

摘 要

近年来,车联网技术在保障交通安全顺畅,为车辆用户提供交通信息方面扮演着越来越重要的角色。通过车载设备获得实时交通状况的数字地图和娱乐服务等信息,极大提高了车辆用户的便利性和舒适度。由于高速公路场景中车辆用户分布密集性低的特性,围绕着高速公路密集式的部署基础设施将会造成大量的浪费。车对基础设施通信(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)和车对车通信(Vehicle-to-Vehicle, V2V)相互协作促进了数据传输效率。为此,在基础设施被稀疏部署的高速公路场景中,设计一种V2I/V2V协作传输策略,以提高系统网络可实现的吞吐量,是十分重要的。

为了研究车辆基于泊松分布的分布情况,本文通过建立车辆分布模型,研究分析出了在固定路长的情况下车辆之间间隔距离的概率密度函数,并进一步推导出了采用传统理论所能实现的系统网络吞吐量的表达式。为未来交通流方面的研究提供了理论基础。

针对双向车道的高速公路场景,由于数据传输过程中路径损耗的存在,车辆分布对于系统网络可实现的吞吐量的影响却常常被忽视。为了解决这个问题,本文利用反向车道中的车辆作为中继车辆,并根据车辆的分布来划分弹性分区,提出了一种基于弹性分区的V2I/V2V协作传输策略(Elastic-Segment-Based V2I/V2V Cooperative Strategy, ESCS)。由于车辆之间的距离是随机的,且由车辆密度决定,因此要推导出可实现吞吐量的封闭表达式是非常具有挑战性的。为此,本文开发了一个新的适应一般双向车道的V2I/V2V协作模型,通过车辆密度分析车辆的分布和运动,并推导出系统网络可实现吞吐量的封闭表达式。然后,本文优化V2V最大有效连接范围和车辆密度,以实现系统网络吞吐量的最大化。仿真结果表明,与现有的协作传输策略相比,该策略显著提高了吞吐量,特别是在车辆密度较高的情况下。

针对单向车道的高速公路场景,为了解决V2V链路固定切换导致的系统网络的吞吐量被限制的问题,本文提出了一种基于V2V链路动态切换的V2I/V2V协作传输策略。该策略根据两车之间的分布距离动态的进行V2V链路的切换,并进一步研究了车辆密度对于车辆的分布的影响,推导出来系统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,本文将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,该策略在基础设施被稀疏部署的高速公路场景中能够提高系统网络的吞吐量。

关键词: 车联网, 协作传输策略, 车辆分布, 吞吐量, 车辆密度, 路径损耗

Abstract

In recent years, internet of vehicles is playing an increasingly important role in ensuring traffic safety and providing instant traffic information to vehicle users. The convenience and comfort of vehicle users are greatly improved by obtaining real-time traffic information such as digital maps and entertainment services through on-board equipment. Due to the loose distribution of vehicle users in highway scenarios, a dense deployment infrastructure around the highway can cause a lot of waste. Vehicle-to-vehicle communication (V2I) and vehicle-to-vehicle communication (V2V) collaborate to improve data transmission efficiency. Therefore, it is very important to design a V2I/V2V cooperative transmission strategy to improve the throughput that can be realized by the system network in the expressway scenario where the infrastructure is sparsely deployed.

In order to study the vehicle based on the distribution of Poisson distribution, in this paper, through establishing the model of vehicle distribution study out under the condition of fixed way long probability density function of the distance between vehicles, and further deduced the system with traditional theory can achieve network throughput expression of traffic flow for the future research provides a theoretical basis.

Due to the existence of path loss in the process of data transmission, the influence of vehicle density on the throughput of system network is often ignored in the scenario of two-way single-lane highway. In order to solve this problem, this paper uses vehicles in reverse lanes as relay vehicles, divides elastic segments according to vehicle distribution, and proposes an Elastic-segment-based V2I/V2V Cooperative Strategy (ESCS). Since the distance between vehicles is a random process and is determined by vehicle density, it is very challenging to derive a closed expression for achieving throughput. Therefore, this paper develops a new V2I/V2V cooperative model adapted to the general two-way lane, analyzes the distribution and movement of vehicles by vehicle density, and deduces the closed expression of throughput that can be realized by the system network. Then, this paper optimizes the maximum effective connection range and vehicle density of V2V to maximize the system network throughput. Simulation results show that compared with the existing cooperative strategies, the proposed strategy can significantly improve the throughput, especially in the case of high vehicle density.

In order to solve the problem that the throughput of the system network is limited due to V2V link fixed switching in the scenario of one-way two-lane highway, a V2I/V2V cooperative strategy based on V2V link dynamic switching is proposed in this paper. The V2V link switch is implemented dynamically according to the distributed distance between two vehicles, and

the influence of vehicle density on vehicle distribution is further studied, and the closed expression of system network throughput is derived. In order to further understand the situation of data delivery, this paper discusses V2I process and V2V process separately, and obtains the closed expression of data delivery delay simulation results show that this strategy can improve the network throughput in the expressway scenario where the infrastructure is sparsely deployed.

Key words: Internet of Vehicles, cooperative strategy, vehicle distribution, throughput, vehicle density, path loss

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 论文研究内容和结构安排.....	6
第二章 车联网理论基础和车辆分布及传输模型分析.....	9
2.1 车联网理论基础.....	9
2.1.1 V2I 和 V2V 技术	9
2.1.2 DSRC 技术.....	9
2.1.3 LTE 技术.....	9
2.2 车辆分布及传输模型分析.....	10
2.2.1 车辆分布模型分析	10
2.2.2 传输模型分析	13
2.3 本章小结.....	16
第三章 基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略.....	17
3.1 系统模型.....	18
3.2 基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略制定.....	20
3.3 ESCS 性能分析	22
3.3.1 通过 V2I 链路获得的数据量	23
3.3.2 通过 V2V 链路获得的数据量.....	24
3.3.3 最优参数分析	29
3.4 仿真结果与分析.....	30
3.4.1 ESCS 的性能分析.....	31
3.4.2 ESCS 与 DCS 的比较分析.....	33
3.4.3 ESCS 时延及优势分析.....	34
3.5 本章小结.....	36
第四章 基于 V2V 链路动态切换的 V2I/V2V 协作传输策略.....	37
4.1 系统模型.....	37
4.2 基于 V2V 链路动态切换的 V2I/V2V 协作传输策略制定.....	39
4.3 性能分析.....	41
4.3.1 可实现吞吐量分析	41
4.3.2 数据交付时延分析	45
4.4 仿真结果与分析.....	48
4.5 本章小结.....	54

第五章 总结与展望	55
5.1 本文工作总结	55
5.2 未来研究工作展望	56
参考文献	57
附录	63
攻读硕士学位期间取得的研究成果	65
致谢	67

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来，随着交通网络密度不断增强，车联网（Internet of Vehicle, IoV）的应用得到了广泛的发展。车联网可以将两辆或多辆独立的车辆进行连接，为车辆用户提供数据共享和下载的通道，从而有效地降低交通拥堵和交通碰撞的概率^{[1][2]}。车联网技术不仅使交通系统更安全、更高效，而且车辆用户通过该技术可以获得大量的数据服务（例如视频，电影）和辅助驾驶服务，使车辆用户在长时间的高速公路行驶中拥有更愉快的驾车体验^[3]。IoV 的发展带动着智能交通系统（Intelligent Transportation Systems, ITS）的发展，现如今娱乐软件的普及以及娱乐文件数据的获取已经成为 ITS 中重要的一部分^{[4][5]}。对于大多数信息娱乐应用，如视频流、社交网络和多媒体下载，高吞吐量（高达 80mbps）、服务连续性和文件传输完整性都是必要的要求^{[6][7]}。

车到车（Vehicle-to-Vehicle, V2V）和车到基础设施（Vehicle-to-Infrastructure, V2I）是 IoV 的重要组成部分，被广泛用于提高车辆用户数据下载可实现的吞吐量^{[8][9]}。V2I 可以为车辆用户提供更稳定的通信链路，但部署无线接入点的基础设施（例如 5G 基站）的成本较高。对于目前车辆用户呈线性分布的高速公路来说，因为密集的基础设施部署使得仅仅采用 V2I 方式会导致经济性和实用性便会非常低^[10]。不同于 V2I 通信，V2V 通信便于部署，极大地方便了车辆之间的信息交互和数据传输。然而，通过 V2V 通信获得的传输容量取决于相邻车辆之间的距离。当相邻车辆之间的距离较大时，V2V 通信的传输能力受到限制^[11]。因此，有效利用 V2I 和 V2V 两种传输模式，合理地制定协同传输策略，对于提高道路上网络的吞吐量至关重要^{[12][13]}。另外，由于城市交通场景和高速公路场景特点的不同，分析模型也会有所区别。

在城市交通场景中，交通路线纵横交错，车辆用户移动速度较为缓慢。由于高层建筑的阻隔和用户种类的繁多，大都采用多源异构无线网络（Multi-Source Heterogeneous Wireless Networks, MHWNs）来满足用户的需求^[14]。高速公路场景与城市交通场景主要的区别在于，高速公路场景中道路路线大多呈直线或路线弯曲程度很小，用户拥有较高的移动速度且沿着高速公路分布。除此以外，高速公路大多位于人烟稀少和视野开阔的地区，非视距传播（Non Line of Sight, NLOS）出现的概率非常小。基于以上对高速公路场景的特点叙述，如图 1.1 所示，基础设施被稀疏部署在高速公路旁的道路模型成为现如今协作传输策略研究的重点。在有基础设施（例如 RSU 或 LTE 基站）覆盖的区域，

车辆用户直接于基础设施建立 V2I 链路来下载所需数据。当处于没有基础设施覆盖的区域，车辆用户之间可以采用专用短程通信技术（Dedicated Short Range Communication, DSRC）进行互连，保证数据的共享以及数据合作下载^[15]。

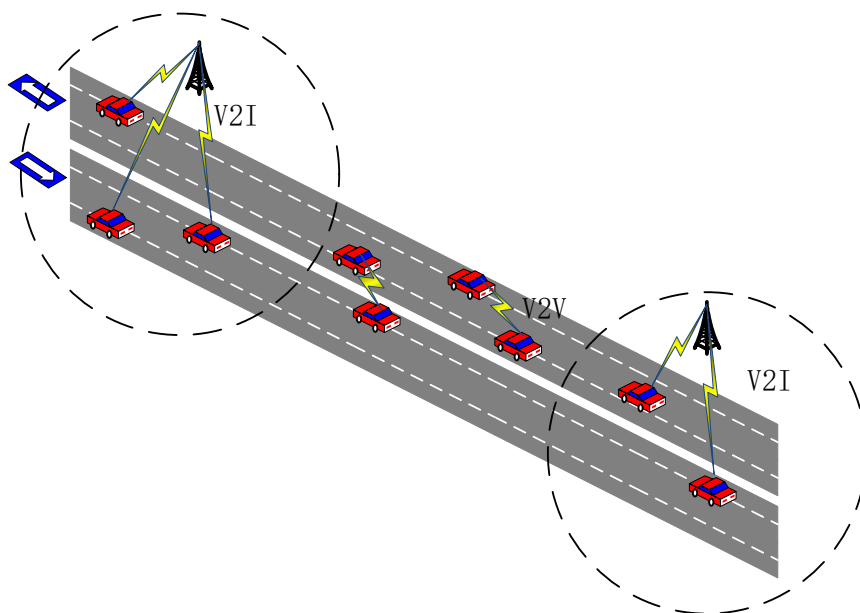


图 1.1 高速公路场景示意图

根据目前的研究发现，在基础设施稀疏部署的高速公路场景中，车辆分布对于高速公路中系统网络的吞吐量具有非常大的影响，这也是接下来 V2I/V2V 协作传输策略研究工作中不可忽略的重要因素。随着 5G 通信设施的普及以及移动娱乐设备进一步的发展，车辆用户对于更快的数据下载速率以及下载更大的文件数据具有强烈的需求^{[16][17]}。为了设计出能够有效提高系统网络可实现吞吐量的协作传输策略，需要对车辆分布特性进行全面分析，并针对中继车辆的选择以及信道接入进行设计。一般来说，中继车辆的选择以及信道的切换都是未来研究中值得关注的研究重点。

