

摘要

蜂窝车联网技术（Cellular Vehicle-to-Everything, C-V2X）是近年来的研究热点之一。C-V2X 包括 V2V（Vehicle-to-Vehicle）、V2I（Vehicle-to-Infrastructure）、V2P（Vehicle-to-Person）、V2N（Vehicle-to-Network）等多种通信类型，其中 V2V 通信是目前解决道路交通安全问题的主要技术之一。为了提高 V2V 通信的性能，本文针对资源分配和模式切换展开研究。

本文首先介绍了蜂窝车联网的系统结构和通信类型，分析了 V2V 通信模式以及不同模式下通信链路的主要性能指标，探讨了 V2V 通信的频谱资源分配模式，并分析了直通模式下多车频谱复用可能造成的干扰以及资源分配常用研究方法。

为提高蜂窝车联网的频谱资源利用率和吞吐量，本文重点研究了基于直通模式的 V2V 通信资源分配问题，包括频谱资源分配和功率控制。针对 V2V 频谱复用模式，即 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源，本文提出了频谱资源分配算法。仿真结果显示，提出的算法可以很好地降低干扰。然后，本文提出了基于严格潜在博弈的功率控制方案。仿真结果显示，提出的功率控制方案能使 V2V 直通链路获得更高的平均吞吐量和总能量效率。

最后，本文考虑多个 V2V 车辆对在动态行驶过程中的通信模式切换场景。对于车辆位置的不确定性，本文建立基于卡尔曼滤波算法的车辆状态预测模型，并通过仿真证明了车辆状态预测模型得到的最优估计位置能够有效降低测量位置的误差。然后，本文提出了基于车辆间最优估计距离的动态 V2V 通信模式自适应切换方案。本文对不同通信模式下的 V2V 通信链路的总吞吐量进行仿真分析，结果显示同时存在两种通信模式时，V2V 通信链路的总吞吐量最优。在此基础上，对车辆行驶过程中不同模式切换方法进行仿真分析。结果表明，相比于基于车辆间测量距离的模式切换方法，本文提出的模式切换方案能使 V2V 通信链路获得更高的平均吞吐量。

关键词： 蜂窝车联网；频谱资源分配；功率控制；模式切换；吞吐量；能量效率

Abstract

Cellular Vehicle-to-Everything(C-V2X) is one of the research hotspots in recent years. C-V2X includes V2V (Vehicle-to-Vehicle), V2I (Vehicle-to-Infrastructure), V2P (Vehicle-to-Person), V2N (Vehicle-to-Network) and other communication types. V2V communication is currently one of the main technologies to solve the security issues for road traffic. In order to improve the performance of V2V communication, this paper studies resource allocation and mode switching.

Firstly, the system structure and communication types of C-V2X networks are introduced in this paper. The V2V communication modes and the main performance indicators of communication links in different modes are analyzed. The spectrum resource allocation modes for V2V communication are investigated. And the possible interference caused by multi-vehicle spectrum reuse in the direct mode and common research methods for resource allocation are analyzed.

In order to improve the spectrum resource utilization and throughput of C-V2X networks, this paper focuses on the resource allocation problem for V2V communication based on the direct mode, including spectrum resource allocation and power control. For the V2V spectrum reuse mode where V2V direct links reuse cellular user uplink spectrum resources, a spectrum resource allocation algorithm is proposed in this paper. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce interference well. Then, a power control scheme based on the exact potential game is proposed. The simulation results show that the proposed power control scheme can achieve higher average throughput and total energy efficiency for the V2V direct links.

Finally, this paper considers the communication mode switching scenarios of multiple V2V vehicles pairs in the dynamic driving process. Due to the uncertainty of vehicle position, the vehicle state prediction model based on the Kalman filter algorithm is established in this paper. And the simulation proves that the optimal estimated position obtained by the vehicle state prediction model can effectively reduce the error of the measured position. Then, a dynamic V2V communication mode adaptive switching scheme based on the optimal estimated distance between vehicles is proposed. This paper simulates

the total throughput of the V2V communication links in different communication modes. The results show that the total throughput of the V2V communication links is optimal when there are two communication modes simultaneously. On this basis, the simulation analysis of different mode switching methods in the driving process is carried out. The results show that compared with the mode switching method based on the measured distance between vehicles, the proposed mode switching scheme can achieve higher average throughput for V2V communication links.

Keywords: C-V2X networks; spectrum resource allocation; power control;
mode switching; throughput; energy efficiency

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
符号说明.....	VI
缩略词列表	VII
1 绪论	
1.1 课题的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状及趋势	3
1.3 论文主要工作和各章节内容安排	6
2 蜂窝车联网中 V2V 通信模式及资源分配概述	
2.1 引言	8
2.2 蜂窝车联网的系统结构及通信类型	8
2.3 V2V 通信模式及性能指标	10
2.4 V2V 通信的资源分配.....	13
2.5 本章小结	16
3 基于直通模式的 V2V 通信资源分配研究	
3.1 引言.....	18
3.2 系统模型	18
3.3 频谱资源分配算法	22

3.4 基于严格潜在博弈的功率控制方案	25
3.5 仿真分析	32
3.6 本章小结	39
4 V2V 通信模式切换研究	
4.1 引言	41
4.2 系统模型	41
4.3 基于卡尔曼滤波算法的车辆状态预测模型	43
4.4 动态 V2V 通信模式自适应切换方案	45
4.5 仿真分析	48
4.6 本章小结	54
5 总结与展望	
5.1 全文总结	55
5.2 工作展望	56
致谢	57
参考文献	59
附录 攻读硕士学位期间参与项目和研究成果	65

符号说明

$\{x\}$	: 元素 x 组成的集合
$\log_2(\cdot)$	: 以 2 为底的对数
$\log_{10}(\cdot)$	: 以 10 为底的对数
$\sum(\cdot)$	: 求累积和
$\max(\cdot)$	: 求最大值
$\min(\cdot)$	: 求最小值
$\arg \max(f(x))$	: 求使得 $f(x)$ 取得最大值时的变量 x
$\forall x$	: 对于任意的 x
$s.t. x$	: 受限于 x
$\mathbf{I}$	: 单位矩阵
$\mathbf{n}$	: 小写黑体表示向量
$\mathbf{N}$	: 大写黑体表示矩阵
$I_v(\cdot)$	: 第一类修正贝塞尔函数
$\Gamma(\cdot)$	: Gamma 函数
$f_z(\cdot)$	: 随机变量 Z 的概率密度函数
$P(\cdot)$	: 求概率

缩略词列表

ITS	: Intelligent Transport System	智能交通系统
RSU	: Road Side Unit	路侧单元
BS	: Base Station	基站
DSRC	: Dedicated Short Range Communication	专用短程通信技术
C-V2X	: Cellular Vehicle-to-Everything	蜂窝车联网技术
CSMA/CA	: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	带冲突避免的载波侦听多路访问
3GPP	: 3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
LTE	: Long Term Evolution	长期演进
LTE-V2X	: Long Term Evolution Vehicle-to-Everything	基于长期演进的车联网技术
5G	: 5-th Generation	第五代移动通信
5G NR-V2X	: 5th Generation New Radio Vehicle-to-Everything	基于 5G 新空口的车联网技术
V2X	: Vehicle-to-Everything	车联网技术
V2V	: Vehicle-to-Vehicle	车与车
V2I	: Vehicle-to-Infrastructure	车与基础设施
V2P	: Vehicle-to-Person	车与人
V2N	: Vehicle-to-Network	车与网络
QoS	: Quality of Service	服务质量
SDN	: Software Defined Network	软件定义网络
MEC	: Mobile Edge Computing	移动边缘计算
D2D	: Device-to-Device	设备到设备
4G	: 4-th Generation	第四代移动通信
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiple Access	正交频分多址
MME	: Mobility Management Entity	移动管理实体
S-GW	: Serving Gateway	服务网关

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

P-GW	:	Packet Data Network Gateway	分组数据网关
SINR	:	Signal to Interference plus Noise Power Ratio	信干噪比
RB	:	Resource Block	资源块
PSO	:	Particle Swarm Optimization	粒子群优化
RMSE	:	Root Mean Square Error	均方根误差

1 绪论

1.1 课题的背景和意义

随着社会经济和工业化进程的不断发 展,越来越多的家庭拥有汽车。汽车数量的增多在提高人们出行效率、货物运输效率、改变交通方式的同时,也带来了诸多交通安全问题。交通安全问题影响了人们的生活工作,对社会对家庭都造成了很严重的后果。为了缓解道路阻塞问题,减少交通事故的发生,保证人们的出行安全,智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)被研究人员提出,目前已成为热门的研究方向。

车联网是实现未来智能交通系统的关键,无线网络通信技术的飞速发展推动了车联网的发展。车联网是由道路上的车辆、路侧单元(Road Side Unit, RSU)、基站(Base Station, BS)和核心网接入设备等组成的网络系统,网络结构灵活多变,具有高速移动性。车联网能给道路上的车辆提供防碰撞预警、路况查询、路线导航等安全服务类应用以及视频娱乐、语音短信等非安全服务类应用。目前,车联网通信主要包括两种通信技术:专用短程通信技术(Dedicated Short Range Communication, DSRC)和蜂窝车联网技术(Cellular Vehicle-to-Everything, C-V2X)。

