

多信道车联网 V2R/V2V 数据传输调度算法

彭鑫^{1,2}, 邓清勇^{3,4}, 田淑娟⁴, 刘昊霖⁴, 谢文武¹, 李仁发²

(1. 湖南理工学院复杂工业物流系统智能控制与优化湖南省重点实验室, 湖南 岳阳 414000;

2. 湖南大学嵌入式与网络计算湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;

4. 湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 针对多信道车联网的数据传输需求, 提出了 V2R/V2V 数据传输调度算法。算法首先根据车辆的数据传输请求生成初始调度操作, 依初始调度操作之间的冲突关系构建初始调度冲突图和冲突矩阵。其次, 在证明冲突矩阵具有半正定性的基础上, 采用半定规划方法进行信道分配并完善调度冲突图。最后, 根据车辆在服务区域的滞留时间和请求传输的数据量赋予其不同的服务权重, 依据调度冲突图, 结合 V2R/V2V 协作传输的方式分时完成调度。交通仿真实验表明, 所提算法可以有效利用车联网的多信道特性, 通过 V2R/V2V 协作传输调度改善了网络服务容量。

关键词: 车联网; 数据传输; 信道分配; 调度; 半定规划

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019060

Data dissemination scheduling algorithm for V2R/V2V in multi-channel VANET

PENG Xin^{1,2}, DENG Qingyong^{3,4}, TIAN Shujuan⁴, LIU Haolin⁴, XIE Wenwu¹, LI Renfa²

1. Key Laboratory of Hunan Province on Intelligent Control and Optimization of Complex Industrial Logistics System, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, China

2. Key Laboratory for Embedded and Network Computing of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China

3. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

4. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China

Abstract: Considering that the data dissemination in multi-channel VANET (vehicular ad hoc network), a cooperative data dissemination scheduling algorithm was introduced for V2R(vehicle to roadside unit) and V2V(vehicle to vehicle). The algorithm created initial scheduling operators according to data requisition of vehicles. Then, initial collision graph and collision matrix were generated based on the conflict among initial scheduling operators. After proving the positive semidefinite of collision matrix, SDP (semidefinite programming) was used to channel allocation and collision graph creation. The algorithm then assigned weights for each data requisition according to dwell time and data volume of vehicles in RSU service region. Furthermore, it selected maximum weighted independent set of collision graph. The goal was to satisfy the most urgent data requisitions by V2R/V2V cooperate transmission. Transportation simulation results demonstrate that the proposed solution effectively promotes the service capacity by utilizes the multichannel of VANET and V2R/V2V transmission scheduling.

Key words: vehicular ad hoc network, data dissemination, channel allocation, scheduling, semidefinite programming

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-07-02

通信作者: 邓清勇, dengqingyong@xtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61772195, No.61602398, No.61300039); 湖南省自然科学基金资助项目 (No.2018JJ2156, No.2018JJ2154); 湖南省科技计划基金资助项目 (No.2016TP1021); 湖南省教育科学“十三五”规划课题基金资助项目 (No.XJK17BXX004); 计算机网络和信息集成教育部重点实验室(东南大学)开放基金资助项目 (No.K93-9-2016-09)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61772195, No.61602398, No.61300039), The Natural Science Foundation of Hunan Province(No.2018JJ2156, No.2018JJ2154), The Science and Technology Program of Hunan Province (No.2016TP1021), The 13th Five-Years Plan of Education Science Program of Hunan Province(No.XJK17BXX004), Key Laboratory of Computer Networks and Information Integration of Ministry of Education Research Foundation (No.K93-9-2016-09)

1 引言

车联网 (VANET, vehicular ad hoc network) [1] 是由具备无线通信和计算能力的智能网联车辆以及路边单元 (RSU, road side unit) 组成的异构网络, 具备碰撞避免、事故预警、交通信息发布、Internet 接入、辅助驾驶等基本功能 [2-3], 还可依托传感器网络提供有效的位置服务 [4], 已吸引汽车企业和学术界的广泛参与。国际电气电子工程师学会 (IEEE) 根据美国联邦通信委员会 (FCC) 为车联网分配了 75 MHz 的带宽, 制定了由 IEEE802.11p 和 IEEE1609 协议构成的车联网专用短距通信 (DSRC, dedicated short range communication) 的组网标准 [5], 为车联网提供了 6 个服务信道和一个控制信道, 实现车辆与车辆 (V2V, vehicle to vehicle) 之间及车辆与路边单元 (V2R, vehicle to roadside unit) 之间的数据传输 [6-8]。

由于车辆行驶速度快, 网络拓扑的动态变化给 V2R/V2V 数据传输带来巨大挑战。尤其是交通事故预警等时延敏感的应用, 需要让消息尽快扩散至兴趣车辆, 对 V2R 和 V2V 数据传输的可靠性提出了更高的要求 [9]。

针对上述问题, 本文提出多信道环境下车联网 V2R/V2V 数据传输调度算法 (MCV-DTS, multi-channel VANET-data transmission scheduling)。该算法根据车辆的数据传输请求和可能的调度操作建立初始调度冲突图, 在此基础上通过多信道分配和传输调度, 构建调度冲突图, 然后通过 V2R 和 V2V 协作通信方式满足车辆的数据传输需要, 可有效利用多信道特性拓展 V2R/V2V 数据传输的服务容量。

2 车联网数据传输机制

对于车联网数据传输机制的研究主要有 2 个方面的考虑: 一方面侧重于信道访问控制协议, 另一方面则侧重于多跳路由协议。本节对其分别进行阐述。

文献 [10] 提出了时隙共享安全消息访问控制 (SS-MAC, slot-sharing media access control) 协议, 通过记录通信时隙的占用情况和分布式时隙共享算法为车联网安全消息的发送提供了无冲突的广播机制。文献 [11] 提出了在无 RSU 支持的情况下, 自组织 V2V 通信的协调 MAC 协议, 通过应用层数据调度和多信道协调机制支持安全和非安全业务。

文献 [12] 提出了车载协作访问控制 (VC-MAC, vehicular cooperative media access control) 协议, 当部分车辆在 RSU 覆盖区域内无法通过 V2R 链路完成数据下载时, 可借助 V2V 链路在其他车辆的协助下进行数据访问, 扩展了 RSU 的实际覆盖范围。

数据路由问题也是车联网的研究热点。文献 [13] 提出了基于共享的消息分发策略, 将车辆按请求的消息类型进行分类, 每个类别以分组接收率和传输时延为指标甄选中继节点, 并形成树形结构分发数据。文献 [14] 提出了合作多跳传输 (PCMR, path-based cooperative multihop relaying) 协议, 降低了路由过程的链路中断概率。当数据传输过程发生链路中断时, 协议将根据网络拓扑和信道条件重新建立传输路径。文献 [15] 提出了车联网混合路由策略 (HRV, hybrid routing in VANET), HRV 包含在线可用 RSU 位置获取算法 HRVretrival 和基于网络编码的多播协议 HRVmulticast, 能提升数据传输的顽健性。文献 [16] 提出了无间隙协助下载方法 (NICDM, non-intermittent cooperative downloading method), 委托行使方向上的最近 2 个 AP 进行协助下载, 并选择合适的协助车辆将数据传送给下载车辆, 实现在信号盲区的下载服务。文献 [17] 提出了针对单播路由的 V2R 和 V2V 传输协议切换决策算法, 根据车辆密度、消息传播方向、网络连通度等参数进行路径决策。

