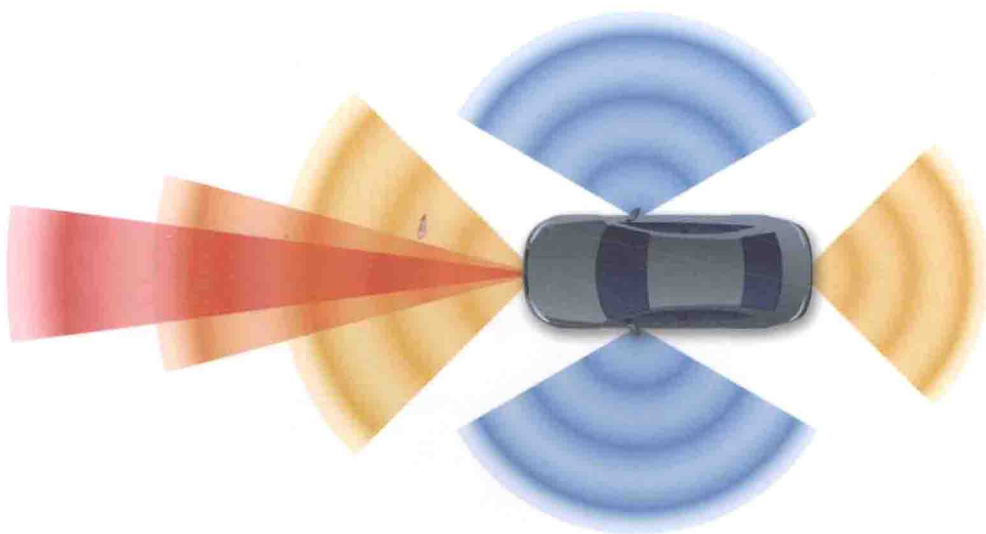


未来智能、安全、绿色的交通系统

Connected Vehicles

车联网系统

田大新 王云鹏 鹿应荣 / 著



车联网的发展将使车辆、道路设施的信息
获取手段和范围产生革命性变化。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



车联网系统

田大新 王云鹏 鹿应荣 著



机械工业出版社

车联网是以“车”为节点和信息源,通过无线通信等技术手段将获取的信息连接到业务应用平台进行管理、分析和深度挖掘,并提供包括交通管理、用户安全和娱乐等综合性服务的信息系统,可以显著提升城市交通运输系统运行效率和服务水平、减少交通事故和污染。车联网技术作为引领未来的前沿技术,引起了社会各界的广泛关注。本书在介绍车联网通信和移动建模的基础上,详细介绍了车联网的若干典型应用。本书共分6章,第1章阐述了车联网通信网络,重点介绍了专用短程通信协议、测试分析方法;第2章介绍了车辆联网环境下群体移动行为分析方法;第3~6章介绍了基于车辆联网研发的相关应用系统,包括基于位置信息的挖掘应用、交通应急疏散管理、驾驶人辅助驾驶、物流车辆调度等。

本书可作为高等院校交通运输工程、计算机科学与技术、信息与通信工程、控制科学与工程、车辆工程等专业的研究生和高年级本科生教材,同时也可为大数 据、物联网、智能交通、云计算、智能汽车等领域 的研究人员提供参 考。

图书在版编目(CIP)数据

车联网系统/田大新,王云鹏,鹿应荣著. —北京:机械工业出版社,2015.3
ISBN 978-7-111-49676-2

I. ①车… II. ①田…②王…③鹿… III. ①互连网络—应用—汽车②智能技术—应用—汽车 IV. ①U469-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第052920号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:赵海青 责任编辑:赵海青

