

基于 LTE D2D 技术的车联网通信架构与数据分发策略研究

彭军, 马东, 刘凯阳, 张倩倩, 张晓勇

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘 要: 基于 5G 通信技术的车联网面临高速率、低时延、高可靠性和大量流媒体数据分发等需求, 提出了一种基于 LTE D2D 的车联网通信架构, 设计基于运动一致性的车辆分簇算法, 有效增加持续 D2D 通信时间, 提高通信可靠性; 其次, 针对簇内车辆的流媒体数据分发, 提出一种带时延约束的 D2D 协作中继转发策略, 设计最优中继选择算法, 大幅提高数据传输速率, 提升网络吞吐量。

关键词: 车联网; D2D 通信; V2V 通信; 数据分发

中图分类号: TP393.0

文献标识码: A

LTE D2D based vehicle networking communication architecture and data distributing strategy

PENG Jun, MA Dong, LIU Kai-yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Xiao-yong

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410000, China)

Abstract: 5G based vehicle networks face with the requirements of high data rate, low latency, high reliability and massive multimedia streaming distribution. A LTE D2D was proposed based vehicle networks communication architecture and then a movement consistency based vehicle clustering algorithm was designed. The results show it increases sustained D2D communication time and improves the reliability of D2D communication. Besides, a D2D cooperative relaying forward strategy under the constraint of latency for distributing multimedia streaming were proposed, which resulted in significant improvement of data transmission rate and network throughput.

Key words: vehicular network, D2D communication, V2V communication, data distribution

1 引言

近年来, 各种智能无线设备(如手机、平板电脑、穿戴式设备等)的海量涌现将人与物紧密联系起来, 同时也给整个无线通信网络带来了爆炸式的数据流量增长, 未来 10 年, 移动互联网流量将增加 1 000 倍^[1,2]。此外, 各种物联网应用, 如智能电网、智慧城市、移动医疗、车载娱乐、虚拟现实等的普及对无线接入带宽和通信延迟提出较高的需求^[3]。未来 5G 网络旨在提供一个大容量、低成本、低功耗、安全可靠的无线网络^[4]。同时, 5G 中不仅需要设备之间的交流, 还需要与环境信息进行交流(如大规模无线传感器网络)。

为满足上述性能要求, 3GPP 组织针对 5G 提出了多种关键技术^[5]。

作为 LTE 及未来 5G 的关键技术之一, D2D 通信可在蜂窝系统的控制下, 允许终端用户通过共享小区资源在一定范围内直接进行通信。该通信方式的数据流量不经过基站和核心网, 进而减小通信时延、减轻基站压力、缓解核心网负载、提高频谱利用率和系统吞吐量^[6,7]。D2D 通信在内容分发、互动游戏、社交网络、紧急救援和公共安全领域将发挥其特有的优势。除了以人为中心的 D2D 通信网络, D2D 在车联网中也有广阔的应用前景^[8]。

文献[9]指出车辆已经成为日常生活中不可缺少

收稿日期: 2016-05-01; 修回日期: 2016-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61379111, No.61202342, No.61402538)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.61379111, No.61202342, No.61402538)

少的一部分,人们在车内消耗的时间仅次于家庭和办公室。同时,V2V通信也早已成为无线通信协会研究的重点,比如IEEE提出将基于DRSC技术的802.11p标准作为V2V通信标准,主要用于支持智能交通系统中的各种V2V应用^[10]。随着无人车技术的发展与普及,基于V2V通信的车辆安全预警和辅助驾驶等车联网安全应用显得尤为重要。但由于现有的V2V通信技术DRSC传输范围有限且缺乏配套设施的部署,只能提供间歇性的、短暂的连接^[11]。因此,利用完全分布式的DRSC作为V2V通信标准无法保证通信的可靠性和有效性。

解决该问题的一个普遍认同的方法是使用LTE网络,但其本身不支持V2V通信^[12]。当车辆密度较大时,车辆之间不断交互的安全信息极有可能超过基站负载,造成网络拥塞。因此,若采用不经过基站的D2D通信作为技术支撑,可大大提升网络性能。文献[13]根据V2V通信和D2D通信的特点,分析了将D2D通信用于V2V的优势。

1) V2V通信的地理特性正是D2D通信的初衷,即实现一定范围内的设备直接通信。2) D2D通信的跳数增益刚好可以满足V2V通信的低时延要求。3) D2D通信的邻近增益可满足V2V通信的高可靠性要求。

目前,已有学者做了相关工作。文献[13]针对车联网中D2D通信的上行链路资源共享问题,提出一种资源块分配和功率控制方案,满足车联网用户通信对时延与可靠性要求的同时,最大化蜂窝用户总速率。文献[14]提出一种基于分簇的分布式D2D架构,簇头作为上行链路数据流的网关,簇内车辆使用D2D直接通信,提高了上行链路的资源利用率。文献[15]针对车联网中的D2D通信,提出一种与车辆位置信息相关的启发式资源分配机制。该机制在满足车联网通信安全服务要求的同时,还减少了信令开销与通信干扰。