车联网数据传输通常需要 RSU 的支持, 参与数据传输的车辆存在 V2V 和 V2R 这 2 种传输模式, 因而已有工作研究了在 2 种传输模式下的数据传输调度问题。文献 [18] 提出了最大自由持续时间 (MFL, maximum freedom last) 协议, 该协议针对 RSU 的文件传输服务, 通过最小化 V2R 链路的切换率扩展 RSU 的有效覆盖范围。文献 [19] 为提升车联网数据传输的顽健性, 采用动态分簇的数据分发方案。方案将数据传输调度建模为最大最小流问题, 并分解为主、子问题求解。文献 [20] 利用出租车作为移动网关为路边单元和车辆提供数据转发服务, 出租车有相对稳定的城市行驶模式, 通过马尔可夫链模型估计出租车的形势轨迹, 选择最合适的车辆转发数据, 降低数据转发时延。文献 [21] 提出了基于信道预测的车联网消息传输调度方案, 该方案通过递归最小二乘算法对信道状态进行预测, 从而降低数据传输时延, 提升吞吐量。文献 [22] 针对 V2R 通信的实时数据传输应用提出了在线调度算法, 算法考虑

了数据传输的时延要求和数据更新的时效性，可实现周期性数据更新和实时业务请求之间的平衡。文献[23]提出了 V2V 和 V2R 协作数据传输 (CDD, cooperative data dissemination) 协议，考虑控制与服务信道分离的情况，采用分时调度机制，将数据传输调度分为 V2V 广播、RSU 广播和 V2V/V2R 混合数据传输 3 个阶段。

当前，对车联网数据传输机制的研究主要针对 RSU 覆盖范围内的信道访问控制和数据路由策略，网络传输调度问题的研究主要局限于 V2R 通信的链路调度机制，而多信道条件下 V2R/V2V 协作传输已成为车联网数据传输的常态，针对该内容的研究仍不多见。

3 车联网数据传输模型

本文研究 RSU 支持下的 V2R/V2V 数据传输调度。假设车辆仅配备一个无线接口，其不能同时处于发送或接收状态，而且不能同时处于 V2V 和 V2R 模式。组网环境参照 IEEE802.11p，使用一个控制信道和 6 个服务信道。控制信道用于发送管理消息和服务广播，服务信道用于数据通信。车辆在同一时刻只能使用一个信道。在调度过程中，所有车辆首先处于 V2V 模式，通过控制信道获取邻居列表；然后进入 V2R 模式，利用控制信道向 RSU 上传自身位置、邻居列表及服务请求，RSU 将服务请求加入任务队列，进行信道分配和调度决策；最后每辆车根据调度决策进入 V2R 或 V2V 模式，使用特定信道进行数据传输。

数据传输过程中处于 V2R 模式的车辆可以与 RSU 通信，获取数据后在后续调度周期可转入 V2V 模式，作为发送方将数据分组转发给自己的邻居车辆。V2R/V2V 混合数据传输示意如图 1 所示。处于 V2R 模式的车辆在 RSU 覆盖范围内可以从 RSU 接收数据， N_1 、 N_2 和 N_3 这 3 辆车处于 V2R 模式。图中的细线方块表示数据分组，粗线方块表示车辆已提交传输请求，但还未传输完成的数据分组。RSU 广播数据分组 a ，由于 N_1 、 N_2 、 N_3 处于 V2R 模式，可以收到数据 a ，而 N_4 、 N_5 、 N_6 、 N_7 处于 V2V 模式，只能接收其他车辆发送的数据。 N_4 已经从 RSU 获取数据 e ，可以作为发送方将数据发送给车辆 N_6 。同理， N_5 已获取数据 b 和 c ，可以作为发送方将数据 c 发送给 N_7 。在数据发送过程中，由于无线信道的开放特性，如果发送方使用同一信道，并且同时

发送数据，则会在接收方造成冲突，无法正常接收。图中 N_4 、 N_5 、 N_6 、 N_7 距离较近，如果 (N_4 , N_6) 和 (N_5 , N_7) 使用同一信道发送数据，将造成 N_6 无法正常接收，此外，RSU 的广播信道也会对 V2V 通信造成干扰，因而有必要采用多信道传输调度机制。

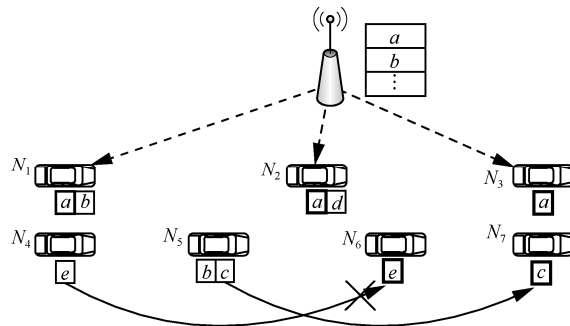


图 1 V2R/V2V 混合数据传输示意

车辆请求传输的数据集 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{|D|}\}$ 包含 $|D|$ 个数据项。车辆集合 $N(t) = \{N_1, N_2, \dots, N_{m(t)}\}$ 表示在调度周期 t 内，有 $m(t)$ 辆车。 $N(t)$ 可以分为 $NR(t)$ 和 $NV(t)$ 这 2 个子集， $NR(t)$ 表示处于 V2R 模式的车辆集合， $NV(t)$ 表示处于 V2V 模式的车辆集合。车辆在一个调度周期内只能处于一种通信模式，即 $NR(t) \cap NV(t) = \emptyset$ ， $NR(t) \cup NV(t) = N(t)$ 。 $CH(\cdot)$ 表示通信节点所处的信道。每辆车 $N_i (1 \leq i \leq |m(t)|)$ 都维护一个数据请求队列 $Q_{N_i}(t) = \{q_1^{N_i}, q_2^{N_i}, \dots, q_{|Q_{N_i}(t)|}^{N_i}\}$ ，其中， $|Q_{N_i}(t)|$ 表示 N_i 在周期 t 请求的数据总数， $q_j^{N_i} (1 \leq j \leq |Q_{N_i}(t)|)$ 表示车辆 N_i 请求的某个数据项。依据请求的数据项是否完成传输调度，又可将 $Q_{N_i}(t)$ 分为 $QC_{N_i}(t)$ 和 $QI_{N_i}(t)$ 2 个子集，分别表示已完成的数据请求和尚未完成的数据请求，满足 $QC_{N_i}(t) \cap QI_{N_i}(t) = \emptyset$ ， $QC_{N_i}(t) \cup QI_{N_i}(t) = Q_{N_i}(t)$ 。车辆 N_i 在调度周期 t 内的邻居集用 $C_{N_i}(t)$ 表示，如果 $N_i \in NV(t)$ ，则 $C_{N_i}(t) \subseteq NV(t)$ 。路边单元 RSU 维持一个服务队列，队列项为车辆信息 $\langle N_i, Q_{N_i}(t), C_{N_i}(t) \rangle$ ，每周期更新一次。RSU 每个调度周期广播数据分组 $d^R(t)$ ， $d^R(t) \in D$ 。与 RSU 相邻的车辆集合为 $C_{RSU}(t)$ ，仅当 $N_i \in C_{RSU}(t) \wedge N_i \in NR(t)$ 时， N_i 才能接收 RSU 广播的数据 $d^R(t)$ 。

