



基于信息中心 5G 车联网中社会感知的流媒体缓存与转发策略

曹腾飞, 江翠丽, 刘志强, 王晓英

(青海大学计算机技术与应用系, 青海 西宁 810016)

摘要: 5G 通信技术的到来为车载自组网 (VANET) 提供高质量的视频流服务奠定了基础。然而, 现有的 VANET 仍然采用以主机通信而非内容分发的 IP 网络来分发视频数据, 造成了网络功能与设计目标之间的不匹配, 为提供高质量的视频服务带来了巨大挑战。基于上述问题, 提出了一种以信息为中心的社会感知流媒体缓存和转发策略 (SACF), 其时间复杂度为 $O(m^2)$ 。首先, 通过分析用户节点的行为构建社会感知的虚拟社区; 然后, 提出了一种视频快速转发机制来支持用户就近获取视频内容; 最后, 提出了一种基于社区的缓存策略来优化视频的缓存分布。仿真实验结果表明, 与最新的解决方案相比, 该算法的缓存命中率提高了 18%, 查找时延降低了 33%, 平均网络开销减少了 14.6%。

关键词: 社会感知; 缓存与转发; 视频流; 车联网; 信息中心网络

中图分类号: TP393.4

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019297

Social-aware caching and forwarding for video streaming in information-centric 5G VANET

CAO Tengfei, JIANG Cuili, LIU Zhiqiang, WANG Xiaoying

Department of Computer Technology and Applications, Qinghai University, Xining 810016, China

Abstract: The arrival of 5G-enabled communication technology has laid the foundation for providing high-quality video stream services in vehicular Ad Hoc network (VANET). However, current VANET still distribute video content over IP networks which design for host communication instead of content distribution. The mismatch between network function and design goals brings huge challenges for providing high quality video service. Based on the above questions, a social-aware caching and forwarding was proposed to support efficient video streaming services and the time complexity of the algorithm was $O(m^2)$. Firstly, a virtual community was constructed by analyzing the user's behaviors. Then, a fast forwarding scheme was introduced to ensure that users could discover the requested videos nearby. Finally, a community-based caching policy was proposed to optimize the in-community caching distributions. Simulation results show how the proposed strategy achieves better performance than other state-of-art solutions in terms of caching hit ratio, searching delay and control overhead.

Key words: social-aware, caching and forwarding, video streaming, VANET, information-centric networking

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2019-12-10

基金项目: 青海省应用基础研究计划资助项目 (No.2019-ZJ-7034); 青海大学实验教育教学研究项目 (No.SY20907); 国家自然科学基金资助项目 (No.61762074)

Foundation Items: National Natural Science Foundation of Qinghai Province (No.2019-ZJ-7034), Experimental Education Teaching Research Project of Qinghai University (No.SY201907), The National Natural Science Foundation of China (No.61762074)

1 引言

最近, 5G 吸引了全球学术界和工业界的广泛关注^[1-2]。5G 的诞生是一次革命性的创新, 其峰值传输速率高达 10 Gbit/s, 它以毫秒级的端到端时延^[3], 满足人们对高质量的移动互联网服务的需求。

车载自组网(vehicular Ad-Hoc network, VANET)作为一项新兴技术, 主要应用于交通道路拥堵、车辆服务推荐等。其中, 最具特色的应用是, 它将具有通信能力的设备安装在车辆上, 使车辆间能够直接进行相互通信^[4], 保证用户能够获得他们所需要的信息, 最终构成车辆间开放式的移动网络。

近年来, 5G 无线通信技术的快速发展(如 IEEE 802.11p^[5]、LTE-D2D^[6]等), 为在车联网下部署高带宽需求的流媒体服务铺平了道路。Cisco 的最新研究报告表明^[7], 截至 2019 年年底, 视频业务已经占据了移动数据总量的 81%, 并且在未来 5 年内呈现不断上升的趋势, 因此研究 5G 车联网中移动流媒体的分发服务意义重大。5G 车联网移动流媒体分发服务示意如图 1 所示。