版式设计:赵颖喆 责任校对:赵蕊

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京市四季青双青印刷厂印刷

2015年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.25印张·175千字

0 001—2 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-49676-2

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版 教育服务网:www.cmpedu.com

前 言



随着城市人口快速膨胀、城市面积迅速增加、汽车保有量快速增长，交通效率、安全、能耗、污染等问题已成为制约我国道路交通系统和汽车产业可持续发展的重大瓶颈。车联网系统通过建立车载和路侧集成平台、利用无线通信网络，将道路和车辆连接成一个整体，形成车路协同整体感知环境。车联网的发展将使车辆、道路设施的信息获取手段和范围产生革命性变化。车辆、道路设施对信息的获取能力将从仅靠自身传感器感知的有限范围，扩展到具备无线通信条件的广阔空间，由此也将引起安全保障、交通管理、出行服务的变革。通过车辆运动与道路交通管理和服务的协同，实现交通系统高度组织化、有序运行，将使交通安全水平和通行效率得到质的提升。

车联网技术作为智能汽车、智能交通研究的前沿，不仅受到美国、欧洲、日本等发达国家交通管理部门的重视，而且已经成为全球各大汽车、通信企业前瞻储备技术研发的重点。从2004年开始，世界主要发达国家在智能交通领域的研究纷纷进入车联网技术研究阶段。美国启动的VII（2009年更名为IntelliDrive，后改为Connected Vehicle）计划，重在建立车辆通信和典型应用标准；日本2006年由政府和23家知名企业共同启动了Smartway计划，其核心在于整合日本智能交通系统的各项功能建立车联网系统。欧盟于2006年开始启动并资助CIVS和SafeSpot项目，对基于车联网的安全辅助驾驶和交通信息共享进行研究。国外各大汽车公司，如通用、大众、奔驰、宝马、丰田、本田等，均成立研究部门开展车联网技术的研究，纷纷开发出了适用于未来车联网系统的概念车。美国预计2030年所有车辆将安装车联网车载装置，车联网技术可有效降低交通事故率80%以上，提高运行效率10%~20%。

本书的三位主要作者是田大新、王云鹏、鹿应荣，其中，田大新负责第1、



2、4、5 章的撰写，王云鹏负责第 3 章的撰写，鹿应荣负责第 6 章的撰写。课题组朱科屹、罗浩、段续庭、周建山、单雄宇、张鑫、杨越、鲁彬彬、李琪琳、宋宇凯等同学参与了本书的编写工作。

本书得到国家自然科学基金项目 (No. 91118008)、车路协同与安全控制北京市重点实验室、城市交通管理集成与优化技术公安部重点实验室、道路与交通工程教育部重点实验室、现代城市交通技术江苏高校协同创新中心和交通运输行业智慧交通协同创新平台的资助，在此表示深深的感谢！由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请专家、学者及广大读者批评指正。

编 者

目 录



前言

第 1 章 车辆联网通信	1
1.1 专用短程通信技术 (DSRC)	2
1.1.1 DSRC 技术标准	2
1.1.2 DSRC 关键应用	5
1.1.3 DSRC 自适应数据广播 算法	7
1.1.4 基于传染病模型的车路协同 预警信息交互方法	12
1.2 蜂窝网络	16
1.2.1 蜂窝网络技术	16
1.2.2 蜂窝网络应用方向	18
1.3 车载通信终端	19
1.3.1 车载通信单元设计	20
1.3.2 软硬件架构	21
1.3.3 Non-IP 传输协议	23
1.3.4 用户操作平台开发	23
1.4 连接性能测评	25
1.4.1 系统开发流程	26
1.4.2 用户界面模块	27
1.4.3 图形展示模块	28
1.4.4 通信性能实车测试	29
1.4.5 实测数据分析	33
参考文献	38

第 2 章 车辆移动建模仿真	41
2.1 车辆群体移动建模	42
2.1.1 改进的人工鱼群算法 (AFSA)	43
2.1.2 多车协同移动模型	46
2.2 列队保持分析	51
2.2.1 车辆行驶轨迹分析	51
2.2.2 各车车速随时间变化情况 分析	53
2.2.3 各车相对距离随时间变化 情况分析	54
2.2.4 车辆数变化对实验结果 产生的影响	55
2.2.5 仿真结果分析	57
2.3 多车协同避障仿真验证	58
2.3.1 仿真场景和参数设置	58
2.3.2 仿真实验和结果分析	59
参考文献	64
第 3 章 联网车辆轨迹挖掘 算法	65
3.1 主要研究内容与方法	65
3.2 出租车 GPS 轨迹数据的处理	67
3.2.1 基本概念	67
3.2.2 出租车载客热点的提取	67