用 $RRN(\cdot)$ 表示 V2R 模式下 RSU 的数据接收车辆集合，其定义如下。

定义 1 若 RSU 广播数据 $d^R(t)$ ，接收 $d^R(t)$ 的车辆集合为 $RRN(d^R(t))$ ，那么对于 $\forall N_i \in RRN(d^R(t))$

需满足以下条件: 1) N_i 为 RSU 的一跳邻居, 2) N_i 处于 V2R 模式, 3) N_i 与 RSU 处于相同信道, 4) $d^R(t)$ 为 N_i 的请求数据。

在 V2V 模式下, 数据发送车辆的集合用 $VSN(t) = \{VSN_1, VSN_2, \dots, VSN_{|VSN(t)|}\}$ 表示, 其中 $|VSN(t)|$ 为数据发送车辆的数目。由于 $VSN_i (1 \leq i \leq |VSN(t)|)$ 处于 V2V 模式, 显然 $VSN(t) \in NV(t)$ 。用 $D(VSN(t)) = \{d(VSN_1), d(VSN_2), \dots, d(VSN_{|VSN(t)|})\}$ 表示 $VSN(t)$ 发送的数据分组集合, 其中 $d(VSN_i) (1 \leq i \leq |VSN(t)|)$ 为车辆 VSN_i 发送的数据分组。由于 $d(VSN_i)$ 是由 RSU 发送给车辆 VSN_i , 因此 $d(VSN_i) \in QC_{VSN_i}(t)$ 。考虑到无线信道的冲突问题, 给出数据传输冲突车辆集的定义如下。

定义 2 $Col(t)$ 为 V2V 模式下数据接收冲突车辆集。对于 $\forall N_k \in NV(t)$, $\forall VSN_i, VSN_j \in VSN(t)$, 如果 N_k 为 VSN_i 、 VSN_j 的邻居, 当 VSN_i 、 VSN_j 处在同一信道, 而且同时发送数据, 将在 N_k 处产生冲突。

定义 3 V2V 模式下, 数据的接收车辆集合。若车辆 VSN_i 发送数据 $d(VSN_i)$, 用 $VRN(d(VSN_i))$ 表示数据 $d(VSN_i)$ 的接收车辆集合。对于 $\forall N_j \in VRN(d(VSN_i))$, 满足以下条件: 1) N_j 为 VSN_i 的邻居, 2) $d(VSN_i)$ 为 N_j 的请求数据, 3) N_j 不是 V2V 模式下的发送车辆, 4) N_j 与 VSN_i 处于相同的信道下。

根据定义 3, $VSN(t)$ 中的车辆准备发送的数据集合为 $D(VSN(t))$, 处于 V2V 模式的接收车辆集合可表示为

$$VRN(D(VSN(t))) = \bigcup_{d(VSN_i) \in D(VSN(t))} VRN(d(VSN_i)) \quad (1)$$

在上述集合的基础上, 建立调度算法的服务容量定义, 具体如下。

定义 4 加权服务容量 $SC_W(t)$ 。 $W_{N_i}(t)$ 表示调度周期 t 中车辆 N_i 的服务权值。加权调度容量 $SC_W(t)$ 定义为调度周期内, 被服务的车辆权值之和。

在上述定义的基础上, 数据传输调度是在给定车辆的可用信道集合 $CH = \{ch_0, ch_1, \dots, ch_6\}$, 数据集合 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 车辆集合 $N(t) = \{N_1, N_2, \dots, N_{m(t)}\}$ 、车辆请求的数据集合 $Q(t) = \{Q_{N_1}, Q_{N_2}, \dots, Q_{N_{m(t)}}\}$ 、每辆车的服务权值集合 $W(t) = \{W_{N_1}, W_{N_2}, \dots, W_{N_{m(t)}}\}$ 的基础上, 最大化加权服务容量。调度过程首先将车辆分为 $NR(t)$ 和 $NV(t)$ 这 2 个集合,

然后将要传输的数据项 $d^R(t)$ 通过 V2R 模式在 ch_0 信道广播。同时在 V2V 模式的车辆中, 选定数据发送车辆集 $VSN(t)$ 和对应的数据集 $D(VSN(t))$ 。如果用 $S(CH, NR, NV, Q, D, W)$ 表示数据传输调度集合, 那么调度策略的优化目标是找到使加权服务容量最大化的调度策略, 优化模型如式(2)所示。

$$\begin{aligned} & (CH^*, NR^*, NV^*, Q^*, D^*) = \\ & \arg \max_{(CH, NR, NV, Q, D) \in (CH, NR, NV, Q, D, W)} SC_W(t) \end{aligned} \quad (2)$$

调度过程可总结为以下阶段步骤。

步骤 1 产生初始调度。初始调度是指能够通过 V2R 或 V2V 模式处理某项数据传输请求的调度操作。初始调度包含集合 $IS_{V2R}(t)$ 和 $IS_{V2V}(t)$ 。 $IS_{V2R}(t)$ 表示通过 V2R 模式进行的调度操作, $IS_{V2V}(t)$ 表示通过 V2V 模式进行的调度操作。 $IS_{V2R}(t)$ 调度操作作用 $R\delta N_{R_r}$ 表示, $IS_{V2V}(t)$ 调度操作作用 $N_s\delta N_{V_r}$ 表示, 其中 R 表示 RSU, N_s 表示发送方车辆, δ 表示请求传输的数据分组。在 V2R 模式下 $\delta \in QI_{NR_r}(t)$, 在 V2V 模式下 $\delta \in QI_{N_r}(t)$, N_{R_r} 和 N_{V_r} 分别表示 RSU 和 V2V 模式下的接收方车辆。在 V2V 模式下, 传输的数据分组 δ 应是发送方已从 RSU 获取的数据, 同时还是接收方正正在请求的数据, 即 $\delta \in QC_{N_s}(t) \wedge \delta \in QI_{N_r}(t)$ 。

步骤 2 判断调度冲突。初始调度操作必须满足以下 4 个条件, 否则将产生调度冲突。

条件 1 发送方同一周期内不能发送多个不同的数据分组。对于初始调度操作 $X\delta N_{X_r}, X\delta' N_{Y_r} \in IS_{V2R}(t) \cup IS_{V2V}(t)$, 其中, X, Y 表示 V2V 或 V2R 模式下的发送方, N_{X_r}, N_{Y_r} 表示接收方。如果 $X = Y \wedge \delta \neq \delta' \wedge N_{X_r} \neq N_{Y_r}$, 即发送方同一周期内发送 2 个不同的数据分组, 将产生冲突。