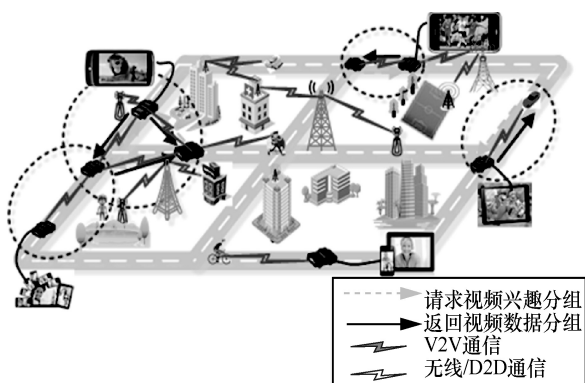


图1 5G 车联网移动流媒体分发服务示意

由于 5G 车联网移动环境导致网络拓扑频繁改变, 然而一些传统的解决方案, 例如对等网络(peer-to-peer network, P2P 网络)^[8]等移动流媒体分享服务, 都是基于传统 IP 协议的技术, 这些技

术是面向主机为中心(host-centric)的解决方案, 每次获取内容都需要将数据请求间接映射到内容存放所在的设备位置上, 这种 IP 地址的二重性表达限制了 5G 车联网对移动节点的支持^[9], 并且违背了用户仅关心数据内容而非数据载体的需求, 极大地降低了用户体验质量。

在信息中心网络(information-centric networking, ICN)^[10]中, 任何网络单元都可以缓存接收到的内容为今后的请求提供服务, 这种路径缓存模式不仅加快了内容在网络中的散播还减轻了核心网的压力。此外, ICN 在内容分发效率以及移动性方面也具有明显优势, 因此构建以 ICN 为架构的车联网视频共享系统已经成为了 5G 车联网的重要发展趋势^[11]。然而, 现有的基于 ICN 的 VANET 解决方案简单地将固网 ICN 中的缓存与转发策略引入到 VANET 中, 不仅造成了大量的缓存冗余, 而且还浪费了宝贵的带宽资源。

因此, 针对以上问题, 本文提出了一种信息中心的 5G 车联网中社会感知的流媒体缓存与转发机制(social-aware caching and forwarding, SACF)。具体贡献如下。

(1) 根据每个节点的相似性(需求内容、移动方向), 提出虚拟社区构建方法。

(2) 根据虚拟社区关系, 进行基于社区的缓存放置; 提前在相似偏好的车辆节点上缓存同类的视频资源, 以便快速定位高概率的视频内容, 提高查找命中率, 降低网络开销。基于车辆节点之间的移动性行为模式提出高效的缓存策略, 以减少具有相似移动行为的节点之间传递数据的抖动, 降低通信开销。

(3) 用户根据放置好的缓存来发送数据请求, 并选择移动方向相似且移动速度较快的节点作为转发节点, 当查找视频资源因请求数量过多出现超时的情况下, 请求节点选择到其他邻近的同类节点继续查找, 以实现 5G 车联网的负载均衡。



2 相关工作

当前的 ICN 网络架构, 如命名数据网络 (named data networking, NDN) [12], 通信是由数据请求者主导, 并且通过交换兴趣分组和数据分组来进行通信的。在信息中心车联网中 [13-14], 用户通过移动环境中的网络接口来广播兴趣分组, 具体来说, 数据请求者首先将兴趣分组发送到所有一跳范围内的邻居节点, 接收节点重复此过程, 直到将兴趣分组传递到内容提供节点。该传递方式容易产生冗余数据分组丢失现象, 造成带宽浪费, 同时还会产生兴趣分组的洪泛, 给信息中心车联网带来巨大的压力。

为了实现信息中心的 5G 车联网在低开销要求下的兴趣分组的快速转发和数据分组的快速回传, 当前的研究工作主要集中在以下几个方面。

在广播路由方面, 由于存在阻碍无线通信的建筑物, 参考文献 [15] 提出了基于广播的内容分发策略, 该策略在一定程度上提高了兴趣分组和数据分组的发送速度, 但是网络负载较大。参考文献 [16] 提出了一种降低兴趣分组转发数量的机制 (HyPOP), 根据兴趣分组的流行度进行分类, 将请求的内容采用广播的方式转发。这种方式在一定程度上降低了移动节点的缓存大小, 但是由于采用全网广播的方式, 平均网络开销较大。

在单播路由选择方面, 参考文献 [17] 提出了一种稳健的转发节点选择机制 (robust for warder selection, RUFS) 通过移动节点交换最近查找成功的内容信息, 并将兴趣分组转发到已经成功路由相同请求的节点。这种方式属于概率性转发策略, 其缺陷是如果最近查找成功列表中不存在相同请求的内容信息, 那么将会查找失败, 因此存在较大的不稳定性。

在缓存放置方面, 参考文献 [18] 提出了一种分布式概率缓存机制 (distributed probabilistic caching, DPC), 根据移动节点收集的用户兴趣列表,