文献[16]提出将D2D通信用于车联网的故障恢复,并设计了一种包含智能交通系统架构、基于LTE的D2D通信机制以及故障感知模型的混合交通系统。仿真结果表明,该系统可有效减少故障恢复时的通信时延和路由跳数。文献[17]根据高速行驶车辆中的地理位置信息,对D2D-V进行了分组。通过信道复用和功率控制使系统总速率达到最大。文献[18]提出一种分布式D2D通信架构,采用混合分

簇法对车辆进行分簇,不同车辆之间形成多个动态簇。由于车辆的移动性很强,因此该分簇法能有效减少车联网的通信时延。

以车辆为中心的D2D通信与以人为中心的D2D通信最大的不同在于移动性。由于D2D通信范围有限,而车辆运动速度较快,正在进行D2D通信的车辆极易因超出通信范围而断开连接。然而,车辆只能在已有的公路上行驶,不同于其他移动设备可以向任意方向移动,又使其运动状态具有一定限制性。为此,本文结合LTE和D2D技术,针对车辆移动的快速性和限制性,提出一种基于运动一致性的分簇算法,增加簇内车辆的持续D2D通信时间,同时提高D2D通信的成功概率。

其次,针对LTE背景下车联网用户的多媒体数据分发,本文提出一种D2D协作中继转发策略,在时延约束下将数据传输速率建模为线性优化问题,并通过IBM ILOG CPLEX^[19]求解,得到簇内用户的最优中继选择策略。

2 基于运动一致性的车辆分簇

2.1 车联网特点与需求分析

城市中车流量大,且交通线路和路面状况复杂,使车辆行驶速度处于较低水准,同时也增加了行驶时间。由于车辆多,行驶间距小,路线变化灵活,使车联网具备以下2个特点:1)人们对于各种车联网应用的服务需求增加,如实时交通播报、违章提醒、新闻娱乐等;2)低速场景下频繁的变道和超车给行车安全带来巨大的威胁。

传统的车联网采用DRSC短程通信技术来实现车与车之间、车与路边基础设施的通信,但其无法保障可靠性和有效性。LTE作为一种可行的解决方案,可以避免大量部署路边设施来支持V2V通信。未来几年,大规模的设备接入将给网络管理和频谱资源带来巨大的挑战,D2D通信作为一种可靠的短距离通信技术可有效缓解海量用户带给LTE核心网络的负载,实现数据的分流,适用于车联网中各种基于服务的D2D应用。

由于车辆行驶速度较快,且路线变化灵活,而D2D通信距离有限,车辆极有可能在进行D2D通信时因超出通信范围导致服务中断,大大降低D2D通信的成功率和用户服务体验。然而,车辆的移动具有一定的限制性,即必须在已有公路上行驶,使

潜在 D2D 通信具有可预测性。为此，基于 LTE 网络架构，提出一种基于车辆运动一致性的分簇方法来增加车联网中 D2D 通信的成功率，提升用户体验。

2.2 基于 D2D 通信的车联网架构

如图 1 所示，本节提出一种基于 LTE D2D 通信的车联网架构。底层车辆根据一定的成簇标准形成多个簇 (CH)，保证簇内车辆之间既可进行 D2D 通信，也可与基站进行蜂窝通信。LTE 接入网中的唯一网元——基站负责无线链路的维护、无线资源的管理。核心网层包含 4 类实体，移动管理实体 (MME) 主要负责车辆的接入控制、移动性管理、会话管理和路由选择等功能；服务网关 (S-GW) 负责数据分组的路由和转发等；PDN 网关 (P-GW) 负责车辆的分组过滤和 IP 地址分配；归属用户服务器 (HSS) 负责用户的数据管理。P-GW 连接的 D2D 应用服务器能提供多种 D2D 服务。

2.3 分簇算法

通过对车辆分簇，可以将邻近范围内且行驶方向一致的车辆分在同一簇内。簇内车辆共享其速

度、运动轨迹以及车内服务等信息，同时将行驶过程中的变道、超车等操作通过 D2D 通信的方式发送给其余车辆，可辅助车辆安全行驶，降低交通事故发生率。为了提高持续 D2D 通信时间，保证车辆之间 D2D 通信的可靠性，本节提出一种基于运动一致性的分簇算法。