在车联网的早期研究中,基于 IEEE802.11p 的 DSRC 技术^[1]较为流行,主要用于车辆与车辆之间或者车辆与基础设施之间的通信。但是,DSRC 技术存在明显不足。首先是通信覆盖距离短,加上车辆处于高速行驶状态,从而导致车辆与车辆间通信经常中断。其次,车辆通过 DSRC 网关接入互联网需要广泛部署基础设施,系统部署成本太高。然后,DSRC 技术缺少集中控制单元。最后,由于 IEEE802.11p 协议的带冲突避免的载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)机制的随机接入特性,当道路上车辆密度较大时,车辆间的信道竞争会非常激烈。近年来,随着蜂窝通信技术的不断普及和更新,由第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)定义的 C-V2X 逐渐成为车联网研究领域的主要通信技术,基于 C-V2X 的网络系统被称为蜂窝车联网。C-V2X 包含基于长期演进(Long Term Evolution, LTE)的车联网技术(Long Term Evolution Vehicle-to-

Everything, LTE-V2X) 和基于第五代移动通信 (5-th Generation, 5G) 新空口的车联网技术 (5th Generation New Radio Vehicle-to-Everything, 5G NR-V2X), 其中 LTE-V2X 向 5G NR-V2X 演进。车联网技术 (Vehicle-to-Everything, V2X) 包括车与车 (Vehicle-to-Vehicle, V2V)、车与基础设施 (Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、车与人 (Vehicle-to-Person, V2P)、车与网络 (Vehicle-to-Network, V2N) 这四种通信类型^[2], 其中 V2V 是解决交通安全问题的重要途径, 也是本文的研究方向。蜂窝网络本身不支持 V2V 间的直接通信, 当蜂窝网络中车辆节点过多时, 车辆间频繁的数据传输会导致基站负载, 造成网络拥塞严重。C-V2X 提供了 Uu 和 PC5 两种通信接口^[3], Uu 接口支持蜂窝通信, PC5 接口支持直接通信。因此, 在蜂窝车联网中, V2V 通信通过 PC5 接口能够实现直接通信, 减轻基站负荷, 传输时延低且可靠性高。

无线资源管理在蜂窝网络中有非常重要的作用, 可以为用户提供业务质量保证。常见的无线资源管理包括频谱资源分配、功率控制、信道分配等等。无线资源管理可以在保证网络系统服务质量 (Quality of Service, QoS) 的同时尽可能地提高系统频谱资源利用率和系统容量。在蜂窝车联网中, 基于直通模式的 V2V 直通链路可通过复用蜂窝用户的频谱资源, 提高系统频谱资源利用率。然而, 由于频谱资源复用存在严重的干扰问题, 会影响 V2V 直通链路的吞吐量, 所以我们需要研究如何合理地进行频谱资源分配和车辆发射功率控制, 在降低干扰的同时尽可能地提高 V2V 直通链路吞吐量。

在蜂窝车联网中, 基站是控制中心, 可以接收其覆盖范围内所有车辆发送的数据。为了提高车辆行驶的安全性, 我们需要实现车辆间的互相通信, 特别是车辆位置信息等安全相关消息的传输。因此, 我们需要研究如何在车辆行驶过程中选择合适的 V2V 通信模式, 实现动态模式自适应切换, 以提高 V2V 通信链路的吞吐量。

综合上述出发点, 本课题主要围绕蜂窝车联网中 V2V 通信的资源分配和模式切换进行研究。本文首先介绍了 C-V2X 及其关键技术, 包括 V2V 通信的两种通信模式: 蜂窝模式和直通模式, 并分析了不同通信模式下的频谱资源分配模式以及频谱复用造成的干扰。然后, 我们研究基于直通模式的 V2V 通信资源分配问题。提出了有效的频谱资源分配算法和基于博弈论的功率控制模型, 仿真结果表明 V2V 直通链路

的平均吞吐量等性能指标得到了提高。最后，我们研究了 V2V 通信模式切换问题，提出了基于车辆间最优估计距离的动态 V2V 通信模式自适应切换方案。仿真结果表明提出的模式切换方案可以很好地提高 V2V 通信链路的平均吞吐量。

1.2 国内外研究现状及趋势

1.2.1 车联网研究现状

国外对车联网的研究开展地较早，美日欧等国处于领先地位。上世纪九十年代，美国就提出了 DSRC 技术。IEEE 从 2004 年开始制定 IEEE802.11p 协议，用于车辆间通信。2009 年 12 月，美国交通部发布了《ITS Strategic Research Plan: 2010-2014》，“车联网”构想被第一次提出，其目标是利用无线通信技术实现车辆、道路基础设施以及其他通信设备之间的相互通信，形成一个地面交通系统。到 2012 年，美国对关于 ITS 的战略研究计划进行了更新。相应地，日本也推出车辆信息与通信系统，该系统收集道路交通信息，然后实时地为驾驶员提供预警消息和路线导航等服务，很好地缓解了道路阻塞问题，保证了交通安全。欧洲所有国家推行的是远程信息处理技术，主要服务于车辆导航和路况分析等应用。欧洲各国车联网同步发展，由欧洲通信标准化组织制定车联网通信标准。

国内的车联网研究起步相对国外较晚，从 2008 年开始，国家自然科学基金委员会对车联网相关研究课题进行资助，科技部“863”项目也开始围绕车间通信、车路协同技术等方面展开研究。不同于有些国家采用基于 IEEE802.11p 协议的 DSRC 技术，我国主推基于蜂窝网络的 V2X 技术。2015 年，工信部发布关于智能网联汽车的项目，并设置试点示范区，目前已经在国内多地展开基于 LTE 的 V2X 试验以及基于 LTE V2X 和 5G 技术的智能交通示范应用。近年来，国内外学术界对车联网领域展开诸多研究。文献[4,5]介绍了车联网系统、车联网的需求、解决方法和挑战。文献[6,7]主要介绍了车联网的通信协议和相关应用等。在之前的一些车联网研究中，作者研究了基于 IEEE802.11p 的 V2V 多跳连接概率^[8,9]和 V2V 通信中消息广播传输的多跳时延^[10]。由于基于 IEEE802.11p 的 DSRC 技术存在扩展性差、容量低、持续性中断等

缺点^[11]，蜂窝车联网通信技术成为实现智能交通系统的关键技术。同时，随着 5G 时代的来临，5G 关键技术与车联网的结合也成为研究热点。文献[12,13]提出在车联网中使用毫米波通信，以达到更好的可靠性、更低的延迟和更高的数据传输速率。文献[14-16]将软件定义网络（Software Defined Network, SDN）和移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）引入 5G 车联网中，加强对车联网系统的控制，以提高车联网的通信质量。文献[17]指出设备到设备（Device-to-Device, D2D）通信作为 5G 关键技术之一，允许相似设备在许可的蜂窝网频段上直接通信，不用经过基站和核心网，进而减少了通信时延和基站压力。基于蜂窝网络的 D2D 通信技术被视为实现 V2V 直接通信的有效方法。

1.2.2 C-V2X 研究现状

近几年来，C-V2X 引起了人们的注意。DSRC 是早期使用的车联网技术，主要是美国等国家在使用，而目前我国主要推进的车联网通信技术是 C-V2X。按照时间先后顺序，3GPP 制定的 C-V2X 标准化研究工作可以分为三个阶段：LTE-V2X 标准，LTE-eV2X 标准和 5G NR-V2X 标准。3GPP 最先开始制定的是 LTE-V2X 标准，并于 2017 年发布 R14 版本 LTE-V2X 相关标准化工作，主要包括通信业务需求、系统架构、空口设计和交通安全研究等方面。LTE-eV2X 是支持 V2X 更高级、更复杂业务场景的增强型标准，支持该标准的 3GPP R15 版本标准于 2018 年完成。R15 在保持与 R14 向后兼容性的同时，提高了 V2X 直通模式的可靠性、实时性和传输速率等通信性能。5G NR-V2X 标准的制定工作于 2018 年 6 月启动，主要研究 5G 蜂窝网络下的车联网通信，目标是实现更高速率、更高可靠性和更低时延的车联网信息传输。5G NR-V2X 是 LTE-V2X 和 LTE-eV2X 的演进。对于 C-V2X 来说，目前较多的是关于 LTE-V2X 的研究。文献[18]经过仿真分析，证明 LTE-V2X 技术性能要优于 DSRC 技术。文献[19]研究了基于 LTE 网络的 V2X 服务。文献[20]提出基于第四代移动通信（4-th Generation, 4G）时分 LTE 网络的 LTE-V 系统，将其作为实现 V2X 通信的一种技术方案，并提出了 LTE-V 的两种通信模式：LTE-V-direct 和 LTE-V-cell。文献[21]也提出了基于 4G LTE 网络的集中式车联网 LTE4 V2X，并分析了多跳扩展对于蜂窝