挖掘出用户的需求并进行决策, 然后比较网内车辆之间的度中心, 得出车辆的重要性, 最终来决定缓存的位置; 在比较车辆的度中心时仅仅参照相邻车辆的数量来做出判断, 可能导致所选择的并非最佳节点的问题。参考文献 [19] 提出了一种位置社会关系的兴趣分组转发机制 (STCR), 该机制虽然在一定程度上提高了查找命中率, 但是由于相遇存在一定的几率性, 可能导致转发数据的不稳定性。

传统的信息中心车联网解决方案, 大都单独考虑流媒体服务的时延敏感或网络负载度的问题, 而本文针对以信息为中心的 5G 车联网环境中的并行数据传输效率问题, 提出了跨区域节点的社区共享机制, 目的在于降低缓存负载与转发时延的同时满足大规模移动用户在 5G 车联网环境下传输高质量视频服务的需求。信息中心的 5G 车联网中社会感知的流媒体缓存与转发如图 2 所示。

3 系统整体架构

3.1 基本框架

命名数据网络是一种特定的 ICN 示例, 可在信息中心 5G 车联网中使用, 它基于两种消息: 兴趣分组和数据分组。兴趣分组主要包括所需要查找内容的名字。数据分组封装了通过网络传输所请求的具体内容 [20]。所有节点都使用基于 NDN 的转发策略来转发, 转发节点主要包括内容缓存 (content store, CS)、转发兴趣表 (pending interest table, PIT) 和转发信息表 (forwarding information base, FIB)。图 2 介绍了 SACF 的架构与工作流程。SACF 框架主要分为 3 层, 分别是: 5G 车联网物理层、缓存/转发逻辑层和社会感知逻辑层。

(1) 5G 车联网物理层

除了基于移动互联网实现车与车 (vehicle-to-vehicle, V2V), 车与基础设施 (vehicle-to-infrastructure, V2I) 和车与路边单元 (vehicle-to-roadside unit, V2R) 信息交互以外,

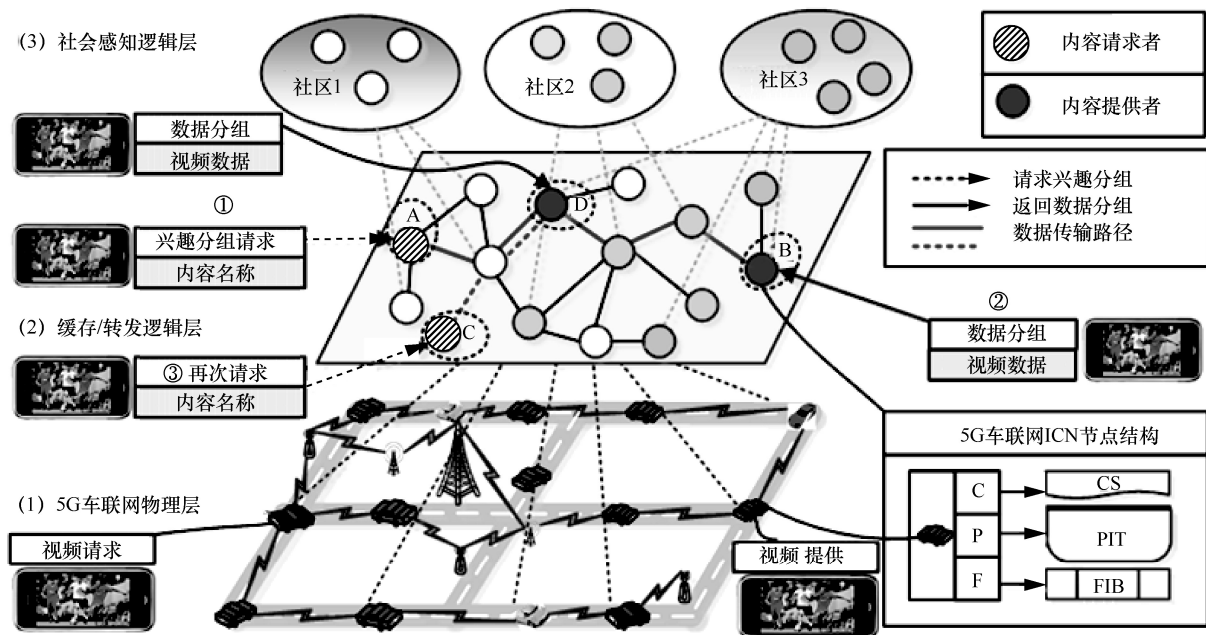


图2 信息中心的5G车联网中社会感知的流媒体缓存与转发

还实现了移动终端(device-to-device, D2D)的互联互通^[21]。在5G车联网SACF中,假设车辆节点只与一跳范围内相邻的车辆以及移动终端通信。

