcal{V}_z(t)|$ 的方阵, 当车辆具有一跳相邻关系时, 对角线上的元素为 0. 定义 C_{left} 为 RSU 剩余缓存空间. 定义可缓存内容集合中能产生的最大 VAH 为 $\Delta \Omega_{\text{max}}$, 其内容为 q^* .

算法1 内容价值最大增量算法

输入: 周期 t , 内容集合 $Q_z^q(t)$, 车辆缓存内容集合 $C_{z,cv}^q(t)$, 流行度分布

$\Gamma_z(t)$;

步骤:

初始化

FOR all $v \in \mathcal{V}_z(t)$ do

FOR all $q \in Q_z^q(t)$ do

根据 $C_{z,v}^q(t)$ 和 $\mathcal{E}_z(t)$ 初始化 $\mathcal{V}_{z,i,u,k}(t)$ 和年龄分布 $\delta_{z,i,u,k}(t)$

END FOR

END FOR

计算 $\Omega_z^{\text{cv}}(t)$

$C_{\text{left}} \leftarrow C_R$

$\hat{Q}_z^q(t) \leftarrow Q_z^q(t)$

选择缓存内容

WHILE $C_{\text{left}} > 0$ do

$\Delta \Omega_{\text{max}} \leftarrow 0$

$q^* \leftarrow \emptyset$

FOR all $q \in Q_z^q(t)$ do

计算 $\Delta \Omega_q^R(t)$

IF $\Delta \Omega_q^R(t) > \Delta \Omega_{\text{max}}$ and $s_q < C_{\text{left}}$ then

$q^* \leftarrow q$

$\Delta \Omega_{\text{max}} \leftarrow \Delta \Omega_q^R(t)$

END IF

END FOR

IF $q^* \neq \emptyset$ then

$\Omega_z^R(t) \leftarrow \Omega_z^R(t) + \Omega_{z,q}^R(t)$

$\Omega_z^{\text{cv}}(t) \leftarrow \Omega_z^{\text{cv}}(t) - \hat{\Omega}_{z,q}^{\text{cv}}(t)$

$C_z^R(t) \leftarrow C_z^R(t) \cup q^*$

$C_{\text{left}} \leftarrow C_{\text{left}} - s_{q^*}$

$\hat{Q}_z^q(t) \leftarrow \hat{Q}_z^q(t) \setminus q^*$

ELSE

BREAK

输出: RSU 缓存内容集合 $C_z^R(t)$

5 仿真分析

本文考虑曼哈顿城市网格情景, 道路上每 2 km 随机布置 0 个或 1 个或 2 个 RSU. 将 RSU 的覆盖范围划分为 7 个区块, 每个区块相应的传输 u_z 速率为 $[1 \ 2 \ 5.5 \ 11 \ 5.5 \ 2 \ 1]$ Mbps. 表 1 列出了重要的仿真参数.

表 1 仿真参数

参数	值	参数	值	参数	值	参数	值
B	10 MHz	$D_{z,i}$	400	σ^2	-105 dBm	C_R	10
s	1 Mb	R_{v2v}	100	I_{inf}	-75 dBm		
P_B	10 W	ρ_u	50/km	α	3.5		
P_R	1 Mb	$ Q_z^q(t) $	100	P_{cv}	0.5		

将文中提出的策略与以下三种缓存部署策略作比较.

(1) 仅流行度的缓存策略^[19]: 这一缓存策略只与流行度有关, 在 CAP 中缓存内容请求概率最大的内容.

(2) 仅 RSU 的缓存策略^[20]: 这一缓存策略仅考虑把 RSU 作为边缘缓存 CAP 进行缓存分发的情况.

(3) 仅新鲜度的缓存策略^[21]: 这一缓存策略只与内容的新鲜度有关, 在 CAP 中缓存内容新鲜度最大的内容.