综上所述，为了寻求提高系统网络可实现吞吐量的 V2I/V2V 协作传输策略，本文针对不同的交通网络模型，重点考虑了车辆分布对交通模型的影响，并提出了相应的 V2I/V2V 协作传输策略。通过仿真分析，可以验证所提策略在提高高速公路系统网络可实现的吞吐量方面具有显著的优越性。

1.2 国内外研究现状

对于车载网络协作传输策略，由于高速移动的车辆具有随机性以及道路环境的复杂多变性，一些专家学者针对不同业务需求和关注重点已经做了大量的研究。为了提高协同车载通信系统网络的实现吞吐量，一些研究人员针对单跳和多跳中继传输方法进行了深入研究。所谓单跳中继是指需要传输的数据由发射机发射，中间只经过一次中继的携

带-存储-转发。多跳中继传输是指需要传输的数据由发射机发射，中间经过两次或多次中继的携带-存储-转发才会到达接收机。Wang 等提出了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，而且提高了路由效率^[18]。Fathy 等将多跳中继扩展到高速公路上的车辆通信，推导出了端到端数据传输错误率的上界^[19]。Chen 等提出了一种具有单跳中继的动态车辆网络协作传输策略(Dynamic Cooperative Strategy, DCS)，该策略将与车辆用户行驶方向相反的所有车辆作为中继车辆^[20]。这个问题被进一步扩展到一个更一般的场景中，Chen 等在文献[21]中将延迟容忍作为一个典型应用场景，并且在文献[22]中推导出了在有限车辆密度下 V2I/V2V 协作网络可实现的吞吐量。为了能够最小化车辆网络间歇连接中未覆盖区域的中断时间，Siddig 等提出了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，提高中继车辆与目标车辆之间的有效通信时间，从而提高系统网络为目标车辆提供数据下载可实现的吞吐量^[23]。多跳中继传输方法相比较于单跳中继传输方法具有更大的扩展性，与此同时多跳中继传输方法也会增加数据传输错误的概率以及增加数据交付时延。

针对车辆用户对于从车载网络中下载大数据文件的需求，如流媒体文件、多媒体文件等，产生的数据交付时延较长，这对系统网络的吞吐量具有更高的要求。根据车辆用户的目的不同，中继车辆从基础设施中下载的数据内容也不同。在文献[24]中，集群中的每个成员车辆充当中继车辆，从基础设施下载目标车辆请求的相同文件，以确保下载文件的成功率。为了提高车辆网络系统的吞吐量而不是提高下载文件的成功率，Chen 等将请求的大文件划分为多个数据块，其中反向车道中的每辆中继车辆下载一个不同的数据，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^[20]。Chen 等利用车辆协同卸载网络的剩余资源形成资源池，并提出了一种模糊协同卸载策略，将资源池在移动车辆之间进行分配，为了提高车辆网络可实现的吞吐量，每辆中继车辆携带不同的数据块^[25]。

为了提高交通中系统网络可实现的吞吐量，在双车道场景中基于集群的 V2I/V2V 协作传输策略被提出。集群是一种通过局部协调来处理车辆自组织网络(Vehicular Ad-hoc Network, VANET)拓扑结构频繁变化的有效方法。在文献[24]中，当一组车辆向同一方向移动时，集群中的每一辆车辆从路侧单元(Road Side Unit, RSU)协同下载目标车辆请求的相同内容文件，并在离开 RSU 覆盖区域时转发给目标车辆。在相同策略的基础上，Tao 等提出了一种利用相反方向行驶的车辆的内容协作传播策略来提高数据下载的速率^[26]。Long 等提出了一种新型 V2I/V2V 协作传输策略，即通过依次选择与目标车辆

同向且跟驰在其后面车辆作为中继车辆，中级车辆扮演着 RSU 的角色，承担着数据的接收-转发，以此保证数据传输的连续性，同时提高车辆网络可实现的吞吐量^[27]。为了解决频繁的链路中断和报文重传导致网络负载的增加和用户质量的降低的问题，Huang 等在 VNDN 中提出了一种基于集群的协作缓存和移动预测方法，即在具有相似移动模式的车辆之间建立通信，以减轻车辆移动的影响^[28]。在文献[24]和文献[26]提出的基于集群的协作传输策略中，集群的运动方向与请求下载文件的目标车辆的运动方向相反。然而为了保证数据传输的连续性，在文献[27]中，中继车辆只是充当中继的作用，并不会携带数据。为了保证集群连接的稳定性，Bavalatti 等利用静态和移动智能体组成的多智能体交互方法建立车辆与 RSU 之间的通信，提出了基于多智能体的稳定集群。RSU 根据车辆速度改变集群的大小，这反过来增加了集群的生命周期，并减少了路由开销^[29]。

当基础设施被稀疏部署，车辆用户则无法一直处于基础设施覆盖范围内^[30]。通常为了保证数据安全稳定的传输，车辆会通过 V2V 链路定期广播一个安全数据包，针对有限的 V2V 链路资源和对高吞吐量网络的需求，由于车辆处于没有基础设施覆盖范围的情况下使用自适应方案来控制通道访问，V2V 链路的接入的问题也越来越重要。针对媒体访问控制（Medium Access Control, MAC）协议存在限制间隔导致无法提供足够的容量来承载安全和非安全应用的问题，Nguyen 等研究了各种用于 MAC 协议的动态间隔技术^{[31][32]}。Choe 等提出了一种基于协同强化学习的智能信道接入算法，该算法中车辆以完全分散的方式协调信道接入以提高通过 V2V 链路安全广播^[33]。

VANET 促进了处于未被基础设施覆盖范围内车辆之间的相互通信，VANET 的安全关键应用要求高可靠性和低传输延迟。针对这类车载通信系统提出的两个标准为 IEEE 802.11p 和 IEEE 802.11bd。Ma 等提出了一种有效的基于信噪比的模型用来分析采用 IEEE 802.11p 和 IEEE 802.11bd 标准 VANET 网络的 QoS。同时 Ma 等对采用 IEEE 802.11p 和 IEEE 802.11bd 标准的通信系统对人工驾驶 VANET 和自动驾驶 VANET 的 QoS 安全要求进行了比较^[34]。与此同时，射频（RF）技术和可见光通信（VLC）链路通过相互协作可以用来提高移动车辆之间的通信质量，为了充分发挥这两种通信链路的优越性，提高 VANET 的性能，根据 VANET 中移动车辆的分布情况，制定拓扑控制方案，以此来帮助车辆与车辆之间正确建立 VLC 和 RF 链路。为了解决车辆由于车辆的高速移动导致 VANET 结构的频繁变化的问题，Chen 等提出了一种自适应拓扑控制方案，旨在寻求在混合 VLC/RF VANET 中实现移动车辆的连通性和功耗的平衡^[35]。与上述不同，Cui 等考虑到随着现如今交通信息需求的增加导致 VANET 系统的资源配置效率会很低的问题，

提出了一种基于边缘计算概念的高效且保护用户隐私的 VANETs 数据下载方案, 该方案要求 RSUs 通过分析附近的车辆发送的加密请求来找到所需要的数据, 同时保证了其下载请求的隐私没有被泄露^[36]。Li 等通过实验证实了不同的交通密度和恶劣天气对 V2V 通信会产生一定的影响, 导致数据传输的连通性降低, 传输延迟提高^[37]。由于道路环境的复杂性, 一些障碍物的阻挡, 严重影响了车辆之间数据的传输。为了增强车辆与车辆之间的连通性, 提高 VANET 的性能, 研究人员通过将无人机作为中继来解决由于障碍物的阻挡导致信号衰落增大, 并且扩大基础设施和车载通信设备的覆盖范围^{[38][43]}。在基础设施稀疏部署的高速公路场景中, VANET 提高整个高速公路系统网络的吞吐量, 保证了在没有基础设施的环境中保证了车辆用户数据下载的连续性。在高速公路中对于中继车辆的选择, 使用无人机作为中继适用性将会很低, 相反, 车辆作为中继是一个比较好的选择。

车辆用户与行人用户最大的区别在于车辆用户的移动性要远远大于行人用户, 而车辆运动的不确定性和高速移动是 V2I/V2V 协作传输策略不可忽视的考虑因素。为了提高在高速公路场景下系统网络的性能, Wang 等提出了一种基于测量的关于 V2V 的阴影效应的分析方法^[44]。针对于车载内容中心网络 (VCCN), Lin 等利用车辆移动行为的规律性, 采用隐马尔可夫模型 (HMM) 来推断出车辆到达指定区域的概率, 提出了一种基于社会属性和移动性预测的 VCCN 协作缓存策略, 很大程度提高了车辆网络的性能^[45]。在城市十字路口的场景中下, 为了降低交通拥堵的概率, Xiao 等提出了一种迭代优化的集群算法, 该算法可以根据周围车辆的数量自动地形成多个集群, 同时集群的头也可以被快速找到, 从而避免了计算复杂造成的延迟^[46]。高速公路中车辆的不确定性和高速移动性依然是 V2I/V2V 协作传输策略不可忽视的因素, 本文通过建立新的交通分析模型, 进一步研究能够提高高速公路系统网络可实现吞吐量的 V2I/V2V 协作传输策略。

为了保证车联网协作传输策略的可靠性, 研究人员对于车载系统的协同通信与计算进行了全面的探讨。有许多学者将研究重点放在优化终端能耗上^{[47][48]}, 并且从优化数据卸载效用方面^[49], 降低能耗和数据交付时延方面^{[50][51]}, 以及降低系统计算复杂度上提出了比较有效的协作任务分配策略^[52]。Sun 等通过设计一种计算效率指标, 定义为计算数据比特数除以相应的能耗, 并进一步提出了一种局部计算与卸载相结合的联合计算方案^[53]。Liu 等在排队论的基础上提出了移动和云计算的可靠性度量方法, 并且描述出了移动和云缓存中计算任务的队列长度^[54]。但是上述方案并没有以可靠性为约束条件, Han 等提出了一个结合队列长度和车辆隐私熵的虚拟队列模型来优化分区, 并采用动态规划

方法提出了面向耦合的车辆协作可靠性计算方法^[55]。与上述研究目的不同,本文的研究重点通过分析车辆的分布特性,进一步对 V2I/V2V 协作传输策略进行研究以此提高网络传输性能,同时车载系统的协同计算方案为本文的研究提供了理论基础。

1.3 论文研究内容和结构安排

本文主要研究了在基础设施被稀疏部署的高速公路场景下,设计一款 V2I/V2V 协作传输策略,以提高高速公路系统网络可以为目标车辆提供大文件数据下载可实现的吞吐量。针对单向车道高速公路场景和双向车道的高速公路场景下,本文综合考虑车辆分布对车辆分布以及路径损耗对数据传输的影响,建立其所对应场景的分析模型,提出了能够提高在对应的道路模型场景中系统网络可实现的吞吐量的 V2I/V2V 协作传输策略,经过模型分析和理论推导获得系统网络可实现吞吐量的封闭表达式。通过实验仿真验证了提出策略的有效性。