车联网性能的提高。文献[22]指出基于 LTE 蜂窝网络的 V2X 技术包括通过集中调度资源分配的蜂窝通信和通过分布式自主选择的直接通信,具有低时延、高可靠性、高速移动性和覆盖范围广等特点。文献[23]研究了基于 PC5 接口的 C-V2X 模式 4 中的 V2V 直接通信性能。文献[24]指出单小区点对多点传输技术是一种适合在车辆之间传输数据的蜂窝技术,并针对该技术展开研究,以提高 C-V2X 通信的可靠性。文献[25]研究了部署多接入边缘计算设备来减少 C-V2X 中的端到端时延,避免远程云端计算带来的时延。文献[26]提出将 DSRC 技术和蜂窝网络技术进行互联,以实现高效的 V2X 通信,满足更多的 V2X 应用需求。为满足车联网越来越高的需求,文献[27,28]将 5G 与 V2X 相结合,介绍了 5G V2X 超低延迟和超高可靠性的服务和用例。文献[29]将 5G 网络切片技术应用于 V2X 服务中,以提高道路交通的流动性和安全性。文献[30,31]将 sidelink D2D 通信作为加强 5G V2X 通信的关键技术。

1.2.3 V2V 通信资源分配及通信模式研究现状

为了提高车联网系统的吞吐量和频谱资源利用率,需要对 V2V 用户进行合理的资源分配。如今,国内外关于 V2V 通信资源分配的研究主要包括 V2V 用户的频谱资源分配、车辆功率控制、信道分配等方面。文献[32]在车联网中使用正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 进行警报消息广播传输,以提高消息传输可靠性和资源利用率。文献[33-36]主要是研究信道选择和车辆发射功率控制,使得车联网内干扰最小的同时数据传输总速率最快。文献[37]通过资源分配和功率控制来达到系统的时延和可靠性限制。文献[38]研究了在蜂窝网管理下,基于 D2D 通信的 V2V 通信资源分配策略,将道路上的车辆分成多个集群,每个集群使用一个蜂窝用户的资源,并提出了一种基于动态规划的聚类优化算法。文献[39]研究了基于 D2D 的安全关键型 V2X 通信无线资源管理优化问题,并提出基于簇的资源块共享和功率分配启发式算法来解决优化问题。文献[40]通过优化 D2D 资源分配来实现车联网时延的最小化。文献[41]为了最大化同时传输的 V2V 数量,对基于 D2D 通信的车联网进行了资源分配。文献[42]提出了一种新的资源优化分配算法,用于最大化 V2I 链路和 V2V 链路的吞吐量。对于无线资源分配问题,常利用博弈论来解决。

文献[43-48]研究了基于博弈论的资源分配模型。基于博弈模型的资源分配已成为车联网无线资源管理领域的研究热点。

在传统的 D2D 通信系统研究中,为了最大限度地提高整个系统的吞吐量,经常联合模式选择和资源分配进行研究^[49]。文献[50]研究了蜂窝网络下的 D2D 通信设备间的模式切换,提出的模式切换算法可以显著提高系统能效。对于车联网中的 V2V 通信模式,可以根据数据传输是否经过基站,分为蜂窝模式和直通模式^[51]。现有一些研究人员对 V2V 通信模式选择展开研究。文献[51]提出了一种 V2V 通信模式选择算法来避免 sidelink 资源的过载,改善了 V2V 直通链路在网络容量和网络拥塞等方面的性能。文献[52]提出了一种最优访问模式选择和资源分配方案,车辆用户在蜂窝通信和直接通信之间选择合适的接入模式来最大化用户效用。

1.3 论文主要工作和各章节内容安排

本课题来源:湖北省科技厅国际合作项目——“5G 移动通信网络关键技术研究”(项目编号:2016AHB006)。

本文主要是对蜂窝车联网中 V2V 通信的资源分配和模式切换进行分析和研究。各章节及内容安排如下:

第一章主要介绍了本文的研究背景和意义,同时介绍了车联网、C-V2X 以及 V2V 通信资源分配和通信模式等方面的国内外研究现状。

第二章主要介绍了蜂窝车联网的系统结构以及通信类型,研究了 V2V 通信模式和 V2V 通信链路的性能指标,探讨了 V2V 通信的频谱资源分配模式,并分析了频谱资源复用造成的干扰以及资源分配常用研究方法。

第三章围绕基于直通模式的 V2V 频谱资源分配和功率控制展开研究。针对系统频谱资源紧缺的问题, V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源进行通信,并提出了一种频谱资源分配算法。同时,为提高 V2V 直通链路的吞吐量,提出了基于严格潜在博弈的功率控制方案,并进行仿真分析和比较。

第四章围绕 V2V 通信模式切换展开研究。针对车辆位置的不确定性,建立了基于卡尔曼滤波算法的车辆状态预测模型,并通过仿真证明了车辆状态预测模型得到

的最优估计位置能够降低测量位置的误差。由于通信设备间的通信模式可以根据距离来选择^[53]，因此本文提出基于车辆间最优估计距离的动态 V2V 通信模式自适应切换方案，并对 V2V 通信性能进行了仿真分析及比较。

第五章对全文的研究成果进行总结和归纳，概述了本文的研究内容和创新之处，并指出存在的不足，最后对未来的研究工作做出展望。

2 蜂窝车联网中 V2V 通信模式及资源分配概述

2.1 引言

V2X 是将车辆与其他通信设备相连接的新一代车联网通信技术，其中 V 代表车辆，X 代表车联网系统中其他通信设备（例如车、人、路侧基础设施和核心网）。C-V2X 是由 3GPP 定义的蜂窝车联网技术，包含 LTE-V2X 和 5G NR-V2X。基于 C-V2X 的网络系统被称为蜂窝车联网。V2V 通信是 C-V2X 的重要组成部分，采用不同接口的 V2V 通信模式适用于不同的场景。在不同的 V2V 通信模式下，需要采取不同的频谱资源分配模式，常通过 V2V 直通链路复用蜂窝用户频谱资源来提高系统吞吐量和频谱资源利用率。

2.2 蜂窝车联网的系统结构及通信类型

2.2.1 系统结构

C-V2X 不仅能在高速移动环境下提供高可靠性、低时延、高传输速率的通信能力，还能提供更广阔的信号覆盖范围。3GPP 制定的 C-V2X 标准化研究工作包括 LTE-V2X 标准、LTE-eV2X 标准和 5G NR-V2X 标准，其中 5G NR-V2X 是 LTE-V2X 和 LTE-eV2X 的演进。目前，比较成熟的蜂窝车联网技术是 LTE-V2X。接下来我们以 LTE-V2X 车联网为例，介绍蜂窝车联网的系统结构。LTE 通信网络主要由核心网、接入网组成，车联网通过基站与核心网连接，组成 LTE-V2X 车联网。在 LTE-V2X 车联网中，基站是所有蜂窝用户、车辆用户的控制中心，属于集中式调度。基站能够对用户频谱资源分配、用户功率控制、车辆间通信模式切换等方面进行控制。LTE-V2X 车联网系统结构图如图 2.1 所示。

LTE-V2X 车联网的终端包括车辆、蜂窝用户等；接入网由基站组成，可以为终端用户提供进入核心网络的接口；核心网主要由移动管理实体（Mobility Management Entity, MME）、服务网关（Serving Gateway, S-GW）、分组数据网关（Packet Data

Network Gateway, P-GW) 等组成, MME 负责身份验证、存储用户位置信息和移动性管理等控制功能。S-GW 主要负责数据包转发和路由。P-GW 负责 IP 地址分配、分组的路由转发等功能。LTE 具有传输速率快、时延低等优点, 且 LTE 网络基础设施已实现广泛部署, 将 LTE 与车联网相结合能很好地利用已有基础设施, 减少组网成本。同时, 从技术演进的角度来看, LTE-V2X 可以支持平滑演进到 5G-V2X, 具有很好的研究前景。

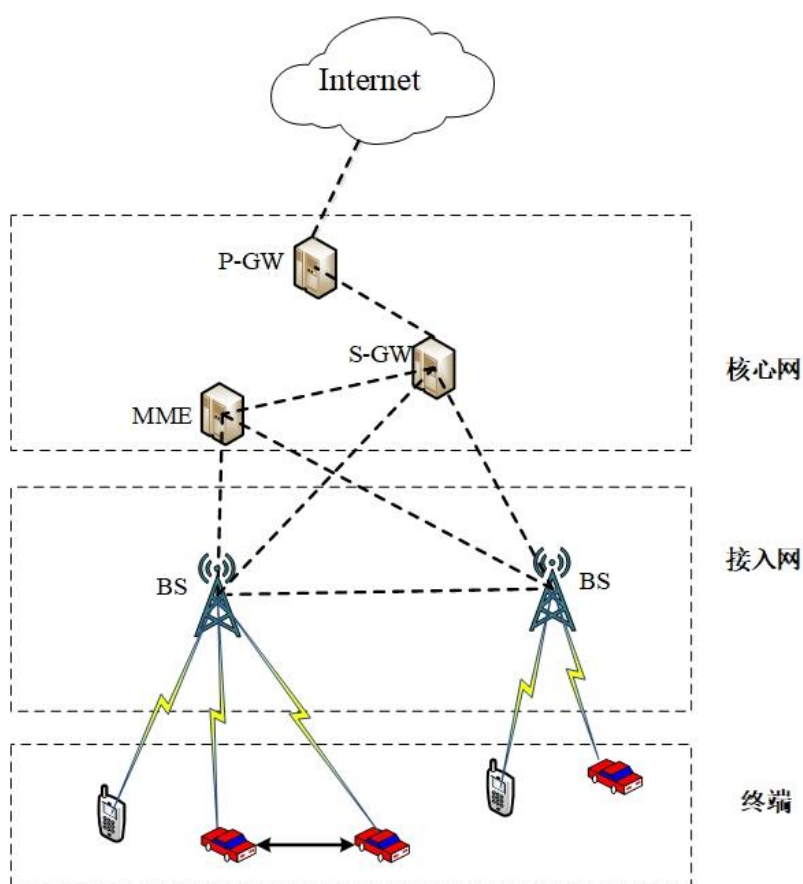


图 2.1 LTE-V2X 车联网系统结构图

2.2.2 通信类型

C-V2X 是在蜂窝网络的基础上, 实现车辆与一切事物相互连接的车联网通信技术。在蜂窝车联网中, 按照业务类型, C-V2X 可以分为 V2V、V2I、V2P 和 V2N 四种通信类型, 如图 2.2 所示。