(2) 缓存/转发逻辑层

主要实现车辆之间数据的缓存与转发。第一次请求兴趣分组,节点A采用普通转发方式到达数据提供节点B之后,数据分组沿原路径返回,如图2所示加粗实线路径;在返回过程中,属于相同社区的车辆会将该视频缓存下来,图2加粗实线路径中只有节点D缓存了该视频;当其他节点C再次请求该视频时,只需要找到相同社区中最近的节点D即可,消息请求与数据回传,见图2加粗虚线路径,这样降低网络开销的同时还能提高视频查找命中率。

(3) 社会感知逻辑层

主要实现车辆之间的社区划分和归类。参考文献[22]揭示了拥有相似视频兴趣的移动用户,将会有更高的概率来请求同类视频。也就是说,在相似视频偏好的移动节点中,用户会优先找到所需要内容。本文SACF提出虚拟社区构建方法,受到该文献的启发,综合考虑移动节点

缓存视频数据的相似性,为缓存/转发逻辑层服务。

3.2 基本概念介绍

3.2.1 信息中心的5G车联网

在信息中心的5G车联网中,移动车辆彼此之间会概率性地接触,可以表示为 V ,车辆节点集合为 $V\{V_1, V_2, \dots, V_m\}$,为了简化操作,也用 x, y, z, o 表示车辆节点;同时为了简化模型,将城市车联网环境映射为二维平面,车辆可以通过GPS定位。

3.2.2 虚拟社区

虚拟社区是本文的核心,一个好的社区定义将简化信息中心的5G车联网中缓存与转发操作。对社区而言,最重要的是社区大小和参数的确定,本文给出的虚拟社区数据结构形式如下。

Community<videoname, mobilitydirection, type, playbacktime, requestnum>简称C。

videoname: 观看视频的名称(例如: /domain/videos/video1.mpg)。

type: 观看视频的类型(T_1, T_2, T_i)具体表示为(体育类、综艺类、游戏类等,可以根据实际情况进行细化,比如体育类又可分为篮球、足



球等), 视频内容可以从视频网站上获取(例如优酷、爱奇艺等)。

playbacktime: 播放时间。本文定义一个非负的参数 P_i^x ($1 < i < k$) 作为用户 x 对于 i 类视频的偏好程度。 P_i^x 计算方式如式 (1):

$$P_i^x = \sum_{v_j \in V_x} I_i(v_j) \frac{p_x(v_j)}{P_{\text{total}}(v_j)} \quad (1)$$

其中, v_x 代表车辆用户 x 所观看的所有视频的集合, $P_x(v_j)$ 和 $P_{\text{total}}(v_j)$ 分别代表在历史播放行为中, 对应视频播放的时间和完整视频 v_j 的时间。 $I_i(v_j)$ 是一个指示器方程, 如式 (2):

$$I_i(v_j) = \begin{cases} 1, & V_j \in T_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, T_i 表示 i 类型的视频集合。 P_i^x 值更高表示用户 x 花费更多的时间在类型 i 的视频上, 同时更可能对 i 类型的视频感兴趣。

requestnum: 视频类型的请求次数 ($R_1, R_2, \dots, R_i$)。

某一类视频的请求率为 R_i^x :

$$R_i^x = \frac{R_i}{R_{\text{total}}} \quad (3)$$

其中, R_i 表示当前节点 x 对视频类型 i 的请求数, R_{total} 表示当前节点在一小时内总的视频请求数。

mobilitydirection: 移动方向, 假设每个移动节点 x 的速度信息可以用一个二维矢量 $S_x = (x_1, x_2)$ 表示。本文通过如下计算式任意两个邻居节点 x 和节点 y 间的移动相似性:

$$M(s_x, s_y) = \frac{(x_1 y_1, x_2 y_2)}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \cdot \sqrt{y_1^2 + y_2^2}} \quad (4)$$