假设当前公路上共有 N 辆车，每辆车表示为 $u_i, i=1, \dots, N$ ，分成 $M \leq N$ 个簇，每个簇用 S_k 表示， $k=1, 2, \dots, M$ ，簇内车辆表示为 $u_{k,j}, j=1, \dots, w_k$ 。 w_k 为簇内车辆数目。定义车辆关键信息 inf ，包括车辆位置、当前速度 v 和预计在当前道路行驶距离 d 。簇内成员周期性地向簇头汇报其 inf ，簇头维护簇成员信息。同时，将车辆速度和预计行驶距离作为运动一致性的 2 个参考元素，定义入簇因子 $\eta_{k,i}$

$$\eta_{k,i} = \alpha_k \left| \frac{v - \bar{v}_k}{\bar{v}_k} \right| + \beta_k \frac{1}{d} \tag{1}$$

$$\bar{v}_k = \frac{1}{w_k} \sum_{j=1}^{w_k} v_{kj} \tag{2}$$

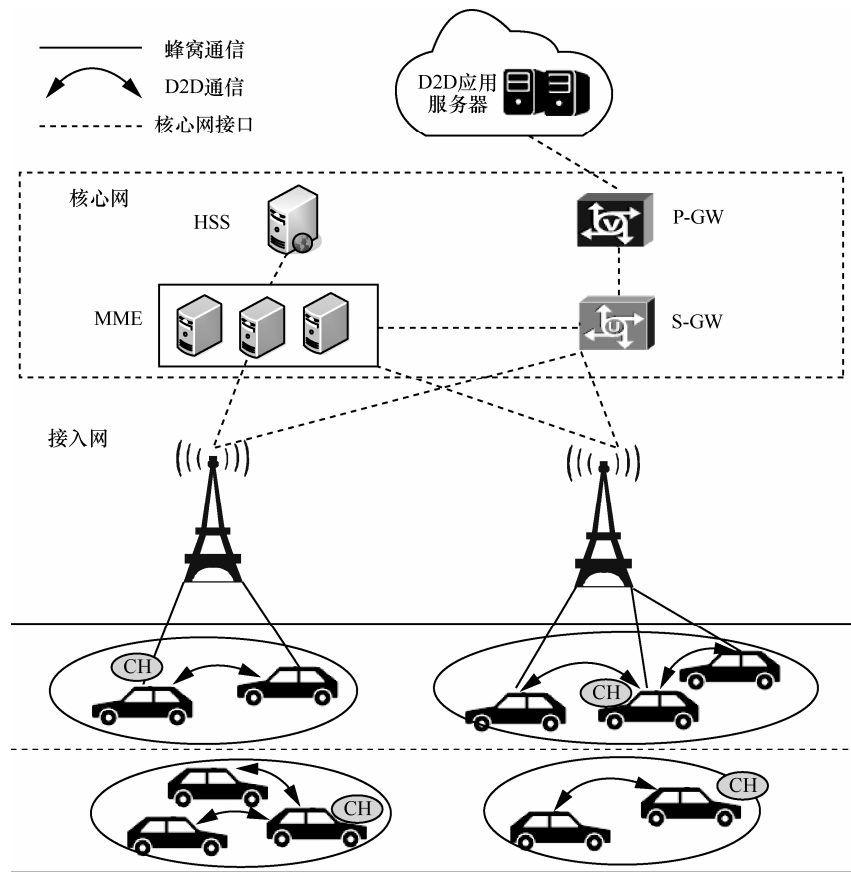


图 1 基于 LTE D2D 通信的车联网架构

其中, \bar{v}_k 为第 k 个簇的平均速度, v_i 为第 i 辆车的速度, α_k 和 β_k 是第 k 个簇计算入簇因子的加权系数, 可根据实际情况动态调整, 且每个簇的加权因子可以不同。 $\eta_{k,i}$ 越小, 簇头接收车辆 u_i 入簇的概率越大, 因为 v_i 与 \bar{v}_k 的相对差越小, d_i 越大, u_i 与簇内成员的可持续 D2D 通信的时间越长。

如算法 1 所示, 在 LTE 通信支持下, 首先根据车辆位置信息, 将相近的车辆分到一个簇中, 形成初始化簇。第 2) 行~第 8) 行将速度与簇平均速度相差较大的车辆删除, 使剩下的簇成员具有较高的运动一致性。第 9) 行~第 11) 行选择预计行驶距离最大的车辆作为簇头, 并周期性广播簇信息。对于之前删除的车辆或者新加入的车辆, 在其汇报关键信息后, 簇头根据式 (1) 计算入簇因子, 若满足该簇要求, 则加入该簇, 否则自身形成一个新簇。

算法 1 基于运动一致性的分簇算法

输入 N , 车辆关键信息 inf , η_{th}

输出 M , S_k

1) 初始化簇: 根据位置相近原则将 N 辆车分成 M 个簇, $S_k, k \in 1, \dots, M$, 每个簇的车辆数为 w_k

2) 计算簇平均速度 \bar{v}_k

3) for $k=1$ to M do

4) for $j=1$ to w_k do

5) 若 $\left| \frac{v_{kj} - \bar{v}_k}{\bar{v}_k} \right| \geq 0.5$

6) $S_k \leftarrow S_k - \{u_{kj}\}$ /*将速度与

簇平均速度相差太大的车辆删掉*/

7) end for

8) end for

9) for $k=1$ to M do

10) $h_k = \arg \max(d_{u_{kj}}), u_{kj} \in S_k$ /*选择行驶距离

最远的车辆为簇头*/

11) 簇头广播簇信息, 通信范围内且不属于任一簇的车辆上报 inf 信息

12) for $i=1$ to 所有未入簇车辆数, do

13) h_k 根据式(1)计算 $\eta_{k,i}$,

14) 若 $\eta_{k,i} \leq \eta_{th}$

15) $S_k \leftarrow S_k + \{u_j\}$

16) 否则

17) $S_{M+1} = \{u_j\}$ /*新建一个簇*/

18) end for

该算法考虑了车辆的运动一致性元素 d 和 v , 延长了簇内车辆的持续通信时间, 提供了相对可靠的连接。同时, 由于每次入簇只需计算一次 $\eta_{k,i}$, 因此该算法复杂度较低。

