

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2023.02.018

## 基于异质链路联动切换的 V2I/V2V 协作传输策略

刘鑫一,狄陈琪\*,徐志麟

(长安大学信息工程学院,西安,710064)

**摘要:**随着新一代无线通信技术的发展和交通业务需求的不断增长,车联网(Internet of Vehicle, IoV)作为智能交通领域的重要组成部分得到了快速发展.车辆在高速行驶过程中位置分布的随机性导致IoV网络拓扑结构变化频繁,对用户的信息传输造成极大的影响.针对基础设施稀疏部署的高速公路场景,提出一种基于异质链路联动切换的车与基础设施之间(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、车与车之间(Vehicle-to-Vehicle, V2V)的协作传输策略.根据车辆之间的分布距离对V2V的通信链路质量进行分析,并在动态场景下对链路进行联动切换;研究车辆密度对于车辆分布的影响,推导出IoV网络吞吐量的封闭表达式;为了进一步了解数据交付的情况,将V2I过程和V2V过程进行分离讨论,获得了数据交付时延的封闭表达式.仿真结果表明,在基础设施稀疏部署的高速公路场景中,提出的策略能提高系统的网络吞吐量,降低交付时延.

**关键词:**车联网,协作策略,车与基础设施/车与车,吞吐量,交付时延

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

## A V2I/V2V cooperation transmission strategy based on linkage switching of heterogeneous links

Liu Xinyi, Di Chenqi\*, Xu Zhilin

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710064, China)

**Abstract:** With the development of the new generation of wireless communication technology and the continuous growth of traffic business demand, Internet of Vehicle (IoV), as an important part of intelligent transportation field, has been rapidly developed. The random location distribution of vehicles in the process of high-speed driving leads to frequent changes in the topology of IoV network, which greatly affects the information transmission of users. In this paper, a Vehicle-to-Infrastructure (V2I) and Vehicle-to-Vehicle (V2V) cooperative transport strategy based on heterogeneous link linkage switchover is proposed for the expressway scenario with sparse infrastructure deployment. In this paper, the quality of V2V communication link is analyzed according to the distributed distance between vehicles, and link linkage switch is carried out in dynamic scenarios. The influence of vehicle density on vehicle distribution is studied and the closed expression of IoV network throughput is derived. In order to furtherly understand the situation of data delivery, this paper discusses V2I process and V2V process separately, and obtains the closed expression of data delivery delay. The simulation results show that this strategy improves the network throughput and reduce the delivery delay of the system in the expressway scenario with sparse infrastructure deployment.

**Key words:** Internet of Vehicles, cooperative strategy, Vehicle-to-Infrastructure/Vehicle-to-Vehicle, throughput, data delivery delay

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1807001),陕西省重点研发计划(2022GY-105),陕西省创新能力支撑计划(2021KJXX-102)

收稿日期:2022-11-14

\* 通讯联系人, E-mail: 1399101636@qq.com

车联网(Internet of Vehicle, IoV)技术的快速发展,不仅降低了发生交通事故和交通拥堵的概率,而且能为不同类型的用户提供不同满意度的流媒体服务,特别是视频音频、导航地图等大文件数据的流畅下载,极大地提高了车辆用户的体验满意度<sup>[1]</sup>.然而,在真实的高速公路场景中,由于部分路段的地理位置处于偏远地区,受使用效率和投资成本等因素的限制,对高速公路周边的基础设施进行密集部署会造成严重的资源浪费<sup>[2-3]</sup>,需要用多种技术手段来保障网络的服务质量.为了达到使用效率、投资成本和服务质量之间的均衡,车与车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)之间、车与基础设施(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)之间的协作传输技术作为IoV的重要组成部分,已被广泛应用于提高车辆用户数据下载的吞吐量<sup>[4-5]</sup>.

V2I传输技术可以为车辆用户提供稳定的通信链路和良好的服务质量,但传输能力严重依赖于无线接入点等基础设施的部署情况.对于目前车辆用户呈线性分布的高速公路,仅依靠V2I传输技术需要提高基础设施的发射功率或增加基础设施的数量来保证信号覆盖率,在车流量不大时经济性和实用性较低<sup>[6]</sup>.V2V传输技术易实现,成本低廉,便于车辆之间的信息交互和数据传输,但传输容量受限于相邻车辆之间的距离,当相邻车辆之间的距离增大时传输能力快速下降<sup>[7]</sup>.因此,在基础设施稀疏部署的高速公路场景中,如何设计科学合理的V2I/V2V协作传输策略成为IoV技术的研究热点.

为了通过V2I/V2V协作传输来提高IoV的网络吞吐量,一些研究人员针对单跳和多跳的中继传输方法进行了深入研究.单跳中继是一种由发射机发射数据,只需经过一次中继的携带-存储-转发就可到达接收机的技术,当前的研究重点主要聚焦于设计高效的动态协作策略(Dynamic Cooperative Strategy, DCS).Chen et al<sup>[8]</sup>提出一种具有单跳中继的DCS,将与车辆用户行驶方向相反的所有车辆作为中继车辆来提升车联网用户的吞吐量.Chen et al<sup>[9]</sup>还将此问题扩展到一个普适的场景中,在引入延迟容忍的基础上提出一种优化基础设施部署的方法,并推导出有限车辆密

度下V2I/V2V协作网络可实现的吞吐量<sup>[10]</sup>.Liu et al<sup>[11]</sup>提出一种在单跳中继的模型中对反向车辆进行弹性分区的划分策略来达到提升吞吐量的目的.Wang et al<sup>[12]</sup>提出一种用于双向放大转发中继网络的协作多跳传输策略,不仅增加了传输范围,还提高了路由效率.Feteiha and Ahmed<sup>[13]</sup>将多跳中继扩展到高速公路上的车辆通信,推导出端到端数据传输错误率的上界.为了最小化车辆行驶到未被信号覆盖区域引起的通信中断时长,Siddig et al<sup>[14]</sup>提出一种节能的全双工协同存储-转发策略,利用中继车辆的同时收发能力来提高中继车辆与目标车辆之间的有效通信时间,也提高了目标车辆来自系统网络的数据下载吞吐量.与单跳中继传输方法相比,多跳中继传输方法在具有更大的扩展性的同时,也会增加数据传输错误的概率以及增加数据交付时延.