车辆移动速度大小 $|S_x|$:

$$|S_x| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad (5)$$

4 社会感知的缓存与转发策略

4.1 虚拟社区模型构建

算法 1 描述了虚拟社区的构建过程, 首先遍

历并计算集合中车辆 x 和水平移动的参考车辆 o 的移动方向夹角 $M(s_o, s_x)$, 然后将 $M(s_o, s_x)$ 与提前设定的夹角阈值 α 来比较, 划分不同的移动方向社区 C_x ; 然后在 C_x 中判断偏好 P_i^y 和偏好阈值 β 的大小, 请求率 R_i^y 和请求率阈值 γ 的大小, 来决定是否进一步划分虚拟社区集合 C_y 和 C_{y++} ; 最终遍历所有的节点信息, 形成虚拟社区分类集合 C 。

算法 1 虚拟社区化模型构建算法

输入 车辆节点集合 V , 初始化参考车辆 o 的速度方向 S_o 为 x 轴方向, 间隔时间戳更新整个算法;

输出 虚拟社区化节点集合 C ;

for 车辆 $x \in V$

根据式 (4) 计算 $M(s_o, s_x)$;

判断 $M(s_o, s_x)$ 和 α 的大小来划分不同方向虚拟社区集合 C_x ;

将 x 添加到相应的 C_x 集合中;

end for

for 车辆节点 $y \in C_x$

根据式 (1) 计算车辆 y 节点的偏好相似度 P_i^y ;

根据式 (3) 计算车辆 y 节点的请求率

R_i^y ;

if $(P_i^y > \beta) \ \&\& \ (R_i^y > \gamma)$

将 y 化归到与 x 相同的社区 C_x ;

else if $(P_i^x > \beta \ \&\& \ R_i^x < \gamma) \parallel (P_i^x < \beta \ \&\& \ R_i^x > \gamma)$

$R_i^x > \gamma)$

将 y 化归到新社区 C_y ;

else

将 y 化归属到新的社区 C_{y++} ;

end if

end for

4.2 缓存与转发策略

算法 2 描述了社区感知的缓存与转发策略, 首先根据 GPS 定位寻找社区 C_x 中距离车辆 x 最近的车辆 y , 然后根据与车辆 x 移动方向的夹角和方

向夹角阈值 θ 的比较, 移动速度和速度阈值 δ 的比较, 来选择与节点 x 移动方向类似且移动速度相对较快的节点 z 作为中继转发节点; 在请求视频数据的返回过程中, 根据节点 z 是否属于社区 C_x 决定是否缓存该视频。另外当数据请求的过程发生超时情况时, 视频请求节点 x 选择到次近的源节点 z 去请求数据, 直到完成视频的请求过程。

算法 2 社区感知的缓存与转发算法

输入 车辆节点 x 请求视频内容 v , 设置定时器 $time$;

输出: 节点 x 收到视频内容 v ;

for 车辆 $x \in V$

根据算法 1, 找到 x 所属社区 C_x ;

在 C_x 中根据 GPS 找到距离自己最近的节点 y ;

根据式 (4) 计算移动方向夹角 $M(s_x, s_z)$;

根据式 (5) 计算移动速度 $|S_z|$;

if ($M(s_x, s_z) < \theta$ && $|S_z| > \delta$)

将节点 z 选作转发节点;

end if

到达节点 y 后, 返回视频数据 v ;

if 回传节点 $z \in C_x$

节点 z 缓存该视频 v ;

end if

if 定时器 $time > \mu$ 超时

在 C_x 中找到距离自己次近的节点 y' , $y' > y$;

重复步骤 4~步骤 12

end if

end for

4.3 社会感知的缓存与转发策略流程

为了更加清晰地描述算法 1 和算法 2 的关系, 本文进一步分析缓存与转发策略如下。

步骤 1 首先移动节点根据自己所属的社区 C_x 选择距离自己最近的节点方向转发请求分组, 并设置数据请求定时器; 然后移动节点按照

下一跳节点的移动方向和移动速度来选择中继转发节点 z , 转发节点再根据内容名称查找本地 CS, 如果 CS 中拥有所请求的内容命名, 则直接沿着兴趣分组的进入端口返回该数据分组。否则转到步骤 2。

步骤 2 中继节点 z 校验 PIT 中是否存在该命名请求。如果在 PIT 中发现了匹配项, 则仅需要在 PIT 的端口列表中添加该进入端口, 等待数据返回后转到步骤 4; 如果数据返回时出现超时现象, 则请求节点重新发送消息到距离自己次近的节点 y' , 转到步骤 1; 如果 PIT 中不存在该命名请求, 则创建一个新的请求条目, 转到步骤 3。