3 协作数据分发中继选择

3.1 系统模型

本节考虑服务于同一 LTE 基站的簇内用户之间进行 D2D 协作数据分发。假设车辆具有 2 种通信模式, 既可与基站进行传统的蜂窝通信, 也可与其他车辆进行 D2D 通信。基站为 D2D 用户和蜂窝用户分配正交的频谱资源, 从而有效减少与蜂窝用户之间的同频干扰。以图 2 为例, 根据算法 1 的分簇结果, Car_1 、 Car_2 、 Car_3 、 Car_4 位于同一簇内, Car_2 需要从基站获得大小为 X 的多媒体流。传统方式是它直接通过 LTE 链路从基站获得; 若使用 D2D 协作中继方式, 则 Car_1 和 Car_3 从基站获得部分该数据, 并通过 D2D 链路发送给 Car_2 。

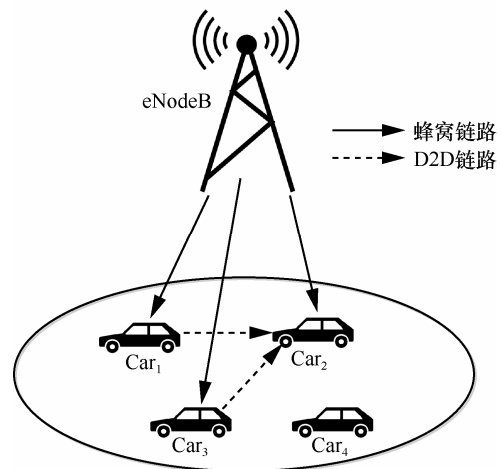


图 2 系统模型实例

用 h_{Bl} 表示基站和车辆 l 之间的信道增益, h_{lj} 表示车辆 l 和 j 之间的信道增益。假设簇内车辆之间的信道参数完全已知。对于每一次的传输, 基站以固定功率 P_B 传输数据, 车辆之间以固定功率 P_D 传输数据, 且满足 $P_D < P_B$ 。

3.2 信道模型

假设蜂窝用户与 D2D 用户之间的信道都为平坦瑞利衰落信道, 对于一个随机链路 $a \rightarrow b$, 接收端的接收信号 y_b 可表示为^[20]

$$y_b = \sqrt{P_a} h_{ab} x_a + n_{ab} \quad (3)$$

其中, P_a 表示发送信号功率, x_a 为发送信号, n_{ab} 表示零均值且方差为 N_0 的高斯白噪声, h_{ab} 为 a 、 b 之间的信道衰落, 且满足 $|h_{ab}|^2 = |h'_{ab}|^2 d_{ab}^{-\alpha} = H_{ab}$, α 是路径衰落因子, h'_{ab} 服从零均值圆对称复高斯分布 $(0, \frac{1}{\mu_{ab}})$, 为了求解简单, 假设 $\mu_{ab} = 1$ 。

因此, 对于接收端 b 来说, 其信号与干扰加噪声比 (SINR) 可表示为^[21]

$$\gamma_{ab} = \frac{P_a H_{ab}}{I_b + n_{ab}} \quad (4)$$

其中, I_b 表示其他用户对接收端 b 的干扰, 满足

$$I_b = \sum_{j \neq a} P_j H_{jb} \quad (5)$$

信号处理和信道编码技术可消除干扰带来的影响, 产生编码增益^[22]。根据文献[23], 加入编码增益 G 后的 SINR 可表示为

$$\gamma'_{ab} = \gamma_{ab} 10^{\frac{G}{10}} \quad (6)$$

根据香农公式, W 为信道带宽, 则用户 b 的接收速率可表示为

$$R_b = W \log(1 + \gamma'_{ab}) \quad (7)$$

假设 a 与 b 之间有效通信所需的最小 SINR 为 γ_{th} , 则接收端若要能成功解码该数据, 需满足

$$\gamma'_{ab} \geq \gamma_{th} \quad (8)$$

对应的成功解码概率为

$$\eta_{ab} = \Pr\{\gamma'_{ab} \geq \gamma_{th}\} \quad (9)$$

3.3 问题求解

考虑簇 k 中有 N 辆车, 每辆车表示为 U_j , $j=1, 2, \dots, N$ 。发出数据请求的车辆称为请求车辆, 通过 D2D 链路协作传输数据的车辆称为中继车辆。假设请求车辆 U_j 向 LTE 基站请求大小为 X 的多媒体流数据, 且选择簇内其余车辆 $U_l, l=1, 2, \dots, N, l \neq j$ 进行协作传输。本文用 0-1 向量 $V = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ 来表示簇内车辆是否被选中作中继, $q=1$ 表示被选中, $q=0$ 表示未选中。