条件 2 车辆不能同时处于发送和接收状态。如果存在 V2V 或 V2R 模式下的初始调度操作 $X\delta N_{X_r}, X\delta' N_{Y_r} \in IS_{V2R}(t) \cup IS_{V2V}(t)$, 当 $N_{X_r} = Y \vee N_{Y_r} = X$ 时, 即当车辆同时处于发送和接收状态, 2 个初始调度之间存在冲突。

条件 3 数据接收车辆同时位于 2 个数据发送车辆覆盖区域内, 2 个发送方不能使用相同信道。对于 2 个初始调度操作 $X\delta N_{X_r}, X\delta' N_{Y_r} \in IS_{V2R}(t) \cup IS_{V2V}(t)$, 如果满足 $CH(X) = CH(Y) \wedge \{P(N_{X_r}) \in COV(X) \cap COV(Y) \vee P(N_{Y_r}) \in COV(X) \cap COV(Y)\}$,

则存在冲突, 其中, $P(\cdot)$ 表示车辆所处位置, $COV(\cdot)$ 表示车辆或 RSU 通信覆盖范围。即接收车辆如果同时位于 2 个发送车辆的覆盖区域内, 当使用相同信道时将出现冲突。

条件 4 接收方同一周期内只能接收一个发送方的数据。对于 2 个初始调度操作 $X\delta N_{X_r}, X\delta' N_{Y_r} \in IS_{V2R}(t) \cup IS_{V2V}(t)$ 如果 $N_{X_r} = N_{Y_r} \wedge X \neq Y$, 则 2 个调度之间存在冲突。

步骤 3 构建初始冲突图。根据上述条件 1~条件 4, 可以构造调度操作的初始冲突图。初始冲突图的顶点对应调度操作, 将数据接收车辆的权值作为顶点的权值, 初始冲突图的边表示相连的 2 个顶点对应的调度操作相互冲突, 图中不相邻的 2 个顶点说明其对应的调度操作不冲突。对于因同道干扰(条件 3)造成的冲突, 可以通过多信道分配进行化解。所以需要在初始冲突图的基础上完成信道分配, 得到调度冲突图。调度冲突图顶点的加权调度容量的累加即代表调度过程的整体加权调度容量。

初始冲突图的信道分配以是否存在同道干扰为冲突的判定依据, 因而可以等效为二维装箱问题。调度冲突图中所有不相邻的顶点正好构成冲突图的加权独立集, 本文调度过程的目标则是最大化整体加权调度容量, 因而可以等效为求解调度冲突图的最大加权独立集问题。综上, 数据传输调度为 NP-hard 问题。

4 数据传输调度算法

本节在数据传输调度模型的基础上, 以最大化加权调度容量为优化目标构建调度算法。首先, 查找 $IS_{V2R}(t)$ 和 $IS_{V2V}(t)$ 中所有存在冲突的调度操作, 计算每个调度操作的优先级作为调度权值, 以此构建初始冲突图; 其次, 根据初始冲突图进行信道分配, 构建调度冲突图; 然后, 将调度方案的构造过程建模为最大加权独立集问题; 最后, 给出 RSU 传输的数据分组 $d^R(t)$ 及其接收车辆集合 $RN(d^R(t))$, V2V 模式下发送车辆集合 $VSN(t)$, 发送数据分组集合 $D(VSN(t))$ 、接收车辆集合 $VRN(D(VSN(t)))$ 以及各条链路所使用的信道 CH。下面分项阐述各部分内容。

4.1 调度优先级

通信调度存在时间相关性, 如果调度过程仅考虑当前时刻, 难以体现数据传输的优先级, 例如, 对于即将驶离服务区的车辆, 其数据传输请求应当更为紧迫。因此, 本文为 RSU 服务的车辆分配了

不同的调度优先级。优先级的分配考虑 2 个方面的因素, 一是在服务区逗留的时长, 二是需要请求传输的数据量。定义车辆在服务区逗留的时长

$$Stay_{N_i}(t) = \frac{Dis_{N_i}(t)}{Vel_{N_i}(t)}$$

其中, $Dis_{N_i}(t)$ 表示车辆 N_i 离

服务区边界距离, $Vel_{N_i}(t)$ 表示车辆 N_i 的行驶速度。车辆在服务区的剩余时间需要传输的数据越多, 则应分配更高的传输优先级, 定义优先级

$$W_{N_i}(t) = \left(\frac{T |D_{N_i}|}{Stay_{N_i}(t)} \right)^\alpha$$

其中, T 表示调度周期的时

长, $|D_{N_i}|$ 表示车辆 N_i 请求传输的数据量, $\alpha > 0$ 表示权值调节因子。对于车辆 N_i 作为接收方的调度操作, $W_{N_i}(t)$ 将作为该操作的权值。

4.2 初始冲突图的构建

构建初始冲突图的前提是判断初始调度操作的冲突关系。首先确定 V2R 模式的车辆集合 $N_{RSU}(t)$, 构建初始调度操作集合 $IS_{V2R}(t)$ 和 $IS_{V2V}(t)$, 并判断初始调度操作的冲突关系, 然后计算每一个操作的权值。

为确定 $N_{RSU}(t)$, 算法检查服务队列元素 $\langle N_i, Q_{N_i}, C_{N_i}, P(N_i) \rangle$ 。只要车辆进入 RSU 的服务区域, 便向 RSU 发送周期性更新信息。为构建 $IS_{V2R}(t)$, 对 $\forall N_j \in C_{RSU}(t)$, 检索其对应的队列元素 $\langle N_i, Q_{N_i}(t), C_{N_i}, P(N_i) \rangle$ 。 N_j 的数据请求 $q_m^{N_j} \in QI_{N_j}(t)$ 存在调度操作 $\{Rq_m^{N_j} N_j\}$, 即 RSU 将数据 $q_m^{N_j}$ 发送给 N_j , 则 $\{Rq_m^{N_j} N_j\} \rightarrow IS_{V2R}(t)$ 。为构建 $IS_{V2V}(t)$, 对已完成的数据请求 $\forall q_m^{N_j} \in QC_{N_j}(t)$, 如果 $q_m^{N_j}$ 是 N_k 的请求数据 $\forall q_m^{N_j} \in QI_{N_k}(t)$, 且 N_k 是 N_j 的邻居 $N_k \in C_{N_j}(t)$, 存在调度操作 $\{N_j q_m^{N_j} N_k\}$ 表示 N_j 可将数据 $q_m^{N_j}$ 发送给 N_k , 则 $\{N_j q_m^{N_j} N_k\} \rightarrow IS_{V2V}(t)$ 。此时 N_k 不需要处于 RSU 覆盖范围内。确定调度操作后按照第 3 节的 4 个条件判断冲突关系。最后, $\forall N_i \in N_{RSU}(t)$, 计算车辆优先级