3.2.3 出租车空车到达时间 计算	71	目的与功能	95
3.3 乘客候车时间预测模型	72	5.2.2 车联网环境下安全预警 系统框架	96
3.3.1 模型建立	72	5.2.3 车联网环境下安全预警 平台搭建	97
3.3.2 模型参数	74	5.2.4 安全预警方法及验证	100
3.4 实验与模型评估	75	5.3 车联网环境下的路径诱导 系统	102
3.4.1 实验方案	75	5.3.1 动态路径诱导系统	103
3.4.2 数据训练与评估	76	5.3.2 基于路段划分的路段旅行 时间估计方法	104
3.4.3 实验结果	76	5.3.3 最优路径计算	109
3.5 结论	78	5.3.4 仿真实验与分析	109
参考文献	78	5.3.5 结论	116
第4章 车联网应急疏散系统	80	5.4 总结	117
4.1 概述	80	参考文献	117
4.1.1 研究背景	80	第6章 车联网物流配送体系	118
4.1.2 国内外研究现状	81	6.1 基于车联网的物流配送模式 构建	118
4.1.3 研究意义	82	6.2 基于车联网的物流配送模式 的优势	123
4.2 基于车联网的交通应急疏散 方法	84	6.3 利用 Petri 网对基于车联网的 物流配送模式建模分析	123
4.2.1 基于车联网的交通应急 疏散技术架构	84	6.3.1 基于车联网的物流配送 模式建模	123
4.2.2 基于车联网的交通应急 疏散优化方法	86	6.3.2 模型的性能分析	128
4.3 车联网应急疏散系统	90	6.3.3 基于车联网的物流配送模式 Petri 网模型的性能分析	130
4.4 系统测试验证	91	6.4 模型的仿真与分析	134
4.5 本章小结	92	6.4.1 仿真平台介绍	134
参考文献	92	6.4.2 模型的仿真与分析	135
第5章 车联网环境下辅助驾驶 方法研究	94	参考文献	139
5.1 概述	94		
5.2 车联网环境下的安全预警 系统	95		
5.2.1 车联网安全预警系统的			

第1章

车辆联网通信



随着我国人口数量、机动车保有量、路网结构、城市规模的不断增长与扩张，交通问题日益严重，交通拥堵、交通安全、节能减排成为新时期交通发展聚焦的三大热点。近年来，世界范围内的智能交通研发热潮推动了交通行业的推陈革新，现代交通将逐渐向更加高效、安全、环保的方向前进。我国20世纪80年代后期，开始了智能交通系统（Intelligent Transport System, ITS）基础性设施的研发工作，90年代开始建设各级交通监控、管制、指挥中心，进入21世纪，移动互联网技术的迅猛发展为交通技术的革新提供了机遇，智能交通已广泛利用无线通信技术实现数据共享，形成了以智能车辆、智能道路、智能终端为主流的发展方向。2011年4月13日，由我国交通运输部正式印发的《交通运输“十二五”发展规划》中指出：“努力提高交通运输设施装备的技术水平和信息化水平，推进交通信息化建设，大力发展智能交通，提升交通运输的现代化水平。”并强调“坚持以科技进步为引领，加快交通科技研发和应用，推进信息化建设和智能交通发展，以信息化推动交通运输的现代化。”2012年由国家发展与改革委员会（发改委）推出的发展规划《“十二五”综合交通运输体系规划》的主要任务中，在“基础设施—强化城市公共交通”和“安全保障—增强安全科研力量”两点中明确指出：“需加快智能交通建设，合理引导需求，提升城市综合交通承载力，支撑城市可持续发展，需加大智能交通技术，从技术上保证综合交通运输体系安全。”由政策规划可以看出，我国政府已经足够重视智能交通在交通运输中的重要作用，亟待应用先进的智能交通技术解决或缓解目前面临的日益严重的交通问题。