传统中继问题考虑中继车辆之间接收和发送相同的数据以增加接收端信噪比, 而本文考虑中继车辆之间传送不同的数据, 以达到较高的数据速

率。如图 3 所示为数据传输分割示意, 请求车辆 U_j 从基站获得部分数据, 中继车辆 $U_l, l=1, 2, \dots, N$, 首先从基站获得其余数据, 再通过 D2D 链路发送给请求车辆。假设请求车辆 U_j 从基站获得的数据大小为 X_j , 从中继车辆获得的数据大小为 $\sum_{l=1}^l X_l$ 。此处采用固定放大转发协议, 请求车辆和中继车辆收到的基站信号 y_{Bj} 、 y_{Bl} 分别为^[24]

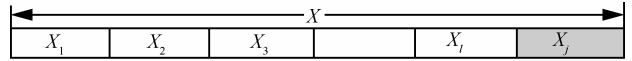


图 3 数据传输分割示意

$$y_{Bj} = \sqrt{P_B} h_{Bj} x_j + n_{Bj} \quad (10)$$

$$y_{Bl} = \sqrt{P_B} h_{Bl} x_l + n_{Bl} \quad (11)$$

其中, P_B 表示基站的发送功率, h_{Bj} 和 h_{Bl} 分别表示基站到请求车辆和中继车辆的信道衰落, n_{Bj} 和 n_{Bl} 分别表示基站到请求车辆和中继车辆的干扰噪声, x_j 和 x_l 分别表示请求车辆和中继车辆 U_l 收到的数据, 且满足 $x_j + \sum_{l=1}^{M_k} x_l = X$ 。

根据固定放大转发协议规则, 中继车辆通过因子 β_l 对数据进行量化后转发给目的车辆^[25], 其中, P_l 表示中继车辆的发送功率。

$$\beta_l = \frac{\sqrt{P_l}}{\sqrt{P_B |h_{Bl}|^2 + N_0}} \quad (12)$$

因此, 请求车辆从基站和中继车辆接收信号的信噪比 (SNR) 分别为

$$\gamma_{Bj} = \frac{P_B |h_{Bj}|^2}{N_0} \quad (13)$$

$$\gamma_j = \frac{1}{N_0} \frac{P_B P_l |h_{Bl}|^2 |h_j|^2}{P_B |h_{Bl}|^2 + P_l |h_j|^2 + N_0} \quad (14)$$

根据中继转发特性和干扰叠加, 考虑簇内其余中继车辆干扰后的 SINR 分别为

$$\gamma'_{Bj} = \frac{P_B |h_{Bj}|^2}{I_j + N_0} \quad (15)$$

$$\gamma'_j = \frac{P_B P_l |h_{Bl}|^2 |h_j|^2}{(P_B |h_{Bl}|^2 + P_l |h_j|^2 + N_0) N_0 + I_j (P_B |h_{Bl}|^2 + N_0)} \quad (16)$$

根据香农公式, 请求车辆的数据接收速率可表

示为

$$R_j = W(\text{lb}(1 + \gamma'_{Bj}) + \sum_{l=1, l \neq j}^N q_l \text{lb}(1 + \gamma'_{lj})) \quad (17)$$

在给定的时延约束 T 下，定义以下优化问题

$$\max_{q_{kl}} R_j \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \gamma'_{Bj} \geq \gamma_{\text{th}} \quad (19)$$

$$\gamma'_{lj} \geq \gamma_{\text{th}} \quad (20)$$

$$0 \leq \sum_{l=1}^N q_l \leq N-1 \quad (21)$$

$$\frac{X}{R_j} \leq T \quad (22)$$

其中，目标函数为最大化接收端的速率，约束式(19)、式(20)分别保证请求车辆和中继车辆能正确接收数据。约束式(21)代表选为中继的车辆数量不能超过除请求车辆之外的其余车辆数；约束式(22)保证在该速率下能满足该服务的时延约束。

对于该优化问题，本文设计算法 2 来求解。第 1) 行和第 2) 行将优化变量 q_l 从 0-1 变量转化为实数变量，从而将该优化问题转化为非线性优化问题；第 3) 行和第 4) 行利用 IBM ILOG CPLEX^[20] 工具箱求解该优化问题，得到取值在 0-1 向量 V' ；第 6) 行~第 20) 行通过遍历的方式比较每种可能的中继选择。第 6) 行和第 7) 行求出向量 V' 的最大值，第 8) 行~第 13) 行将其对应的向量值设为 1，其余为 0；第 14) 行~第 16) 行计算最优的 R ，第 17) 行将此次迭代的最大值去掉，保证下一次迭代加入的是相对最好的中继车辆。