步骤 3 如果 FIB 中包含命名请求到下一跳节点的映射, 则转发该请求到下一跳节点 y ; 否则, 广播该请求到周围的其他节点, 等待数据返回后转到步骤 4。

步骤 4 数据沿原请求路径返回时, 仅当遇到相同社区的回传节点时, 才在 CS 中缓存下该视频数据, 并清空 PIT 中的命名请求记录; 对于其他不属于同一个社区的节点在帮助回传请求视频之后, 删除该视频信息。

5 性能评估

为了评估本文提出的 SACF 策略, 本文采用 NS3 仿真软件下的 ndnsim 模块进行模拟仿真, 并利用 MATLAB 来进行数据分析。移动节点遵循 Random Waypoint 移动模型, 模拟在信息中心的 5G 车联网城市环境中的车辆移动情况, 并采用 IEEE 802.11p 和 V2V/D2D 无线通信方式来进行数据传输。SACF 的对比方案为 RUFS 和 DPC。详细的环境参数设置见表 1, 仿真的场景如图 3 所示, 图 3 中的移动点表示车辆。

图 4 显示了模拟时间期间 SACF、RUFS 和 DPC 的缓存命中率。在这个测试中, SACF 采用社会感知的缓存策略, RUFS 采用一切缓存的方式作为缓存策略, DPC 采用概率性缓存策略。RUFS 在一切缓存策略中, 移动节点缓存每个接收的数



据项,并使用 LRU 缓存替换机制在内容缓存满时切换出最近最少使用的内容副本。从图 4 中可以看出, SACF 相对于 RUFS 和 DPC 曲线保持在更高的水平,也即缓存命中率更高。

表 1 仿真环境参数设置

参数	值
通信范围 (Area)	1 000 m×1 000 m
MAC 接口 (MAC Interface)	IEEE 802.11p
节点个数 (Number of mobile nodes)	200
源节点个数 (Number of provider)	20
视频块个数 (Number of videos)	40
视频块大小 (Size of video)	200 kb
仿真时间 (Simulation Time)	1 000 s
节点移动速度 (Mobile speed)	20 m/s
用户请求规律 (Request happen)	泊松分布 ($\lambda=20$)
内容流行度规律 (Request content)	齐夫分布 ($e=0.5$)

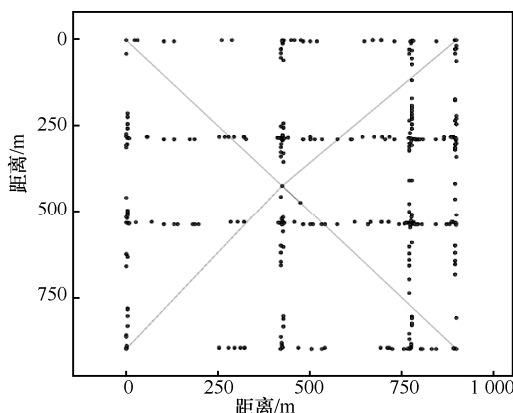


图 3 仿真场景效果图

SACF 中的社会感知机制使用户能够快速定位潜在的視頻源位置,因此兴趣分组可以直接发送到相应的内容提供节点,即便第一次查找出现查找超时,SACF 也能保证到相邻的节点继续查找请求,从而具有较高的命中率;RUFS 中的请求节点从最近查找成功的邻居节点候选集中选择下一跳,从而提高了查找成功率。然而,由于车辆的移动行为和网络的动态变化使得转发候选节点存在不确定性,从而降低了命中率。DPC 采用基于

概率性的度中心缓存机制,由于车辆的变化情况可能对度中心产生影响,导致查找命中率降低。

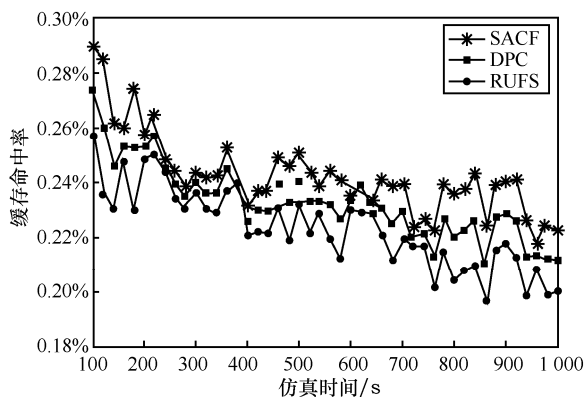


图 4 缓存命中率

图 5 显示的是随着移动节点数量的变化 3 种解决方案的查找时延。仿真时间从 100 s 开始,3 种解决方案的时延均有不同程度的上升趋势,随着仿真时间的推移,3 种方案的时延开始呈下降状态。这是因为刚开始均存在查找资源的随机性,随着仿真时间的延长,内容副本也会逐渐增加,增加了就近查找内容提供节点的几率。