在智能交通发展过程中，多学科知识、技术体系之间融合产生的交叉技术层出不穷，车联网、车路协同技术作为引领未来的前沿技术，已经成为国际智能交



通领域研究的新热点。通过信息交互融合,实现路网信息的网络化管理,实现车车/车路间的智能协同与安全控制,可以显著提升城市交通运输系统运行效率和服务水平、减少交通事故和污染。在“十二五”期间,车联网已被列为我国重大专项第三项,定位为物联网产业化的先头兵。车联网的出现有望彻底解决目前存在的一些交通难题。同时车路协同技术目前被国内外公认为智能交通系统的重要发展方向,它可以满足我们对城市交通控制和交通信息获取的迫切需求,用于改善交通拥堵、减少交通事故发生率、降低交通污染等。在车联网、车路协同环境下,车车/车路间通过无线通信手段,实现实时的信息交互融合。车车间通过位置信息的共享,可以相互感知,结合先进的传感器技术,车辆控制技术即可实现车车间的协同避险、队列跟驰;在典型应用场景中,如十字交叉路口,车与交通信号灯系统信息交互融合,车辆可以获得信号灯的绿灯剩余时间,通过自身车速、位置信息即可判断能否正常通过交叉口,可以帮助驾驶人合理地做出选择,避免车辆进入交通信号灯“两难区”,降低发生交通事故或引起交通拥堵的可能性;在高速公路或城市道路路侧,提供了无线服务接入点,方便驾驶人实时获得天气、路况、限速等信息,同时可为乘车旅客提供优质的互联网娱乐服务;在出现应急事件时,如重大交通事故,由智能道路或其他手段感知事故点基本情况,将信息快速反馈到交通指挥中心,指挥中心根据事故情况做出合适的部署,妥善应对各种紧急事件。

由此可见,车联网、车路协同技术是改善现存交通问题的有效途径,其中移动无线通信技术对保障车车/车路顺利进行信息交互融合,提升交通效率、安全等因素起到至关重要的作用。因此,为车车/车路建立一个安全可靠、抗干扰能力强的无线通信环境就显得十分必要。

1.1 专用短程通信技术(DSRC)

1.1.1 DSRC 技术标准

车辆的移动速度较快,城市道路中车速一般为30~40km/h,省级以上道路中车速一般大于60km/h,因此车辆网络实际意义上是一种特殊的移动网络。车辆高速移动引起的多普勒频移效应会严重影响无线信道的传输质量,同时车辆行驶在一个开放的环境中,周边设施也较为复杂,一般存在树木、建筑物等可能对通信质量产生影响的干扰源,因此车辆网络对通信质量的要求更高。国内外学者通过大量的仿真和实车实验发现在车速大于60km/h的情况下,传统的802.11a/b/g/n技术的无线网络传输质量严重下降,难以适应车辆网络环境,不能提供可

靠的通信链路。为满足车辆通信服务要求，产生发展而来的适用于智能交通车辆网络环境的 802.11p 技术可以很好地解决车速对信道衰减的影响，为车车/车路提供可靠的通信链路。

世界范围内，智能交通无线网络服务的标准化进程主要聚焦于 5.9GHz 频段的专用短程通信技术（Dedicated Short Range Communications, DSRC）智能交通标准研究组织如图 1-1 所示，目前至少有三家有影响力的组织已使用 5.9GHz 频段制定相应通信标准。在欧洲，主要由欧洲电信标准化协会（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）中 TC ITS 小组负责，形成了适合车车/车路通信的标准体系，现已在 CVIS、SAFESPOT、GeoNet 等项目中成功运用；在美国，由美国电气和电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）中 802.11p、P1609 小组以及美国汽车工程师学会（Society of Automotive Engineers, SAE）联合制定了相应标准，统称为 WAVE（Wireless Access in Vehicle Environment）体系；同时，国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）TC204 WG16 小组也制定了相应通信标准，统称为 CALM（Communications access for land mobiles）体系。为了避免工作内容的重复，三家组织在制定标准时，侧重点互不相同且内容相互补充。ETSI 主要关注车车之间的多跳通信模式，IEEE 主要强调物理层使用 5.9GHz 频率的 802.11p 协议，ISO 则侧重对物理层多种接入媒质的管理^[1]。