V2V 通信是指车辆间的消息传输, 每个车辆可以实时获取周围车辆的位置、速

度等状态信息。V2V 通信可以分为安全应用和非安全应用。安全应用包括防碰撞预警,提供周围车辆信息等。此类应用消息的传递需要保证高可靠性和高实时性。非安全应用包括信息娱乐服务和高效驾驶服务。信息娱乐服务就是为车内用户提供手机通讯、上网娱乐社交等通信能力;高效驾驶服务就是为车辆提供智能导航,最佳行驶路线规划等服务,旨在提高车辆出行效率。

V2I 通信是指车辆与路边基础设施(例如 RSU、红绿灯等)之间的消息传输。路边基础设施可以给车辆发送周围道路的交通事故信息、红绿灯信息以及排队预警等消息,帮助驾驶员提高警觉,避免交通事故的发生。

V2P 通信是指车辆与行人身上的通信设备(例如手机、智能手表等)间的消息传输。通过 V2P 通信,车辆可以很好地与行人进行信息交互,有效避免交通事故发生。

V2N 通信是指车辆与核心网络之间的消息传输。通过 V2N 通信,车辆可以获取云端的海量信息,云端也可以将远处的车辆信息、交通事故信息等发送给车辆。

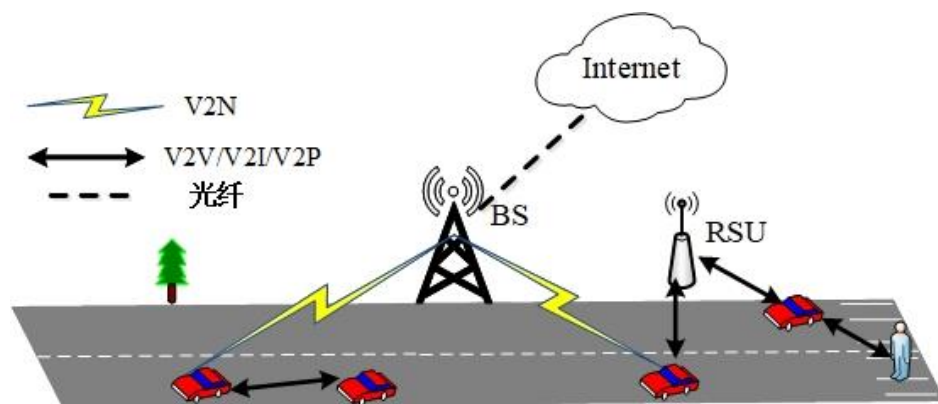


图 2.2 C-V2X 的不同通信类型场景图

2.3 V2V 通信模式及性能指标

2.3.1 V2V 通信模式

C-V2X 包含两种通信接口:一种是 Uu 接口,也称为蜂窝通信接口。采用 Uu 接口的 V2X 通信,由基站作为控制中心进行频谱资源分配、拥塞控制等等,提高了网络可靠性和数据传输可持续性,适用于远距离传输。另一种是 PC5 接口,也称为直连通信接口。采用 PC5 接口的 V2X 通信,以 LTE-D2D 技术为基础,适用于车车间、

车人间、车路间的直接通信。PC5 接口支持调度式和终端自主式的资源分配方式。

在本文中，我们考虑采用两种不同接口的 V2V 通信模式，如图 2.3 所示。

1) 蜂窝模式

在 V2V 蜂窝模式下，车辆间采用 Uu 接口进行通信。由于车辆间通信需要通过基站 BS 进行中继，因此也可称为中继模式。该通信模式实现了远距离车辆间信息分发，车辆可以通过基站接入核心网，进入云端，从而获取其他远距离车辆的状态信息和道路交通安全信息等。

2) 直通模式

在 V2V 直通模式下，车辆间采用 PC5 接口进行通信。该通信模式实现了相邻车辆间的直接通信，满足了低时延、高可靠性的需求，支持网络的高速移动性变化。

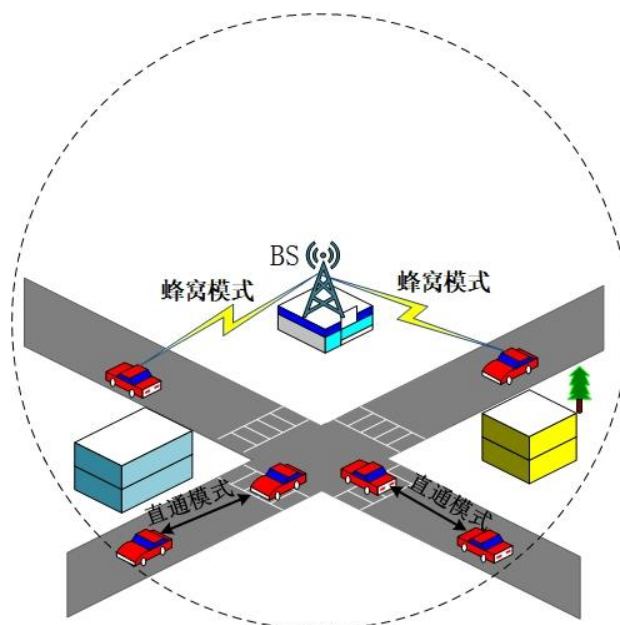


图 2.3 采用不同接口的 V2V 通信模式场景图

2.3.2 V2V 通信链路性能指标

任意 V2V 车辆对 V_i 由发射端车辆 V_i^T 与接收端车辆 V_i^R 组成，根据 V2V 通信的两种通信模式，可以将车辆对 V_i 的通信链路分为直通链路和蜂窝链路。本文考虑的通信链路性能指标包括信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Power Ratio, SINR)、吞吐量和能量效率。

1) V2V 直通链路性能指标

车辆对 V_i 的接收端车辆 V_i^R 的 SINR 为:

$$SINR_{V_i}^d = \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{I_{V2V} + I_{C2V} + N_0 B} \quad (2-1)$$

其中, P_{V_i} 表示 V_i^T 的发射功率, $h_{i,i}$ 表示 V_i^T 与 V_i^R 间的通信链路信道增益, I_{V2V} 、 I_{C2V} 分别表示来自其他 V2V 车辆对、蜂窝用户通信的干扰, 且干扰作用在 V_i^R 上。 N_0 表示噪声功率谱密度, B 表示通信链路占用的频谱资源块带宽大小。根据香农公式, 车辆对 V_i 的直通链路吞吐量为:

$$R_{V_i}^d = B \log_2 (1 + SINR_{V_i}^d) \quad (2-2)$$

车辆对 V_i 的直通链路能量效率为:

$$EE_i^d = \frac{R_{V_i}^d}{\frac{1}{\theta} P_{V_i} + 2P_{cir}} \quad (2-3)$$

其中, θ 表示功率放大器放大系数, P_{cir} 表示电路损耗功率。

2) V2V 蜂窝链路性能指标

假设蜂窝模式下的 V2V 车辆对 V_i 使用基站提供的正交频段进行通信, 则发射端车辆 V_i^T 在基站端的 SINR 为:

$$SINR_{V_i}^c = \frac{P_{V_i} h_{i,BS}}{N_0 B} \quad (2-4)$$

其中, $h_{i,BS}$ 表示 V_i^T 与基站间的通信链路信道增益。根据香农公式, 车辆对 V_i 的蜂窝链路吞吐量为:

$$R_{V_i}^c = B \log_2 (1 + SINR_{V_i}^c) \quad (2-5)$$

车辆对 V_i 的蜂窝链路能量效率为:

$$EE_i^c = \frac{R_{V_i}^c}{\frac{1}{\theta} P_{V_i} + P_{cir}} \quad (2-6)$$

2.4 V2V 通信的资源分配

在蜂窝车联网中，V2V 通信的资源分配研究主要围绕频谱资源分配和功率控制等方面展开。

2.4.1 频谱资源分配模式

在蜂窝车联网中，对于不同的 V2V 通信模式，需要采用相应的频谱资源分配模式。在蜂窝模式下的 V2V 通信链路使用正交频谱资源进行通信，蜂窝用户与车辆间不存在干扰。直通模式下的 V2V 通信根据是否复用蜂窝用户的频谱资源，频谱资源分配模式可分为专用模式和复用模式。在专用模式中，V2V 通信链路利用基站分配的专用频段进行通信，该频段没有被任何蜂窝用户占用。由于不同专用频段是正交的，车辆与蜂窝用户间不会产生干扰。但是，专用模式可能造成系统频谱资源紧张，使得系统容量无法提高。因此，常利用复用模式来提高系统频谱资源利用率。复用模式分为复用蜂窝用户上行和下行链路频谱资源。