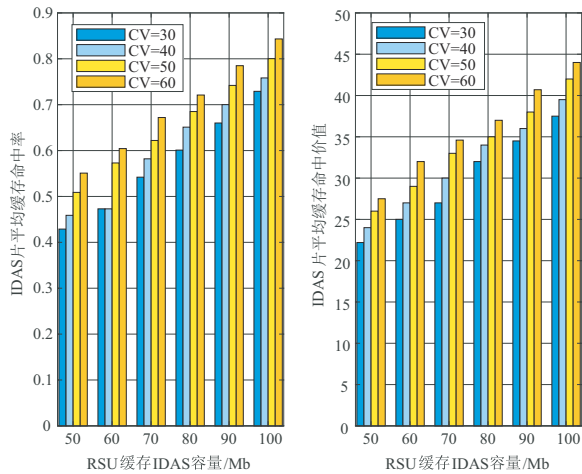
CAP 的缓存容量大小对网络缓存命中效率的影响如图 5 所示. 由图 5(a) 和图 5(b) 可知, 随着 RSU 和 CV 缓存容量的增长, IDAS 片和 DES 片平均缓存命中率 (Cache Hit Rate, CHR) 和平均 VAH 均呈上升趋势. 这是因为 RSU 缓存容量越大, 在 ON 状态下车辆请求内容时, RSU 未缓存该内容而不能服务车辆的概率越小. 同时随着 CV 缓存容量增大, CAP 中就可以存储更多的内容, 更新鲜的内容可以缓存在 CAP 中, 显然更高的 VoA 请求被命中.

另一方面, 本文还考虑在不同策略下 IDAS 片和 DES 片上随着 RSU 缓存容量变化网络效用的情况. 如图 5(c) 所示, 对于 IDAS 片, 本文所提的策略始终优于仅 RSU 策略. 因为 CV 在未被 RSU 覆盖的环境下扮演着移动 RSU 的作用, 在 CV 的缓存容量较小或无 CV 情况下, 网络整体的平均 VAH 会有一些的折损. 车辆在未被 RSU 覆盖的路段请求可以被 CV 满足, 这显然增加了平均 CHR 和平均 VAH. 此外, 对于 DES 片, 如图 5(d) 所示, 三种策略的网络命中情况均随 RSU 缓存容量上升而上升. 本文所提的策略优于仅 AoI 策略, 仅 RSU 最差. 因为在 DES 片内缓存刷新方案为 RR, 内容的平均新鲜度相同, 仅 AoI 策略无法同时考虑到内容的流行度, 因此对于用户请求率较高的内容, CAP 未缓存该内容而不能服务车辆的概率较大. 此外, 由于多内容刷新与请求到达的随机性, CV 的协助缓存不仅降低了 CAP 之间共享的内容 AoI, 还增加了内容缓存命中概率.

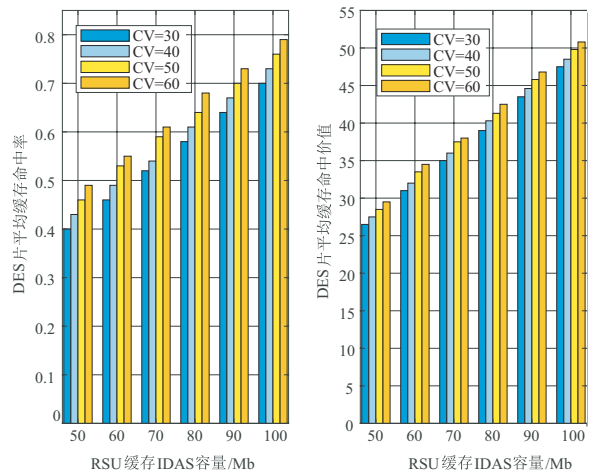
图6显示了当CAP最大通信距离变化时, IDAS片和DES片平均VAH和平均CHR的变化趋势. 如图6(a)和图6(b)所示, 随着CAP最大通信距离的增长, IDAS片和DES片平均CHR和平均VAH均呈上升趋势. 同时, 比较不同策略下RSU最大通信距离对网络效用的影响. 如图6(c)所示, 对于IDAS片本文所提策略性能优于仅RSU的策略, 这进一步验证了图5的结论. 如图6(d)所示, 对于DES片, 当RSU的最大通信距离增大, 本文所提策略性能始终优于其他两种策略.