图 1-1 智能交通标准研究组织

欧洲电信标准化协会（ETSI）为经欧盟认可的欧洲标准发展组织，针对信息、通信技术制定全球性应用标准^[2]。其中 ETSI TC ITS 致力于智能交通中道路运输相关标准的制定，其下由 5 个工作组（Work Group, WG）组成：WG1 规范车载网络的基本应用需求与服务；WG2 制定适合于 ITS 的通信协议栈体系，并



负责协调欧洲范围内不同标准制定组织以实现协议栈更好的适用性；WG3 负责制定协议栈中网络层与传输层标准，采用了基于地理位置的传输方式 GeoNetworking；WG4 制定物理层与媒体接入层标准；WG5 负责 ITS 相关的安全议题。

国际化标准组织（ISO）于 1992 年成立了与 ITS 相关的 TC204 委员会，TC204 又分为 18 个工作组（WG），其中 WG16 覆盖 ITS 的相关应用，负责制定道路运输中的中/长距离无线传输介质通信标准体系（Continuous Air-interface for Long and Medium distance, CALM），目前已更名为路运通信标准体系（Communications Architecture for Land Mobile, CALM）^[3]。CALM 的特点是物理层多种模式传输介质共同使用，包括蜂窝网络（2G/2.5G/3G）、红外传输、5GHz 频段（802.11a/p）、60GHz 频段的无线通信手段。WG16 下共有 8 个子工作组（Sub Work Group, SWG）：SWG16.0 负责 CALM 的架构制定；SWG16.1 负责 CALM 的物理层、媒体接入层标准；SWG16.2 负责网络层、传输层通信协议的设计，同时兼顾上层应用服务与下层接入媒质的衔接，是整个 CALM 体系的核心部分；SWG16.3 负责车载终端传输的数据标准；SWG16.4 侧重应用程序的管理；SWG16.5 制定紧急救援服务中消息内容标准；SWG16.6 制定非 IP 传输方式相关标准；SWG16.7 负责 CALM 的安全与合法性保障。

802.11p 是 IEEE 802.11 标准的扩充，主要应用于车载无线通信，适合智能交通系统的相关应用，IEEE 1609 是基于 IEEE 802.11p 通信标准的上层应用标准。IEEE 802.11p^[4] 支持 5.9GHz 工作频率，频道带宽 10MHz，理论传输距离将达到 1000m，很好地支持车速 60km/h 以上的移动车辆，IEEE 1609 这一标准最主要的目的是提供一个可以将车辆中的主要系统如发送机、传动系统、制动、悬架系统等信息与路侧设备进行信息融合的平台，IEEE 802.11p 与 1609 共同构成 WAVE 体系。IEEE 1609 协议族主要有 IEEE 1609.1、IEEE 1609.2、IEEE 1609.3、IEEE 1609.4 等。IEEE 1609.1^[5] 为 WAVE 的资源管理，允许远端应用程序与车载设备或路侧设备之间的通信，资源管理在整体协议栈中扮演一个应用层的角色。IEEE 1609.2^[6] 的主要目的在于发展与定义 WAVE 安全消息格式、处理 DSRC 与 WAVE 系统内部的信息安全。IEEE 1609.3^[7] 为 WAVE 系统提供网络服务，定义网络层与传输层的服务，与 OSI（Open System Interconnection）网络模型的三、四层类似，IEEE 1609.3 提供两大类网络传输服务：IPv6 传输服务和 WSM（WAVE short message）服务。IEEE 1609.3 规范了 5.9GHz 车载设备与路侧设备的网络层和传输层的服务及操作。IEEE 1609.4^[4] 提供频带的协调和 MAC 子层的管理功能。协调控制频道（Control Channel, CCH）与服务频道（Service Channel, SCH）的操作，控制频道（CCH）用来传输高优先权的车辆安全控制信息，服务信道（SCH）用来传输低优先权的娱乐服务信息等。

