



信息科学技术专著丛书

车联网无线接入 关键技术

何欣欣 编著

KEY TECHNOLOGIES OF WIRELESS ACCESS TO
INTERNET OF VEHICLES



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

近年来,车联网被认为是物联网体系中产业潜力很大、市场需求很明确的领域,是信息化与工业化深度融合的重要方向,具有应用空间广、社会效益强的特点。随着 5G/B5G 技术的逐步应用,各种关键技术围绕着车联网智能化和网联化形成融合,技术不断发展和变革,推动车联网服务生态逐步升级,并最终实现能替代人操作的完全自动驾驶。本书结合作者多年来在该领域的研究成果和相关技术的发展现状,介绍了车联网的系统架构、标准体系和物理层理论基础,并且深入探讨了 sub-6GHz 频段和毫米波频段的资源分配机制和性能,最后叙述了 C-V2X 应用技术的发展趋势和挑战。

本书可作为车联网无线接入技术领域的科研参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

车联网无线接入关键技术 / 何欣欣编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2022. 8

ISBN 978-7-5635-6694-5

I. ①车… II. ①何… III. ①汽车—无线接入技术—接入网 IV. ①U469-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 140156 号

策划编辑: 姚 顺 刘纳新 责任编辑: 王小莹 责任校对: 张会良 封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 唐山玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 9.75

字 数: 160 千字

版 次: 2022 年 8 月第 1 版

印 次: 2022 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6694-5

定 价: 39.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

随着汽车保有量的高速增长,新场景、新技术的引入推进车联网从仅支持车载信息服务的传统车联网向支持车联一切(V2X)服务的下一代车联网发展。本书围绕 5G/B5G 大容量、高可靠、低时延等关键性指标,结合不同阶段 V2X 技术的互通和演进需求,基于 sub-6GHz 频段的 C-V2X 直连通信架构,在提高基础安全业务传输可靠性的基础上,综合考虑车辆高速移动性和毫米波信号阻挡效应的影响,进一步研究面向自动驾驶信息交互共享的毫米波传输机制。本书结合作者在车联网无线传输领域的研究积累和该领域近年来的发展状况,介绍了车联网相关背景知识和理论基础,并针对其中的新型传输协议展开探讨,最后展望了未来的技术发展趋势。本书内容为 5G/B5G 技术的发展、标准的制定和应用提供了理论基础和技术支持,可作为车联网无线接入技术领域的科研参考书。

本书共包括 7 章。第 1 章为绪论,概述了车联网的全球发展态势和关键技术研究的国内外现状。第 2 章为车联网的架构体系、应用场景及标准体系,第 3 章为物理层关键技术,这两章介绍了本书涉及的背景知识和技术基础。如果读者已了解过该部分内容,可以忽略这两章或将其作为回顾内容。第 4 章为 C-V2X 分布式资源分配机制,分析了分布式资源选择冲突对传输可靠性的影响,设计了基于短期侦听辅助的资源分配机制,此机制降低了 C-V2X mode 4 的资源冲突,并且能够支持 5G 非周期性业务的可靠传输。第 5 章针对 C-V2X 分布式机制仍然存在的资源选择冲突问题,设计了 C-V2X 基于分簇的半分布式资源分配机制,进一步减少了分布式机制无法避免的资源选择冲突问题,提高了基础安全业务传输的可靠性。第 6 章为车载毫米波通信技术,分析了 sub-6GHz 和毫米波联合调度的

传输机制,探索了多频谱在车辆高速移动场景中多信道在频率域上参数的变化规律和相关性,并结合毫米波信道的稀疏特性,研究了低复杂度快时变信道估计和波束对准与追踪。联合调度机制可充分发挥多频段技术各自的优势,动态适配车辆用户不同的服务质量需求,同时可克服毫米波传输的链路阻挡影响,进一步提高网络频谱效率。第7章为C-V2X应用技术的发展趋势和挑战,阐述了C-V2X未来的发展趋势及其在自动驾驶和智能交通系统中面临的技术难题。