论文的结构安排如下:

第一章,首先介绍了 V2I/V2V 协作传输策略的研究背景,随着车联网技术的兴起和智能用户平台的发展,车辆用户对于高吞吐量下载网络系统的需求也越来越强烈。对于基础设施被稀疏部署的高速公路场景,如何提高系统网络的性能逐步成为现如今研究的重点。其次,介绍了目前国内外研究人员针对车联网场景中面临如何保证车辆网络连通性和可靠性等不同的问题而提出了不同的解决方法和网络协作传输策略。

第二章,首先介绍了 V2I/V2V 协作传输策略所使用到的一些技术理论。其次,首次对高速公路场景中基于泊松分布的车辆分布模型进行了分析,并推导出了在道路中关于车辆之间间隔的概率密度函数,为接下来关于交通流理论的研究提供了理论基础。

第三章,针对双向车道的高速公路场景,为了提高系统网络可实现的吞吐量,提出了一种基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略。首先,通过对系统模型的分析详细介绍了基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略的内容以及弹性分区的组成原理,并根据车辆密度的影响建立起对应的分析模型。其次,通过对所建立的分析模型的分析,获得了系统网络为目标车辆提供数据下载可实现的吞吐量的封闭表达式。最后,通过仿真实验结果,证明了所提出的基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略对于提高系统网络的吞吐量具有一定的优越性。

第四章,针对单向车道的高速公路场景,为了提高系统网络可实现的吞吐量,降低数据交付时延,提出了一种基于 V2V 链路动态切换的 V2I/V2V 协作传输策略。首先,针对单向车道的高速公路场景系统模型进行分析,推导出 V2V 链路最佳切换点,并相

信介绍了基于 V2V 链路动态切换的 V2I/V2V 协作传输策略的内容以及中继车辆选择准则，并根据车辆密度的影响建立起对应的分析模型。其次，通过对所建立的分析模型的分析，获得了系统网络为目标车辆提供数据下载可实现的吞吐量和目标车辆数据交付时延的封闭表达式。最后，通过仿真实验结果，表明了所提出的策略基于 V2V 链路动态切换的 V2I/V2V 协作传输策略对于提高系统网络的吞吐量以及降低数据的交付时延具有可行性。

第五章，首先总结了本文所做出的研究内容，并对 V2I/V2V 协作传输策略未来的研究重点提出了构思。

第二章 车联网理论基础和车辆分布及传输模型分析

2.1 车联网理论基础

2.1.1 V2I 和 V2V 技术

V2I 主要是指处于任何运动状态的车辆与基础设施之间进行无线通信, 其中, 基础设施包括通信基站, 交通灯和其他为大众服务的基础设施。在本文中所述的基础设施为携带着无线通信接入点的通信基础设施 (例如 5G 基站或 RSU)。此外, V2I 还需要加密操作来计算生成的 200 多个数字签名, 并在基础设施和车辆之间每秒传输 1000 多条消息, 以有效地执行其任务^[56]。在高速公路的场景下, V2I 最大有效连接范围大约为 600m^[57]。

V2V 主要是指处于任何运动状态的两辆或多辆车辆之间进行无线通信, 现如今车辆大多搭载着智能车载单元, 能够实现与其他车辆进行通信和共享信息, 这种车辆之间的信息交换能够提高安全性和减少机动车碰撞。在高速公路的场景下, V2V 最大有效连接范围大约为 300m^[20]。

2.1.2 DSRC 技术

DSRC 是车联网中非常重要的一种技术, 在国内最为常见的应用场景便是高速公路中的 ETC。现如今随着智能车辆和智能交通道路的普及, DSRC 主要应用于车辆的短程通信, 所使用频段为 5.9GHz, 75MHz 频谱。为了保证数据传输过程的安全性, 一般情况下, DSRC 能够分为七个信道, 包含一个控制信道和六个通信信道。车辆采用 DSRC 进行数据传输时, 控制信道和通信信道会同时进行切换, 从而避免信息的遗漏和数据的丢失。其中, IEEE802.11p 是基于 DSRC 对 IEEE802.11 标准扩充的通讯协定, 主要应用于车辆之间的无线通信。

2.1.3 LTE 技术

LTE 是一种 UMTS 技术标准的长期演进, 其核心技术包括采用 SC-FDMA, OFDM, MIMO 等, 很大程度增加了数据传输的速率。无论从 3G 到 3G+ 的发展还是向着 4G 的过渡过程中, 都扮演着了至关重要的角色。随着技术的发展, LTE 发展为两个核心模式: 频分双工 (FDD) 和时分双工 (TDD)。FDD 通过对频率进行划分, 形成发送数据和接收数据两条信道, 从而实现数据的同时接收发送。由于 FDD 划分主要针对于频率, 这对频率的要求比较严格, 即必须采用成对的频率。而 TDD 主要针对于时间将信道划分为发送和接受信道, 在发送数据或者接受数据时, 所使用的信道承载于载波的不同时段,

这对于频率而言可以是相同的。针对于车联网通信，现如今已发展有 LTE-V 等技术。

2.2 车辆分布及传输模型分析

2.2.1 车辆分布模型分析

在车辆网络协作传输策略中，大多数研究将 V2I 或 V2V 传输过程中的传输速率设置为一个固定值，无论发射机和接收机的相对位置是否发生改变^[22]。然而，由于路径损耗的影响，随着发射机和接收机的相对位置的改变，对数据传输产生很大的影响。本节主要对在没有基础设施的直线道路上车辆分布传输模型进行分析。

假设存在双向双车道道路路段长为 L ，路段两端分别为车流量的入口和出口且路段中间不存在道路分支。研究表明，泊松分布能够准确反映实际的交通分布^{[58][59]}。假设车辆到达该路段为一个泊松过程，车辆的到达间隔距离服从参数为 λ （单位时间内到达的车辆数）的泊松分布，在路段 $[0, L]$ 区间内车辆数量为 K 的概率可以表示为：

$$P(K) = \frac{(\lambda L)^K}{K!} e^{-\lambda L}, K = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

车辆之间的间隔距离 d 服从指数分布，其概率密度函数为：

$$f(d) = \lambda e^{-\lambda d}, d \geq 0 \quad (2.2)$$

这里存在一个无法忽略的事实，公式 (2.2) 作用的路段长度区间为 $[0, \infty]$ 。当路段长度设定为 L ，在 $[0, L]$ 区间内对于车辆之间的间隔距离 d 的概率密度函数，公式 (2.2) 不再成立。

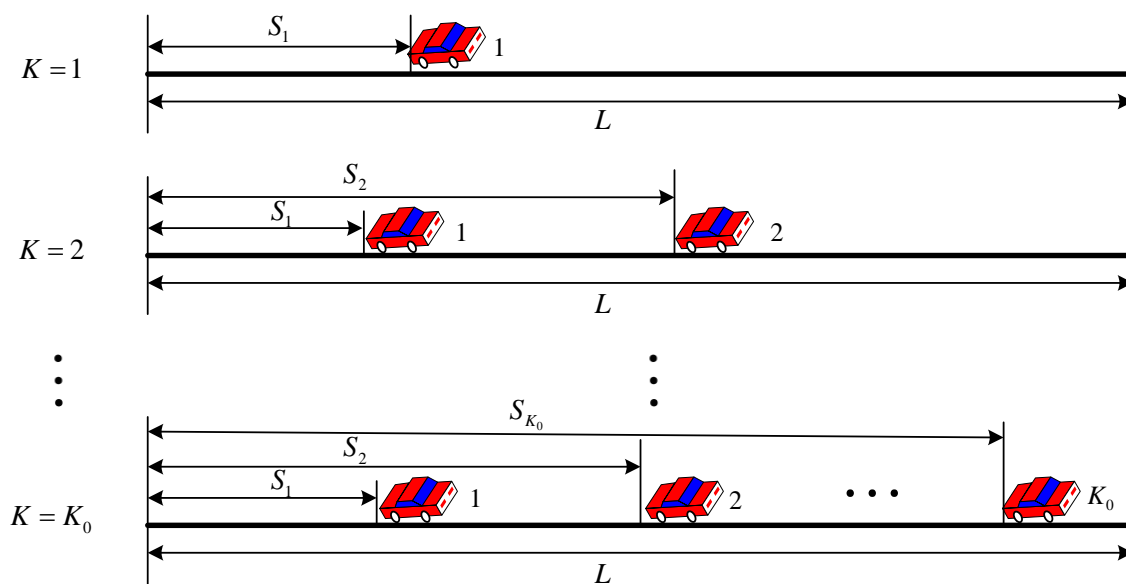


图 2.1 泊松分布的车辆分布模型

如图 2.1 所示，当在道路 $[0, L]$ 区间内存在 K_0 辆车时，为了便于说明，将每辆车从

左到右 1 到 K_0 进行编号。每辆车在到达该路段的行驶距离表示为 S_1, S_2, \dots, S_{K_0} ，由于道路长度有限， S_{K_0} 的分布大小受到前面所有车辆分布的影响，所以每辆车到达该路段的行驶距离是一个条件分布，为独立且服从在 $[0, L]$ 的均匀分布。

K_0 辆车的到达距离对应的顺序统计量可以表示为 S_1, S_2, \dots, S_{K_0} ，车辆到达间隔为 $d_1 = S_1, d_2 = S_2 - S_1, \dots, d_{K_0} = S_{K_0} - S_{K_0-1}$ 。根据文献[60]可知，当路段存在 K_0 任意两辆车的 $d_i = S_i - S_j$ 的概率密度函数为：

$$f_{K_0}(d_i) = \frac{K_0!}{L^{K_0} (j-i-1)!(K_0-j+i)!} d_i^{j-i-1} (K_0-d_i)^{K_0-j+i} \quad (2.3)$$

由于在本文所研究的协作传输策略中，重点讨论由于车辆密度的不同，导致车辆之间的间隔距离的不同。因此，在 $[0, L]$ 区间内，任意相邻的两辆车之间的间隔距离 d_k 的概率密度函数可表示为：

$$f_{K_0}(d_k) = \frac{K_0}{L^{K_0}} (L-d_k)^{K_0-1}, \quad k \geq 2 \quad (2.4)$$

其中： k 表示为编号为 k 的车辆， d_k 表示编号为 k 的车辆与编号为 $k-1$ 的车辆之间的间隔距离。值得注意的是，当路段中只有一辆车的时候，公式 (2.4) 则无法确定是否成立。因此，需要证明在 $k=1$ 时，公式 (2.4) 是否依然成立。

证明：首先需要获得样本 d_1 的概率密度函数，即样本 S_1 的概率密度函数。根据文献[61]，当在区间 $[0, L]$ 存在 K_0 辆车时，第 k 辆车的概率密度函数可表示为：

$$f_k(S | K = K_0) = \frac{K_0! f_1 f_2 f(S)}{(k-1)!(K_0-k)!} \quad (2.5)$$

$$\text{其中：} \begin{cases} f_1 = \int_{-\infty}^S \int_{S_1}^S \cdots \int_{S_{k-2}}^S (k-1)! \prod_{i=1}^{k-1} f(S_i) dS_1 \cdots dS_{k-1} \\ f_2 = \int_S^{\infty} \int_{S_{k+1}}^{\infty} \cdots \int_{S_{K_0-1}}^{\infty} (K_0-k)! \prod_{i=k+1}^{K_0} f(S_i) dS_{k+1} \cdots dS_{K_0} \end{cases} .$$