$$W_{N_i}(t) = \left(\frac{T |D_{N_i}|}{Stay_{N_i}(t)} \right)^\alpha$$

4.3 信道分配与数据传输调度

本节在初始冲突图的基础上分配信道, 得到调度冲突图。假设有冲突图 G^I , 信道分配过程考虑由同道干扰造成的冲突, 仅针对冲突边集合 $E^I(t)$ 。为

简单起见, 用 v_i 表示冲突图的每个顶点, 用 B 表示可用信道个数, 则信道分配过程可表示为

$$f(v_i) = \text{ch}_j, 1 \leq j \leq B \quad (3)$$

信道分配映射必须满足如下条件。

- 1) $\bigcup_{v_i \in V(t)} f(v_i) = \{\text{ch}_j \mid 1 \leq j \leq B\}$ 。
- 2) 对于冲突图的任意顶点 $\forall v_i, v_j \in V(t)$, 如果 $\langle v_i, v_j \rangle \in E^l(t)$, 那么 $f(v_i) \neq f(v_j)$ 。
- 3) 对于冲突图的任意顶点 $\forall v_i, v_j, v_k \in V(t)$, 且 $i \neq j \neq k$, 如果 $f(v_i) = f(v_j)$, $f(v_j) = f(v_k)$ 则 $f(v_i) = f(v_k)$ 。

根据冲突图 G^l 构造 $|V(t)| \times |V(t)|$ 阶冲突矩阵 $\Sigma = (\sigma_{ij})_{|V(t)| \times |V(t)|}$, 则有

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} \lambda, & i = j \\ -2, & \langle v_i, v_j \rangle \in E^l(t) \\ \alpha_{ij}, & \langle v_i, v_j \rangle \notin E^l(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\alpha_{ij} \in \{-2, \lambda\}$, $\lambda \in \mathbb{Z}^+$ 。确定参数 α_{ij} 的值便可确定信道的分配关系。根据矩阵 Σ 的定义, 如果可用信道数为 B , 可建立定理 1。

定理 1 对于信道映射 $f(v_i) = \text{ch}_j (1 \leq j \leq B)$ 和矩阵 Σ , 如果 $f(v_i) = f(v_j)$, 则 $\alpha_{ij} = \lambda$, 否则 $\alpha_{ij} = -2$ 。那么当 $\lambda \geq 2(B-1)$ 时, 矩阵 Σ 具有半正定性。

证明 根据 Σ 的定义, Σ 为对称矩阵。根据信道分配应满足的条件 3 可知, 信道映射 f 是冲突图顶点集合的等价关系, 所以构成等价类 $\{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_B\}$, B 为所需要的信道数。对于 $\forall v_i, v_j \in \Gamma_k$, $1 \leq k \leq B$, 矩阵 Σ 中与之对应的第 i, j 两行和第 i, j 两列是相等的, 即 $\sigma_i = \sigma_j$, $\sigma_i = \sigma_j$ 。如果矩阵 Σ 的某 l 阶主子式 $|\Sigma|_{ll}, 1 \leq l \leq |V(t)|$, 包含位于同一等价类中的两列和两行, 即 $\exists 1 \leq i, j \leq |V(t)|$, 使 $v_i, v_j \in \Gamma_k, 1 \leq k \leq B$, 那么 $|\Sigma|_{ll} = 0$ 。仅当由来自不同等价类的行和列构成的主子式非零时, 其值为 $|\Sigma|_{ll} = (\lambda - 2(l-1))(\lambda + 2)^{l-1}, 1 \leq l \leq B$ 。仅当 $\lambda \geq 2(B-1)$ 时, $|\Sigma|_{ll} \geq 0$, 矩阵 Σ 具有半正定性, 定理 1 得证。

为确定矩阵 Σ 的元素, 根据定理 1 可建立求解矩阵 Σ 的半定规划模型为

$$\begin{aligned} & \min \max(\sigma_{ij}) \\ & \text{s.t. } \Sigma > 0 \\ & -2 \leq \sigma_{ij} \leq \lambda, \forall \langle v_i, v_j \rangle \notin E^l(t) \\ & \sigma_{ij} = -2, \forall \langle v_i, v_j \rangle \in E^l(t) \\ & \sigma_{ii} = \lambda, 1 \leq i \leq |V(t)| \end{aligned} \quad (5)$$

在求解上述模型的过程中, 难以严格保证 Σ 的元素 $\sigma_{ij} = -2$ 或 $\sigma_{ij} = \lambda$, 通常是 $\sigma_{ij} \approx \lambda$ 或 $\sigma_{ij} \approx -2$ 。这里采用逐项迭代近似处理的方案解决这一问题, 过程如算法 1 所示。

算法 1 基于半定规划的信道分配算法

输入 $G^l(V(t), E(t), E^l(t), \omega_{X \delta N X_r}(t))$

输出 $G^S(V(t), E^S(t), \omega_{X \delta N X_r}(t))$

- 1) $\forall v_i \in V(t), f(v_i) = \text{null}$;
- 2) if $E^l(t) = \emptyset$, then
- 3) $\forall v_i \in V(t), f(v_i) \leftarrow \text{ch}_i, \forall j \in \{1, 2, \dots, B\}$;
- 4) $E^S(t) = E^l(t) + E(t)$;
- 5) return
- 6) else
- 7) 令 $k=0, t=0, \Gamma_0 = \emptyset, G_0(V_0(t), E_0^l(t)) = G(V(t), E^l(t))$;
- 8) do
- 9) {用内点法解 $G_k(V_k(t), E_k^l(t))$ 的模型(5), 得 $\Sigma_k, \lambda^k = \max(\sigma_{ij}^k, 1 \leq i, j \leq |V(t)|) + 1$;
- 10) $\sigma_{ij}^k = \max\{\sigma_{ij}^k \mid 1 \leq i, j \leq e_k, i \neq j, e_k = \dim(\Sigma_k)\}$;
- 11) $k = k + 1$;
- 12) if $v_a, v_b \notin \bigcup_{t=1}^k \Gamma_t$, then
- 13) $\{t = t + 1$;
- 14) $V_k(t) = V_{k-1}(t) \setminus \{v_a, v_b\} \cup \{v_x \mid x \in \Gamma_t\}$;
- 15) $E_k^l(t) = \{\langle v_x, v_y \rangle \in E_{k-1}^l(t) \mid v_x, v_y \notin \{v_a, v_b\}\} \cup \{\langle v_x, v_{\Omega k} \rangle \mid v_x \notin \{v_a, v_b\}, \langle v_x, v_z \rangle \in E_{k-1}^l(t), v_z \in \{v_a, v_b\}\}$;
- 16) else if $\Gamma_i, \{v_a, v_b\} \notin \Gamma_i, 1 \leq i \leq t$, then
- 17) $\{v_a, v_b\} \rightarrow \Gamma_i$;
- 18) end if
- 19) end if }
- 20) while $(|V_k(t)| = \gamma^0)$
- 21) $\gamma = \gamma^0$;
- 22) for each $\Gamma_i, 1 \leq i \leq t$
- 23) $\forall v_i \in \Gamma_i, f(v_x) = \text{null}$;
- 24) end for
- 25) $n = 1$;
- 26) do
- 27) {if $\omega_{v_x}(t) = \max_{v \in V(t)} (\omega_{v_x}(t))$, then
- 28) if $v_x \in \Gamma_i$, then
- 29) $\forall v_j \in \Gamma_i, f(v_j) = \text{ch}_n$;
- 30) $n++$;
- 31) $V(t) = V(t) - \Gamma_i$;
- 32) end if
- 33) end if }

```

34) while( $n \leq 6 \wedge V(t) \neq \text{null}$ )
35) for each  $\langle v_i, v_j \rangle \in E^l(t)$ 
36) if  $f(v_i) \neq \text{null} \wedge f(v_j) \neq \text{null}$ , then
37)    $E^l(t) = E^l(t) - \{ \langle v_i, v_j \rangle \}$ ;
38) end if
39) end for
40)  $E^S(t) = E^l(t) + E(t)$ ;
41) end if