图7说明了资源切片率对CHR和VAH的影响. 从图7(a)中可以看出, 随着片间切片率的增加, DES片网

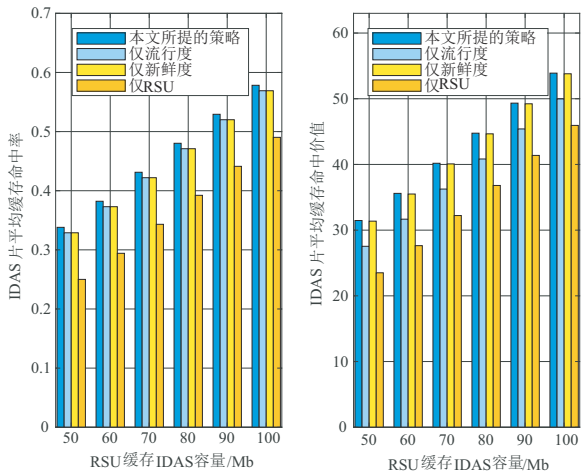
络性能随之增加, 而相较而言, IDAS片网络性能变化不明显. 此外, 本文所提策略均优于其他策略. 因为对于IDAS内容的AoI资源切片率相对于聚合内容到达率的影响可忽略不计, 而DES内容的AoI资源切片率对于内容AoI影响较为明显, 此现象验证了前文理论分析的正确性. 需要注意的是, 在IDAS片由于片内资源是上下行链路共享, 因此我们只考虑调整DES片片内资源分配比例以满足不同的AoI需求. 从图7(b)中可以看出, 随着DES片内切片率的增加, VM2的内容交付服务速率提高, 但是降低了VM1缓存刷新的服务速率, 降低内容的AoI, 从而降低DES片缓存VAH和缓存内容命中率.



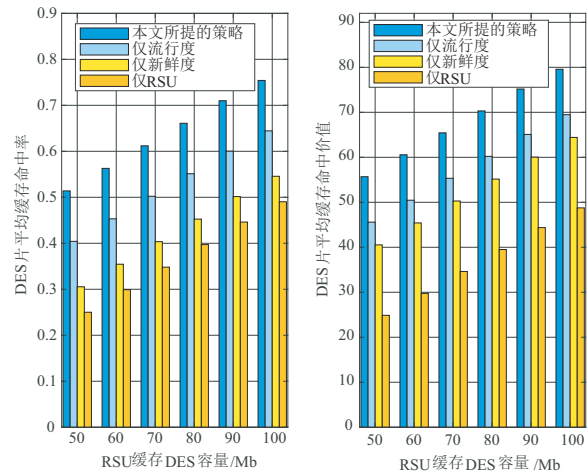
(a) CAP缓存IDAS的容量对网络效用的影响分析结果验证



(b) CAP缓存DES的容量对网络效用的影响分析结果验证



(c) RSU缓存IDAS的容量对不同策略的影响分析结果验证



(d) RSU缓存DES的容量对不同策略的影响分析结果验证

图5 CAP的缓存容量对网络效用的影响分析结果验证

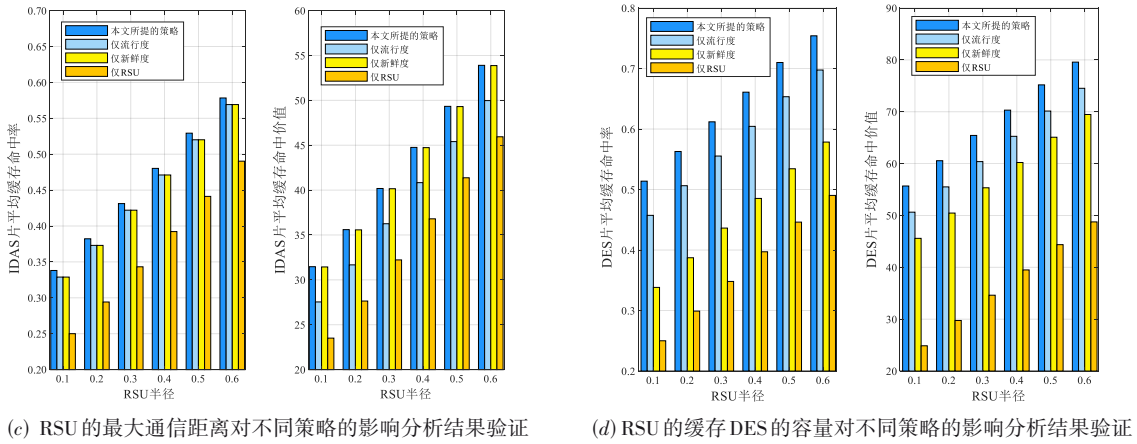
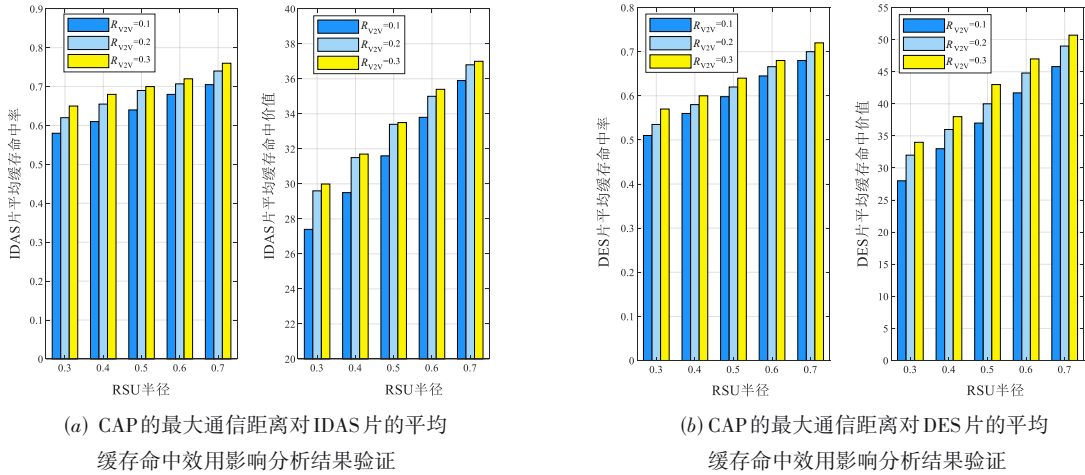