由于样本 S_1, S_2, \dots, S_{K_0} 独立而且服从在 $[0, L]$ 的均匀分布，其概率密度函数可以表示为：

$$f(S) = \frac{1}{L} \quad (2.6)$$

所以，通过计算可以得到 f_1 和 f_2 为：

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \int_{-\infty}^S \int_{S_1}^S \cdots \int_{S_{k-2}}^S (k-1)! \prod_{i=1}^{k-1} \frac{1}{L} dS_1 \cdots dS_{k-1} \\
 &= \int_{-\infty}^S \int_{S_1}^S \cdots \int_{S_{k-2}}^S \frac{(k-1)!}{L^{k-1}} dS_1 \cdots dS_{k-1} \\
 &= \frac{S^{k-1}}{L^{k-1}}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}
 f_2 &= \int_S \int_{S_{k+1}}^{\infty} \cdots \int_{S_{K_0-1}}^{\infty} (K_0 - k)! \prod_{i=k+1}^{K_0} \frac{1}{L} dS_{k+1} \cdots dS_{K_0} \\
 &= \int_S \int_{S_{k+1}}^{\infty} \cdots \int_{S_{K_0-1}}^{\infty} \frac{(K_0 - k)!}{L^{K_0 - k}} dS_{k+1} \cdots dS_{K_0} \\
 &= \int_S \int_{S_{k+1}}^{\infty} \cdots \int_{S_{K_0-2}}^{\infty} \frac{(K_0 - k)!}{L^{K_0 - k - 1}} - \frac{(K_0 - k)! S_{K_0 - 1}}{L^{K_0 - k}} dS_{k+1} \cdots dS_{K_0 - 1} \\
 &= \sum_{i=0}^{K_0 - k} (-1)^{K_0 - k - i} \frac{(K_0 - k)!}{L^{K_0 - k - i}} S^{n - k - i}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

所以，公式 (2.5) 可以转化为：

$$\begin{aligned}
 f_k(S | K = K_0) &= \frac{K_0! \frac{d^{k-1}}{L^{k-1}} \sum_{i=0}^{K_0 - k} (-1)^{K_0 - k - i} \frac{i!(K_0 - k - i)!}{L^{K_0 - k - i}} S^{n - k - i} \frac{1}{L}}{(k-1)!(K_0 - k)!} \\
 &= \frac{K_0! \sum_{i=0}^{K_0 - k} \frac{(-1)^{K_0 - k - i}}{i!(K_0 - k - i)! L^{K_0 - i}} S^{K_0 - 1 - i}}{(k-1)!}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

假设在 $k=1$ 时，公式 (2.4) 依然成立，那么

$$f_{K_0}(d_1) = f_1(S | K = K_0) \tag{2.10}$$

第一步，根据二项式定理，对公式 $f_{K_0}(d_1)$ 进行代入变形计算，得到关系式为：

$$\begin{aligned}
 f_{K_0}(d_1) &= \frac{K_0}{L^{K_0}} (L - d_1)^{K_0 - 1} \\
 &= \frac{K_0}{L^{K_0}} \left[C_{K_0 - 1}^0 L^{K_0 - 1} + C_{K_0 - 1}^1 L^{K_0 - 2} (-d_1)^1 + \cdots + C_{K_0 - 1}^{K_0 - 1} (-d_1)^{K_0 - 1} \right] \\
 &= \frac{K_0}{L^{K_0}} \sum_{i=0}^{K_0 - 1} C_{K_0 - 1}^i L^{K_0 - 1 - i} (-d_1)^i \\
 &= \frac{K_0}{L} \sum_{i=0}^{K_0 - 1} C_{K_0 - 1}^i \frac{(-d_1)^i}{L^i}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

第二步，对公式 $f_1(S | K = K_0)$ 进行代入变形计算，得到关系式为：

$$\begin{aligned}
f_1(S | K = K_0) &= f_1(d_1 | K = K_0) \\
&= K_0! \sum_{i=0}^{K_0-1} \frac{(-d_1)^{K_0-1-i}}{i!(K_0-1-i)!L^{K_0-i}} \\
&= \frac{K_0!}{(K_0-1)!} \sum_{i=0}^{K_0-1} \frac{(-d_1)^{K_0-1-i}}{i!(K_0-1-i)!L^{K_0-i}} \\
&= K_0 \sum_{i=0}^{K_0-1} C_{K_0-1}^i \frac{(-d_1)^{K_0-1-i}}{L^{K_0-i}} \\
&= \frac{K_0}{L} \sum_{i=0}^{K_0-1} C_{K_0-1}^i \frac{(-d_1)^{K_0-1-i}}{L^{K_0-1-i}}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

因为 $\begin{cases} C_{K_0-1}^i = C_{K_0-1}^{K_0-1-i}, K_0-1 \text{ 为奇数} \\ C_{K_0-1}^i = C_{K_0-1}^{K_0-1-i}, K_0-1 \text{ 为偶数} \end{cases}$, 所以公式(2.10)成立, 即在 $k=1$ 时, 公式(2.4)

依然成立。由此可以得到在区间 $[0, L]$ 内, 当存在 K_0 辆车时, 任意相邻的两辆车之间的间隔距离 d_k 的概率密度函数可表示为:

$$\begin{aligned}
f_{K_0}(d_1) &= \frac{K_0}{(L)^{K_0}} (L-d_1)^{K_0-1} \\
f_{K_0}(d_2) &= \frac{K_0-1}{(L-d_1)^{K_0}} (L-d_1-d_2)^{K_0-1} \\
&\vdots \\
f_{K_0}(d_{K_0}) &= \frac{1}{\left(L - \sum_{i=1}^{K_0-1} d_i\right)^{K_0}} \left(L - \sum_{i=1}^{K_0} d_i\right)^{K_0-1}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

2.2.2 传输模型分析

本节为了研究车辆分布模型对数据传输的影响, 采用文献[20]所提出的数据传输模型, 目标车辆处于未被基础设施覆盖区域内, 通过反向车道中的所有车辆作为中继车辆, 依次从相邻的基础设施中下载目标车辆所需的数据块, 当与目标车辆相遇时, 目标车辆则会通过建立 V2V 链路从中继车辆中得到需要的数据。如图 2.2 所示, 在长度为 L 的路段内, 目标车辆以 v_1 的速度匀速行驶, 反向车道中的车辆以 v_2 的速度匀速行驶, 且反向车道中的车辆密度表示为 ρ_2 。目标车辆与中继车辆一旦建立 V2V 链路, 只有在发射机和接收机之间的距离达到 V2V 最大有效传输范围时, V2V 链路才会断开, 与此同时, 目标车辆与相邻的中继车辆建立新的 V2V 链路。数据传播过程中带来的传播时延并不在本文考虑范围内。

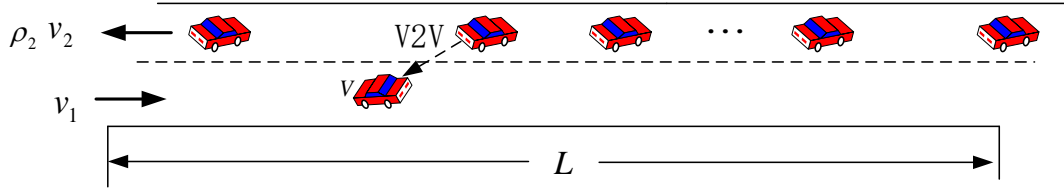


图 2.2 车辆分布对数据传输模型影响分析图

这里将目标车辆在该路段接收到数据量作为性能衡量指标，那么目标车辆在该路段可以获得数据量可以定义为：

$$C_V = \sum_{K_0=0}^{\infty} P[K = K_0] \times C_{K_0} \quad (2.14)$$

式中： C_{K_0} 为路段中存在 K_0 辆中继车辆时，目标车辆所能够接收到的数据量， $P[K = K_0]$ 为路段中存在 K_0 辆中继车辆时发生的概率。

利用香农定理可以得到发射机与接收机之间的距离为 x 处的瞬时传输速率为：

$$I = B \log_2 \left[1 + \frac{P}{N} (x)^{-\alpha} \right] \quad (2.15)$$

式中： B 为信道带宽， P 为发射机的发射功率， N 为接收机所接收到的噪声功率， α 为路径损耗衰减指数。假设 V2V 最大连接范围为 r_0 ，随着第 k 辆车与第 $k-1$ 辆车的间隔距离 d_k 的大小的不同，目标车辆可以从第 k 辆中继车辆获得数据量也会不同。

(1) 间隔距离 $d_k < r_0$

根据公式 (2.13)，目标车辆可以从第 k 辆中继车辆获得数据量可以表示为：

$$C_{K_0}^{k,1} = B \int_0^L \int_0^{L-d_1} \dots \int_0^{L-\sum_{i=1}^{k-1} d_i} \int_0^{r_0} \int_{\frac{r_0-d_k}{v_1+v_2}}^{\frac{d_k}{v_1+v_2}} \log_2 \left[1 + \frac{P_V}{N} ((v_1 + v_2) t_k)^{-\alpha} \right] \times \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_1 dd_2 \dots dd_{k-1} dd_k \quad (2.16)$$

(2) 间隔距离 $r_0 \leq d_k \leq 2r_0$

根据公式 (2.13)，目标车辆可以从第 k 辆中继车辆获得数据量可以表示为：

$$C_{K_0}^{k,2} = B \int_0^L \int_0^{L-d_1} \dots \int_0^{L-\sum_{i=1}^{k-2} d_i} \int_0^{2r_0} \left\{ \int_0^{\frac{d_k-r_0}{v_1+v_2}} \log_2 \left[1 + \frac{P_V}{N} ((v_1 + v_2) t_k)^{-\alpha} dt_k \right] + \int_0^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} \log_2 \left[1 + \frac{P_V}{N} ((v_1 + v_2) t_k)^{-\alpha} dt_k \right] \times \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dd_1 dd_2 \dots dd_{k-1} dd_k \right. \quad (2.17)$$

(3) 间隔距离 $d_k > 2r_0$

根据公式 (2.13)，目标车辆可以从第 k 辆中继车辆获得数据量可以表示为：

$$C_{K_0}^{k,3} = 2B \int_0^L \int_0^{L-d_1} \cdots \int_0^{L-\sum_{i=1}^{k-2} d_i} \int_{r_0}^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} \log_2 \left[1 + \frac{P_V}{N} \left((v_1 + v_2) t_k \right)^{-\alpha} \right] \times \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_1 dd_2 \cdots dd_{k-1} dd_k \quad (2.18)$$

综上所述，在 $[0, L]$ 道路区间内的存在 K_0 辆中继车辆时，目标车辆可以从第 k 辆中继车辆得到的数据量可以表示为：

$$C_{K_0}^k = \int_0^L \int_0^{L-d_1} \cdots \int_0^{L-\sum_{i=1}^{k-2} d_i} \left\{ \int_0^{r_0} \int_{\frac{r_0-d_k}{v_1+v_2}}^{\frac{d_k}{v_1+v_2}} C(t_k) \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_k + \int_{r_0}^{2r_0} \left[\int_{\frac{r_0-d_k}{v_1+v_2}}^{\frac{d_k}{v_1+v_2}} C(t_k) dt_k + \int_0^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} C(t_k) dt_k \right] \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dd_k + 2 \int_{r_0}^{\infty} \int_0^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} C(t_k) \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_k + \right\} dd_1 dd_2 \cdots dd_{k-1} \quad (2.19)$$

式中： $C(t_k) = B \log_2 \left[1 + \frac{P_V}{N} \left((v_1 + v_2) t_k \right)^{-\alpha} \right]$ 。