为了满足车辆用户通过IoV网络下载大数据文件(如流媒体文件、多媒体文件等)的需求,由于系统产生的数据交付时延较长,这对IoV网络的吞吐量提出了更高的要求.Zhou et al<sup>[15]</sup>以协作集群中的每个车辆为中继,从基础设施下载与目标车辆相同的文件来确保下载文件的成功率.为了提高IoV系统的吞吐量,Chen et al<sup>[8]</sup>将需要下载的大文件划分为多个数据块,让反向车道的每辆中继车下载不同的数据块,当中继车辆与目标车辆相遇时,再将携带的数据转发至目标车辆.Chen et al<sup>[16]</sup>利用车辆协作卸载网络的剩余资源形成资源池,并提出一种模糊协作卸载策略,每辆中继车携带不同的数据块,将资源池在车辆间进行分配,从而提高IoV网络的吞吐量.另外,Nguyen et al<sup>[17]</sup>选择目标车辆后方的来车作为中继,提出一种V2I/V2V动态协作传输策略,扩大了目标车辆被信号覆盖的区域.

在以往的研究中,由于高速公路中车辆的高速移动使通信链路持续时间短、容易断裂,V2V链路的切换通常使用固定的策略,即当车辆间的距离大于V2V的有效传输距离时,V2V之间的通信链路便会断开,同时新的V2V通信链路开始建立<sup>[9-10,14]</sup>.由于车辆密度以及路径损耗的影响,固定的V2V链路切换模式对车辆用户数据下载的吞吐量产生了一定的影响,为了提高用户数据下

载的吞吐量,针对V2V链路切换的问题亟待解决.对于双向多车道,由于道路情况的不可确定性和复杂性,时常出现双向车道之间距离过远或逆向车道无法通车的情况,因此利用逆向车道的车辆来携带-储存-转发数据的V2I/V2V协作传输策略不再可靠.为了解决逆向车道的车辆无法被使用的问题,本文在单向双车道的场景中充分考虑车辆密度,提出一种基于异质链路联动切换的V2I/V2V协作传输策略来提高车辆用户数据下载的吞吐量.本文的主要贡献:

(1)将链路切换问题视为V2I/V2V协作策略研究的重点,提出一种基于异质链路联动切换的V2I/V2V协作策略,在高速公路场景中提高目标车辆数据下载的吞吐量,降低数据的交付时延.

(2)通过分析车辆分布特性,获得V2V的最佳切换方案,并制定了中继车辆的连接标准,使车辆用户可以从中继车辆中获得更多的数据.

(3)提出一种新型的分析模型来研究V2I/V2V协作策略下的数据传播过程,推导出车辆用户数据下载可实现的吞吐量和数据交付时延的封闭表达式,为后续相关研究提供理论基础.

仿真结果表明,本文提出的基于异质链路联动切换的V2I/V2V协作策略在提高车辆数据下载吞吐量和降低数据交付时延方面,和以往研究中固定信道切换策略相比,具有明显的优越性.

## 1 系统模型

本文只考虑基础设施中无线基站提供的无线网络,后文中使用无线基站来表示基础设施.假设在一个拥有单向双车道的高速公路场景中,道路两侧均匀部署无线基站,其高度为 $h$ ,设立在距离道路 $m$ 的位置.所有无线基站的最大有效覆盖范围(半径)为 $r_1$ ,每个无线基站可通过无线或者有线方式连接至核心网. $L$ 为两个相邻的无线基站之间未被基站所提供的网络覆盖的路段长度,则相邻无线基站之间的距离为 $L + 2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}$ .由于无线基站之间间隔的距离足够大,所以不会出现无线基站之间相互干扰的情况,如图1所示.

假设每个车辆用户仅携带一根传输天线用于

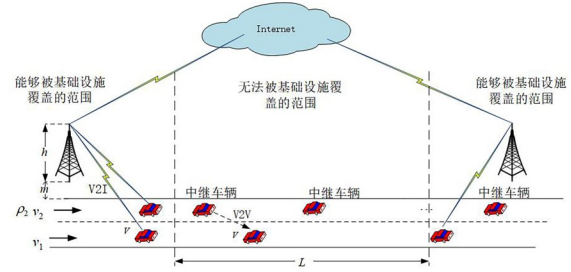


图1 基础设施(无线基站)被稀疏部署的高速公路模型

Fig. 1 Highway model with sparsely deployed infra-structures (wireless base stations)

发射和接收数据,不能同时作为发射机和接收机.为了避免V2I链路和V2V链路之间的相互干扰,分别给V2I链路和V2V链路分配不同的信道,并在V2V链路中通过协议控制来避免车辆用户间的同频干扰.本文主要研究车辆用户从无线基站下载数据的场景,不考虑上行链路.由于无线基站给用户提供了更高质量的服务,因此建立V2I链路的优先级大于V2V链路,即当目标车辆进入无线基站的覆盖范围即建立V2I链路,若有V2V链路则断开V2I链路,在通过V2I链路和V2V链路传输数据的过程中,假设接收信号强度的变化只取决于车辆的位置变化.一般地,数据瞬时传输速率随着车辆与无线基站(两个车辆之间)的距离的增大而减弱,这里采用衰减指数 $\beta$ 来代替标准路径损耗公式<sup>[18]</sup>.处于无线基站覆盖范围内的车辆采用单播方式建立V2I链路,从无线基站下载数据.处于未被无线基站覆盖范围的车辆同样采用单播传输方式建立V2V链路相互连接,所有车载设施能达到的覆盖范围(半径)为 $r_0$ ,当且仅当发射端与接收端(车与无线基站/车与车)的欧氏距离不大于最大覆盖范围( $r_1, r_0$ )时,两者才可以建立传输链路.本研究忽略了路径损耗以外的物理层细节,重点研究交通网络对车辆用户数据下载吞吐量的影响.

由于车载设施和无线基站能达到的最大覆盖范围都远远大于道路的宽度和车辆的长度,且 $r_1 > r_0$ ,所以忽略道路的宽度和车辆的长度,将该道路的两端设置为车流量的入口和出口.假设目标车辆以速度 $v_1 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 匀速行驶至该路段,将目标车辆所在的车道定义为慢车道,与目标车辆



行驶方向相同且平均速度高于该车道的车道定义为快车道. 快车道中的车辆密度为每米  $\rho_2$ , 以  $v_2(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$  通过该路段, 且  $v_2 > v_1$ . 一些研究证实指数分布式的车距能反映真实的交通分布<sup>[7-10]</sup>, 因此假设快车道中车辆的数量服从泊松分布, 车辆之间的距离呈指数分布. 快车道中的所有车辆作为中继车辆承担数据的携带-储存-转发任务.