图6 CAP的最大通信距离对网络平均缓存命中效用的影响分析结果验证

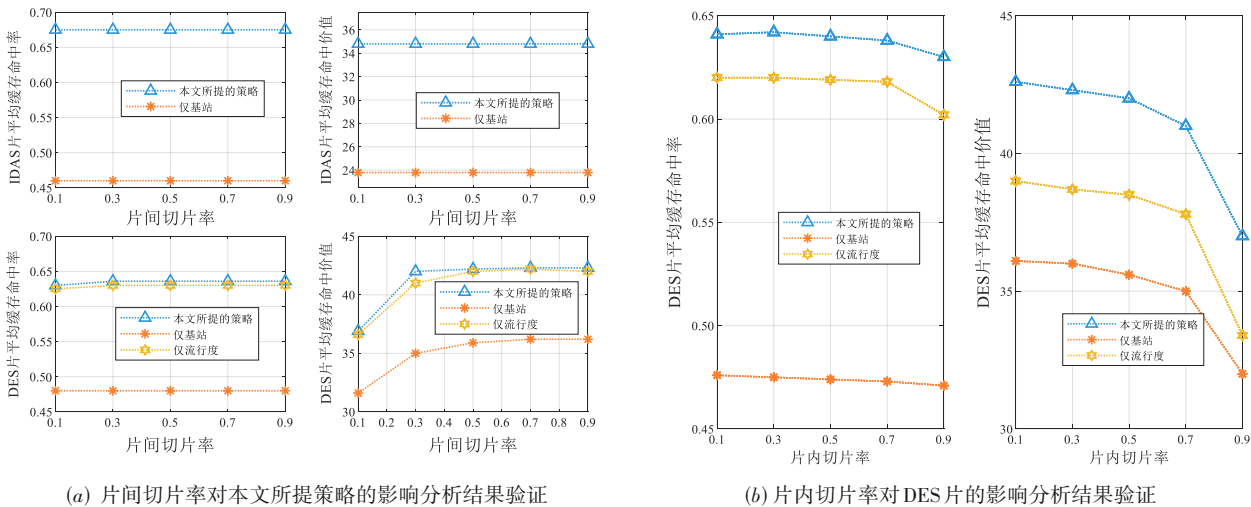


图7 资源切片率对网络效用的影响分析结果验证

6 结论

首先,本文利用概率论对IoV场景中基于AoI的CAP协作缓存架构进行数学建模,其次,以最大化内容价值为目标,提出了基于协作内容放置的系统内容缓存

命中价值的优化问题. 基于IoV中车辆的移动性特征的考虑,本文在求解协作缓存策略的过程中,同时兼顾IoV中RSU覆盖范围有限的问题,根据内容流行度和车群缓存情况,设计了一个内容价值最大增量算法求