在 $[0, L]$ 道路区间内的存在 K_0 辆中继车辆时，目标车辆可以从这 K_0 辆中继车辆得到的数据量可以表示为：

$$C_{K_0} = \sum_{k=1}^{K_0} C_{K_0}^k = \sum_{k=1}^{K_0} \left\{ \int_0^L \int_0^{L-d_1} \cdots \int_0^{L-\sum_{i=1}^{k-2} d_i} \left\{ \int_0^{r_0} \int_{\frac{r_0-d_k}{v_1+v_2}}^{\frac{d_k}{v_1+v_2}} C(t_k) \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_k + \int_{r_0}^{2r_0} \left[\int_{\frac{r_0-d_k}{v_1+v_2}}^{\frac{d_k}{v_1+v_2}} C(t_k) dt_k + \int_0^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} C(t_k) dt_k \right] \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dd_k + 2 \int_{r_0}^{\infty} \int_0^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} C(t_k) \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_k + \right\} dd_1 dd_2 \cdots dd_{k-1} \right\} \quad (2.20)$$

由于车辆的到达是一个泊松过程，所以在 $[0, L]$ 道路区间内的存在 K_0 辆中继车辆的概率为：

$$P[K = K_0] = \frac{\rho_2}{K_0!} e^{-\rho_2}, K_0 = 0, 1, \cdots \quad (2.21)$$

根据公式 (2.14)，目标车辆在该路段可以获得数据量可以表示为：

$$\begin{aligned}
 C_V = & \sum_{K_0=0}^{\infty} \frac{\rho_2}{K_0!} e^{-\rho_2} \sum_{k=1}^{K_0} \left\{ \int_0^L \int_0^{L-d_1} \cdots \int_0^{L-\sum_{i=1}^{k-2} d_i} \left\{ \int_0^{r_0} \int_{\frac{r_0-d_k}{v_1+v_2}}^{\frac{d_k}{v_1+v_2}} C(t_k) \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_k + \right. \right. \\
 & \left. \int_{r_0}^{2r_0} \left[\int_{\frac{r_0-d_k}{v_1+v_2}}^{\frac{d_k}{v_1+v_2}} C(t_k) dt_k + \int_0^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} C(t_k) dt_k \right] \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dd_k + \right. \\
 & \left. \left. 2 \int_{r_0}^{\infty} \int_0^{\frac{r_0}{v_1+v_2}} C(t_k) \prod_{i=1}^k f_{K_0}(d_i) dt_k dd_k + \right\} dd_1 dd_2 \cdots dd_{k-1} \right\} \quad (2.22)
 \end{aligned}$$

根据所得到目标车辆在该路段可以获得数据量的表达式可以发现，当路段中中继车辆的数量较少时，该表达式有一定的适用性。但是，随着路段中车辆的增多，计算复杂度也会随之增加。在本文假设的高速公路场景中，未被基础设施覆盖的路段较长，路段中存在的车辆数量也会比较多，以上分析方法则不再适用。但是，本节分析了泊松分布的车辆分布模型，对于未来关于交通流的研究提供了一定的理论基础。

2.3 本章小结

本章首先介绍了车联网的基本理论基础，如 V2I 和 V2V 技术等。其次，重点分析了泊松分布的车辆分布模型，并获得了车辆之间间隔距离的概率密度函数，为未来对于交通流的研究提供了理论基础。通过对车辆分布传输模型的分析，获得了目标车辆可以通过中继车辆获得的数据量表达式。结果表明，随着路段中所承载的车辆数量的增加，该数据量表达式的复杂度也会随之增加。由于本文考虑的场景是在路段较长且所承载的车辆数量较多的高速公路场景，这为本文接下来采用新的方法研究数据传输过程提供了理论证明。

第三章 基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略

随着交通网络的不断扩大，车联网的应用得到了广泛的发展。车联网通过将单独行驶的车辆进行连接，为车辆用户提供数据共享和下载的通道，从而有效降低交通拥堵和交通碰撞的概率^[2]。车到车（V2V）和车到基础设施（V2I）是车联网的重要组成部分，被广泛用于提高系统网络的吞吐量。

路径损耗是影响数据传输质量的一个特别重要的因素。另外，路径损耗很好地抓住了这样一个事实，即发射机和接收机越近，它们的传输速度就越快。在高速公路环境下，V2I 的有效传输距离约为 600 m^[57]，V2V 的有效传输距离约为 300 m^[20]。因此，远距离传输造成的路径损耗是一个不可忽视的重要参数。当然，在 V2I/V2V 通信信道中，有许多参数起着重要作用，如小尺度衰落和多普勒频移等。与路径损耗不同，小尺度衰落和多普勒频移问题可以通过物理层技术来处理，对上层网络策略设计的影响可以忽略不计。因为这些参数不会显著影响本章的贡献，因此，我们在本章中没有考虑到这些参数。此外，车辆分布的不同决定了车辆之间的平均距离，进而对路径损失的大小起主导作用。总的来说，车辆分布极大地影响了车辆用户下载数据可实现的吞吐量。但是，之前的研究并没有考虑车辆分布对吞吐量的影响。针对上述问题，本章考虑了与目标车辆相反方向车道中的车辆密度对系统网络的吞吐量的影响，提出了一种基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略（Elastic-Segment-Based V2I/V2V Cooperative Strategy, ESCS）。

与以往研究中提出的无差别中继协作传输策略相比，所提出的协作传输策略能够有效提高目标车辆的吞吐量，并且减少频繁信道交换造成的资源浪费，特别是在较高车辆密度的场景下。此外，由于高速公路上车辆的高速行驶，ESCS 可以有效避免由于频繁的信道切换而增加数据丢失或传输错误的概率。而 ESCS 中的中继车辆只负责数据下载、携带、转发，数据分发等所有算法都由基础设施实现，相对于集群（cluster），算法执行的稳定性大大提高。如表 3.1 所示，清晰地展示了本章的研究与以往研究成果的比较。本章的主要贡献可以总结如下：

（1）通过使用 V2I 和 V2V 这两种常用的通信方式，提出了一种基于弹性分区的 V2I/V2V 协作传输策略，以提高车辆用户在基础设施覆盖不连续的道路上从网络中下载数据的可实现吞吐量。在该策略中，从与车辆用户行驶方向相反的车辆中选择中继车辆来形成弹性分区，增加车辆用户接收的数据量。弹性分区和集群的区别在于弹性分区中的车辆不相互通信，而集群中的车辆是相互通信的。

(2) 通过对与车辆用户行驶方向相反的车辆分布的分析, 推导出弹性分区大小的制定准则, 以减小反方向车辆密度对系统网络吞吐量的影响。

(3) 分析了本章模型中数据传输的过程, 考虑了路径损耗对数据传输速率的影响, 进而得到了车辆用户从网络中下载数据的可实现的吞吐量的封闭表达式。为了使可实现的吞吐量最大化, 我们进一步推导出 V2V 通信的有效传输范围的最优值和反向车道中的车辆密度。

表 3.1 研究点比较表

参考文献	中继车辆	双车道	单次中继	路径损耗	集群	车辆密度	弹性分区
[18]	√	x	x	x	x	x	x
[19]	√	√	x	√	x	x	x
[20]-[22]	√	√	√	x	x	x	x
[23]	√	x	√	x	x	x	x
[24]	√	√	x	√	√	x	x
[25]	√	√	√	x	x	x	x
[26]	√	√	√	√	√	x	x
[27]	√	x	x	√	x	x	x
本章研究	√	√	√	√	x	√	√

3.1 系统模型

本章以双车道高速公路场景为研究对象, 如图 3.1 所示, 将道路的两端设置为车流的出入口。由于网络设备的类型不局限于一种, 因此本章使用携带无线接入点的基础设施来替换各种网络设备。具有无线接入点的基础设施被有规律地部署在道路旁, 基础设施的高度表示为 h , 基础设施与高速公路的直线距离表示为 m 。V2I 的有效连接范围(半径)表示为 r_l , 所有的基础设施都通过无线或有线连接至 Internet。假设基础设施之间的距离足够大, 且使得基础设施之间不存在干扰, 基础设施之间的距离表示为 $L+2\sqrt{r_l^2-m^2-h^2}$, 其中 L 为两个相邻基础设施之间的无法被基础设施覆盖的路段长度。在实际的高速公路中, 由于道路的长度要远远大于道路的宽度和车辆的长度, 且在本章的模型中同方向的车辆不存在超车的现象, 所以本章忽略了道路的宽度和车辆的长度, 将方向相同的多个车道抽象为一个车道。为了便于阅读, 附录中列出了本文所使用到的重要符号以及其含义。

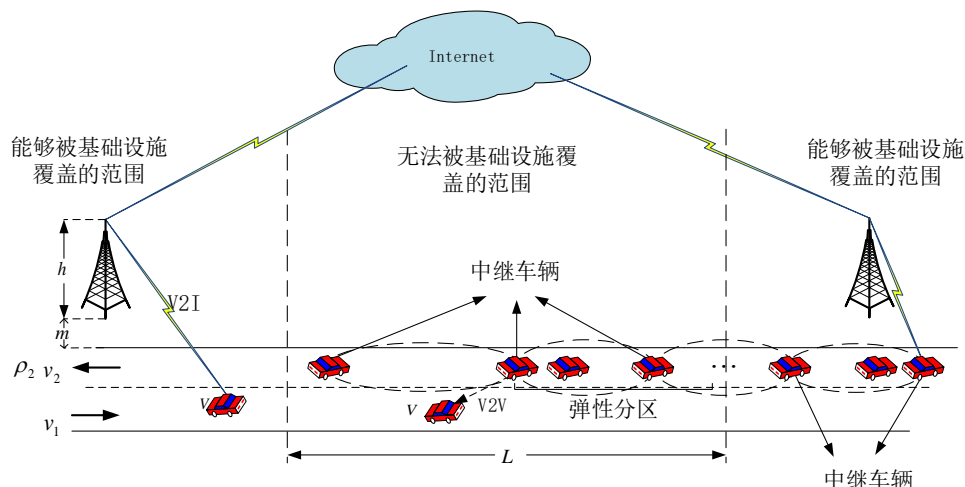


图 3.1 双向车道高速公路模型示意图

假设目标车辆 v 以恒定速度 v_1 行驶到该路段，定义 v 的行驶方向为正向车道， v 行驶方向相反的车道为反向车道，反向车道中的车辆密度表示为 ρ_2 。在真实的车辆网络中，个别车辆的速度可能会偏离平均速度，如高斯速度模型。这种偏差虽然会导致车辆超车，但这种现象对吞吐量影响不大。此外，反向车道中存在的车辆数量服从泊松分布，车辆的间距服从指数分布。研究表明，泊松分布能够准确反映实际的交通分布^[58]。

当车辆用户从基础设施下载数据时，无论基础设施是一次向一辆车辆传输数据，还是将带宽分配给多个用户并同时向多个用户传输数据，都不会影响吞吐量计算^[62]。因此，本章假设每辆车辆通过单播传输与基础设施或中继车辆建立通信链路，V2V 有效连接范围（半径）为 r_0 。假设发射端和接收端之间的距离不大于最大有效连接范围(r_t 或 r_0)，则发射端和接收端可以建立传输链路。同时，所有的无线设备都有一个有限的传输范围，并且两个设备距离越近，数据传输速度越快。本章忽略了除路径损失以外的物理层的其他细节，而是主要讨论交通网络对数据下载的可实现吞吐量的拓扑影响。

本章重点考虑路径损耗而忽略物理层其他细节的原因如下：衰落信道可以分为大尺度衰落和小尺度衰落，大尺度衰落往往与发射机和接收机之间距离和障碍物阻挡效果有关，而路径损耗则仅仅与距离有关，是涉及求取吞吐量的关键的因素。并且由于路径损耗对信噪比的影响比较大，因此不能忽略。阴影衰落作为大尺度衰落的一种，其影响效果依赖于障碍物阻挡效果，由于本章策略所适用的场景是高速公路，路边几乎没有障碍物来阻隔信号的传播，因此，本章忽略阴影衰落的影响。小尺度衰落是指短期内的衰落，即当移动基站移动一小段距离时，接收信号在短期内的快速波动。此外，多径效应、车速、环境速度等现象均为小尺度衰落效应。与此不同的是，这些现象可以通过解调技术