## 2 基于异质链路联动切换的 V2I/V2V 协作传输策略

在多车道的高速公路中, 假定目标车辆通过无线基站请求从远程服务器下载一个大文件, 远程服务器会将大文件数据包划分为多个数据块传输至无线基站. 目标车辆处于无线基站覆盖范围内时会首先选择与无线基站建立 V2I 链路来下载数据块, 但当目标车辆驶出无线基站覆盖范围后 V2I 链路将无法使用. 此时, 与目标车辆处于同向快车道中的车辆会被选择为中继车辆, 提前在无线基站覆盖范围内下载目标车辆还未下载完成的数据包, 在目标车辆离开无线基站覆盖范围且尚未到达下一毗邻的无线基站覆盖范围期间, 目标车辆选择与中继车辆建立 V2V 链路持续下载未完成的数据.

本文根据传输链路的不同质量, 采取联动切换的 V2V 链路切换方式, 即根据道路环境中的车辆密度以及车辆位置对链路质量的影响, 动态合理地联动切换 V2V 链路. 用户接收信噪比是衡量链路质量的一个重要因素, 能直观地展现链路质量的优劣. 本文以目标车辆在某个位置的接收信噪比来表示 V2V 链路质量, 即目标车辆通过 V2V 链路下载数据时, 如果存在比连接状态具有更高信噪比的 V2V 链路, 目标车辆会断开已连接的 V2V 链路, 重新建立具有更高接收信噪比的 V2V 链路. 通过分析, 在发射功率不变的情况下, 发射机和接收机的传输距离增加, 信噪比也随之下降, 因此, 只有目标车辆与两辆中介车辆的接收信噪比相等时才是最佳切换点. 如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \text{SNR}_i &= \text{SNR}_{i+1} \\ \frac{P_V}{N} d_i^{-\beta} &= \frac{P_V}{N} d_{i+1}^{-\beta} \\ d_i &= d_{i+1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\text{SNR}_i$  为目标车辆从第  $i$  辆中继车辆接收数据的信噪比,  $\text{SNR}_{i+1}$  为目标车辆从第  $i+1$  辆中继车辆接收数据的信噪比,  $P_V$  为中继车辆的发射功率,  $N$  为目标车辆所接收到的噪声功率,  $d_i$  为目标车辆与第  $i$  辆中继车辆的距离,  $d_{i+1}$  为目标车辆与第  $i+1$  辆中继车辆的距离. 则链路联动的最佳切换点可由比较接收信噪比转换为比较车辆之间的间隔距离, 且 V2V 最佳的链路切换距离为  $E[d]/2$ , 其中,  $E[d]$  为车辆之间的平均距离. 目标车辆通过 V2V 链路下载数据的详细过程如下: (1) 目标车辆与同向快车道中的车辆建立 V2V 链路下载数据, 如图 2a 所示; (2) 当相邻两辆中继车辆之间的车距小于或等于  $2r_0$  且目标车辆处于两辆中继车辆中心位置时, 目标车辆断开已连接状态的中继链路, 同时与下一辆中继车辆建立新的 V2V 链路, 如图 2b 所示, 此时的 V2V 传输范围为  $E[d]/2$ ; (3) 当相邻的两辆中继车辆之间的距离大于  $2r_0$  且目标车辆与处于现连接状态的中继车辆距离达到 V2V 最大传输范围时, 目标车辆断开 V2V 链路, 保持无连接状态, 直至到达与下一辆中继车辆能建立 V2V 链路的位置或者驶入下一个无线基站的覆盖范围, 如图 2c 和图 2d 所示, 此时 V2V 的传输范围为最大传输范围. 综上所述, 本文制定了异质链路联动切换的准则:

(1) 待连接车辆行驶方向与正处于连接状态的中继车辆相同, 且跟驰在正处于连接状态的中继车辆的后方.

(2) 当待连接车辆和正处于连接状态的中继车辆之间的距离小于或等于  $2r_0$  时, 目标车辆继续行驶并保持连接, 直到目标车辆与待连接车辆的距离等于目标车辆与正处于连接状态的中继车辆之间的距离, 断开 V2V 连接并与待连接车辆建立连接.

(3) 当待连接车辆和正处于连接状态的中继车辆之间的距离大于  $2r_0$  时, 目标车辆继续行驶并保持连接, 直到目标车辆与正处于连接状态的中继车辆之间的距离超出最大传输范围  $r_0$ , 则断开 V2V 链路. 目标车辆随后处于无连接状态直到目标车辆与待连接车辆的距离达到最大传输范围  $r_0$  时, 立刻建立 V2V 链路.

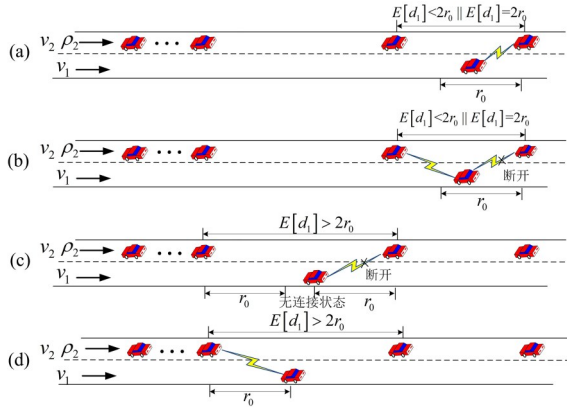


图2 目标车辆通过V2V链路下载数据的过程

Fig. 2 The process of the target vehicle downloading data through V2V links

### 3 性能分析

**3.1 吞吐量分析** 将IoV系统的吞吐量作为衡量联动切换策略优越性的性能指标. 假设目标车辆请求下载一个大文件, 根据建立的道路模型, 目标车辆通过依次循环建立的V2I和V2V链路分别从无线基站和中继车辆获得数据. 将目标车辆进入无线基站覆盖范围到目标车辆进入相邻无线基站覆盖范围的过程定义为一个周期. 任意选择时间间隔 $[0, t]$ , 目标车辆 $V$ 接收的数据量为 $C(t)$ , 包括从无线基站和中继车辆接收的数据, 则吞吐量 $\eta$ 定义为:

$$\eta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} \quad (2)$$

若 $S$ 表示该路段的路长, 存在 $t = S/v$ . 由于目标车辆会通过V2I和V2V两个过程来获得吞吐量, 式(2)可以转化为:

$$C_1 = \frac{2B_1}{v_1 \ln 2} \left[ \sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2} \ln \left( 1 + \frac{P_1}{r_1^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{h^2 + m^2} \arctan \sqrt{\frac{r_1^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2}} + 2\sqrt{h^2 + m^2} + \frac{P_1}{N} \arctan \sqrt{\frac{r_1^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2} + \frac{P_1}{N}} \right] \quad (5)$$

**3.1.2 V2V通信** 由于 $\frac{L}{v}$ 为车辆在无基站覆盖

下的行驶时间,  $\frac{E(d)}{(v_2 - v_1)}$ 为单个V2V的传输时

$$\eta = \frac{v_1(C_1 + C_V)}{S} \times \frac{S}{L + 2\sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2}} = \frac{v_1(C_1 + C_V)}{L + 2\sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2}} \quad (3)$$

其中,  $C_1$ 和 $C_V$ 分别是目标车辆 $V$ 在一个周期内通过V2I和V2V连接方式接收的数据量.