1.1.2 DSRC 关键应用

DSRC 技术是一种高效的专用无线短程通信技术，具有组网时间短、通信延迟小、适应车辆高速行驶环境、抗干扰能力强等特点。目前该技术已广泛应用于不停车收费、车队管理等领域，保障车辆之间、车辆与路侧之间实现顺利的信息交互，可以满足车辆快速移动环境下对车辆网络的要求。目前，DSRC 在车载环境下的应用主要有车路协同避撞控制和车队跟驰等。所谓车路协同避撞控制，是指在车路协同环境下，车车/车路之间通过 DSRC 进行信息交互，能实现对行人、障碍物的探测，避免碰撞，以及前车能把紧急制动信息快速传递给等候车辆，避免追尾事故，通过车路通信还能避免盲点区域的直角碰撞。而车队跟驰，是指交通流密度很大时，车辆之间通过信息交互，动态调整速度，车队中任一车辆的速度都受前车速度的制约。在车队跟驰中，后车与前车的距离不是时刻变化的，反而几乎总是紧随前车前进。显然，这种情况下车与车之间的信息交互对时延性的要求极度苛刻，要求它能提供低时延、高可靠性的通信。总体来说，DSRC 目前的应用主要是使车辆之间、车辆和路侧之间进行信息交互。车车之间、车辆与路侧之间进行通信的系统由许多子系统组成，通过这种信息交互，它能使车辆和道路有机地结合起来，能充分地实时采集车辆和路侧的信息，高效充分地利用交通资源。车路之间、车车之间的应用方向如下。

(1) 车路通信

车路通信主要是通过 DSRC 协议实现路侧单元 (RSU) 和车载终端 (OBU) 的通信。如图 1-2 所示，车载设备可以接收路侧设施发送的安全警告信息、交通状态信息、交通管理控制指令信息等。除此之外，路侧设施也可以采集实时的交

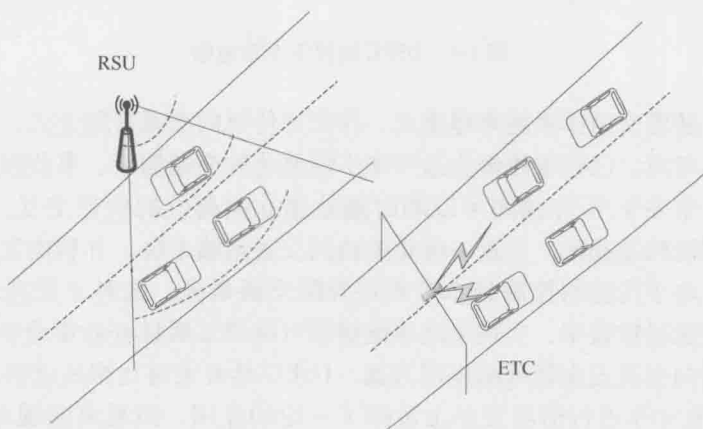


图 1-2 DSRC 协议下的车路通信



通信息，车辆自身的状态信息、道路的状态信息、车车间通过多跳传输的信息都可以通过路侧设备快速地接入互联网，并传送到交通指挥控制中心进行处理。

(2) 车车通信

车车之间主要依靠多跳 Ad-Hoc 进行通信，即车辆之间通过无线连接组成车辆自组织网络。在这种模式下，无线传输范围内的车辆可以直接进行信息交互。相距较远的车辆之间进行信息交互主要是通过无线路由协议和广播协议。DSRC 协议能很好地在车辆之间进行信息交互，它的基础是 WIFI 网络 802.11 协议，并且它充分考虑车辆之间行驶速度快、自组网拓扑结构时常快速变化、无线信道环境干扰大等车辆自组织网络的特点，建立高效的传输机制^[9]。如图 1-3 所示，通过 DSRC 协议可以实现车辆之间的预警信息传递。