郝建军、于聪卿、李殿昂、戚璇和杨昕焯在本书的编写过程中给予作者很大的帮助和支持,在此表示感谢。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免出现错误和不妥之处,恳请读者给予批评指正。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 车联网的发展背景	1
1.2 车联网的全球发展态势	5
1.2.1 车联网资源分配机制研究现状	5
1.2.2 毫米波车联网资源分配机制研究现状	9
1.3 本书章节安排	11
本章参考文献	12
第 2 章 车联网的架构体系、应用场景及标准体系	20
2.1 车联网的架构体系	21
2.2 车联网的典型应用场景	22
2.3 技术与标准化进展	24
2.3.1 IEEE 802.11p 技术与标准	24
2.3.2 C-V2X 技术与标准	27
本章小结	31
本章参考文献	31
第 3 章 物理层关键技术	33
3.1 LTE-V2X 物理层关键技术	33

3.1.1	LTE-V2X 物理信道和信号设计	33
3.1.2	时隙结构	37
3.2	5G NR-V2X 物理层关键技术	37
3.2.1	5G NR-V2X 物理信道和信号设计	38
3.2.2	侧向链路的时隙结构	43
3.2.3	侧向链路的同步设计	44
3.2.4	侧向链路 CSI	48
3.2.5	侧向链路 HARQ 操作	49
3.2.6	侧向链路功率控制	49
3.3	无线传播环境信道建模	50
	本章小结	59
	本章参考文献	59
第 4 章	C-V2X 分布式资源分配机制	63
4.1	系统模型	63
4.2	C-V2X mode 4 的性能分析	67
4.3	基于短期侦听辅助的分布式资源分配机制	73
4.4	STS-RS 机制的性能分析	75
4.5	仿真与数值分析	77
	本章小结	84
	本章参考文献	85
第 5 章	C-V2X 基于分簇的资源分配机制	86
5.1	基于分簇的通信场景模型	86
5.2	簇的生成和维护	87
5.2.1	关键指标的定义	88

5.2.2	初始角色的判定	90
5.2.3	簇的维护过程	91
5.3	基于分簇的资源集选择方法	94
5.3.1	基于资源集的能量检测	94
5.3.2	自适应资源集复用阈值的设计	95
5.4	分簇通信的帧结构设计	96
5.5	不同簇之间合并冲突资源管理方案	98
5.6	基于分簇的资源分配机制的 PDR 性能分析	100
5.6.1	周期业务的 PDR 分析	101
5.6.2	非周期业务的 PDR 分析	104
5.7	仿真与性能分析	105
	本章小结	114
	本章参考文献	114
第 6 章	车载毫米波通信技术	115
6.1	毫米波的传播特性	115
6.2	车载毫米波网络通信挑战	116
6.3	毫米波与 sub-6GHz 协同无线接入技术与资源管理	120
6.3.1	多频段协同接入网络功能架构	120
6.3.2	基于信道模型的无线接入传输理论分析	123
6.3.3	基于 3D 射线追踪的多频段信道相关性建模与分析	127
6.3.4	车辆高动态场景中毫米波快时变波束对准与追踪	129
6.3.5	面向不同业务 QoS 需求的高谱效多频段资源协同调度	135
	本章小结	139
	本章参考文献	139



第 7 章 C-V2X 应用技术的发展趋势和挑战	143
7.1 发展趋势	143
7.2 挑战	144
本章参考文献	147

第 1 章

绪 论

1.1 车联网的发展背景

近年来,车联网被认为是物联网体系中很有产业潜力、市场需求很明确的领域,是信息化与工业化深度融合的重要方向,具有应用空间广、产业潜力大、社会效益强的特点。通信技术的发展促进智能交通系统(Intelligent Transportation System,ITS)通过监测驾驶行为,实现车辆之间(Vehicle to Vehicle,V2V)、车辆和路边基础设施之间(Vehicle to Infrastructure,V2I)、车辆与人之间(Vehicle to Pedestrian,V2P)以及车辆与网络之间(Vehicle to Network,V2N)的相互通信,这些统称为 C-V2X 技术。C-V2X 技术可实现车与车、路、人、网的全方位连接,提升汽车智能化程度和自动驾驶能力,构建汽车和智能交通服务新业态。