算法性能和复杂度之间往往存在一个 Trade-off 问题，本文提出的优化问题求解算法基于迭代思想。假设有 i 个车辆被选作中继，用 S_i 表示，则在通过 IBM ILOG CPLEX 求解得出线性解 V' 后，迭代的过程为

$$S_{i+1} = S_i \cup \{j_i\} \quad (23)$$

其中

$$j_i = \arg \max_{j \in \{1, \dots, M\} \setminus S_i} \gamma_{S_i \cup j} \quad (24)$$

即每次的迭代过程是在未被选为中继的车辆集合中选择一个作为中继后使 SINR 最大的车辆，且满足 S_i 总是 S_{i+1} 的子集。因此，总的搜索次数为 R ，每次搜索中需要计算 $R-i+1$ 步，共需要 $\frac{R(R+1)}{2}$ 步，总的复杂度为 $O(n^2)$ 。

算法 2 中继选择优化问题求解算法

输入 $X, T, h, P_B, P_D, \gamma_{\text{th}}$

输出 $V = (q_1, q_2, \dots, q_N)$

- 1) 初始化 $q'_l = 0, l = 1, 2, \dots, N$
- 2) 映射 $q'_l \in \{0, 1\} \rightarrow 0 \leq q'_l \leq 1$
- 3) 通过 IBM ILOG CPLEX 求解式(18)~式(22)
- 4) 解得 $V' = (q'_1, q'_2, \dots, q'_N), 0 \leq q'_l \leq 1$
- 5) 初始化 $R=0$; /*传输速率*/
- 6) for $i=1$ to N do
- 7) $\max V'$; /*求 V' 中的最大值*/
- 8) for $l=1$ to N do /*每次迭代加入一个
- 9) 信道条件较优的车辆作为中继*/
- 10) 若 $q_l \geq \max V''$ $q''_l = 1$;
- 11) 否则 $q''_l = 0$;
- 12) end for
- 13) 得 $V'' = (q''_1, q''_2, \dots, q''_N)$
- 14) 将 V'' 代入式(17)解得 R_i
- 15) 若 $R_i > R$ /*比前一次迭代好*/
- 16) $R = R_i$; /*更新 R */
- 17) $V = V''$
- 18) $V' = V' - \{\max V'\}$ /*去掉已经选为中
- 19) 继的车辆*/
- 20) end for
- 21) 输出 V

4 仿真分析

4.1 参数设置

本节针对前 2 部分提出的分簇算法和数据分发时中继选择的优化问题，设置仿真场景，通过数值结果来分析和比较本文提出算法的有效性和正确性。以下仿真结果为在随机场景下运行 1 000 次后的平均值。表 1 为部分参数设置。

表 1 参数设置

参数	值
P_B	1 W
P_D	0.01 W
γ_{th}	10 dB
α	3
N_0	0.001 W
W	5 MHz

4.2 数值分析

图 4 比较了基于地理位置的分簇算法和本文算法在平均可持续 D2D 通信时间上的性能。可以看出，随着车辆的增加，基于本文算法的持续 D2D 通信时间一直高于传统分簇算法。原因有两方面：1) 簇头的速度与簇的平均速度相差不大，同时簇头在当前道路的行驶距离相对较长，这就避免因簇头行驶距离过短导致簇解散的情形；2) 簇内车辆根据入簇因子筛选，以保证簇内成员具有较高的运动一致性，有利于延长车辆平均持续 D2D 通信时间。

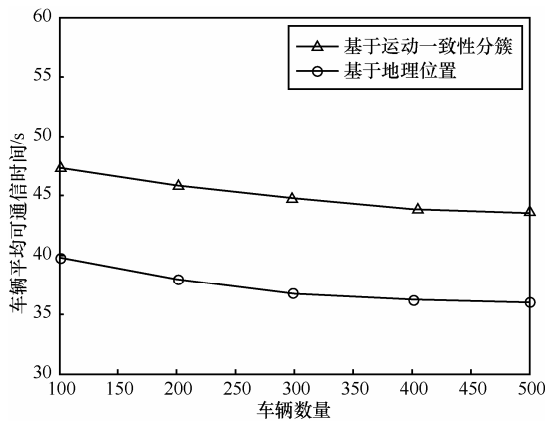


图 4 车辆平均持续通信时间与车辆数量关系

图 5 表示这 2 种分簇方法下持续通信时间大于 40 s 的车辆所占的比例。可以看出，根据基于运动一致性的分簇算法，持续 D2D 通信时间超过 40 s 的车辆比例明显高于基于地理位置的分簇算法。原因在于后者中车辆速度差可能较大，使 D2D 车辆在短时间内超出通信范围；同时，车辆会因为转向、变道等原因导致 D2D 链路中断。相反，本文算法同时考虑了速度和在当前道路的行驶距离，从而使持续 D2D 通信时间较长的车辆比例更高。