```

算法 1 使用了内点法求解半定规划模型式(5)，依次确定矩阵各元素的值，从而解出冲突矩阵 Σ (算法 1 第 8)~20)行)。冲突矩阵 Σ 反映了各操作间的同道冲突关系，据此通过贪心着色过程可完成信道分配。完成信道分配的顶点之间的冲突边从集合 $E^l(t)$ 中去除，形成调度冲突图 (算法 1 第 21)~34)行)。如果可用信道不够，则冲突边仍保留 (算法 1 第 35)~39)行)，最终得到调度冲突图 G^S 。 G^S 中没能分配信道的操作则需要通过操作调度算法解决数据传输问题。

算法 2 在 G^S 的基础上，选择最大加权独立集对应的操作，并根据选择的操作进行调度决策，包括确定 $d^R(t)$ 、 $RRN(d^R(t))$ 、 $VSN(t)$ 、 $D(VSN(t))$ 、 $VRN(D(VSN(t)))$ 。然后根据车辆的加入和离开，更新服务队列，具体介绍如下。

算法 2 数据传输调度

步骤 1 通过逐项检索调度冲突图 G^S 顶点 v_i 的权值和连接关系确定最大加权独立集 $V_{ind}(t)$ 。

步骤 2 逐项解析并判断最大加权独立集的每一项操作 v_i 的类型。

步骤 2.1 如果传输操作属于 V2R 模式，即 $\forall R \delta N_r \in V_{ind}(t)$ ，由于一个周期内 RSU 只能发送一个数据，因此数据 δ 都是相同的。RSU 确定发送数据 δ ，从而确定 $d^R(t)$ 。每个调度操作 $R \delta N_r$ 的接收车辆 N_r 的集合构成 $RRN(d^R(t))$ 。

步骤 2.2 如果传输操作属于 V2V 模式，即 $\forall N_s \delta N_r \in V_{ind}(t)$ ， N_s 形成发送车辆的集合，从而确定 $VSN(t)$ ，操作中的数据 δ 构成 V2V 通信传输数据的集合 $d(VSN(t))$ ，操作中的接收车辆 N_r 构成接收车辆集合 $VRN(t)$ 。

步骤 3 维护服务队列，将新进入服务区域的车辆添加到服务车辆集合 $N(t)$ ，并将离开服务区域的车辆所对应的数据项从服务车辆集合 $N(t)$ 中删除。

4.4 算法开销分析

假设车辆总数为 $|M|$ ，每辆车提交的数据请求数

为 $|Q|$ 。在构建初始冲突图过程中，查找 $IS_{V2R}(t)$ 的开销为 $|M||Q|$ ，其中， $|Q|$ 表示尚未完成的数据请求数目，有 $|Q| \leq |Q|$ 。同时，查找 $IS_{V2V}(t)$ 的开销为 $|M||QC| \overline{\text{con}} |Q|$ ，其中， $|QC|$ 表示已经完成的数据请求数，且 $|QC| \leq |Q|$ ， $\overline{\text{con}}$ 为车辆间平均连通度，且 $\overline{\text{con}} \leq |M|$ ，则 $\overline{\text{con}} |Q|$ 表示某车辆需要查找所有邻居未完成的数据请求。因此，构建初始冲突图的复杂度为 $O(|M|^2)$ 。算法 1 使用内点法求解模型(5)的复杂度为 $O(|V(t)| + |E^l(t)|^3)$ ，其中， $|V(t)|$ 为冲突图中操作的个数， $|E^l(t)|$ 为冲突边的个数。信道分配过程按照内点法得出的可分配相同信道的等价类进行信道分配，最差情况是每个等价类仅包含一个操作，所以信道分配过程的开销为 $O(|V(t)|)$ ，故算法 1 的复杂度为 $O(|V(t)| + |E^l(t)|^3)$ 。算法 2 中查找最大加权独立集的复杂度为 $O(|V(t)|^2)$ ，算法解析调度操作生成调度决策的过程复杂度为 $O(|V_{ind}(t)|)$ ，算法确定当前周期内服务车辆的复杂度为 $O(|N(t)|)$ ，因此算法 2 的复杂度为 $O(|V(t)|^2)$ 。

5 仿真分析

5.1 实验环境

本文采用 SUMO+NS2 耦合仿真平台对所提调度算法进行仿真验证。由于本文主要研究 RSU 服务范围内的数据传输调度，因此仿真场景采用设置单一 RSU 的直线路段。道路采用双向 6 车道。逐步增加车流密度，降低相应车速，对称车道参数相同，模拟 6 种不同的交通环境，如表 1 所示。在 SUMO 中，车辆的行驶速度设为平均值后，引入 5% 的标准差。

表 1 交通仿真参数

交通场景	平均速度/(km·h ⁻¹)			车辆密度/(辆·km ⁻¹)		
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 1	车道 2	车道 3
1	110	90	80	15	18	25
2	100	80	70	20	24	30
3	90	70	60	25	28	35
4	80	60	50	30	35	40
5	70	50	40	40	45	50
6	60	40	30	50	55	60

RSU 的覆盖范围为 500 m，车辆通信半径为 150 m。车辆在驶过 RSU 服务区时，发起数据传输请求的位置服从均匀分布，数据请求的次数不超过

10次。调度周期为1s。RSU数据队列长度为100,数据项 d_i 被访问的概率服从均匀分布。本文将所提MCV-DTS算法与文献[23]的CDD算法和文献[24-25]的IF广播算法在车联网中的应用形式进行了对比。CDD算法支持数据传输调度,IF算法是可用于多跳无线网络的广播机制,本文在IF中采用最多请求的数据广播策略^[26]。

仿真过程验证了3种算法的平均加权服务容量(weighted service capacity)、服务比率(service proportion)、请求完成度(completion probability)和服务时延(service delay)。服务容量是调度周期内服务的车辆数目;将已完成的数据请求分为直接由RSU服务的请求和通过邻居车辆完成服务的请求2个部分,服务比率是这2个部分完成的请求数之比;请求完成度是已完成的服务请求与总体数据请求数之比;服务时延是从数据请求提交到数据服务完成所需的时长,单位为s。