车联网的关键技术分布在“端—管—云”3 个层面,总体技术路线向着智能化、网联化方向演进,两条路线同步推进并走向融合。车联网技术目前已经可以支持多项基本主动安全通信应用,如交叉路口违规警告应用(V2I/I2V 的应用),电子制动警告、相向车辆警告、车辆稳定性警告、并线警告等 V2V 应用,以及车道上行人警告等 V2P 的应用。随着汽车智能化程度和自动驾驶能力的不断发展和升级,更多更复杂的传感器将被纳入新型汽车中,包括车载雷达、视觉摄像头和激

光雷达(LIDAR)等基于多项高级服务的复杂传感器。智能交通自动驾驶系统运行的安全性、稳定性、可靠性依赖系统对运行环境的感知和理解程度。然而,传感器技术的一个主要挑战是有限的感知范围和能力与高质量全方位自动驾驶感知需求的矛盾,这样无法确保安全有效的自动驾驶。车载雷达、LIDAR 和摄像机等只能探测传感器视线范围内的环境信息,并且在恶劣天气下受到的影响很大,这限制了以更高安全为目的的智能车辆自动化驾驶的发展。因此,亟需先进的支持自动驾驶安全应用的网联技术,将不同车辆之间以及车辆和路边单元(RSU)之间原始传感器数据共享互联,实现更全面、实时、精准的协同感知效果,推动智能网联汽车实现全自动无人驾驶的应用。

作为智能汽车网联技术,全球范围车联网无线通信技术还没有形成规模化商用部署。国家发展和改革委员会和交通运输部在发布《推进“互联网+”便捷交通 促进智能交通发展的实施方案》中提出要加快车联网建设,提供无线接入互联网的公共服务,以及建设基于下一代互联网和专用短程通信(LTE-V2X、DSRC等)的道路无线通信网。目前两个国际主流技术体系都在积极推动车联网无线通信技术的研发、测试和示范。一方面,基于专用短程通信(DSRC)的 IEEE 802.11p技术在 IEEE(电气和电子工程协会)于 2010 年完成标准化工作,该技术支持车辆在 5.9 GHz 专用频段进行 C-V2X 的直连通信,能够支持的最大数据速率为 27 Mbit/s。另一方面,由 3GPP 主导推动的 C-V2X(包含 Release 14/15 LTE-V2X 和向后演进的面向新空口的 NR-V2X 技术)是基于 4G/5G 蜂窝网通信技术演进形成的 C-V2X 技术,定义了两种互补的传输模式:①基于传统的蜂窝网上、下行链路 Uu 接口的信息传输,车辆、RSU(路边单元)等终端通过上行链路将 C-V2X 业务信息传输给基站,基站将收集到的多个车辆的业务信息通过下行链路广播给覆盖范围内的所有车辆,主要适用于延迟容忍等远程信息处理或娱乐信息应用,最大数据速率为 100 Mbit/s;②基于侧向链路(sidelink,即 PC5 接口)实现设备间的直连通信,业务信息无须通过基站中转,主要适用于短距离主动安全低延迟应用,最大数据速率为 44 Mbit/s^[1]。直连通信不依赖基站的覆盖能力,当车辆处于蜂窝网络覆盖下时,基站可以为车辆提供信令传输,如参数配置、资源调

度等,业务数据信息通过车辆间直接通信模式传输,当车辆没有在蜂窝网络覆盖下时,车辆之间的(信令、数据)直接通信也能进行,具有更高的传输可靠性。Release 14/15 LTE-V2X 由大唐、华为等中国企业牵头推动,分别于 2017 年 3 月和 2018 年 6 月正式发布。2018 年 11 月,工业和信息化部正式发布《车联网(智能网联汽车)直连通信使用 5905-5925MHz 频段的管理规定(暂行)》^[2],标志着我国 LTE-V2X 正式进入产业化阶段。

在未来的车联网自动驾驶应用中,对自动驾驶网联技术上提出了 Gbit/s 级的数据速率、毫秒级($<10\text{ ms}$)的时延和 99.999% 的可靠性等要求。有报告表示,在 2017 年支持自动驾驶车载传感器的数量约 100 个,并且随着技术需求在不断增长^[3]。Google 的无人驾驶车每秒可以生成高达 750 MB 的传感数据^[4],甚至有些研究预测具备自动驾驶功能的车辆每秒单程就可产生高达 1 TB 的数据^[5]。目前 5G-PPP 对自动驾驶中扩展传感器场景的典型数据类型、数据速率等技术需求参数进行了说明。然而,无论是 IEEE 802.11p 技术还是 LTE-V2X 技术,基于有限的频谱资源,都无法满足自动驾驶传感数据交互高达 Gbit/s 级数据速率的通信需求。因此,需要探索新的频谱资源,研究新的通信技术,以更好地为自动驾驶应用提供可行性技术。