**3.1.1 V2I通信** 目标车辆 $V$ 处于无线基站的覆盖范围内将只使用V2I通信, 因此, 目标车辆在一个周期内从基础设施接收的预期数据量 $C_1$ 为:

$$C_1 = \frac{2}{v_1} \int_{\sqrt{h^2 + m^2}}^{r_1} B_1 \log_2 \left[ 1 + \frac{P_1}{N} x^{-\beta} \right] dx = \frac{2}{v_1} \int_0^{\sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2}} B_1 \log_2 \left[ 1 + \frac{P_1}{N} (s^2 + h^2 + m^2)^{-\frac{\beta}{2}} \right] ds \quad (4)$$

其中,  $B_1$ 为V2I链路的带宽,  $P_1$ 为基础设施的发射功率,  $N$ 为目标车辆在高速公路场景下接收到的噪声功率, 且在该场景下接收的噪声功率始终不变,  $x$ 为目标车辆与基础设施之间的距离.

本文的应用场景是基础设施稀疏部署的高速公路, 大多在郊区和农村地区, 道路两侧障碍物较少, 多径效应影响甚微, 可以忽略不计. 针对小尺度衰落和多普勒效应, 可以通过一些物理层技术(如分集)来缓解. 由于本文策略不是基于瞬时接收功率而是基于平均接收功率, 所以只考虑路径损耗而不是小尺度衰落. 路径损耗指数表示路径衰落的快慢, 其值越大, 路径衰落的速度越快. 根据Du and Dao<sup>[18]</sup>, 设置路径损失指数为2~6, 在这个范围内选取一个合理的值. 基于本文的应用场景, 发射机和接收机之间不会出现物体的遮挡, 因此认为数据在一个近似的自由空间中传输. 综上所述, 将路径损失指数设置为2. 通过式(4)可以得出目标车辆通过V2I链路获得的数据量 $C_1$ 为:

间, 目标车辆 $V$ 通过V2V从中继车辆中获得的数据量 $C_V$ 的表达式为:

$$C_V = \frac{L(v_2 - v_1)}{E[d]v_1} E[C_V^i] \quad (6)$$

其中,  $r_1$  为该策略下 V2V 链路的最大传输范围,  $E[C_V^0]$  为在 V2V 最大传输范围为  $r_1$  时目标车辆 V 通过一次建立 V2V 链路从中继车辆获得的平均数据量. 中继车辆携带的数据通过 V2V 传输至目标车辆的过程中可能出现数据耗尽的情况, 即中继车辆和目标车辆处于连接状态, 但中继车辆已经没有目标车辆所需的数据, 通过定理 1 可以证明, 在该策略的假设下上述情况不会发生.

**定理 1** 在本文提出的异质链路联动切换的 V2I/V2V 协作传输策略中, V2I 能够给中继车辆提供的数据量大于 V2V 过程中中继车辆传输给目标车辆的数据量.

**证 明** 由于高速公路上的车辆密度小于城市道路, 模型中的中继车辆有足够的带宽接收来自无线基站的数据. 根据式(4)可知, 中继车辆通过 V2I 从基础设施中获得的数据为:

$$C_I^0 = \frac{2B_I}{v_2} \int_0^{\sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2}} \log_2 \left[ 1 + \frac{P_I}{N} (s^2 + h^2 + m^2)^{-1} \right] ds \quad (7)$$

目标车辆通过 V2V 可以从中继车辆中获得的平均数据量  $C_V^0$  为:

$$C_V^0 = \frac{2B_V}{v_2 - v_1} \int_0^{r_0} \log_2 \left[ 1 + \frac{P_V}{N} y^{-2} \right] dy \quad (8)$$

其中,  $B_V$  为 V2V 链路的带宽,  $P_V$  为中继车辆的发射功率,  $y$  为目标车辆与中继车辆之间的距离, 且  $B_I > B_V$ ,  $P_I > P_V$ . 因为  $B_I$  远大于  $B_V$  且  $\frac{B_I}{v_2} > \frac{B_V}{v_2 - v_1}$ , 因此,  $C_I^0 > C_V^0$ .

综上, 目标车辆将遇到的所有中继车辆都有足够的数据发送给目标车辆.

证毕.

为了简化计算过程, 采用车辆间距均匀化的思想, 即将不确定的车辆间距划分为均匀的间隔距离<sup>[17]</sup>. 由于车辆到达服从泊松分布, 所以车辆之间的平均间距  $E[d]$  可以表示为:

$$E[d] = \int_0^L df(d) dd = \int_0^L d \rho_2 e^{-\rho_2 L} dd = \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (9)$$

$$C_V^0 = 2 \int_0^{r_1} B_V \log_2 \left( 1 + \frac{P_V}{N} y^{-2} \right) dy \quad (10)$$

(1) 情况 a:  $\rho_2 \leq \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left( L + \frac{1}{2r_0} \right)$ , 如图 3

所示, 车辆的平均间距  $E[d] > 2r_0$ . 根据本文策略的中继车辆连接标准, V2V 连接距离等于 V2V 最大有效传输范围, 即  $r_1 = r_0$ .

结合式(9)和式(10), 情况 a 时目标车辆通过 V2V 链路获得的数据量  $C_V^1$  可以表示为:

$$C_V^1 = \frac{2LB_V}{\left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) v_1 \ln 2} \left[ r_0 \ln \left( 1 + \frac{P_V}{N} r_0^{-2} \right) - 2 \sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[ \arctan \left( \sqrt{\frac{P_V}{N}} r_0^{-1} \right) + \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (11)$$

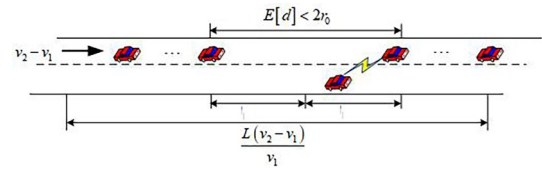


图 3 目标车辆从中继车辆中获得数据(情况 a)

**Fig. 3 The target vehicle obtains data from the relay vehicle (Situation a)**

(2) 情况 b:  $\rho_2 > \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left( L + \frac{1}{2r_0} \right)$ , 此时,

车辆的平均间距  $E[d] < 2r_0$ , 如图 4 所示.