2.4.2 频谱复用造成的干扰分析

在蜂窝车联网中，频谱资源复用会带来干扰，如图 2.4 所示。

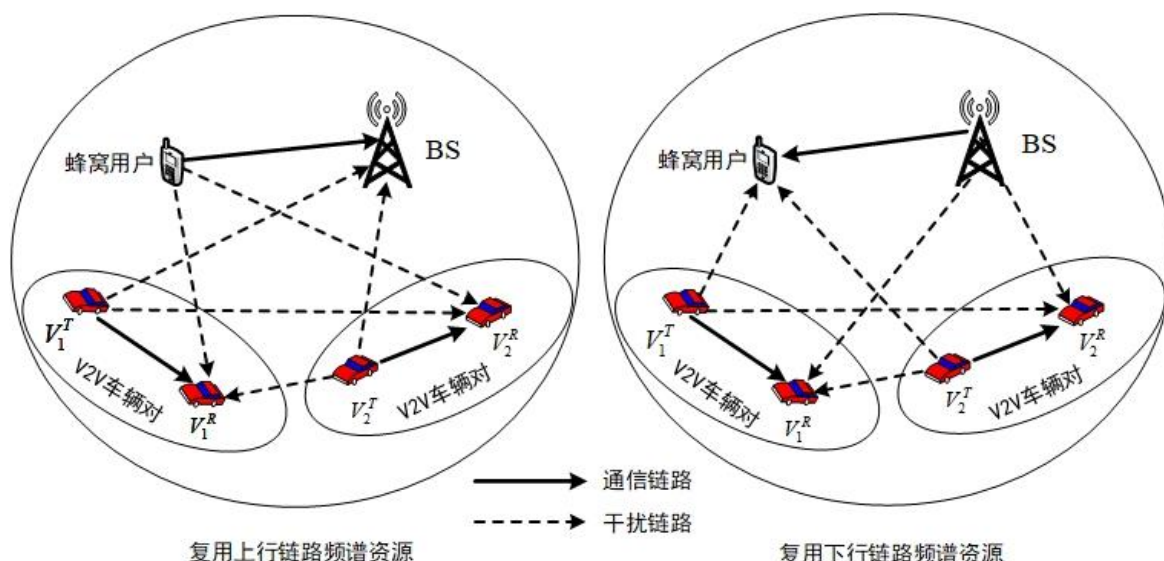


图 2.4 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行和下行链路频谱资源

图 2.4 描述了 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行和下行链路频谱资源时，蜂窝车联网系统中的通信链路和干扰链路。系统中存在三种类型的干扰：V2V 车辆对之间的干扰、V2V 通信对蜂窝用户通信的干扰、蜂窝用户通信对 V2V 通信的干扰。

1) V2V 车辆对之间的干扰 I_{V2V}

复用同一蜂窝用户频谱资源的车辆对间存在干扰。在复用蜂窝用户上行和下行链路频谱资源的两种情况下，干扰信号均是由一个车辆对的发射端车辆发出，作用在另一个车辆对的接收端车辆。干扰表达式分别为：

$$I_{V_1 2V_2} = P_{V_1} g_{1,2} \quad (2-7)$$

$$I_{V_2 2V_1} = P_{V_2} g_{2,1} \quad (2-8)$$

其中， P_{V_1} 表示 V_1^T 的发射功率， P_{V_2} 表示 V_2^T 的发射功率， $g_{1,2}$ 表示 V_1^T 与 V_2^R 间的干扰链路信道增益， $g_{2,1}$ 表示 V_2^T 与 V_1^R 间的干扰链路信道增益。

2) V2V 通信对蜂窝用户通信的干扰 I_{V2C}

当 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源时，V2V 通信对蜂窝用户通信的干扰会作用在基站 BS 上。干扰表达式为：

$$I_{V2C} = P_{V_1} g_{1,BS} + P_{V_2} g_{2,BS} \quad (2-9)$$

其中， $g_{1,BS}$ 表示 V_1^T 与 BS 间的干扰链路信道增益， $g_{2,BS}$ 表示 V_2^T 与 BS 间的干扰链路信道增益。

当 V2V 直通链路复用蜂窝用户下行链路频谱资源时，V2V 通信对蜂窝用户通信的干扰直接作用在蜂窝用户上。干扰表达式为：

$$I_{V2C} = P_{V_1} g_{1,C} + P_{V_2} g_{2,C} \quad (2-10)$$

其中， $g_{1,C}$ 表示 V_1^T 与蜂窝用户间的干扰链路信道增益， $g_{2,C}$ 表示 V_2^T 与蜂窝用户间的干扰链路信道增益。

3) 蜂窝用户通信对 V2V 通信的干扰 I_{C2V}

当 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源时，蜂窝用户通信对 V2V 通信的干扰就是蜂窝用户对车辆 V_1^R 和 V_2^R 的干扰。干扰表达式分别为：

$$I_{C2V_1} = P_C g_{C,1} \quad (2-11)$$

$$I_{C2V_2} = P_C g_{C,2} \quad (2-12)$$

其中, P_C 表示蜂窝用户的发射功率, $g_{C,1}$ 表示蜂窝用户与 V_1^R 间的干扰链路信道增益, $g_{C,2}$ 表示蜂窝用户与 V_2^R 间的干扰链路信道增益。

当 V2V 直通链路复用蜂窝用户下行链路频谱资源时, 蜂窝用户通信对 V2V 通信的干扰就是基站对车辆 V_1^R 和 V_2^R 的干扰。干扰表达式分别为:

$$I_{C2V_1} = P_{BS} g_{BS,1} \quad (2-13)$$

$$I_{C2V_2} = P_{BS} g_{BS,2} \quad (2-14)$$

其中, P_{BS} 表示基站的发射功率, $g_{BS,1}$ 表示基站与 V_1^R 间的干扰链路信道增益, $g_{BS,2}$ 表示基站与 V_2^R 间的干扰链路信道增益。

当 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源时, V2V 接收端车辆会收到其他车辆对的干扰和蜂窝用户的干扰, 同时发射端车辆对蜂窝用户通信的干扰会作用在基站上; 当 V2V 直通链路复用蜂窝用户下行链路频谱资源时, 除了其他车辆对的干扰, V2V 接收端车辆还会收到基站的干扰, 同时发射端车辆对蜂窝用户通信的干扰直接作用在蜂窝用户上。由于基站对 V2V 接收端车辆的干扰会造成较严重的影响, 且基站的抗干扰能力要强于蜂窝用户。为避免干扰信号对系统造成较大影响, 本文采用的复用模式是 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源。

2.4.3 资源分配常用研究方法

在动态资源管理问题中, 常用的资源分配方法有凸优化、图论、博弈论等方法。凸优化方法是一种在约束条件下求解目标函数最优值的方法, 且需要目标函数为凸函数, 约束条件下的变量定义域为凸集。拉格朗日对偶法和 KKT (Karush-Kuhn-Tucher) 条件常被用于求解凸优化问题。图论中的图着色理论和匹配理论常用于解决无线通信资源分配问题。例如, 构建二分图匹配模型或者图着色模型, 并利用相关算法对模型进行求解。

相比于凸优化和图论，博弈论更适用于分析所有用户竞争资源的行为和策略。在博弈过程中，每个用户进行独立决策来获得更多的收益。博弈论模型可以为系统资源管理提供良好的决策，使得所有参与者的策略达到纳什均衡。

在文中，我们利用非合作博弈模型来解决多个 V2V 车辆对的资源分配问题。该非合作博弈由三个基本要素组成：

- 1) 一组参与者，即 V2V 车辆对用户集合 $\mathcal{V} = \{V_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 。
- 2) 参与者的策略，即车辆对用户 V_i 选择的策略 s_i ， s_i 包括复用蜂窝用户频谱资源的选择和发射端车辆 V_i^T 的功率大小。 $s_i \in S_i$ ， S_i 是车辆对用户 V_i 可选择的策略集合。 N 个车辆对用户的策略集 $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 称为策略组合。
- 3) 参与者的收益，即车辆对用户 V_i 的效用函数 u_i ， u_i 不仅与车辆对 V_i 的策略 s_i 有关，也和其他车辆对的策略 s_{-i} 有关。该博弈模型为：

$$G = \{\mathcal{V}; S_1, S_2, \dots, S_N; u_1, u_2, \dots, u_N\} \quad (2-15)$$

纳什均衡是博弈过程中所有参与者的最优策略组合，即每个参与者的策略都是对于其他参与者策略的最优回应。纳什均衡的定义为：在博弈模型 $G = \{\mathcal{V}; S_1, S_2, \dots, S_N; u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 中，如果对于每个参与者， s_i^* 是给定其他参与者策略集 s_{-i}^* 的情况下的最优策略，即对于每个参与者来说，满足：