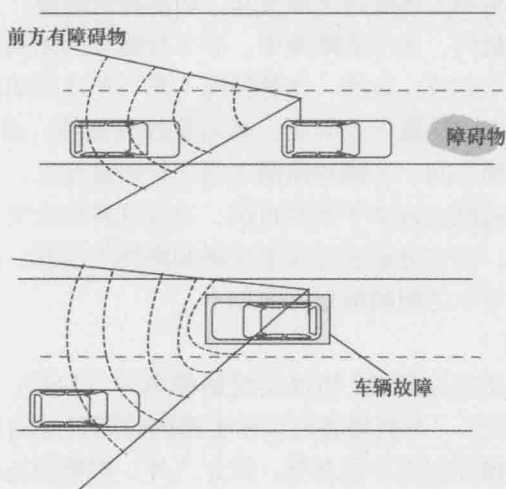


图 1-3 DSRC 协议下车车通信

目前，随着交通体系越来越庞大，仅依靠传统的交通管制方式，单从道路和车辆的角度考虑，已经很难解决近年来不断恶化的交通拥堵、事故频发、环境污染等问题。未来车车/车路间可以随时随地建立起高效的信息交互，将人、车、路的信息有机联系起来，实现一体化的协同交通运输系统，并利用先进的计算机处理技术、电子传感与控制技术等实现智能交通系统，这对于提高道路交通安全、提高交通运输效率、实现交通系统健康可持续发展具有非常重要的意义^[10]。尤其是在面向交通安全领域的应用方面，DSRC 具有无可比拟的优势。虽然目前 DSRC 已经在车车进行信息交互上发挥了一定的作用，但是离实现车车/车路间的协同交互，还有一段距离。如图 1-4 所示，车车/车路之间进行有机联动，高效地为车辆提供道路安全信息服务，是 DSRC 未来的一个应用方向。

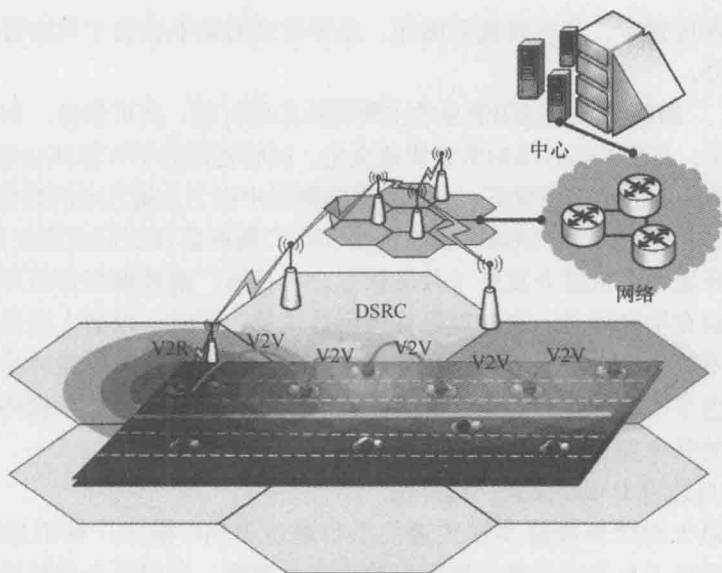


图 1-4 DSRC 应用方向

1.1.3 DSRC 自适应数据广播算法

当交通场景中发生安全事件时，车载多模式通信平台需要更为可靠的无线链路将安全事件的消息以 MAC 层广播的形式传输给其他车载通信平台，此时，针对高速运动场景下的无线通信可靠性保障，多模式通信平台将切换到 DSRC 通信模式。本节首先对 DSRC 广播技术进行介绍，然后提出一种自适应的广播消息频率算法，它能在最大程度地节约通信平台资源的同时，保证安全消息的及时传递。最后通过仿真验证算法的功能。