毫米波(mmWave)技术随着 5G 技术的研究,得到了汽车工业界和学术界广泛的关注,毫米波频段(30~300 GHz)丰富的频谱资源使其成为实现超高数据速率的重要候选者^[6,7]。3GPP RAN 于 2018 年 6 月完成面向 5G-V2X 应用例的评估方法研究,确定不同地区 6 GHz 以上频谱的法规要求、设计考虑,其至少包括 63~64 GHz 和 76~81 GHz。近年来,很多国家在 60 GHz 毫米波频段附近划分了免许可即可使用的频谱资源,并形成了一系列主要应用于个域网的标准。其中比较有代表性的 IEEE 802.11ad 在非授权 60 GHz 频段使用 2.16 GHz 的带宽,可支持室内高达 7 Gbit/s 的数据速率^[8]。毫米波高速率传输可以支持协同感知扩大自动驾驶车辆传感器的探测范围,克服视线限制和盲区问题,实现全面实时精准的感知效果。此外,毫米波的毫米级波长(1~10 mm)可以使得大量天线集成到小空间中,因此,大规模天线波束成形技术在毫米波中得到了很好的应用,波

束成形技术通过空分多址(SDMA)实现并行传输,减少了干扰,提高了频谱利用率。然而,毫米波的低穿透能力和波束对准的复杂开销,使得毫米波通信技术在自动驾驶网联应用中面临了新的挑战:①毫米波阻挡效应使得密集环境下高可靠传输变得困难,毫米波的高路径损耗、低穿透能力传播特性使得通信链路易受到障碍物阻挡而导致信号(信令、业务数据)传输中断,并且定向传输的耳聋问题也会导致产生严重的传输资源选择冲突,无法满足自动驾驶高可靠性需求。②车辆高速移动性导致更加严峻的毫米波波束对准问题。毫米波大规模天线阵列通过波束成形技术获得了空间复用增益,同时补偿了高路径损耗[通过波束成形技术的定向传输可以达到超过 130 m (385 Mbit/s)/ 79 m (2 Gbit/s)的传输范围^[9]]。但是,高速移动的影响使得高可靠快速波束对准和跟踪变得困难,巨大开销和延迟将严重影响系统传输性能。

根据我们的调研,目前毫米波技术在 5G-V2X 中的研究主要聚焦在应用例和业务能力的评估(3GPP 目前达成的初步共识是未来 NR-V2X 技术与 LTE-V2X 技术并存,基础 C-V2X 业务由 LTE-V2X 支持,NR-V2X 提供增强 V2X 业务能力^[10])。在具体的传输协议设计和理论研究方面仍有众多问题亟待解决。在现有低频(6 GHz 以下)直连通信无线接入关键技术中,Release 14/15 LTE-V2V 采用基于能量检测的半持久调度的资源分配机制,虽然在资源利用率和可靠性方面,相比于 IEEE 802.11p 基于 CSMA/CA 的竞争接入机制具有优势,但是无法适用于非周期性触发业务,无法全面保障自动驾驶的高可靠传输。此外,基于 IEEE 802.11p 和 LTE-V2X 等系列研究主要是面向低频的全向天线传输,无法支持毫米波基于波束成形技术的定向传输模式。另外,在毫米波 IEEE 802.11ad 系列研究中基于定向竞争和分层波束扫描的传输机制具有较大的接入延迟,无法支持车辆高速移动下的快速波束对准与切换,并且未考虑在交通环境下信号易受障碍物阻挡而导致的控制信令和数据信息传输中断问题,无法保障自动驾驶的高可靠传输。

基于此,车联网的发展需要围绕大容量、高可靠、低时延等关键性指标,结合不同阶段 C-V2X 技术的互通和演进需求,在提高 C-V2X 基础安全业务传输可靠

性的基础上,综合考虑车辆高速移动性和毫米波信号阻挡效应的影响,深入探索面向自动驾驶信息交互共享的可靠传输机制和毫米波阻挡效应管理的资源分配策略,以及支持链路可靠持续性的快速波束对准和跟踪方案。