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*), \forall s_i \in S_i, s_i \neq s_i^* \quad (2-16)$$

则策略组合 $s^* = (s_1^*, s_{-1}^*)$ 是该博弈模型的一个纳什均衡。

2.5 本章小结

在本章中，我们介绍了蜂窝车联网的系统结构以及通信类型。V2V 通信作为 C-V2X 的关键部分，为提高道路交通安全起到了非常重要的作用。根据采用不同的通信接口，V2V 通信可以分为蜂窝模式和直通模式。在不同 V2V 通信模式下，我们分析了 V2V 通信链路的性能指标。同时，介绍了 V2V 通信的频谱资源分配模式，分析了 V2V 车辆对复用蜂窝用户频谱资源造成的干扰以及资源分配常用研究方法。对于

基于直通模式的 V2V 通信资源分配，可以通过 V2V 直通链路复用蜂窝用户频谱资源来提高系统频谱资源利用率，并通过功率控制来提高 V2V 直通链路的吞吐量和能效，这是后文的研究内容之一。对于车辆行驶过程中的 V2V 通信来说，进行两种通信模式的动态切换可以更大程度地提高 V2V 通信链路性能，这也是后文的研究内容之一。

3 基于直通模式的 V2V 通信资源分配研究

3.1 引言

在车联网系统中,道路上的车辆需要实时向周围车辆发送信息,包括车辆位置信息、道路交通安全信息等。为了提高 V2V 通信的可靠性和实时性,相邻车辆间通过 PC5 接口进行 V2V 直接通信,形成多个 V2V 车辆对。在蜂窝车联网中,由于车辆数量增多造成系统频谱资源紧缺,且蜂窝用户存在频谱资源闲置现象。而 V2V 直通链路可以通过复用蜂窝用户频谱资源来提高系统的频谱资源利用率。因此,我们对基于直通模式的 V2V 通信资源分配进行研究。在本章中,只考虑直通模式下的 V2V 通信,且 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源进行通信。由于频谱复用会带来干扰问题,为尽可能地抑制频谱复用造成的干扰,提高 V2V 直通链路吞吐量,本章提出了合理的频谱资源分配算法和基于严格潜在博弈的功率控制方案。

3.2 系统模型

针对本章中需要解决的频谱资源分配和功率控制问题,我们设计一个单蜂窝覆盖下的车联网通信场景,如图 3.1 所示。假设蜂窝网络的通信覆盖范围是以基站 BS 为圆心,半径为 R_c 的圆形。蜂窝网络覆盖了道路的一部分,被覆盖路段长度为 L ,道路中心距 BS 的距离为 D ,且满足 $D^2 + (L/2)^2 = R_c^2$ 。假设该蜂窝网络中包含 M 个随机均匀分布的蜂窝用户,组成集合 $\mathcal{C} = \{C_m | m=1,2,...,M\}$ 。道路上的车辆服从随机均匀分布,相邻车辆直接通信,形成 N 个 V2V 车辆对,组成集合 $\mathcal{V} = \{V_i | i=1,2,...,N\}$ 。在该场景中,道路上所有的 V2V 车辆对采用 PC5 接口进行直接通信,不用经过基站转发。基站是整个系统的控制中心,进行资源分配和调度。基于直通模式的车辆对 V_i 由发射端车辆 V_i^T 与接收端车辆 V_i^R 组成,其他车辆对设为 $V_j, j=1,2,...,N, j \neq i$ 。本章考虑 V2V 直通链路复用蜂窝用户上行链路频谱资源,并对频谱资源进行合理分配,在提高系统频谱资源利用率的同时尽可能地抑制频谱复用造成的干扰。此外,需要对

不同 V2V 车辆对的发射端车辆进行功率控制，以提高 V2V 直通链路的吞吐量。

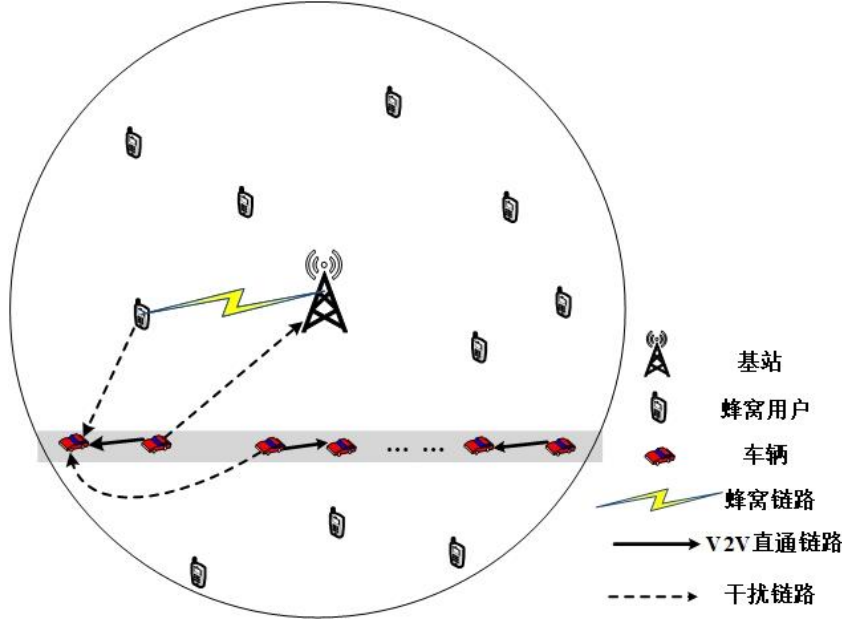


图 3.1 蜂窝车联网场景图

3.2.1 通信链路模型

道路上的 N 个车辆对采用直通模式进行通信，并复用蜂窝用户的上行链路频谱资源。在本章中，用资源块 (Resource Block, RB) 来表示一个蜂窝用户的频谱资源，且每个蜂窝用户的 RB 大小相同。在系统模型中，不同通信链路的信道增益不一样，包括： V_i^T 与 V_i^R 间的通信链路信道增益 $h_{i,i}$ ；蜂窝用户 C_m 与基站 BS 间的通信链路信道增益 $h_{m,BS}$ ； V_i^T 与 V_j^R 间的干扰链路信道增益 $g_{i,j}$ ； V_j^T 与 V_i^R 间的干扰链路信道增益 $g_{j,i}$ ； V_i^T 与蜂窝用户 C_m 接收端基站间的干扰链路信道增益 $g_{i,BS}$ ；蜂窝用户 C_m 与 V_i^R 间的干扰链路信道增益 $g_{m,i}$ 。对于信道增益，我们根据路径损耗模型进行计算。路径损耗是由发射信号扩散和通信信道特性造成，与通信设备间距离 d 有关。在本文中，蜂窝链路的路径损耗模型^[49]为：

$$PL_{C2BS}(d) = PL_{V2BS}(d) = 128.1 + 37.6 * \log_{10}(d [km]) \quad (3-1)$$

车辆间或者蜂窝用户与车辆间的直通链路的路径损耗模型^[49]为：

$$PL_{V2V}(d) = PL_{C2V}(d) = 148 + 40 * \log_{10}(d [km]) \quad (3-2)$$

信道增益的表达式为：

$$\begin{cases} h_{i,i} = 10^{-PL_{V2V}(d_i)/10} \\ h_{m,BS} = 10^{-PL_{C2BS}(d_{m,BS})/10} \\ g_{i,j} = 10^{-PL_{V2V}(d_{i,j})/10} \\ g_{j,i} = 10^{-PL_{V2V}(d_{j,i})/10} \\ g_{i,BS} = 10^{-PL_{V2BS}(d_{i,BS})/10} \\ g_{m,i} = 10^{-PL_{C2V}(d_{m,i})/10} \end{cases} \quad (3-3)$$

其中， d_i 表示 V_i^T 与 V_i^R 间的距离， $d_{m,BS}$ 表示蜂窝用户 C_m 与基站间距离， $d_{i,j}$ 表示 V_i^T 与 V_j^R 间距离， $d_{j,i}$ 表示 V_j^T 与 V_i^R 间距离， $d_{i,BS}$ 表示 V_i^T 与基站间距离， $d_{m,i}$ 表示 C_m 与 V_i^R 间距离。根据公式(2-1)，车辆对 V_i 的接收端车辆 V_i^R 的 SINR 为：

$$SINR_{V_i} = \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{V_j} g_{j,i} f(s_i, s_j) + \sum_{m=1}^M P_{C_m} g_{m,i} f(s_i, s_m) + N_0 B} \quad (3-4)$$

其中， P_{V_i} 表示车辆对 V_i 中发射端车辆 V_i^T 的发射功率， P_{V_j} 表示车辆对 V_j 中发射端车辆 V_j^T 的发射功率， P_{C_m} 表示蜂窝用户 C_m 的发射功率， N_0 表示噪声功率谱密度， B 表示蜂窝用户 RB 的带宽大小。 $f(s_i, s_j)$ 表示 V_i 与 V_j 间是否存在干扰，表达式为：

$$f(s_i, s_j) = \begin{cases} 1 & \text{策略 } s_i \text{ 与策略 } s_j \text{ 复用相同的 RB, } V_i \text{ 与 } V_j \text{ 间存在干扰} \\ 0 & \text{其他情况, } V_i \text{ 与 } V_j \text{ 间不存在干扰} \end{cases} \quad (3-5)$$