5.2 实验结果

图2反映了3种算法在不同交通场景条件下的加权服务容量。3种算法都能利用直接广播和多跳传输这2种通信机制,服务容量不仅包含直接从RSU获取数据的车辆,还包含通过V2V信道从其他车辆获取数据的车辆。实验显示,随着车辆密度的增加,车辆在RSU服务区域内的时间延长,3种算法的加权服务容量逐步增加。IF和CDD算法没有考虑多信道环境,在单信道条件下的广播和多跳传输存在信道冲突,对服务容量造成一定影响。由于CDD算法采用了数据传输权重机制,优先调度服务权重更高的任务,在一定程度上缓解了信道冲突带来的时间开销,相比于IF算法的概率广播机制,有效提升了服务容量。本文MCV-DTS算法在多信道分配的基础上按任务的权重完成传输调度,进一步提升了服务容量。

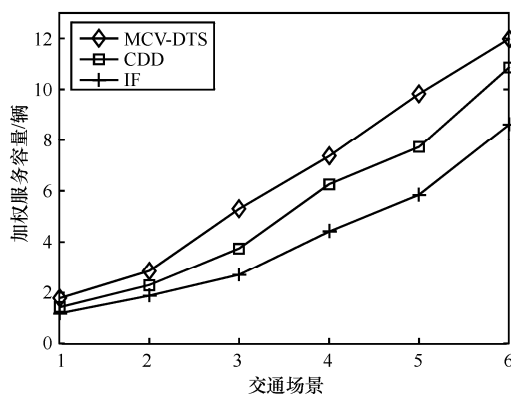


图2 不同交通场景下3种算法的加权服务容量

图3反映了算法在6种交通场景下,通过RSU传输完成的服务容量。IF算法主要依赖广播通信,而且优先调度有最多请求的数据进行广播,当交通密度增加时,RSU服务容量具有显著提升。而CDD和MCV-DTS算法不仅要考虑RSU直接服务的车辆,还要考虑通过V2V通信的车辆,因为部分车辆的数据请求会通过V2V模式完成,所以调度机制的使用并未提升RSU的广播服务容量。实验结果显示,IF算法由于主要通过广播机制传输热度最高的数据,具有最好的广播服务容量,而CDD和MCV-DTS算法不能直接提升V2R广播容量,且两者的RSU服务容量并无显著区别。

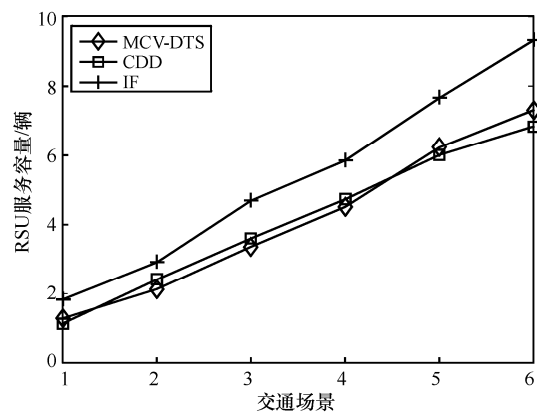


图3 不同交通场景下3种算法的服务容量

图4反映了不同交通场景下3种算法的服务比率。从图4可以看出,IF算法在不同交通场景下具有稳定的服务比率,CDD和MCV-DTS算法在车辆密度增加时,服务比率呈下降趋势。在车辆密度较低时,3种算法服务比率均较高,说明多数车辆通过V2R广播直接获取数据。这是由于车辆密度较低时,V2V模式的数据传输较少,大量数据通过V2R广播完成传输。随着车辆密度的增加,网络连通度增大,CDD和MCV-DTS算法可以将部分数据请求通过调度由V2V通信完成,从而限制了V2R通信的服务容量,降低了服务比率。在V2V通信模式下,MCV-DTS算法通过多信道传输调度,可以满足更多的车辆数据请求,所以当网络密度增加时表现出更低的服务比率。由于RSU只能逐个对数据分组进行广播,因此IF算法通过V2R通信只能满足小部分的数据请求,总体服务比率较高且保持稳定。

图5显示了不同交通场景下3种算法的服务完成度。随着车辆密度的增加,服务完成度逐步上升。这是因为车辆密度较低时,车辆快速通过服务区,提交的服务请求较少。当车辆密度增加时,车辆提

交的请求也开始增加，导致服务比率的下降。当车辆密度进一步增加时，车辆速度继续下降，在服务区域内滞留的时间较长，调度周期增加，所以数据请求完成度逐步增加。不难发现，MCV-DTS 算法在各种交通场景下，尤其是在车辆密度较大的情况下能取得较好的服务完成度。

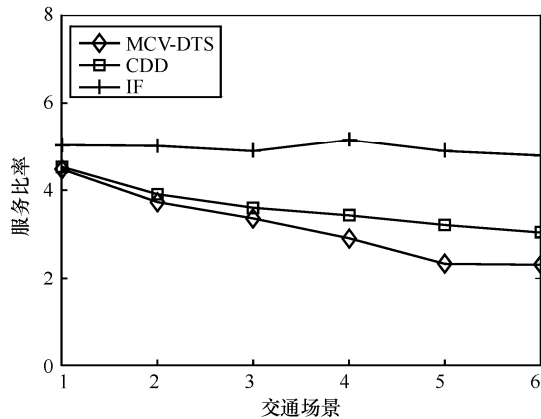


图 4 不同交通场景下 3 种算法的服务比率

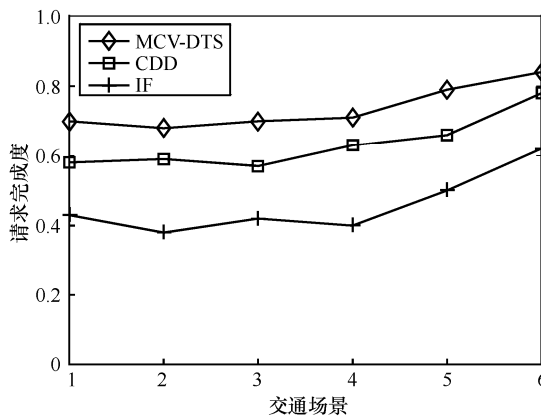


图 5 不同交通场景下 3 种算法的请求完成度

图 6 表示了 3 种算法在不同交通场景下的服务时延。首先，3 种算法在车辆密度较低时具有相近的性能表现，随着车辆密度的增大，3 种算法服务时延逐步上升。这是因为当车辆密度较低时，服务比率较高，V2R 通信占主导地位，数据主要通过 RSU 广播完成传输，时延较低；当车辆密度增大时，V2V 通信承担了部分的数据请求服务，此时 IF 算法中的车辆只能排队等待 V2R 通信模式的广播，而 CDD 和 MCV-DTS 算法则可通过 V2V 通信扩展服务范围，实现 V2R/V2V 并发传输，因而具有相近的性能表现。其中，MCV-DTS 算法通过多信道传输进一步提升了并发服务能力，可有效降低服务等待时间，提升服务完成度。