1.2 车联网的全球发展态势

目前车联网直连通信两大主流技术体系为 IEEE 802.11p 和 C-V2X [包括两个阶段:LTE-V2X(Release 14/15 和 NR-V2X(Release 16))], 5GAA 从物理层设计、MAC 层调度等方面对它们进行了技术对比^[11],分析表明 LTE-V2X 直连通信系统在资源利用率、可靠性和稳定性方面具有理论优势。2018年4月在5GAA 华盛顿会议,福特发布与大唐、高通联合测试的结果,在相同的道路测试环境下,通信距离在 400 m 和 1200 m 之间时,LTE-V2X 直连通信系统的误码率明显低于 DSRC(IEEE 802.11p)系统的,且其可靠性高于 IEEE 802.11p 的。考虑未来更高等级的自动驾驶需求,3GPP SA1 定义了面向 5G 的增强的四大类 V2X 业务需求场景,同时基于业务大带宽的需求,3GPP RAN 设计启动了基于毫米波频段的 C-V2X 研究。3GPP 目前达成的共识是未来面向新空口的 NR-V2X 技术与 LTE-V2X 技术并存,基础 C-V2X 业务由 LTE-V2X 进行接收或发送,NR-V2X 提供增强 C-V2X 业务能力。

本节按照车联网发展路线,分别将 6 GHz 频段以下和毫米波频段的车联网无线接入传输机制的相关成果进行分类叙述,并且将保障通信链路可靠持续的毫米波波束对准和跟踪技术现状进行具体阐述,探讨支持全自动驾驶高可靠低时延的可行性机制和相关技术。

1.2.1 车联网资源分配机制研究现状

目前车联网(5.9 GHz 频段)直连通信接入机制主要基于全向天线,分为基于

竞争和无竞争两大类,如图 1-1 所示。

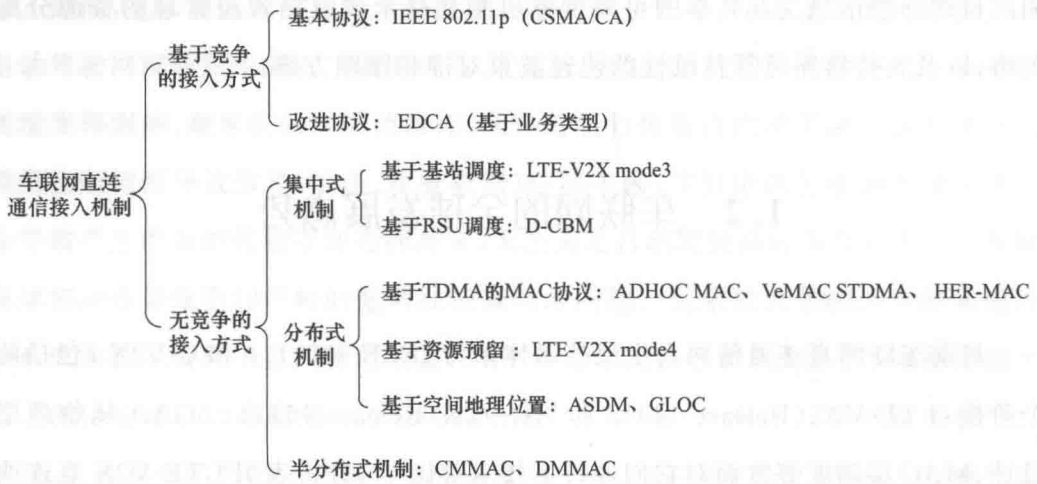


图 1-1 车联网直连通信接入机制研究现状

基于竞争的接入方式主要依靠载波监听、退避来减少冲突,且目前的车联网接入协议大多都是在基于竞争的 IEEE 802.11p^[12]基础上进行的一些修订和扩展。主要基于 CSMA/CA 协议,各节点以分布式的方式竞争接入信道,这些机制较简单,但存在较严重的隐藏终端、暴露终端问题,这会导致资源选择冲突问题,同时,在高密度车辆环境中更容易引起冲突,产生资源分配不公平和接入时延较长等问题。作者所在项目组在已发表的论文(本章参考文献[13]和[14])中,对基于 IEEE 802.11pMAC 协议的车联网网络容量做了理论分析,并通过系统仿真验证理论值的合理性,结果表明在瑞利衰落信道下网络传输容量的上界理论值为平均 1 km 道路能够容纳 4(上取整)通信传输对(全向广播,参数值取 IEEE 802.11p 中的规定值),无法支持未来车联网网络大容量通信的需求。因此,有学者研究无竞争的接入方式,以减少资源选择冲突。