根据本文所提策略的中继车辆连接标准, V2V 连接距离  $r_1$  为:

$$r_1 = \frac{1}{2} E[d] = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \quad (12)$$

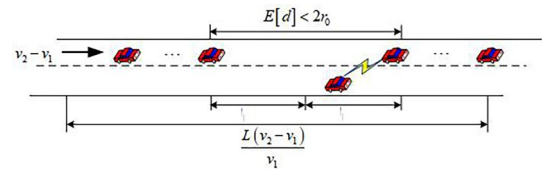


图 4 目标车辆从中继车辆中获得数据(情况 b)

**Fig. 4 The target vehicle obtains data from the relay vehicle (Situation b)**

结合式(10)和式(12), 情况 b 时, 目标车辆通过 V2V 链路获得的数据量  $C_V^2$  可以表示为:

$$C_V^2 = \frac{2LB_V}{\left(\frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right)\right) v_1 \ln 2} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right) \ln \left( 1 + 4 \frac{P_V}{N} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right)^{-2} \right) - \right. \\ \left. 2 \sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[ \arctan \left( 2 \sqrt{\frac{P_V}{N}} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right)^{-1} \right) + \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (13)$$

**3.1.3 吞吐量** 综上所述,在周期内目标车辆通过IoV网络可获得的吞吐量分别表示为:

$$\eta^1 = \frac{2B_1}{(L + 2\sqrt{a}) \ln 2} \left[ \sqrt{a} \ln \left( 1 + \frac{P_1/N}{r^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{b} \arctan \sqrt{\frac{a}{b}} + 2\sqrt{c} \arctan \sqrt{\frac{a}{c}} \right] + \\ \frac{2LB_V}{(L + 2\sqrt{a}) \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right) v_1 \ln 2} \times \left[ r_0 \ln \left( 1 + \frac{P_V}{N} r_0^{-2} \right) - 2 \sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[ \arctan \left( \sqrt{\frac{P_V}{N}} r_0^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (14)$$

$$\eta^2 = \frac{2B_1}{(L + 2\sqrt{a}) \ln 2} \left[ \sqrt{a} \ln \left( 1 + \frac{P_1/N}{r^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{b} \arctan \sqrt{\frac{a}{b}} + 2\sqrt{c} \arctan \sqrt{\frac{a}{c}} \right] + \\ \frac{2LB_V}{(L + 2\sqrt{a}) \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right) v_1 \ln 2} \times \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right) \ln \left( 1 + 4 \frac{P_V}{N} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right)^{-2} \right) - \right. \\ \left. 2 \sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[ \arctan \left( 2 \sqrt{\frac{P_V}{N}} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left(L + \frac{1}{\rho_2}\right) \right)^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (15)$$

其中,  $a = r_l^2 - m^2 - h^2$ ,  $b = m^2 + h^2$ ,  $c = m^2 + h^2 + \frac{P_1}{N}$ , 而  $\eta^1, \eta^2$  分别代表不同情况下车联网的平均吞吐量. 目标车辆下载数据的过程中获得的平均吞吐量  $\eta$  表示为:

$$\eta = \begin{cases} \eta^1, & \rho_2 \leq \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left(L + \frac{1}{2r_0}\right) \\ \eta^2, & \rho_2 > \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left(L + \frac{1}{2r_0}\right) \end{cases} \quad (16)$$

**3.2 交付时延分析** 交付时延表示目标车辆从开始接收数据到接收数据完毕所耗费的时间,能直观地反映系统性能的优劣<sup>[19]</sup>,本文主要分析目标车辆通过所提策略从请求下载数据到下载数据完毕期间的交付时延问题. 假设每个V2I/V2V链路在传输过程中有恒定的数据传输速率,即使用在传输过程中V2I/V2V链路的平均数据传输速率来替换瞬时传输速率,可以简化这个问题. 假设目标车辆所需下载的数据量为  $V_T$ , 经过  $n$  个完整周期之后,剩余的数据量  $V_r$  为:

$$V_r = V_T - \left\lfloor \frac{V_T}{C_1 + C_V} \right\rfloor (C_1 + C_V) \quad (17)$$

其中,  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整,根据车辆密度的分布:

$$C_V = \begin{cases} C_V^1, & \rho_2 \leq \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left(L + \frac{1}{2r_0}\right) \\ C_V^2, & \rho_2 > \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left(L + \frac{1}{2r_0}\right) \end{cases}$$

根据车辆的行驶距离,目标车辆经过一个周期使用的时间  $T_0$  为:

$$T_0 = \frac{L + 2\sqrt{r_l^2 - m^2 - h^2}}{v_1} \quad (18)$$

(1) 如果目标车辆所需下载的数据量  $V_r \leq C_1$ .

目标车辆只有进入无线基站覆盖范围内才可以发送数据下载的请求,且传播延迟可以忽略不计,在这种情况下,目标车辆在驶出无线基站覆盖范围之前便可以完成数据的下载. 根据式(5)可以得到目标车辆通过V2I从无线基站下载数据的平均传输速率  $w_1$  为:

$$w_1 = \frac{2B_1}{\sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2} \ln 2} \left[ \sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2} \ln \left( 1 + \frac{P_{1/N}}{r_1^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{h^2 + m^2} \arctan \sqrt{\frac{r_1^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2}} + \right. \\ \left. 2\sqrt{h^2 + m^2 + \frac{P_{1/N}}{N}} \arctan \sqrt{\frac{r_1^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2 + \frac{P_{1/N}}{N}}} \right] \quad (19)$$

考虑数据的平均传输速率  $w_1$  与数据大小  $V_r$ , 根据式(17)和式(19), 数据传输完毕产生的交付时延为:

$$T_1 = \left\lfloor \frac{V_r}{C_1 + C_v} \right\rfloor T_0 + \frac{V_r}{w_1} = \left\lfloor \frac{V_r}{C_1 + C_v} \right\rfloor \frac{L + 2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}}{v_1} + \frac{2B_1 V_r}{\sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2} \ln 2} \left[ \sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2} \ln \left( 1 + \frac{P_{1/N}}{r_1^2 + h^2} \right) - \right. \\ \left. 2\sqrt{h^2 + m^2} \arctan \sqrt{\frac{r_1^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2}} + 2\sqrt{h^2 + m^2 + \frac{P_{1/N}}{N}} \arctan \sqrt{\frac{r_1^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2 + \frac{P_{1/N}}{N}}} \right] \quad (20)$$

(2) 如果目标车辆所需下载的数据量  $V_r > C_l$ . 在这种情况下, 一个无线基站覆盖范围内无法完成数据的交付, 需要通过 V2V 从中继车辆中获得剩余的数据包, 所以在无线基站未覆盖范围期间提供的平均传输速率会受车辆密度的影响. 下面主要从两种情况分别分析平均交付时延.