其中， s_i 和 s_j 分别表示车辆对 V_i 和 V_j 当前选择的策略，包括复用蜂窝用户 RB 的选择和发射端车辆的功率大小。同理， $f(s_i, s_m)=1$ 表示 V_i 与蜂窝用户 C_m 间存在干扰， $f(s_i, s_m)=0$ 表示 V_i 与 C_m 不存在干扰。根据公式(2-2)，车辆对 V_i 的直通链路吞吐量为：

$$\begin{aligned} R_{V_i} &= B \log_2(1 + SINR_{V_i}) \\ &= B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{V_j} g_{j,i} f(s_i, s_j) + \sum_{m=1}^M P_{C_m} g_{m,i} f(s_i, s_m) + N_0 B} \right) \end{aligned} \quad (3-6)$$

根据公式(2-3)，V2V 车辆对的直通链路总能效为：

$$EE_{total} = \sum_{i=1}^N \frac{B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{V_j} g_{j,i} f(s_i, s_j) + \sum_{m=1}^M P_{C_m} g_{m,i} f(s_i, s_m) + N_0 B} \right)}{\frac{1}{\theta} P_{V_i} + 2P_{cir}} \quad (3-7)$$

在系统模型中，蜂窝用户 C_m 在基站端的 SINR 为：

$$SINR_{C_m} = \frac{P_{C_m} h_{m,BS}}{\sum_{i=1}^N P_{V_i} g_{i,BS} f(s_i, s_m) + N_0 B} \quad (3-8)$$

则 C_m 的通信链路吞吐量为：

$$\begin{aligned} R_{C_m} &= B \log_2 (1 + SINR_{C_m}) \\ &= B \log_2 \left(1 + \frac{P_{C_m} h_{m,BS}}{\sum_{i=1}^N P_{V_i} g_{i,BS} f(s_i, s_m) + N_0 B} \right) \end{aligned} \quad (3-9)$$

3.2.2 问题描述

为了提高 V2V 直通链路吞吐量的同时尽可能地减少系统内干扰，我们将从频谱资源分配和功率控制两个方面来解决。在本章中，我们考虑的是在一个资源分配周期内的频谱资源分配和功率控制，不同周期内需要重复这两个步骤，且在初始状态下所有车辆的发射功率为最大发射功率。此外，在本章中，所有蜂窝用户的发射功率为相同的定值。

1) 频谱资源分配

对于车辆对 V_i ，我们需要合理地为其分配蜂窝用户 RB，使得频谱复用造成的干扰尽可能小。假设一个车辆对只能复用一個蜂窝用户上行链路 RB，而一个蜂窝用户可以為多个车辆对提供频谱复用。在本章中，系统内干扰包括：车辆对之间的干扰、车辆对基站的干扰、蜂窝用户对车辆的干扰。

对于 V2V 车辆对之间的干扰，它只存在于复用同一 RB 的车辆对间，复用同一 RB 的车辆对组成一个组。因此，我们需要采用合理的车辆对分组方法，使得同组的车辆对之间的干扰最小。对于车辆对基站的干扰，我们需要考虑它对基站 SINR 造成的影响，满足 SINR 阈值。对于蜂窝用户对车辆的干扰，应当使得蜂窝用户对同组 V2V 车辆对的干扰最小。综合上述几个考虑的方面，合理得出频谱资源分配策略。

2) 功率控制

由 R_{V_i} 的表达式可知，可以通过控制车辆发射功率大小使得 R_{V_i} 增大。但随着发射功率的增大，系统内会产生更多干扰。因此，为了提高 V2V 直通链路吞吐量并且减少干扰，需要在进行频谱资源分配后，对车辆发射功率进行控制。在本章中，我们利用博弈模型 $G = \{\mathcal{V}; S_1, S_2, \dots, S_N; u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 来描述资源分配问题。效用函数 $u_i(s_i, s_{-i})$ 由所有车辆对的频谱资源分配结果和发射端车辆功率大小决定。由于频谱资源分配在上一步骤已完成，则博弈模型 G 可以用来描述功率控制问题，表达式为：

$$G = \{\mathcal{V}; P_{V_1}, P_{V_2}, \dots, P_{V_N}; u_1, u_2, \dots, u_N\} \quad (3-10)$$

其中， $\mathbf{P}_V = (P_{V_1}, P_{V_2}, \dots, P_{V_N}) \in \Psi$ 是所有车辆对的发射端车辆的功率控制策略集合， Ψ 是功率控制策略的取值空间。因此，车辆对 V_i 的最优功率控制问题可以描述为：

$$P_{V_i}^* = \arg \max_{P_{V_i} \in [0, P_{V_{\max}}]} u_i \quad (3-11)$$

其中， $P_{V_{\max}}$ 表示车辆最大发射功率。

从系统整体考虑，最优功率控制问题可以描述为：

$$\mathbf{P}_V^* = \arg \max_{\mathbf{P}_V \in \Psi} (\{u_1, u_2, \dots, u_N\}, \Phi(\mathbf{P}_V)) \quad (3-12)$$

其中， $\Phi(\mathbf{P}_V)$ 是所有 V2V 直通链路的总加权效用函数，即后文提出的潜在函数。

3.3 频谱资源分配算法

根据前文所述，本章主要考虑三种干扰来进行频谱资源分配。对于不同 V2V 车辆对之间的干扰，我们通过合理地分组来避免。根据车辆对在道路上的位置顺序，从

左到右依次将 V2V 车辆对设为 $V_1, V_2, \dots, V_N$ 。V2V 车辆对的分组集合为 $\mathcal{G} = \{Group_k | k = 1, 2, \dots, K\}$ ，依次将所有车辆对分到这 K 个组中，每个组对应一个合适的蜂窝用户，并由蜂窝用户提供 RB，分组情况见表 3.1。通过分组，保证了复用同一 RB 的车辆对相距最远，使得 V2V 车辆对之间的干扰最小。

表 3.1 V2V 车辆对分组表

分组序号	$Group_1$	$Group_2$	...	$Group_K$
不同蜂窝用户的 RB	RB_1	RB_2	...	RB_K
车辆对	$V_1, V_{K+1} \dots$	$V_2, V_{K+2} \dots$	...	$V_K, V_{2K} \dots$

完成分组后，需要给每个组分配一个合适的蜂窝用户用于提供复用的 RB。为了容忍干扰造成的影响，一般来说，能够被车辆对复用 RB 的蜂窝用户应该具有较好的信道条件。因此，提供复用 RB 的蜂窝用户数量是有限的，需要我们从 M 个蜂窝用户中选出 K 个合适的进行复用。一般情况下，车辆对数量 N 大于 K 。

为每个组分配蜂窝用户 RB 需要满足如下两个条件：

- 1、蜂窝用户 C_m 在基站端的 SINR 需要满足基站的 SINR 阈值 $SINR_{th}$ ，即：

$$SINR_{C_m} = \frac{P_{C_m} h_{m,BS}}{\sum_{i=1}^N P_{V_i} g_{i,BS} f(s_i, s_m) + N_0 B} \geq SINR_{th} \quad (3-13)$$

- 2、蜂窝用户 C_m 对同组 $Group_k$ 内 V2V 车辆对的干扰要最小，即：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^N P_{C_m} g_{m,i} f(s_i, s_m) \\ & s.t. \quad f(s_i, s_m) \in \{0, 1\}, \forall i = 1, \dots, N, \forall m = 1, \dots, M; \\ & \quad i \% K = k \% K, \forall i = 1, \dots, N, \forall k = 1, \dots, K; \end{aligned} \quad (3-14)$$

具体的频谱资源分配算法见算法 3.1。

算法 3.1 频谱资源分配算法

输入： $K, M, N, SINR_{th}, N_0, B, (P_{V_1}, P_{V_2}, \dots, P_{V_N})$, P_{C_m} ，车辆和蜂窝用户位置

输出： 对应 K 个蜂窝用户的 V2V 车辆对的分组集合 $\mathcal{G}$

```

1) 初始化:  $\mathcal{G}$  为空集合

2) for  $k=1:K$  do
    设置蜂窝用户  $C_m$  对同组车辆对的最小干扰  $I_{\min}$  为无穷大;

    for  $m=1:M$  do
        同组车辆对蜂窝用户  $C_m$  的干扰  $I_{v2c}=0$ ;

        for  $i=1:N$  do
            计算车辆对  $V_i$  对蜂窝用户  $C_m$  的干扰  $I_{im}$ ;

            if  $i\%K == k\%K$  then
                 $I_{v2c} = I_{v2c} + I_{im}$ ;
            end if
        end for

        计算蜂窝用户  $C_m$  在基站端的 SINR:  $SINR_{Cm} = P_{Cm} h_{m,BS} / (I_{v2c} + N_0 B)$ ;

        if  $SINR_{Cm} \geq SINR_{th}$  &  $m \notin \mathcal{G}$  then
            蜂窝用户  $C_m$  对同组车辆对的干扰  $I_{sum} = 0$ ;

            for  $i=1:N$  do
                计算蜂窝用户  $C_m$  对车辆对  $V_i$  的干扰  $I_{mi}$ ;

                if  $i\%K == k\%K$  then
                     $I_{sum} = I_{sum} + I_{mi}$ ;
                end if
            end for

            if  $I_{sum} < I_{\min}$  then
                 $I_{\min} = I_{sum}$ ;

                把蜂窝用户  $C_m$  分配给集合  $\mathcal{G}$  中第  $k$  个组:  $Group_k = m$ ;
            end if
        end if
    end for
end for

return  $\mathcal{G}$ 