来消除，并且此类方法也可以解决多普勒效应的影响。

如图 3.2 所示，本章分析了 5.9 GHz 频段内不同路径损耗参数对路径损耗的影响。路径损耗参数设置为 2~6，随着发射端到接收端的距离的增加，路径损耗也随之增大。此外，路径损耗也随着路径损耗参数的增大而增大，但随着路径损耗参数的增大，路径损耗的趋势没有变化。因此，路径损耗参数的差异并不影响本章的研究。

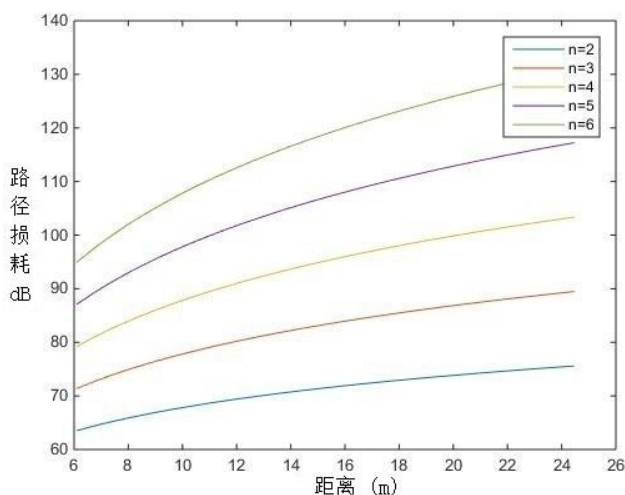


图 3.2 5.9 GHz 频段内不同路径损耗参数对路径损耗的影响示意图

本章假设每辆车只有一个天线用于数据的发射和接收，这意味着每辆车不能同时作为发射机和接收机。此外，我们采用了广泛使用的干扰模型^[22]，在该干扰模型中，如果有其他发射机在该设备的干扰范围内发射数据信号，则该设备无法发射数据信号。当且仅当它们之间的距离在有效连接范围内且互不干扰时，两辆车之间（或车辆与基础设施）可以直接通信。当它们之间的距离超出其范围，本章并不考虑终端隐藏问题。这是因为本章研究的场景为郊区或农村地区的高速公路，这种场景中数据传播会有很少的障碍，因此隐藏的终端效应可以忽略。由于基础设施有相对稳定的传输链路，所以建立 V2I 链路的优先级高于 V2V 链路。即当目标车辆进入基础设施覆盖范围时，立即建立 V2I 链路，如果存在 V2V 链路，则断开 V2V 链路。模型中需要对传输目标车辆需要的数据进行集中控制。本章假设 V2I 和 V2V 通信分配不同的信道，使它们之间不存在相互干扰。在 V2I 和 V2V 通信中，接收信号强度的变化只取决于车辆的位置。通常瞬时传输速率随着车辆与基础设施或两辆车之间距离的增加而减小。在本章中，采用路径损耗衰减指数 α 来代替标准路径损耗公式^[64]。

3.2 基于弹性分区的 V2I/V2V 网络协作传输策略制定

由于基础设施可以提供较快且较稳定的传输链路，所以最大化下载数据量的最佳方

法是使车辆直接从基础设施下载所请求的文件数据。当基础设施的服务范围有限，且下载请求数量较少时，其他车辆可以协助从基础设施检索和下载数据，然后将信息传输到基础设施覆盖范围以外的目标车辆。通过这种方式，能够达到增加目标车辆下载的数据量的目的，进而增加系统网络的吞吐量^[21]。因此，本章提出的 ESCS 采用 V2I 通信作为主要传输模式，V2V 通信作为辅助传输模式。

假设目标车辆 v 需要下载一个大文件。 v 的请求首先通过 V2I 发送到基础设施，基础设施将其转发到 Internet。根据中继车辆的分布特点，将大文件数据分成多个小数据块，并分发到 v 将要经过的携带无线接入点的基础设施中。假设数据在 V2I 和 V2V 中传输的时延可以忽略。当 v 通过第一个有无线接入点的基础设施时， v 可以通过 V2I 从基础设施下载数据。此时，剩余的数据块将通过邻近的无线接入点通过 V2I 有选择地传输到中继车辆。在本章的场景中，所有的基础设施共同扮演着集中控制的角色，即基础设施决定中继车辆携带的数据量和中继车的连接对象。在基础设施将数据分发给中继车辆之前，将目标车辆的识别号添加到数据的前面。当中继车辆遇到反向车辆时，如果该车辆的识别号与中继车辆携带的识别号相同，则中继车辆发送数据。

假设存在目标车辆 v 不在基础设施的服务范围内，但其希望继续下载请求的数据。本章所提 ESCS 中，弹性分区的头部和尾部可作为中继车辆，从基础设施接收数据且向目标车辆传输数据，另外，第 i 个弹性分区的尾部同时是第 $(i+1)$ 个弹性分区的头部。如图 3.3(a)所示，当 v 与中继车辆相遇时，通过建立的 V2V 链路从中继车辆上下载数据。如图 3.3 (b)所示，当 v 和中继车辆的距离超过最大 V2V 有效连接范围，现存的 V2V 链接断开，且 v 和下一辆可用的中继车辆立即建立 V2V 链接，此时弹性分区的大小是小于或等于 $2r_0$ 的。如图 3.3(c) (d)所示，如果弹性分区的大小大于 $2r_0$ 时， v 在一定距离内是不连通的，且与距离 v 最近的反向车道中的车辆建立 V2V 链路是接收更多数据的最佳方式。在 V2V 数据传输过程中，存在一些保证数据稳定传输的协议，如 ARQ。另外，对于协议控制之外丢失的数据包，当目标车辆到达下一个基础设施的覆盖范围时，将从基础设施中被重新获取。

根据 ESCS，通过已知中继车辆来决定选取下一中继车辆，进而确定弹性分区的大小。下一辆中继车辆（弹性分区尾部或弹性分区头部）的选择标准如下：

- (1) 待选车辆与处于连接状态的中继车辆（弹性分区头部）方向相同，并跟驰在该中继车辆（弹性分区头部）的后方，且速度相同；
- (2) 当处于连接状态的中继车辆（弹性分区头部）与后方跟驰的车辆的距离小于或

等于 $2r_0$ 时，处于连接状态的中继车辆（弹性分区头部）后方 $2r_0$ 范围内且距离该中继车辆（弹性分区头部）最远的车辆被选为下一辆中继车辆（弹性分区的尾部或下一弹性分区的头部）；

(3) 当处于连接状态的中继车辆（弹性分区头部）与后方跟驰的车辆的距离大于 $2r_0$ 时，距离处于连接状态的中继车辆（弹性分区头部）最近的车辆被选为下一辆中继车辆（弹性分区的尾部或下一弹性分区的头部）。

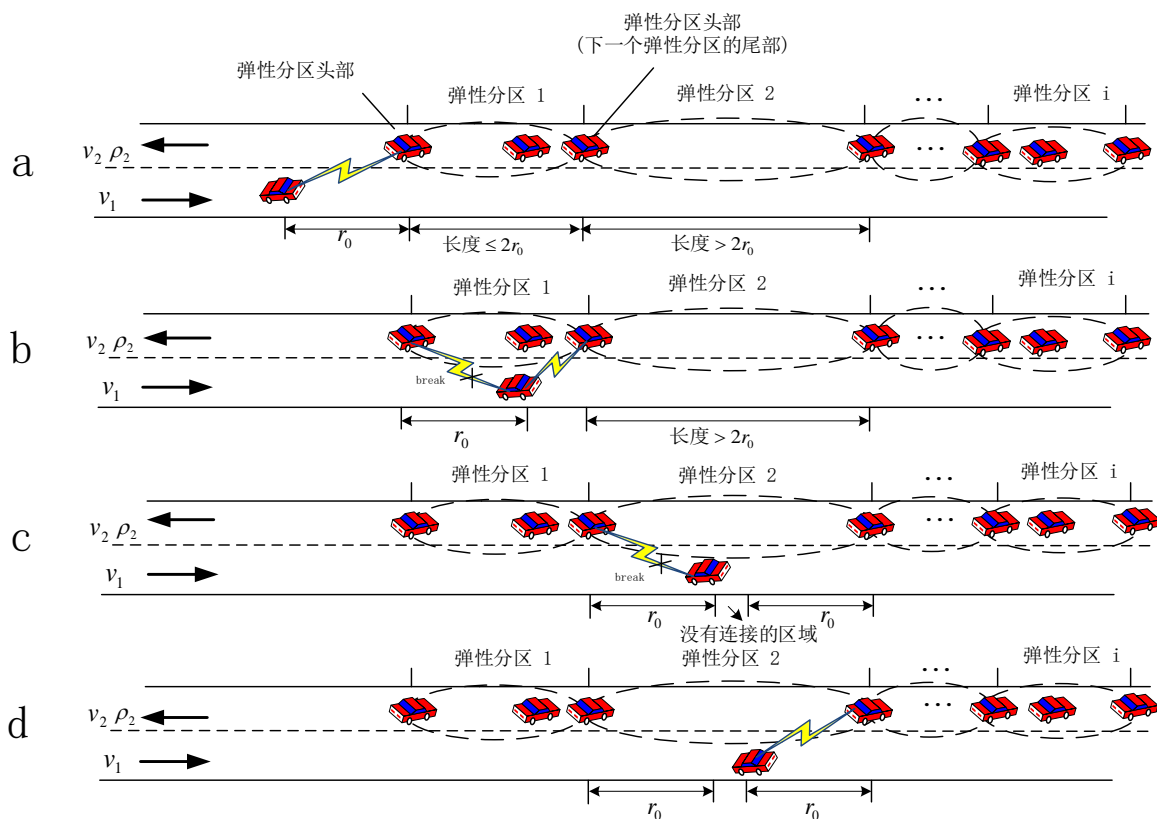


图 3.3 ESCS 中目标车辆从中继车辆获取数据的过程示意图

V2V 最大有效连接范围和反向车道中的车辆密度是影响目标车辆下载数据可实现吞吐量的两个重要参数。为了获得最大化系统网络可实现的吞吐量，本章分析出这两个参数的最优值。

3.3 ESCS 性能分析

为降低计算复杂度，将目标车辆从进入基础设施覆盖到进入下一个相邻基础设施覆盖这段区间定义为一个周期，假设该路段的长度为 $L + 2\sqrt{r_t^2 - h^2 - m^2}$ 。在这个周期内，目标车辆 V 通过 V2I 和 V2V 两种传输方式协作地下载请求的数据。本章采用了参考文献[20]中的道路模型，该模型认为相邻基础设施之间的距离足够大，使得相邻基础设施

之间不存在干扰。假设系统中只有中继车辆和目标车辆 V 参与数据传输，其他车辆保持沉默。在时间区间为 $[0, t]$ 内， $C(t)$ 表示为在此区间目标车辆从基础设施和中继车辆中获得的总数据量。由于本章只考虑传输信道中的路径损耗，所以本节分析是针对特定的场景进行的。在本章所提出的策略中，可实现的吞吐量可以定义为：

$$\eta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{v_1(C_I + C_V)}{L + 2\sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2}} \quad (3.1)$$