情况 a.  $\rho_2 \leq \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left( L + \frac{1}{2r_0} \right)$ , 在这种情况下, 在无线基站未覆盖范围期间, V2V 能够给目标车辆提供的平均传输速率  $w_v^1$  为:

$$w_v^1 = \frac{2B_v}{\left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \ln 2} \left[ r_0 \ln \left( 1 + \frac{P_v}{N} r_0^{-2} \right) - 2\sqrt{\frac{P_v}{N}} \left[ \arctan \left( \sqrt{\frac{P_v}{N}} r_0^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (21)$$

根据式(17)和式(21)可以得出, 目标车辆在情况 a 下数据的交付时延为:

$$T_2 = \left\lfloor \frac{V_r}{C_1 + C_v^1} \right\rfloor T_0 + \frac{2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}}{v_1} + \frac{(V_r - C_l)}{w_v^1} = \left\lfloor \frac{V_r}{C_1 + C_v^1} \right\rfloor \frac{L + 2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}}{v_1} + \frac{2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}}{v_1} + \\ \frac{2B_v(V_r - C_l)}{\left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \ln 2} \times \left[ r_0 \ln \left( 1 + \frac{P_v}{N} r_0^{-2} \right) - 2\sqrt{\frac{P_v}{N}} \left[ \arctan \left( \sqrt{\frac{P_v}{N}} r_0^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (22)$$

情况 b.  $\rho_2 > \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left( L + \frac{1}{2r_0} \right)$ , 此时, 在无线基站未覆盖范围期间, V2V 能够给目标车辆提供的平均传输速率  $w_v^2$  为:

$$w_v^2 = \frac{2B_v}{\left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \ln 2} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \ln \left( 1 + 4 \frac{P_v}{N} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right)^{-2} \right) - \right. \\ \left. 2\sqrt{\frac{P_v}{N}} \left[ \arctan \left( 2\sqrt{\frac{P_v}{N}} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right)^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (23)$$

根据式(17)和式(23)可以得出, 目标车辆在情况 b 下数据的交付时延为:



$$T_3 = \left[ \frac{V_T}{C_1 + C_V^2} \right] T_0 + \frac{2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}}{v_1} + \frac{(V_r - C_1)}{w_V^2} = \left[ \frac{V_T}{C_1 + C_V^2} \right] \frac{L + 2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}}{v_1} + \frac{2\sqrt{r_1^2 - m^2 - h^2}}{v_1} + \frac{2B_V(V_r - C_1)}{\left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \ln 2} \times \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \ln \left( 1 + 4 \frac{P_V}{N} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right)^{-2} \right) - 2\sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[ \arctan \left( 2\sqrt{\frac{P_V}{N}} \left( \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 L} \left( L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right)^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (24)$$

因此,目标车辆完成数据的下载所产生的交付时延为:

$$T = \begin{cases} T_1, & V_r \leq C_1 \\ T_2, & V_r > C_1 \text{ 且 } \rho_2 \leq \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left( L + \frac{1}{2r_0} \right) \\ T_3, & V_r > C_1 \text{ 且 } \rho_2 > \frac{1}{2r_0} - e^{-2r_0 L} \left( L + \frac{1}{2r_0} \right) \end{cases} \quad (25)$$

#### 4 仿真与分析

为了保证实验结果的准确性,使用 Matlab 2019 对每次实验仿真运行 1000 次并取其均值. 基础设施的高度  $h$  设置为 20 m, 无线基站距离道路的距离设置为 30 m, 其发射功率  $P_I$  设置为 53 dBm, 最大有效覆盖范围为 500~800 m. 车辆的发射功率  $P_V$  设置为 20 dBm, 最大覆盖范围为 100~300 m, 基础设施之间未被基础设施覆盖的范围为 0~5000 m. V2I 链路的带宽  $B_I$  设置为 50 MHz, V2V 链路的带宽  $B_V$  设置为 5 MHz. 接收端接收到的热噪声功率为 -96 dBm, 并在整个数据下载过程中保持不变. 快车道中的车辆的行驶速度设置为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 目标车辆(慢车道)的行驶速度设置为  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

快车道中车辆密度  $\rho_2$  设置为每米 0.005 辆, V2V 最大有效传输范围  $r_0$  设置为 200 m. 如图 5 所示, 系统网络可实现的吞吐量随着 V2V 传输区域的增大而减小, 这是因为在同样时间内, 目标车辆通过 V2I 链路从无线基站获得的数据大于通过 V2V 链路从中继车辆中获得的数据, 在恒定的基础设施传输范围中, 系统的传输效率受限于未覆盖的区域. 在 V2V 最大有效连接范围不变的情况下,  $r_1$  分别取 500, 600, 700 和 800 时, 目标车辆进行数据下载可实现的吞吐量随着  $r_1$  的增加呈现递减的趋势, 这是由于远距离传输造成的路径损

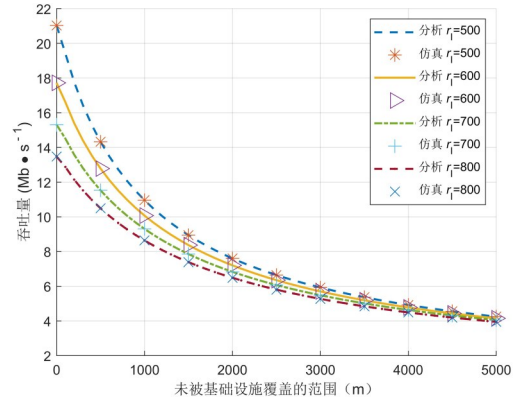


图5 不同的未被基础设施覆盖范围下可实现的吞吐量  
Fig. 5 Achieved throughput for different areas uncovered by infrastructures

耗会导致瞬时数据传输速率的降低. 在无线基站覆盖范围的边界, 较低的瞬时传输速率影响了整个下载过程的吞吐量, 随着  $r_1$  的增大, 目标车辆进行数据下载可实现的吞吐量受限于无线基站覆盖范围的边界, 并且随着无线基站覆盖范围的增大,  $r_1$  的影响效果会随之减弱.

为了验证 V2V 最大有效连接范围  $r_0$  对可实现吞吐量的影响, 将无线基站覆盖范围  $r_1$  设置为 600 m, V2V 最大有效连接范围  $r_0$  设置为 200, 250 和 300 m, 并且将快车道中车辆密度  $\rho_2$  设置为每米 0.005 辆. 如图 6 所示, 吞吐量随着  $r_0$  的增大也会逐渐增大, 但变化幅度微弱. 这是因为没有被无线基站覆盖的范围内, 随着 V2V 最大有效连接范围  $r_0$  的增大, 增加了目标车辆通过 V2V 链路下载数据的时长, 尤其是在快车道车辆密度较低的情况下. 由于路径损耗的影响, 当  $r_0$  较大且车辆的发射功率较低时, 目标车辆虽然可以在未被无线基站覆盖范围内获得更多的数据量, 但是获取数据量的提升较少.