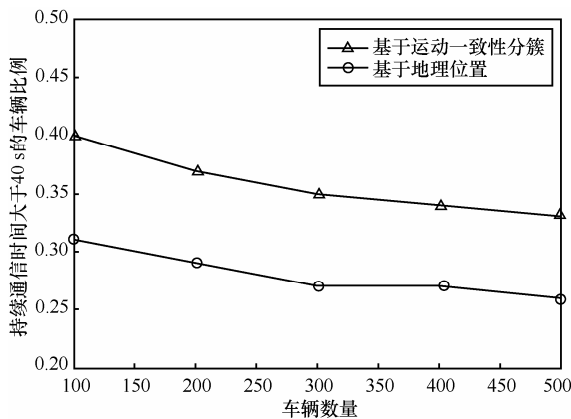


图 5 持续通信时间大于 40 s 的车辆比例与车辆数量关系

图 6 和图 7 对比了 3 种不同传输方式下的性能。基站传输是指簇内车辆之间没有协作，单独从 LTE 基站获得所有数据；随机中继选择指随机选择不同数目的车辆作为中继，辅助请求车辆接收部分基站数据；最优中继选择指根据算法 2 得出的最优中继选择策略，可以保证在时延约束下得到最大的传输效率。

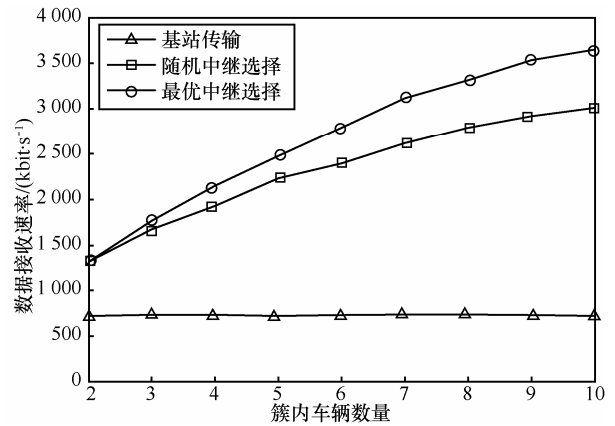


图 6 数据接收速率与簇内车辆数量关系

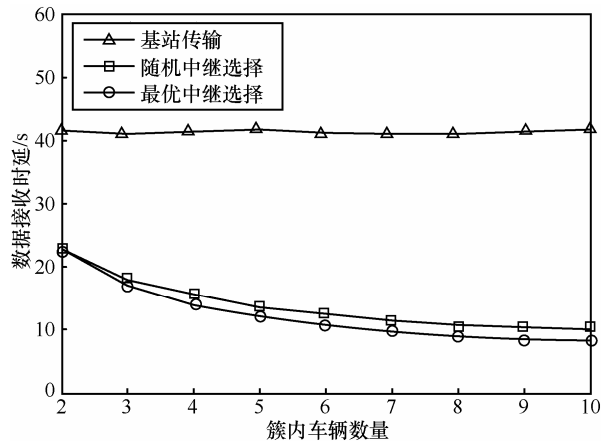


图 7 数据接收时延与簇内车辆数量关系

图 6 表示簇内车辆在请求一个流媒体数据时接收速率和簇内车辆数目的关系。可以看出，随着簇内车辆数目的增加，基站传输方式的数据接收速率基本保持不变，这是因为车辆之间没有协作，传输速率只由自身的信道状态决定。随机中继选择可以在其他中继车辆的辅助下，从基站获取部分数据，并通过 D2D 链路转发给接收方，因此可大大提高传输速率；但中继车辆会对接收车辆产生干扰，降低从基站接收数据的信噪比，从而降低传输速率，因此最优中继选择综合考虑中继车辆带来的增益和干扰，使接收车辆达到更高

接收速率。

图 7 表示簇内某车辆在请求一个数据大小为 30 MB 的数据时的时延和簇内车辆数目的关系。由于 D2D 链路通信距离短、速率快, 因此相比传统的基站传输方式, 通过中继车辆的协作可以大大降低数据传输时延, 而且, 选择最优中继车辆可以在增加传输速率的同时, 保证干扰在可接收范围内, 从而在保证服务质量的前提下最小化传输时延。

5 结束语

未来 5G 网络中, 海量的设备接入导致车联网对通信技术和服务质量提出更高的要求。现有的 V2V 通信技术 DRSC 无法满足未来车联网高速率、低时延、高可靠性和大量流媒体分发的需求。结合 LTE 和 D2D 通信技术, 将其应用到车联网中可有效缓解以上挑战, 为车联网服务的普及带来可能。本文针对车辆快速移动带来的 D2D 通信不可靠问题, 提出了一种基于运动一致性的分簇算法, 仿真结果表明该算法有效增加了持续 D2D 通信时间, 提升了车辆间通信的可靠性; 其次, 针对簇内用户的流媒体数据分发, 提出一种带时延约束的 D2D 协作中继转发策略, 设计最优中继选择算法, 仿真结果表明该算法得出的中继策略大幅提升了数据接收速率和网络吞吐量。

参考文献:

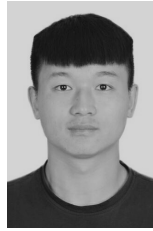
- [1] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Science China, Information Science, 2014, 44(5): 551-563.
- [2] 王志勤, 罗振, 魏克. 5G 业务需求分析及技术标准进程[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(2): 1-4.
WANG Z Q, LUO Z, WEI K. 5G service requirements and progress on technical standards[J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(2): 1-4.
- [3] 赵国锋, 陈婧, 韩远兵, 等. 5G 移动通信网络关键技术综述[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2015, 27(4): 441-452.
ZHAO G F, CHEN J, HAN Y B, et al. Prospective network techniques for 5G mobile communication: a survey[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, Natural Science Edition, 2015, 27(4): 441-452.
- [4] MUMTAZ S, SAIDULH K M, RODRIGUEZ J. Direct mobile-to-mobile communication: paradigm for 5G[J]. Wireless Communications IEEE, 2014, 21(5): 14-23.
- [5] AGYAPONG P, IWAMURA M, STAEHLE D, et al. Design considerations for a 5G network architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 65-75.
- [6] LIU J, KATO N, MA J, et al. Device-to-device communication in LTE-advanced networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(4): 1923-1940.
- [7] 王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. D2D 通信技术综述[J]. 桂林电子科技大学学报, 2014, 34(2): 114-119.
WANG J Y, GONG Z S, FU J L, et al. A survey on device-to-device communication[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 34(2): 114-119.
- [8] MUMTAZ S, SAIDULH K M, ASHRAF M I, et al. Cognitive vehicular communication for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(7): 109-117.
- [9] XING W, WANG N, WANG C, et al. Resource allocation schemes for D2D communication used in VANETs[C]//80th IEEE Vehicular Technology Conference. c2014: 1-6.
- [10] LLUSIA D, MÁRQUEZ R, BELTRÁN J F, et al. IEEE 802.11p: towards an international standard for wireless access in vehicular environments[C]//VTC/Spring-2008 IEEE 67th Vehicular Technology Conference. c2008: 2036-2040.
- [11] ARANITI G, CAMPOLO C, CONDOLUCI M, et al. LTE for vehicular networking: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5): 148-157.
- [12] VINEL A. 3GPP LTE versus IEEE 802.11p/WAVE: which technology is able to support cooperative vehicular safety applications [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(2): 125-128.
- [13] SUN W, STROM E G, BRANNSTROM F, et al. D2D-Based V2V communications with latency and reliability constraints[C]//2014 IEEE GLOBECOM Workshops. c2014: 1414-1419.
- [14] TOUKABRI T, SAID A M, ABD-ELRAHMAN E, et al. Distributed D2D architecture for ITS services in advanced 4G networks[C]// 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference. c2015: 7.
- [15] BOTSOV M, KLUGEL M, KELLERER W, et al. Location dependent resource allocation for mobile device-to-device communications[C]// 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. c2014: 1679-1684.
- [16] ABD-ELRAHMAN E, SAID A M, TOUKABRI T, et al. Assisting V2V failure recovery using device-to-device communications[C]// 2014 Wireless Days. c2014: 1-3.
- [17] REN Y, LIU F, LIU Z, et al. Power control in D2D-based vehicular communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5547-5562.
- [18] SUN W L, YUAN D, ERIK G, et al. Cluster-based radio resource management for D2D-supported safety-critical V2X communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2756-2769.
- [19] IBM. (2013). ILOG CPLEX optimization studio[EB/OL]. <http://www->

- 01.ibm.com/software/ntegration/opt-ization/cplex-optimization-studio/
- [20] BELLESCHI M, FODOR G, ABRARDO A. Performance analysis of a distributed resource allocation scheme for D2D communications[C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops. c2011: 358-362.
- [21] YU C H, TIRKKONEN O, DOPPLER K, et al. On the performance of device-to-device underlay communication with simple power control[C]//2009 IEEE 69th Vehicular Technology Conference. c2009: 1-5.
- [22] KANG X, CHIA K Y, SUN S, et al. Mobile data offloading through a third-party wifi access point: an operator's perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014,13(10): 5340-5351.
- [23] GOECKEL D, TOWSLEY D. Bounds on the gain of network coding and broadcasting in wireless networks[C]//IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007). Anchorage, AK, c2007:724-732.
- [24] IBRAHIM A S, SADEK A K, SU W, et al. Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with?[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2814-2827.
- [25] JING Y, JAFARKHANI H. Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1414-1423.

作者简介:



彭军 (1966-), 女, 湖南长沙人, 博士, 中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为协同控制、云计算与无线通信。



马东 (1992-), 男, 四川雅安人, 中南大学硕士生, 主要研究方向为 D2D 通信与无线传感器网络。



刘凯阳 (1992-), 男, 安徽桐城人, 中南大学博士生, 主要研究方向为计算机网络、云计算与无线通信。



张倩倩 (1991-), 女, 河南杞县人, 中南大学硕士生, 主要研究方向为数据中心网络、D2D 通信。



张晓勇 (1980-), 男, 山西原平人, 博士, 中南大学副教授, 主要研究方向为云计算、移动传感器网络、嵌入式系统与网络优化。