解出使内容价值最大化的缓存内容集合以更新 CAP 的缓存内容。仿真结果证明了 CAP 协作内容放置策略的性能优于其他策略。

参考文献

- [1] CHEN C, WANG C, QIU T, et al. Caching in vehicular named data networking: Architecture, schemes and future directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2378-2407.
- [2] TAN L T, HU R Q. Twin-timescale artificial intelligence aided mobility-aware edge caching and computing in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3086-3099.
- [3] 廖勇, 田肖懿, 蔡志镨, 等. 面向 C-V2I 的基于边缘计算的智能信道估计[J]. *电子学报*, 2021, 49(5): 833-842.
LIAO Y, TIAN X Y, CAI Z R, et al. Intelligent channel estimation based on edge computing for C-V2I[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(5): 833-842. (in Chinese)
- [4] ZHANG K, ZHU Y, et al. Edge intelligence and blockchain empowered 5G beyond for the industrial Internet of Things[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(5): 12-19.
- [5] ZHANG S, LI J, LUO H, et al. Low-latency and fresh content provision in information-centric vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(5): 1723-1738.
- [6] ZHONG J, YATES R D, SOLJANIN E. Two freshness metrics for local cache refresh[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE, 2018: 1924-1928.
- [7] QIN X, XIA Y, LI H, et al. Distributed data collection in age-aware vehicular participatory sensing networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(19): 14501-14513.
- [8] ZHANG S, LUO H, LI J, et al. Hierarchical soft slicing to meet multi-dimensional QoS demand in cache-enabled vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(3): 2150-2162.
- [9] HUO Y, SUN Y, XING Y, WANG Z. Cooperative caching scheme based on hawkes popularity prediction in vehicular networks[C]//2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE, 2021: 436-440.
- [10] 张涛, 李强, 张继良, 等. 面向软件定义无线接入网的高效协作内容缓存算法[J]. *电子学报*, 2017, 45(11): 2649-2655.
ZHANG T, LI Q, ZHANG J L, et al. An efficient cooperative content caching algorithm for software-defined radio access networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(11): 2649-2655. (in Chinese)
- [11] 张德干, 崔玉亚, 陈晨, 等. 一种面向高速路车联网场景的自适应路由方法[J]. *电子学报*, 2020, 48(1): 172-179.
ZHANG D G, CUI Y Y, CHEN C, et al. An adaptive routing method for high-speed-road scenario of the Internet of vehicle[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(1): 172-179. (in Chinese)
- [12] QIAO G, LENG S, MAHARJAN S, et al. Deep reinforcement learning for cooperative content caching in vehicular edge computing and networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 7(1): 247-257.
- [13] HUANG W, SONG T, YANG Y, ZHANG Y. Cluster-based cooperative caching with mobility prediction in vehicular named data networking[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 23442-23458.
- [14] WU H, CHEN J, XU W, et al. Delay-minimized edge caching in heterogeneous vehicular networks: A matching-based approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(10): 6409-6424.
- [15] MA M, WONG V W S. Age of information driven cache content update scheduling for dynamic contents in heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(12): 8427-8441.
- [16] VAN D D, AI Q, LIU Q, HUYNH D T. Efficient caching strategy in content-centric networking for vehicular ad-hoc network applications[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, 12(7): 703-711.
- [17] KUMAR N, ZEADALLY S, RODRIGUES J J P C. QoS-aware hierarchical web caching scheme for online video streaming applications in internet-based vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7892-7900.
- [18] SHAH S D A, GREGORY M A, LI S. SDN-based service mobility management in MEC-enabled 5G and beyond vehicular networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(15): 13425-13442.
- [19] ZHANG S, QUAN W, LI J, et al. Air-ground integrated vehicular network slicing with content pushing and caching[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 2114-2127.
- [20] YAO L, WANG Y, WANG X, WU G. Cooperative caching in vehicular content centric network based on social attributes and mobility[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, 20(2): 391-402.

- [21] ABDEL-AZIZ M K, LIU C F, et al. Ultra-reliable low-latency vehicular networks: Taming the age of information tail[C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE, 2018: 1-7.

作者简介



林志坚 男,1984年出生于福建省漳州市。现为福州大学电子信息工程系副教授、硕士生导师。主要研究方向为车联网、边缘缓存与计算卸载。

E-mail: zlin@fzu.edu.cn



侯映 女,1999年7月出生于四川省达州市。福州大学先进制造学院研究生。主要研究方向为车联网、边缘缓存与计算卸载。

E-mail: learnerhy@163.com



曹晓晓 女,1994年5月出生于陕西省咸阳市。福州大学先进制造学院研究生。主要研究方向为车联网、边缘缓存与计算卸载。

E-mail: 297875635@fzu.edu.cn



吴文浩 男,2000年3月出生于福建省宁德市。福州大学物理与信息工程学院研究生。主要研究方向为车联网、边缘缓存与计算卸载。

E-mail: 221127202@fzu.edu.cn



陈小培 男,1997年11月出生于福建省漳州市。福州大学先进制造学院硕士研究生。主要研究方向为计算卸载与边缘缓存。

E-mail: cspace@qq.com



陈平平(通讯作者) 男,1986年出生于福建省泉州市。现为福州大学电子信息工程系教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信、信息传输与计算卸载。中国电子学会会员编号: E190021215M。

E-mail: ppchen.xm@gmail.com