```

3.4 基于严格潜在博弈的功率控制方案

通过本章提出的频谱资源分配算法，道路上的所有 V2V 车辆对被分到不同的 K 个组，且每个组对应一个蜂窝用户。使得车辆对合理地复用蜂窝用户 RB，减小了干扰。为了提高 V2V 链路吞吐量，我们需要对所有车辆对中发射端车辆进行功率控制。

3.4.1 潜在博弈模型

对于功率控制问题，博弈论是常用的解决方法之一。本章采用的潜在博弈模型是一种特殊的博弈模型，在每次迭代中参与者通过自适应学习来选择策略，保证各参与者的策略组合能收敛到纳什均衡点。在潜在博弈模型中，对于任何参与者通过改变策略得到的效用函数激励都可以用称为潜在函数的单一全局函数来表示。作为一种典型的潜在博弈，严格潜在博弈(Exact Potential Game)的定义如下：

$$\Phi(s'_i, s_{-i}) - \Phi(s_i, s_{-i}) = u_i(s'_i, s_{-i}) - u_i(s_i, s_{-i}) \quad (3-15)$$

其中， $\Phi(s_i, s_{-i})$ 表示潜在函数， $u_i(s_i, s_{-i})$ 表示效用函数。严格潜在博弈的性质有：潜在函数表示系统的总体收益，而效用函数表示参与者的个人收益。对于一个博弈模型来说，如果能找到效用函数对应的潜在函数，则该模型就是一个潜在博弈模型，且严格潜在博弈一定能收敛到纳什均衡点^[54]。

3.4.2 效用函数建立

对于车辆对 V_i 的效用函数，我们主要考虑 V2V 直通链路的吞吐量以及干扰对 V2V 直通链路吞吐量造成的影响。 V_i 的直通链路受到来自其他车辆对 V_j 和被 V_i 复用 RB 的蜂窝用户 C_m 的干扰。无干扰情况下，车辆对 V_i 直通链路的最大吞吐量为：

$$r_{i,\max} = B \log_2(1 + \text{SNR}_{V_i}) = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B} \right) \quad (3-16)$$

对于车辆对 V_i ，为了强调来自其他车辆对 V_j 的干扰，将 V_j 对 V_i 的干扰造成的吞吐量减少量定义为 V_i 在无干扰时的直通链路吞吐量减去 V_j 作为唯一干扰源时的直通

链路吞吐量，表达式为：

$$I_{i,j} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B} \right) - B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B + P_{V_j} g_{j,i}} \right) \quad (3-17)$$

类似的， V_i 对 V_j 的干扰造成的吞吐量减少量：

$$I_{j,i} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_j} h_{j,j}}{N_0 B} \right) - B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_j} h_{j,j}}{N_0 B + P_{V_i} g_{i,j}} \right) \quad (3-18)$$

蜂窝用户 C_m 对 V_i 的干扰造成的吞吐量减少量：

$$I_{i,m} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B} \right) - B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B + P_{C_m} g_{m,i}} \right) \quad (3-19)$$

V_i 对蜂窝用户 C_m 接收端基站的干扰造成的吞吐量减少量：

$$I_{m,i} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{C_m} h_{m,BS}}{N_0 B} \right) - B \log_2 \left(1 + \frac{P_{C_m} h_{m,BS}}{N_0 B + P_{V_i} g_{i,BS}} \right) \quad (3-20)$$

本章中，车辆对 V_i 的效用函数定义为车辆对 V_i 直通链路的最大吞吐量减去各项干扰造成的吞吐量减少量，表达式为：

$$u_i(s_i, s_{-i}) = r_{i,\max} - \varepsilon_1 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N f(s_i, s_j) (I_{i,j} + I_{j,i}) - \varepsilon_2 f(s_i, s_m) (I_{i,m} + I_{m,i}) \quad (3-21)$$

其中， $f(s_i, s_j)$ 表示 V_i 与 V_j 间是否存在干扰， $f(s_i, s_m)$ 表示 V_i 与 C_m 间是否存在干扰，与频谱资源分配的结果有关。 ε_1 和 ε_2 是平衡 V2V 直通链路最大吞吐量和干扰项的加权干扰因子。

3.4.3 严格潜在博弈模型建立及证明

我们设计的潜在函数是所有车辆对的效用函数的加权总和：

$$\Phi(s_i, s_{-i}) = \sum_{i=1}^N \left(r_{i,\max} - \varepsilon_1 b \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{i,j} f(s_i, s_j) - \varepsilon_1 (1-b) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{j,i} f(s_i, s_j) - \varepsilon_2 f(s_i, s_m) (I_{i,m} + I_{m,i}) \right) \quad (3-22)$$

其中, b 是构建该潜在博弈函数的调整参数, 在潜在函数中引入参数 b 用于调整不同博弈成本之间的比例。为证明文中提出的博弈过程是一个严格潜在博弈, 需证明等式(3-15)成立。

令 $\Phi(s_i, s_{-i}) = T - I_1 - I_2 - I_3 - I_4$, 则 T 的表达式为:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^N r_{i,\max} = \sum_{i=1}^N B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B} \right) \\ &= r_{i,\max} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_j} h_{j,j}}{N_0 B} \right) \\ &= r_{i,\max} + T(s_{-i}) \end{aligned} \quad (3-23)$$

其中, $T(s_{-i})$ 表示与博弈参与者 V_i 的策略 s_i 无关的收益。

I_1 的表达式为:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_1 b \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{i,j} f(s_i, s_j) = \varepsilon_1 b \sum_{k=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N I_{k,j} f(s_k, s_j) \\ &= \varepsilon_1 b \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{i,j} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N I_{k,j} f(s_k, s_j) \right) \\ &= \varepsilon_1 b \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{i,j} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{k,i} f(s_k, s_i) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k \\ j \neq i}}^N I_{k,j} f(s_k, s_j) \right) \\ &= \varepsilon_1 b \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{i,j} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{k,i} f(s_k, s_i) + I_1(s_{-i}) \right) \\ &= \varepsilon_1 b \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{i,j} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{j,i} f(s_j, s_i) + I_1(s_{-i}) \right) \end{aligned} \quad (3-24)$$

其中, $I_1(s_{-i})$ 表示与策略 s_i 无关的成本。

I_2 的表达式为:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_1 (1-b) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{j,i} f(s_i, s_j) = \varepsilon_1 (1-b) \sum_{k=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N I_{j,k} f(s_k, s_j) \\
 &= \varepsilon_1 (1-b) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{j,i} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N I_{j,k} f(s_k, s_j) \right) \\
 &= \varepsilon_1 (1-b) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{j,i} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{i,k} f(s_k, s_i) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k \\ j \neq i}}^N I_{j,k} f(s_k, s_j) \right) \\
 &= \varepsilon_1 (1-b) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{j,i} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N I_{i,k} f(s_k, s_i) + I_2(s_{-i}) \right) \\
 &= \varepsilon_1 (1-b) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{j,i} f(s_i, s_j) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N I_{i,j} f(s_j, s_i) + I_2(s_{-i}) \right)
 \end{aligned} \tag{3-25}$$

其中， $I_2(s_{-i})$ 表示与策略 s_i 无关的成本。

已知 I_1 和 I_2 ，且由于 $f(s_i, s_j) = f(s_j, s_i)$ ，可得到 $I_1 + I_2$ 的表达式为：

$$I_1 + I_2 = \varepsilon_1 \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N f(s_i, s_j) (I_{i,j} + I_{j,i}) + b I_1(s_{-i}) + (1-b) I_2(s_{-i}) \right) \tag{3-26}$$

接下来求 I_3 和 I_4 。

$$\begin{aligned}
 I_3 &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_2 f(s_i, s_m) I_{i,m} \\
 &= \varepsilon_2 f(s_i, s_m) \sum_{i=1}^N \left(B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B} \right) - B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_i} h_{i,i}}{N_0 B + P_{C_m} g_{m,i}} \right) \right) \\
 &= \varepsilon_2 f(s_i, s_m) I_{i,m} + \varepsilon_2 f(s_j, s_m) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left(B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_j} h_{j,j}}{N_0 B} \right) - B \log_2 \left(1 + \frac{P_{V_j} h_{j,j}}{N_0 B + P_{C_m} g_{m,j}} \right) \right) \\
 &= \varepsilon_2 f(s_i, s_m) I_{i,m} + \varepsilon_2 I_3(s_{-i})
 \end{aligned} \tag{3-27}$$

其中， $I_3(s_{-i})$ 表示与策略 s_i 无关的成本。

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/125044041301011130>