式中： C_I 为目标车辆 V 通过 V2I 链路从基础设施中获取的数据量； C_V 为目标车辆 V 通过 V2V 链路从中继车辆中获取的数据量。通过获得的下载数据总量，进而得出整个过程中系统网络可实现的吞吐量。总数据量包含两部分：通过 V2I 链路获得的数据量 C_I 和 V2I 链路获得的数据量 C_V 。

3.3.1 通过 V2I 链路获得的数据量

当目标车辆 V 刚刚进入基础设施覆盖范围时，立即向基础设施发送请求下载所需文件，随即建立 V2I 数据传输链路。利用香农定理可以得到在基础设施覆盖范围内，距离基础设施欧氏距离为 x 处的瞬时传输速率为：

$$I_{V2I} = B_I \log_2 \left[1 + \frac{P_I}{N} x^{-\alpha} \right] \quad (3.2)$$

式中： B_I 是 V2I 链路的带宽； P_I 是基础设施的传输功率； N 为目标车辆接收的噪声功率， x 是基础设施和 V 之间的欧几里德距离，且 $\sqrt{h^2 + m^2} \leq x \leq r_1$ 。SNR = $\frac{P_I}{N} x^{-\alpha}$ ，目标车辆的接收功率为 $P_I x^{-\alpha}$ 。

如图 3.4 所示，将目标车辆刚刚进入基础设施覆盖范围的位置以及基础设施覆盖范围内道路的中心位置分别定义为原点和参考点，参考点是基础设施到道路最近的地方。因此，要获得 V2I 接收到的数据量，只需要考虑 V 从原点到参考点接收到的数据量。 V 通过 V2I 链路获得的数据量为：

$$\begin{aligned} C_I &= \frac{2B_I}{v_1} \int_{\sqrt{h^2 + m^2}}^{r_1} I_{V2I}(x) dx \\ &= \frac{2B_I}{v_1} \int_{\sqrt{h^2 + m^2}}^{r_1} \log_2 \left[1 + \frac{P_I}{N} x^{-\alpha} \right] dx \end{aligned} \quad (3.3)$$

为了寻求一个更容易计算的方程，令 s 表示 V 与参考点之间的距离。如图 3.4 所示， $s = \sqrt{x^2 - h^2 - m^2}$ ，并且 $0 \leq s \leq \sqrt{r_1^2 - h^2 - m^2}$ 。为了简化计算，本章假设数据传输信道为理想

信道，背景噪声通常服从均值为零的正态分布，路径损耗衰减指数 $\alpha = 2^{[64]}$ 。式 (3.2) 和式 (3.3) 都可以转化为 s 的函数：

$$I_{V2I}(s) = B_I \log_2 \left[1 + \frac{P_I}{N} (h^2 + m^2 + s^2)^{-1} \right] \quad (3.4)$$

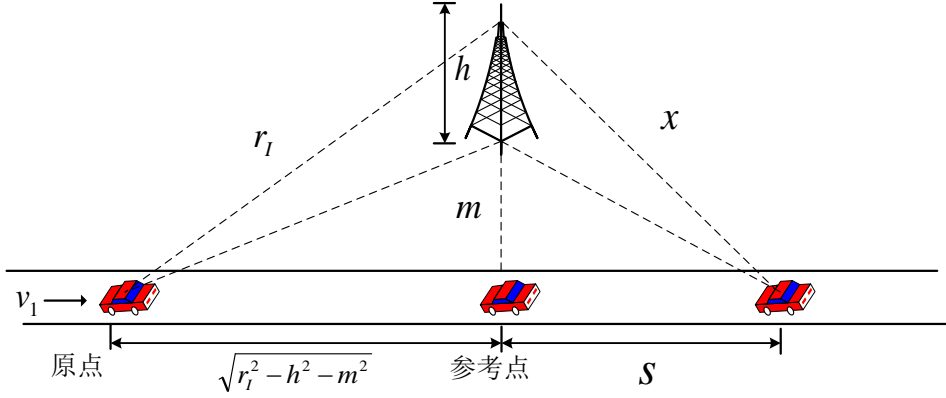


图 3.4 V2I 传输过程示意图

v 通过 V2I 获得的数据量可以表示为：

$$C_I = \frac{2}{v_1} \int_0^{\sqrt{r_l^2 - h^2 - m^2}} I_{V2I}(s) ds \quad (3.5)$$

结合式 (3.2) 和式 (3.4)，式 (3.5) 可转换为：

$$C_I = \frac{2B_I}{v_1 \ln 2} \left[\sqrt{r_l^2 - h^2 - m^2} \ln \left(1 + \frac{P_I/N}{r_l^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{h^2 + m^2} \arctan \sqrt{\frac{r_l^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2}} \right. \\ \left. + 2\sqrt{h^2 + m^2 + \frac{P_I}{N}} \arctan \sqrt{\frac{r_l^2 - h^2 - m^2}{h^2 + m^2 + \frac{P_I}{N}}} \right] \quad (3.6)$$

3.3.2 通过 V2V 链路获得的数据量

v 通过 V2V 获得的数据量大小受到中继车辆通过 V2I 从基础设施获得的数据量影响，有可能会出现这么一种情况，中继车辆仍在 V2V 最大有效连接范围内，但中继车辆没有数据可以继续传输给目标车辆 v 。参考文献[20]对其进行了详细的研究证明，假设通过 V2I 和 V2V 链路获得数据的过程中传输速率不变，且 $w_{V2I} > w_{V2V}$ ，证明了目标车辆 v 遇到的中继车辆有足够的数据发送给 v 。但是，在本章所建立的模型中考虑了在路径损耗的影响下，上述问题是否仍然有效。本章得到下面的定理 3.1。

定理 3.1: 在路径损失的影响下，目标车辆遇到的中继车辆仍有足够的数据传输给目标车辆。

证明：由于高速公路上的车辆密度小于城市道路上的车辆密度，因此模型中的中继车辆有足够的信道用于接收来自基础设施的数据。此外，设置 V2I 链路优于 V2V 链路，即中继车辆进入基础设施覆盖范围后立即可以建立 V2I 链路。由式 (3.4) 和式 (3.5) 可知，中继车辆通过 V2I 从相邻的基础设施中得到的数据量为：

$$C_I^0 = \frac{2B_I}{v_2} \int_0^{\sqrt{r_I^2 - h^2 - m^2}} \log_2 \left[1 + \frac{P_I}{N} (h^2 + m^2 + s)^{-1} \right] ds \quad (3.7)$$

假设所有车辆携带天线的高度相同，当 v 处于未被基础设施覆盖的路段，与中继车辆之间的距离为 y 时， v 从中继车辆下载数据所产生的瞬时传输速率为：

$$I_{V2V}(y) = B_V \log_2 \left[1 + \frac{P_V}{N} y^{-2} \right] \quad (3.8)$$

其中： B_V 表示 V2V 链路的带宽， P_V 表示中继车辆的发射功率。 v 可以从中继车获得的最大数据量为：

$$C_V^0 = \frac{2B_V}{v_1 + v_2} \int_0^{r_0} \log_2 \left[1 + \frac{P_V}{N} y^{-2} \right] dy \quad (3.9)$$

其中： y 被定义为中继车辆与 v 之间的距离，因为 $B_I > B_V$ ， $P_I > P_V$ 且 $\sqrt{r_I^2 - h^2 - m^2} > r_0$ ，很容易就能够得到 $C_I^0 > C_V^0$ ，这意味着目标车辆 v 遇到的中继车辆仍有足够的数据传输给 v 。

根据定理 1，本章避免了中继车辆通过 V2I 获得的数据量对目标车辆通过 V2V 从中继车辆获得的数据量的影响。如图 3.5 所示，为方便分析，假设反向车道中的中继车辆是静止的，则 v 以 $v_1 + v_2$ 的速度进行移动。 v 通过 V2V 链路获得数据的路段长度为 $L(v_1 + v_2)/v_1$ ， l_i 表示第 i 个弹性分区的大小，即第 i 辆中继车辆与 $(i+1)$ 辆中继车辆的距离。

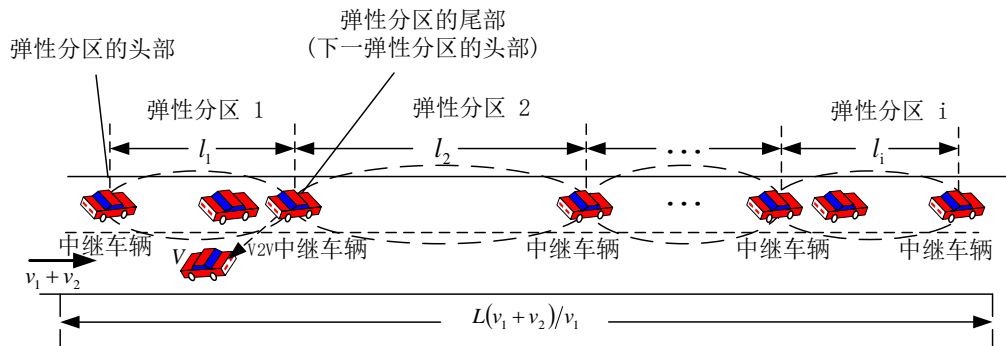


图 3.5 V2V 传输过程示意图

由于高速公路上车辆的位置具有较高的随机性和不确定性，使得 v 通过V2V链路所能获得的数据量和 v 与中继车辆之间的距离密切相关，这就给接下来的计算带来了挑战。为了解决这个问题，本章着眼于每个弹性分区能够向 v 传输的平均数据量。为了简化计算，采用了车距均匀化的思想，将车辆之间的距离划分为等间距的大小，参考文献[27]中同样采用了这种车距均匀化的思想。在计算所有弹性分区可传输的平均数据量时，本章重点获取一个弹性分区所能够为 v 提供的数据量，并将其扩展到所有弹性分区。V2V链路可以有效提供数据的最大传输时间为 L/v_1 ，正如上述假设，因为假设中继车辆是静止的，则 v 以 $v_1 + v_2$ 的速度进行移动， v 可以通过V2V链路获取数据的有效长度为 $L(v_1 + v_2)/v_1$ ，那么通过一个弹性分区内目标车辆 v 获取的平均信息量， v 通过V2V链路获取的数据量可以表示为：

$$C_v = \frac{L(v_1 + v_2)/v_1}{E[l]} C_v^{E[l]} \quad (3.10)$$

式中： $E[l]$ 表示中继车辆之间的平均距离， $C_v^{E[l]}$ 为 $E[l]$ 的函数，表示在 $E[l]$ 条件下 v 从一个弹性分区获得的平均数据量。

为了求解 v 能够从一个弹性分区可获得的平均信息量，首先需要知道反向车道中车辆的间隔距离，进而才能获得中继车辆的间隔距离。反向车道中的车辆到达该路段遵循泊松过程。在长度为 L 的该路段中，存在 k 辆车的概率为：

$$P(k) = \frac{(\rho_2 L)^k}{k!} e^{-\rho_2 L}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.11)$$

反向车道中相邻两辆车辆的间隔距离服从指数分布。反向车道中两辆相邻车辆之间的间隔为 d 的概率密度函数表示为：

$$f(d) = \rho_2 e^{-\rho_2 d} \quad (3.12)$$

反向车道中，两辆相邻车辆之间的平均间隔距离为：

$$\begin{aligned} E[d] &= \int_0^L df(d)dd = \int_0^L d \rho_2 e^{-\rho_2 d} dd \\ &= \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 d} \left(L + \frac{1}{\rho_2} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

根据公式(3.13)可知，反向车道中的车辆密度 ρ_2 对反向车道中车辆之间的平均距离大小具有较大的影响，对于不同范围的 ρ_2 ，计算数据量的方法是不同的。如图3.6所