无竞争的接入方式可依据其协调模式分为分布式机制、半分布式机制和集中式机制。集中式机制可以通过中央单元,如路侧单元(RSU)或基站通过将传输资源分配给车辆来避免冲突,但是增加了控制信道的开销和关联或授权过程的延迟。在 LTE-V 直连通信模式 mode 3 中^[15],基站为其覆盖范围内的车辆提供传

输参数和资源调度。在节点密度较高的情况下资源调度十分复杂,且车辆安全信息的传输不能仅依靠基站的调度。本章参考文献[16]研究了 LTE 架构下基于分簇的资源分配机制,提出了基于着色理论的 eNodeB 簇间资源分配算法。eNodeB 以簇为单位进行资源分配,考虑簇的移动性,对簇的邻接进行预测,进而进行合理的资源空间复用,提高资源的利用率。本章参考文献[17]中提出的 D-CBM MAC 协议以 RSU 作为协调点收集簇头的信息,簇头通过 TDMA 的方式给成员分配资源。以上机制都完全依赖基站的调度,在无基站覆盖的场景下将产生传输中断,无法保障节点间信息传输的可靠性。

此外,车辆可以采用自主协调模式,不依赖基站的覆盖范围,采用分布式机制实现无竞争接入,每个节点占据相应的时隙资源。本章参考文献[18]中 ADHOC MAC 协议采用一种时隙结构,将时隙划分到虚拟帧中。节点通过收集其他节点广播的时隙占用情况来选择自己的时隙。这种方法可以保证每个节点在每个虚拟帧中至少访问一次通道,适用于非延迟容忍的应用程序,但在高移动场景下存在合并冲突(merging collision)的问题。Omar 等人提出 VeMAC 协议^[19],对不同行驶方向的车辆划分不同的时隙集合,以解决合并冲突的问题。自组织时分多址(STDMA)协议^[20]将时间分为固定期限的帧,每个帧分为大小相同的时隙。STDMA 协议不需要对全局帧同步,只需要实现时隙同步。这种自组织的无竞争接入方式虽然可以减少资源选择冲突,但在节点密度较低时存在资源浪费的情况。除此之外,节点可以通过预留的方式,实现无竞争的接入方式。本章参考文献[21]提出一种混合式高效可靠的 MAC 层协议(HER-MAC),该协议允许车辆节点在控制信道的预留时隙无竞争地发送安全信息,在控制信道间隔利用服务信道资源传输非安全消息,提高了安全消息的可靠性和服务信道的利用率。LTE-V2X mode 4^[22]采用基于能量检测的半持久资源调度。车辆通过解码和能量检测进行资源排除,对剩下的资源排序,在干扰最小的 20%的资源中随机选择一个作为最终的资源。LTE-V2X 的资源选择方式只适用于周期性的业务,而且在节点密度较高时仍存在较大的资源选择冲突。作者所在项目组已经对 LTE-V2X mode 4 的资源调度协议进行了理论分析^[23],结果表明其在密集环境或非周期业

务下仍然存在着资源选择冲突,网络容量受限。于是针对 LTE-V2X mode 4 存在的资源选择冲突问题,作者所在项目组分别研究了 5G-V2X 基于短期监听的资源选择和基于车辆调度的资源选择方案,并已经提交两个发明专利的申请且已受理^[24-25],而且发表了会议论文^[26]。此外,有学者考虑通过空间地理位置划分实现无竞争的接入,自适应空分复用(ASDM)^[27]协议将道路区域匹配到不同的时隙资源,每个道路区域中最多只存在一个车辆节点,车辆可以使用前方空闲区域的资源以避免资源浪费。在本章参考文献[28]和[29]中,道路划分区域被匹配到正交的频域资源,考虑了单车道划分和多车道划分的不同情况。这种基于空间地理位置划分的接入方式可以有效地避免资源选择冲突,但是此方法是以车身长度来划分道路区域,对定位精度的要求极高,并且不同道路的微小区域的划分起止点以及划分规则在实际应用中存在很大的问题。