针对快车道中车辆密度的影响, 将快车道中

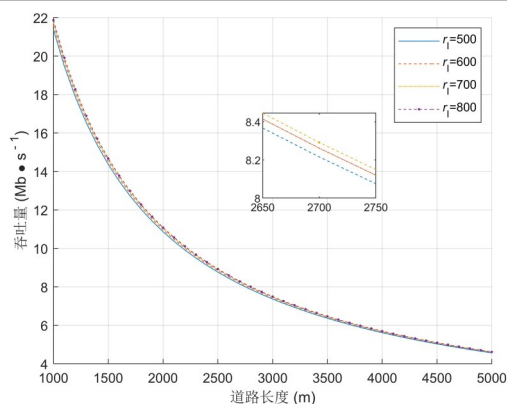


图 6 不同 V2V 最大有效连接范围内可实现的吞吐量

Fig. 6 Achieved throughput for different V2V maximum effective connection ranges

车辆密度  $\rho_2$  设置为每米 0~0.5 辆, V2V 最大有效连接范围  $r_0$  设置为 300 m, 无线基站覆盖范围  $r_1$  设置为 500, 600, 700 和 800 m, 未被无线基站覆盖的范围设置为 5000 m. 如图 7 所示, 目标车辆数据下载可实现的吞吐量随快车道中车辆密度的增加而增加, 但吞吐量随无线基站覆盖范围  $r_1$  的增加而降低. 这是因为实验将未被无线基站覆盖的范围设置为固定值, 随着无线基站覆盖范围  $r_1$  的增加, 该路段的长度也随之增加, 但无线基站覆盖范围的边界由于路径损耗的影响会导致较低的瞬时传输速率, 导致吞吐量的降低.

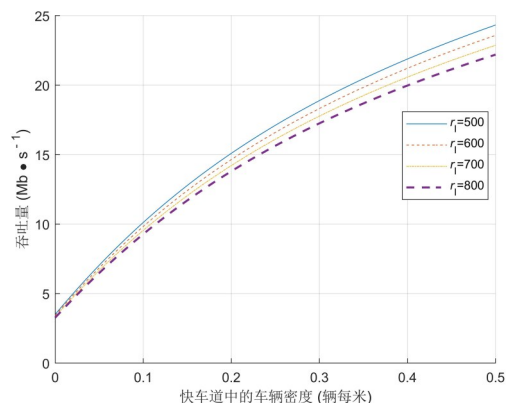


图 7 不同的快车道车辆密度下可实现的吞吐量

Fig. 7 Throughput achieved under different vehicle densities in the fast lanes

如图 8 所示, 将 V2V 最大有效连接范围  $r_0$  设置为 0~300 m, 无线基站覆盖范围设置为 600 m, 快车道中车辆密度设置为每米 0.004, 0.006, 0.008 和 0.01 辆. 实验结果表明, 随着 V2V 最大

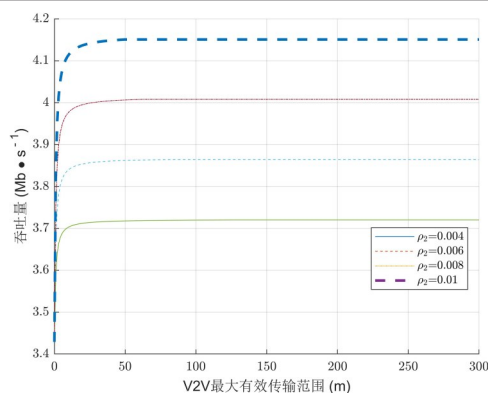


图 8 不同 V2V 最大有效传输范围内可实现的吞吐量

Fig. 8 Throughput achieved in different maximum effective transmission ranges of V2V

有效传输范围的增大, 目标车辆数据下载可实现的吞吐量会逐渐增大, 最后趋于一个稳定值. 而随着快车道中车辆密度的增加, 可实现吞吐量也会增加. 根据本文提出的策略, 车辆密度的增加, V2V 的连接范围也会随着车辆密度的变化动态变化, 以此来提高系统网络可实现的吞吐量.

为了验证提出的策略在同向单车道场景中对提升系统网络吞吐量的有效性, 进行对比实验. 如图 9 所示, 将快车道中的车辆密度设置为每米 0.05 辆, V2V 最大有效连接范围  $r_0$  设为 200 m, V2I 最大有效连接范围  $r_1$  设置为 600 m. Chen et al<sup>[8]</sup>将反向车道中的所有车辆作为中继车辆, 如果反向车道中的车辆传输受限或无法从反向车道中的车辆获取数据, 则车辆用户在未被无线基站覆盖范围内无法获取数据. Feteiha and Ahmed<sup>[13]</sup>利

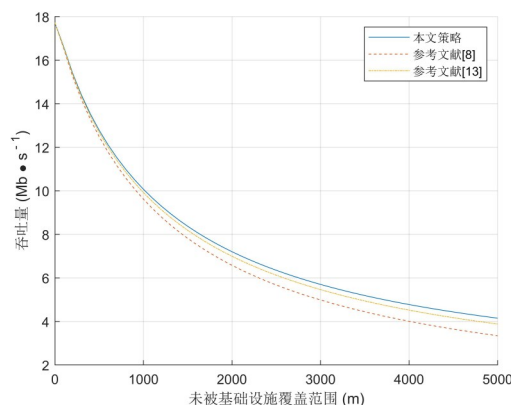


图 9 本文策略与其他方案的吞吐量比较

Fig. 9 Throughput of the proposed policy and other alternatives

与目标车辆在同向车道且跟驰在其后方的车辆充当临时基站的角色,负责数据的转发,但是可实现的吞吐量受到同一车道车辆密度的限制,无法根据车辆密度进行动态的调节.实验结果表明,本文提出的策略优于其他两种策略.

将快车道中的车辆密度设置为每米0.004,0.008,0.02和0.05辆.为了验证提出的V2I/V2V协作策略能有效降低数据交付时延,假设存在一组0~10000 Mb的数据需要传输,实验结果如图10所示.随着待传输数据量的增加,完成数据交付的时延呈分段式有层次地增加.产生这种现象的原因是,目标车辆通过V2I链路从无线基站下载数据比通过V2V链路从中继车辆下载数据要快得多.假设目标车辆通过V2I链路从基础设施下载数据和通过V2V链路从中继车辆下载数据过程中的传输速率保持不变,为了保证假设的传输速率的合理性,以目标车辆通过V2I(或者V2V)下载数据的过程中的平均传输速率作为恒定的传输速率.