示, 情况 *a*: $\rho_2 < 1/2r_0 - e^{-2r_0L}(L+1/2r_0)$, 此时车辆之间的平均距离的大小为 $E[d] > 2r_0$; 情况 *b*: $1/2r_0 - e^{-2r_0L}(L+1/2r_0) \leq \rho_2 \leq 1/r_0 - e^{-r_0L}(L+1/r_0)$, 此时车辆之间的平均距离的大小为 $r_0 < E[d] < 2r_0$; 情况 *c*: $\rho_2 > 1/r_0 - e^{-r_0L}(L+1/r_0)$, 此时车辆之间的平均距离的大小为 $0 < E[d] < r_0$ 。因此, 针对不同的 ρ_2 取值范围, *v* 通过 V2V 链路可以得到不同的数据量, 进而得到可实现吞吐量的封闭表达式。

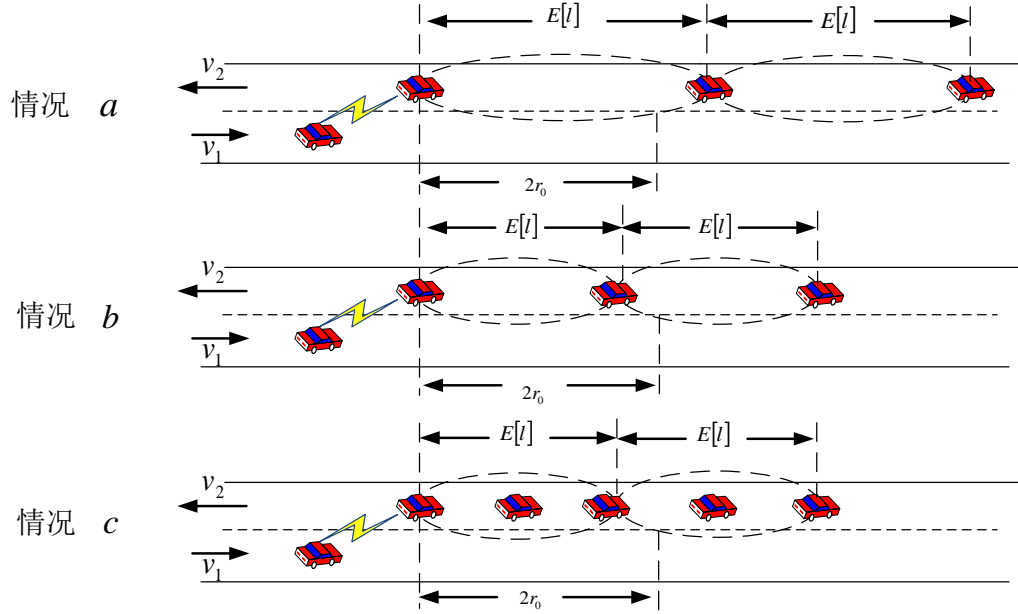


图 3.6 反向车道中车辆密度对弹性分区大小的影响示意图

情况 *a*: 即 $\rho_2 < 1/2r_0 - e^{-2r_0L}(L+1/2r_0)$ 。在这个范围内, *v* 相对于静止的中继车辆移动 $2r_0$, 能够使一条 V2V 链路能够有效不间断连接, 并且 $E[l] = E[d]$ 。*v* 能够从一个弹性分区得到的平均数据量 $C_v^{E[l]}$ 可以表示为:

$$C_v^{E[l]} = 2 \int_0^{r_0} I_{V2V}(y) dy \quad (3.14)$$

由公式 (3.8)、(3.10)、(3.13) 和 (3.14) 可知, *v* 在第一种情况下通过 V2V 获得的数据量 C_v^1 为:

$$C_v^1 = \frac{2LB_v}{d_0 v_1 \ln 2} \left\{ r_0 \ln \left(1 + \frac{P_v}{N} r_0^{-2} \right) - 2 \sqrt{\frac{P_v}{N}} \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{P_v}{N}} r_0^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (3.15)$$

式中: $d_0 = 1/\rho_2 - e^{-\rho_2 L}(L+1/\rho_2)$ 。

情况 *b*: 即 $1/2r_0 - e^{-2r_0L}(L+1/2r_0) \leq \rho_2 \leq 1/r_0 - e^{-r_0L}(L+1/r_0)$ 。在这个范围内, 反向车道中车辆之间的平均距离是 $r_0 < E[d] < 2r_0$ 。如图 3.7 所示, 此时 $E[l] = E[d]$, *v* 能够从一个弹性分

区得到的平均数据量 $C_v^{E[l]}$ 可以表示为:

$$C_v^1 = \int_0^{r_0} I_{V2V}(y) dy + \int_0^{E[l]-r_0} I_{V2V}(y) dy \quad (3.16)$$

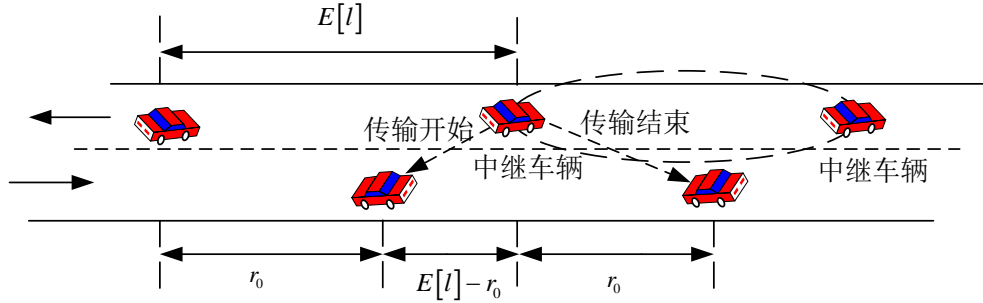


图 3.7 从 V2V 建立到 V2V 断开的过程示意图

公式 (3.16) 中第一部分指的是目标车辆接近中继车辆的过程中接收到的数据量。第二部分是目标车辆远离中继车辆的过程中接收到的数据量。由公式 (3.8)、(3.10)、(3.13) 和 (3.16) 可知, v 在第二种情况下通过 V2V 获得的数据量 C_v^2 为:

$$C_v^2 = \frac{LB_V}{d_0 v_1 \ln 2} \left\{ r_0 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} r_0^{-2} \right) + d_1 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} d_1^{-2} \right) - 2\sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} r_0^{-1} \right) + \arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} d_1^{-1} \right) - \pi \right] \right\} \quad (3.17)$$

式中: $d_1 = 1/\rho_2 - e^{-\rho_2 L} (L + 1/\rho_2) - r_0$ 。

情况 c : 即 $\rho_2 > 1/r_0 - e^{-\rho_2 L} (L + 1/r_0)$ 。在此范围内, 在路段长度为 $2r_0$ 的反向车道中至少存在三辆车辆。并根据 ESCS 下一中继车辆的选择标准, $E[l] \neq E[d]$ 。这里定义 $y = \lfloor x \rfloor$ 为一个整数函数, 表示不超过实数 x 的最大整数, 并且假设在 $2r_0$ 范围内存在 $\lfloor 2r_0/E[d] \rfloor$ 辆中继车辆。因此, 弹性分区的平均大小可以表示为:

$$E[l] = \left\lfloor \frac{2r_0}{E[d]} \right\rfloor E[d] = \left\lfloor 2r_0 \left/ \frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 d} \left(L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right. \right\rfloor \left(\frac{1}{\rho_2} - e^{-\rho_2 d} \left(L + \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \quad (3.18)$$

根据公式 (3.8)、(3.10)、(3.13) 和 (3.18) 可知, v 在第二种情况下通过 V2V 获得的数据量 C_v^3 为:

$$C_v^3 = \frac{LB_V}{d_2 v_1 \ln 2} \left\{ r_0 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} r_0^{-2} \right) + d_1 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} d_3^{-2} \right) - 2\sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} r_0^{-1} \right) + \arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} d_3^{-1} \right) - \pi \right] \right\} \quad (3.19)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} d_2 = \left\lfloor 2r_0 / (1/\rho_2 - e^{-\rho_2 L} (L+1/\rho_2)) \right\rfloor (1/\rho_2 - e^{-\rho_2 L} (L+1/\rho_2)) \\ d_3 = \left\lfloor 2r_0 / (1/\rho_2 - e^{-\rho_2 L} (L+1/\rho_2)) \right\rfloor (1/\rho_2 - e^{-\rho_2 L} (L+1/\rho_2)) - r_0 \end{cases} \circ$$

根据公式 (3.1)、(3.6)、(3.15)、(3.17) 和 (3.19), 可以得到在三种情况下 V 下载数据可以达到的吞吐量 η^1 、 η^2 和 η^3 为:

$$\eta^1 = \frac{2B_I}{(L+2\sqrt{a})\ln 2} \left[\sqrt{a} \ln \left(1 + \frac{P_I/N}{r_I^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{b} \arctan \sqrt{\frac{a}{b}} + 2\sqrt{c} \arctan \sqrt{\frac{a}{c}} \right] + \quad (3.20)$$

$$\frac{2LB_V}{d_0(L+2\sqrt{a})\ln 2} \left\{ r_0 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} r_0^{-2} \right) - 2\sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} r_0^{-1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \right\}$$

$$\eta^2 = \frac{2B_I}{(L+\sqrt{a})\ln 2} \left[\sqrt{a} \ln \left(1 + \frac{P_I/N}{r_I^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{b} \arctan \sqrt{\frac{a}{b}} + 2\sqrt{c} \arctan \sqrt{\frac{a}{c}} \right] + \quad (3.21)$$

$$\frac{LB_V}{d_0(L+\sqrt{a})\ln 2} \left\{ r_0 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} r_0^{-2} \right) + d_1 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} d_1^{-2} \right) - \right.$$

$$\left. 2\sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} r_0^{-1} \right) + \arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} d_1^{-1} \right) - \pi \right] \right\}$$

$$\eta^3 = \frac{2B_I}{(L+\sqrt{a})\ln 2} \left[\sqrt{a} \ln \left(1 + \frac{P_I/N}{r_I^2 + h^2} \right) - 2\sqrt{b} \arctan \sqrt{\frac{a}{b}} + 2\sqrt{c} \arctan \sqrt{\frac{a}{c}} \right] + \quad (3.22)$$

$$\frac{LB_V}{d_2(L+\sqrt{a})\ln 2} \left\{ r_0 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} r_0^{-2} \right) + d_1 \ln \left(1 + \frac{P_V}{N} d_3^{-2} \right) - \right.$$

$$\left. 2\sqrt{\frac{P_V}{N}} \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} r_0^{-1} \right) + \arctan \left(\sqrt{\frac{P_V}{N}} d_3^{-1} \right) - \pi \right] \right\}$$

其中: $a = r^2 - m^2 - h^2$, $b = m^2 + h^2$, $c = m^2 + h^2 + \frac{P_I}{N}$ 。

在本章所提出的策略中, V 下载数据可实现的吞吐量可以表示为:

$$\eta = \begin{cases} \eta^1, & \rho_2 < 1/2r_0 - e^{-2\rho_2 L} (L+1/2r_0) \\ \eta^2, & 1/2r_0 - e^{-2\rho_2 L} (L+1/2r_0) \leq \rho_2 \leq 1/r_0 - e^{-\rho_2 L} (L+1/r_0) \\ \eta^3, & \rho_2 > 1/r_0 - e^{-\rho_2 L} (L+1/r_0) \end{cases} \quad (3.23)$$

3.3.3 最优参数分析

根据本章所提出的 ESCS, 随着 V2V 链路最大有效连接范围 r_0 的增大, V 下载数据

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/845220222131011104>