由此,在高节点密度的场景下,现有基于基站的集中式资源调度算法的复杂度较高,并且车辆的高速移动性带来的相邻基站之间频繁切换问题会影响传输可靠性,而分布式机制在节点密集情况下仍然存在着较大的资源选择冲突。近期,半分布式机制在资源的选择和调度方面的优势引起了很多学者的关注。在半分布式车辆自组织网络中,无须考虑基站或者 RSU 覆盖范围的影响(在一般情况下,若有 RSU 覆盖,则 RSU 可以竞争成为簇头,即基站类型的 RSU 可以选择成为车辆类型的 RSU),车辆与周围节点成簇,并由簇头调度簇内成员的资源分配。现有的分簇算法主要依赖车辆间周期性交换的状态信息,本章参考文献[30]~[33]研究了基于权值的簇头选择算法,每辆车根据接收的邻居节点的状态信息计算一个权值,作为簇头判断的指标,权值最高的车辆将充当邻近车辆中的簇头。一般而言,该权值可与网络指标(即连通度和链路寿命等)和移动指标(即移动方向、相对速度和加速度等)相关。此类成簇算法需要收集周围节点的状态信息,具有较大的开销和时延。基于最小 ID 的分簇算法^[34]选择具有最小 ID 的节点作为簇头节点,该算法只需周期性地获得周围节点的 ID 并更新簇头,簇的形成和维持比较简单,开销较小,但在一定程度上牺牲了簇的稳定性。然而,基于分簇的资源调度协议的相关研究比较有限。本章参考文献[35]提出一种基于分簇的多信道

接入协议(CMMAC),将分簇与无竞争协议集成在一起,提高了簇内安全信息传输的可靠性,但是此机制中簇头之间的资源调度仍然采用基于竞争的 IEEE 802.11 协议,无法避免相邻簇之间的资源选择冲突问题。本章参考文献[36]提出基于移动信息的多信道分簇协议(DMMAC 协议),通过资源调度和自适应学习车辆位置的机制,车辆自主形成更稳定的簇集合,增加簇成员在簇内的停留时间。该协议的可靠性与没有预留时隙的 TDMA 方案的相同,同时,簇头必须选择与其邻居不同的子载波,消除隐藏终端问题。

1.2.2 毫米波车联网资源分配机制研究现状

在毫米波无线通信中,小尺寸的毫米波天线可以构建复杂的天线阵列,采用先进的波束成形技术,形成定向的收发波束,获得较高的天线增益,补偿路径损耗。毫米波技术有着丰富的频谱资源,在自动驾驶中应用毫米波变得很有必要。然而,车辆的移动性在极具挑战性的毫米波无线电传输环境中,极易造成车辆之间的遮挡,降低链路的传输可靠性。1.2.1 节中关于车联网传输协议的研究成果主要是低频网络场景下的设计,不能直接应用于高频段毫米波车联网中,需要深入研究毫米波传播性能对高速移动环境下 C-V2X 传输的影响。

考虑到定向波束形成是毫米波传输系统必要的组成部分^[37],在车联网中定向传输对接入控制协议的设计提出的挑战主要是:车辆节点无法了解邻居节点的完整信息,从而导致定向传输中的耳聋和碰撞问题。目前已经有许多专门用于定向天线的 MAC 协议^[38-45],它们在处理方向性方面各有不同。尽管毫米波通信在这些协议中没有被假设,但仍为 mmWave V2X 的接入协议提供了可能的研究思路。Y B Ko 等人在本章参考文献[38]中提出一种定向 MAC 协议(D-MAC),其在至少一个天线波束被阻塞时,发送节点 DRTS。K T Feng 等人^[40-41]提出的 LMA 协议为增强的 D-MAC 协议,利用车辆的移动信息预测车辆位置,减少隐藏终端的问题,同时实现定向天线的空间复用,提高网络的吞吐量。这些协议都基于节点,可以在全向和定向两种模式下工作,这会造成天线增益不对称的问题。