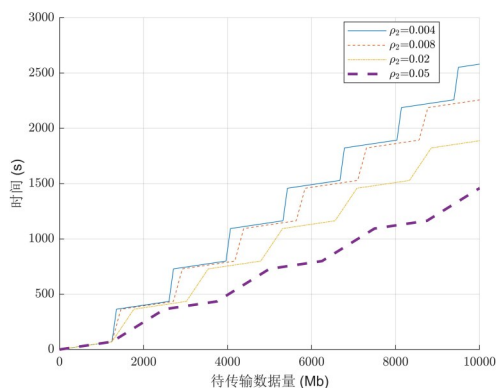


图10 不同车辆密度下的交付时延分析

Fig. 10 Delivery delay analysis under different vehicle density

当自变量为道路长度时,如图11所示,目标车辆数据下载可实现的吞吐量整体变化趋势并没有发生变化.但是,随着 $r_1$ 的增大,目标车辆数据下载可实现的吞吐量也随之增大,这是因为道路的长度已经被固定,无线基站覆盖范围 $r_1$ 增大则目标车辆通过V2V链路接收数据的区域就会减小.由于目标车辆通过V2I链路从无线基站获得的数据要大于目标车辆通过V2V链路从中继车辆中获得的数据,目标车辆通过V2V链路接收数据

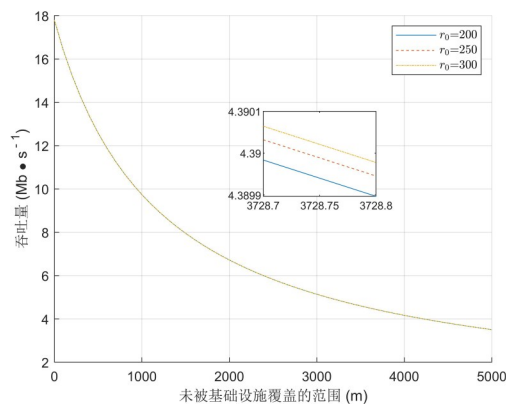


图11 在不同的道路长度影响下可实现的吞吐量

Fig. 11 Throughput achieved under the influence of different road lengths

的区域作为可实现的吞吐量的受限条件被减弱.所以,当道路长度被固定,目标车辆数据下载可实现吞吐量随着 $r_1$ 增大而增大.

## 5 结论

针对V2I/V2V协作传输策略中V2V切换的问题,现有研究中大都采用固定切换策略,本文根据车辆分布的动态变化,提出一种基于异质链路联动切换的V2I/V2V协作传输策略,考虑不同的车辆密度对车辆网络吞吐量的影响,得到了车辆用户数据下载的吞吐量和数据平均交付时延的封闭表达式.仿真结果证明,本文提出的基于异质链路联动切换的V2I/V2V协作传输策略对于提高车辆用户数据下载系统网络可实现吞吐量和降低数据交付时延具有更加突出的优越性.

## 参考文献

- [1] Yue W W, Li C L, Wang S B, et al. Towards enhanced recovery and system stability: Analytical solutions for dynamic incident effects in road networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(1): 483–498.
- [2] 彭鑫,李仁发,付彬,等.基于路径时延模型的车联网数据分发方案. *电子学报*, 2017, 45(9): 2195–2201. (Peng X, Li R F, Fu B, et al. Data dissemination based on road delay for VANETs. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(9): 2195–2201.)
- [3] 申滨,周晓勇,徐浪,等.基于SideLink的LTE-V2X联合切换方案设计. *电子与信息学报*, 2020, 42(2):

- 511—518. (Shen B, Zhou X Y, Xu L, et al. A Side-Link-assisted joint handover scheme for long term evolution-vehicle to everything system. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 511—518.)
- [4] Dar K, Bakhouya M, Gaber J, et al. Wireless communication technologies for ITS applications [topics in automotive networking]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(5): 156—162.
- [5] MacHardy Z, Khan A, Obana K, et al. V2X access technologies: Regulation, research, and remaining challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 1858—1877.
- [6] Yang Y, Hua K. Emerging technologies for 5G-enabled vehicular networks. *IEEE Access*, 2019(7): 181117—181141.
- [7] Abbas F, Liu G, Fan P Z, et al. An efficient cluster based resource management scheme and its performance analysis for V2X networks. *IEEE Access*, 2020(8): 87071—87082.
- [8] Chen J Q, Zafar A, Mao G Q, et al. On the achievable throughput of cooperative vehicular networks//*IEEE International Conference on Communications*. Chengdu, China: IEEE, 2018: 1—7.
- [9] Chen J Q, Mao G Q, Li C L, et al. Throughput of infrastructure-based cooperative vehicular networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(11): 2964—2979.
- [10] Chen J Q, Mao G Q, Li C L, et al. Capacity of cooperative vehicular networks with infrastructure support: Multiuser case. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 1546—1560.
- [11] Liu X Y, Xu Z L, Meng Y, et al. An elastic-segment-based V2V/V2I cooperative strategy for throughput enhancement. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(5): 5272—5283.
- [12] Wang C L, Cho T N, Tsai T H, et al. A cooperative multihop transmission scheme for two-way amplify-and-forward relay networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 8569—8574.
- [13] Feteiha M F, Ahmed M H. Multihop best-relay selection for vehicular communication over highways traffic. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(10): 9845—9855.
- [14] Siddig A A, Ibrahim A S, Ismail M H. An optimal power allocation and relay selection full-duplex store-carry-forward scheme for intermittently connected vehicular networks. *IEEE Access*, 2020(8): 163903—163916.
- [15] Zhou H B, Bo L, Luan T H, et al. ChainCluster: Engineering a cooperative content distribution framework for highway vehicular communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(6): 2644—2657.
- [16] Chen Y, Wu F, Ma L X, et al. Fog-enabled cooperative offloading for intermittently connected vehicular networks//2019 11<sup>th</sup> International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Xi'an, China: IEEE, 2019: 1—6.
- [17] Nguyen B L, Ngo D T, Tran N H, et al. Dynamic V2I/V2V cooperative scheme for connectivity and throughput enhancement. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(2): 1236—1246.
- [18] Du L L, Dao H A. Information dissemination delay in vehicle-to-vehicle communication networks in a traffic stream. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 66—80.
- [19] Ni Y Z, He J P, Cai L, et al. Data uploading in hybrid V2V/V2I vehicular networks: Modeling and cooperative strategy. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4602—4614.

(责任编辑 杨可盛)