另外,在 SACF 中,用户节点兴趣相似的内容已经提前在社区中缓存,这使得请求节点能够避免到未知且较远的提供节点中去请求内容,因此,SACF 实现了较低的查找时延,具有明显的优势;RUFS 通过满意度邻居列表,来维护最近成功的路由信息,以帮助选择转发节点。然而,信息中心车联网规模较复杂,用户在播放兴趣和移动方向等方面的行为频繁变化,这些因素会降低该列表的可靠性,导致 RUFS 的查找时延相对较高。DPC 方案由于在信息中心车联网环境下度中心选择引起的不稳定性,导致时延相对较高。

图 6 显示了随着移动节点数量的增加,3 种解决方案的网络开销均有上升趋势,SACF 相对于 RUFS 基本保持在更低的水平。这是因为随着车辆规模的扩大,整个网络的视频请求会更加频繁,视频传输量也会逐渐增加;由于 SACF 中的主要集中在社区内部进行数据交换,并根据移动相似

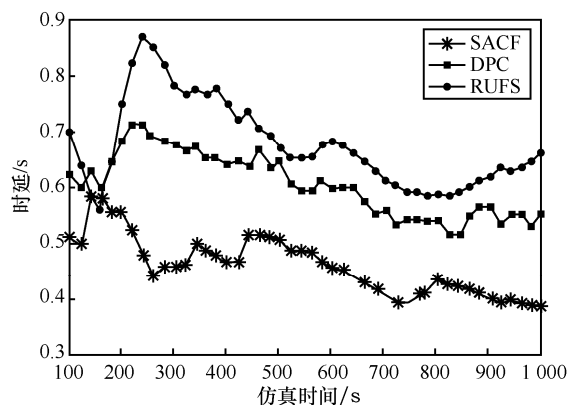


图5 查找时延

性采用类似于单播的分发方式,避免了因数据广播而引起网络的大量开销;在RUFS中,移动节点与所有相遇的节点交换最近满足的信息,当网络规模较大时,这将产生巨大的开销;DPC选择度中心时也存在广播消息的情况,将会引起较大的开销。

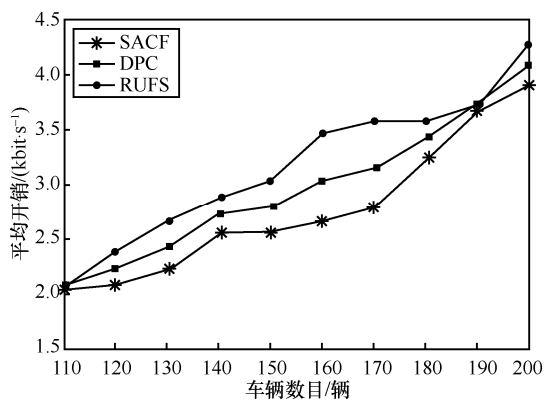


图6 网络开销

6 结束语

综上所述,本文提出了一种信息中心的5G车联网流媒体缓存与转发策略,解决了5G车联网下连接不稳定、传输时延大、带宽资源浪费等问题。该方法通过构建用户偏好的虚拟社区,实现了视频资源的就近获取,视频数据的快速转发,另外通过社区感知的缓存策略,优化了车联网的缓存分布,实现了高效的流媒体缓存与转发机制,该算法的时间复杂度为 $T(n) = O(m^2)$ 。大量仿真实

验表明,本文所提的SACF策略与最新的相关参考文献的RUFS、DPC相比,在命中率、查找时延、网络开销等方面均有较大的优化。未来需要进一步考虑如何通过博弈合作方法来实现高效的缓存放置,降低视频分发的开销。

参考文献:

- [1] Private LTE & 5G network market ecosystem 2020-2030 growth, key players, trends, opportunities, challenges, strategies, industry verticals & forecasts [R]. 2019.
- [2] 林利军. 5G移动通信网络架构与关键技术要点探讨[J]. 网络安全技术与应用, 2019(11): 84-86.
LIN L J. Discussion on 5G mobile communication network architecture and key technologies[J]. Network Security Technology and Application, 2019(11): 84-86.
- [3] 杜滢, 朱浩, 杨红梅, 等. 5G移动通信技术标准综述[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 2-9.
DU Y, ZHU H, YANG H M, et al. Summary of 5G mobile communication technology standards [J]. Telecommunications Science, 2018, 34(8): 2-9.
- [4] 张炎炎, 李欣, 王宝聪, 等. 车联网同频干扰兼容性研究[J]. 电信科学, 2019, 35(Z1): 59-64.
ZHANG Y Y, LI X, WANG B C, et al. Research on co-channel interference compatibility of telematics [J]. Telecommunications Science, 2019, 35(Z1): 59-64.
- [5] ALESSANDRO B, MASINI B M, PASOLINI G. Real time acquisition of traffic information through V2V, V2R, and V2I communications[J]. Chapter in Roadside Netw. Vehic. Commun, 2013(4): 72-92.
- [6] ASADI A, MANCUSO V. Network-assisted outband D2D clustering in 5G cellular networks: theory and practice[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(8): 1-16.
- [7] Cisco. Cisco visual networking index: forecast and methodology: 2017-2022 technical report[R]. 2019.
- [8] DHUNGANA A, BULUT E. Peer-to-peer energy sharing in mobile networks: applications, challenges and open problems[J]. Ad Hoc Networks, 2019: 97.
- [9] ZHANG H, QUAN W, CHAO H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future internet [J]. IEEE Network, 2016, 30(3): 46-51.
- [10] Networks-Telecommunications. Studies from kwansei gakuin university reveal new findings on telecommunications (on scaling property of information-centric networking) [J]. Computers, Networks & Communications, 2019.
- [11] MENG Y H, NAEEM M A, ALI R, et al. DCS: distributed caching strategy at the edge of vehicular sensor networks in information-centric networking [J]. Sensors (Basel, Switzerland),



- 2019, 19(20).
- [12] QIAO X Q, WANG H Y, TAN W, et al. A survey of applications research on content-centric networking [J]. China Communication, 2019, 16(9): 122-140.
- [13] Reports from Tianjin University advance knowledge in information and data networking (packet forwarding in named data networking requirements and survey of solutions) [J]. Computers, Networks & Communications, 2019.
- [14] GRASSI G, PESAVENTO D, PAU G, et al, VANET via named data networking [C]//IEEE INFOCOMM, 2014 NOM Workshop, April 27-May 2, 2014, Toronto, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2014.
- [15] KUANG J, YU S Z. Broadcast-based content delivery in information-centric hybrid multihop wireless networks [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 889-892.
- [16] WANG X, WANG W, ZENG C, et al. Reducing the size of pending interest table for content-centric networks with hybrid forwarding [C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [17] AHMED S H, BOUK S H, KIM D. RUFs: robust forwarder selection in vehicular content-centric networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(9): 1616-1619.
- [18] DENG G, WANG L, LI F, et al. Distributed probabilistic caching strategy in VANET through named data networking [C]//the 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), April 10-14, 2016, San Francisco, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 314-319.
- [19] LU Y, LI X, YU Y T, et al. Information-centric delay-tolerant mobile ad-hoc networks [C]//IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), April 27-May 2, 2014, Toronto, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2014: 428-433.
- [20] XU C, JIA S, WANG M, et al. Performance-aware mobile community-based VoD streaming over vehicular Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(3):1201-1217.
- [21] Computers and Networks. Recent research from Federal University highlight findings in computers and networks (towards scala

ble mobile crowdsensing through device-to-device communication) [J]. Computers, Networks & Communications, 2019.

- [22] 吴大鹏, 李雪, 李红霞. 基于 TWDM-PON 与 C-RAN 的 QoE 感知视频协作缓存与传输机制[J]. 通信学报, 2019, 40(3): 80-91.

WU D P, LI X, LI H X. QoE-aware video cooperative buffering and transmission mechanism based on TWDM-PON and C-RAN[J]. Journal of Communications, 2019, 40(3): 80-91.

[作者简介]



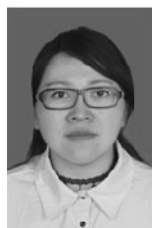
曹腾飞 (1987-), 男, 博士, 青海大学讲师, 主要研究方向为 5G 智能网络优化。



江翠丽 (1995-), 女, 青海大学硕士生, 主要研究方向为边缘计算。



刘志强 (1981-), 男, 青海大学计算机技术与应用系副主任, 主要研究方向为虚拟现实。



王晓英 (1982-), 女, 博士, 青海大学副校长、教授, 主要研究方向为并行计算。