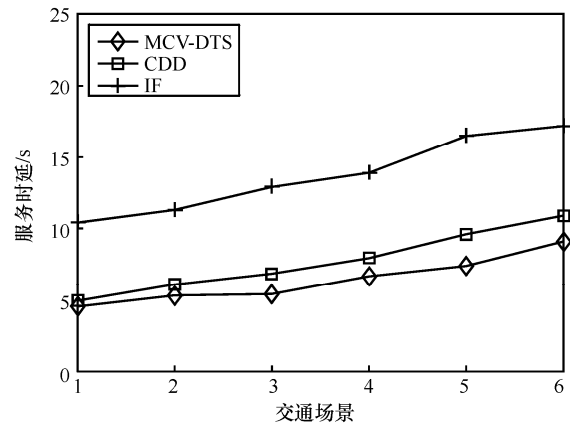


图 6 不同交通场景下 3 种算法的服务时延

6 结束语

本文针对多信道车联网提出了 V2R/V2V 的数据传输调度算法。算法根据车辆的数据传输请求生成初始调度操作集，并建立调度操作之间的冲突条件，以此根据初始调度操作之间的冲突关系构建初始调度冲突图和冲突矩阵。本文证明了冲突矩阵的正半定性，从而采用半定规划方法进行信道分配，并建立调度冲突图。然后根据车辆在服务区域的滞留时间赋予其不同的服务权重。为了让权重较大的车辆优先获得传输调度服务，本文通过选取最大加权独立集的调度方案，利用 V2R/V2V 传输完成调度过程。交通仿真实验表明，所提算法可以有效利用车联网的多信道特性改善网络服务容量。

参考文献:

- [1] XIAO Z, LI P, HAVYARIMANA V, et al. A novel design for vehicle positioning and trajectory prediction under urban environments[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(13): 5586-5594.
- [2] XIAO Z, HAVYARIMANA V, LI T, et al. A nonlinear framework of delayed particle smoothing method for vehicle localization under non-gaussian environment[J]. Sensors, 2016, 16(5): 692-708.
- [3] ZHAO J, LIU Y, GONG Y, et al. A dual-link soft handover scheme for C/U plane split network in high-speed railway[J]. IEEE Access, 2018(6): 12473-12482.
- [4] XIAO F, LIU W, LI Z, et al. Noise-tolerant wireless sensor networks localization via multi-norms regularized matrix completion[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2409-2419.
- [5] YU R, DING J, HUANG X, et al. Optimal resource sharing in 5G-enabled vehicular networks: a matrix game approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 7844-7856.
- [6] GAO Z, CHEN D, CAI S, et al. OptDynLim: an optimal algorithm for the one-dimensional RSU deployment problem with non-uniform profit density[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 11(4): 1-10.

- [7] GAO Z, CHEN D, SUN P, et al. KM-based efficient algorithms for optimal packet scheduling problem in cellular/infostation integrated networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2018, 77(8): 84-94.
- [8] GAO Z, CHEN D, CAI S, et al. Optimal and efficient approximate algorithms for one-dimensional RSU deployment problem with new model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 11(4): 1-14.
- [9] YU R, DING J, HUANG X, et al. Optimal resource sharing in 5G-enabled vehicular networks: a matrix game approach [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(10): 7844-7856.
- [10] LV F, ZHU H, ZHOU H, et al. SS-MAC: a novel time slot-sharing MAC for safety messages broadcasting in VANETs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3586-3597.
- [11] TONY K, LABERTEAUX K, SENGUPTA R. A multi-channel VANET providing concurrent safety and commercial services[C]//*ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. 2005:1-9.
- [12] ZHANG J, ZHANG Q, JIA W. VC-MAC: a cooperative MAC protocol in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(3):1561-1571.
- [13] DAS B, MISRA S, ROY U. Coalition formation for cooperative service-based message sharing in vehicular ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2016, 27(1):144-156.
- [14] SHAN H, ZHUANG W. Multihop cooperative communication for vehicular ad hoc networks[C]// *International ICST Conference on Communications and Networking in China*. 2011:614-619.
- [15] WU D, ZHANG Y, BAO L, et al. Location-based crowdsourcing for vehicular communication in hybrid networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(2):837-846.
- [16] LIU B, JIA D, LU K, et al. Infrastructure-assisted message dissemination for supporting heterogeneous driving patterns[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(10): 2865-2876.
- [17] VEGNI A, LITTLE T. Hybrid vehicular communications based on V2V-V2I protocol switching[J]. *International Journal of Vehicle Information & Communication Systems*, 2011, 2(3/4):213-231.
- [18] CHANG C, CHENG R, SHIH H, et al. Maximum freedom last scheduling algorithm for downlinks of DSRC networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, 8(2):223-232.
- [19] AZIZIAN M, CHERKAOUI S, HAFID A, et al. A distributed cluster based transmission scheduling in VANET[C]// *IEEE International Conference on Communication*. 2016: 1-6.
- [20] WANG Y, YANG E, ZHENG W, et al. A realistic and optimized V2V communication system for taxicabs[C]// *International Conference on Distributed Computing Systems*. 2016:139-148.
- [21] ZENG F, ZHANG R, CHENG X, et al. Channel prediction based scheduling for data dissemination in VANETs[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(6):1409-1412.
- [22] LIU K, LEE V, NG K, et al. Temporal data dissemination in vehicular cyber-physical systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(6):2419-2431.
- [23] LIU K, NG J, LEE V, et al. Cooperative data scheduling in hybrid vehicular ad hoc networks: VANET as a software defined network[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(3):1759-1773.
- [24] BUSANELLI S, FERRARI G, GIORGIO V. On the effects of mobility for efficient broadcast data dissemination in I2V networks[C]// *GLOBECOM Workshops*. 2011:38-42.
- [25] BUSANELLI S, FERRARI G, PANICHPAPIBOON S. Efficient broadcasting in IEEE 802.11 networks through irresponsible forwarding[C]// *Global Telecommunications Conference*. 2009:1-6.
- [26] WONG J. Broadcast delivery[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1988, 76(12):1566-1577.

[作者简介]



彭鑫 (1981-)，男，湖南岳阳人，博士，湖南理工学院副教授，主要研究方向为车联网和云计算。

邓清勇 (1981-)，男，湖南武冈人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为物联网与认知网络。

田淑娟 (1982-)，女，湖南攸县人，博士，湘潭大学副教授，主要研究方向为物联网和 CPS。

刘昊霖 (1988-)，男，湖南宁乡人，博士，湘潭大学讲师，主要研究方向为物联网和无线传感器网络。

谢文武 (1979-)，男，湖北监利人，博士，湖南理工学院讲师，主要研究方向为物联网与大数据。

李仁发 (1957-)，男，湖南郴州人，博士，湖南大学教授、博士生导师，主要研究方向为物联网与 CPS。