(1) DSRC 广播技术介绍

广播是指网络中某一源节点将一条消息发送给临近网络中的所有节点的通信过程。车载环境下的安全消息发送，一般都是基于广播模式发送的。车载环境下的 DSRC 广播通信是许多安全应用的基础。车载环境下车载网络拓扑结构本身具有一定的规模，因此，传统的大规模频繁广播容易导致网络中出现许多冗余的报文。某些时刻，广播会造成大量的通信开销和冗余报文，这很容易引起广播通信质量的下降。同时，在车载环境下一旦发生紧急情况，如交通事故预警、车车避撞、车车协同控制等，某些面向安全的应用需要通过 DSRC 进行快速广播，必须最大程度地保证车载网络节点能够紧急处理相应情况。

本节首先介绍现有的 DSRC 面向安全消息的广播通信协议，然后根据车载环境的特点以及 IEEE802.11p/1609 协议的性质，提出一种自适应的安全消息广播算法，它能有效改善车载环境下的 DSRC 通信性能，保障行车安全，同时能动态



调整广播发包频率，节省带宽和能耗，是多模式通信平台关于网络管理体系的重要组成部分。

DSRC 广播面向安全应用消息的主要目标是低时延、高可靠性。但实际的车载网络体系中，车辆的拓扑结构常常快速变化，同时链路的不可靠性会给 DSRC 通信带来更大的挑战。车载环境下，一个密集的网络中由于大量冗余的数据包会导致信道拥塞，而 IEEE802.11p 协议并没有为 DSRC 广播通信设定信道恢复机制。

车载环境下，信道介质处于共享状态，盲目的广播数据包容易导致相邻节点之间的通信竞争和冲突。这种现象称为广播风暴。同时，以最大发送频率广播安全消息并不能保证道路上所有车辆都能够接收此消息，反而可能容易引起网络拥塞。而且由于车辆的高速移动，车辆之间的距离快速变化，在车载环境下试图以一个恒定的频率发送数据包也显然不是最优的。

(2) 自适应 DSRC 模式广播算法

为了最大程度地降低多模式通信平台通过 DSRC 模式广播消息的冗余广播数，本书设计了自适应调整广播频率的算法及策略。在保证车载环境下安全消息及时到达的同时，也能降低能耗，节省带宽。在车载环境下的通信平台，其能量和带宽非常可贵，因此设计一种保证安全消息及时达到目的节点，在避免碰撞的同时，能有效地减少车载环境下的冗余信息发送，从而节约利用各种资源。下面从几个方面展开此算法的设计。

当交通场景中发生安全事件时，车载多模式通信终端需要更为可靠的无线链路将安全事件的消息以 V2V 或者 V2R 的形式传输给其他交通实体，因此，针对高速运动场景下的无线通信可靠性保障，多模式通信系统将切换到 DSRC 通信模式，利用 DSRC 技术为安全消息的传输提供可靠的无线链路。本节引入微观交通跟车模型与无线信道的两点传输概率模型，对最大可容忍消息传输时延（the maximum tolerant message delivery latency）以及 DSRC 无线信道的数据丢包率（packet loss rate）进行理论建模，然后在最大可容忍消息传输时延以及数据丢包率约束条件下，设计一种基于 DSRC 的数据包广播的算法，使得车载终端广播数据包的频率可根据传输时延和数据丢包率动态调整，实现车车间安全消息可达性的保障，从而有效避免车辆碰撞的发生。

本算法考虑常规交通流场景，如图 1-5 所示。假设某一车辆 1（用符号 V1 表示）发生紧急事件，则其多模式通信系统切换到 DSRC 链路，需要通过 DSRC 通信模式向周围邻居车辆广播紧急事件的消息。为了有效地保障车辆的安全运行，车辆 V1 的安全消息需要可靠地广播给周围的车载终端，为其他车辆的驾驶操作提供信息决策或者安全预警。假设车辆 V1 的邻居车辆都具备 DSRC 车载通信功能，且车车间的信息传递为单跳传输方式，则可进一步地考查该车辆 V1 与其最邻近的跟驰车辆 V2 之间的信息传输过程。其中，为了简化分析，假设研究

的相邻两辆车处于同一车道的直线运动状态。

DSRC模式

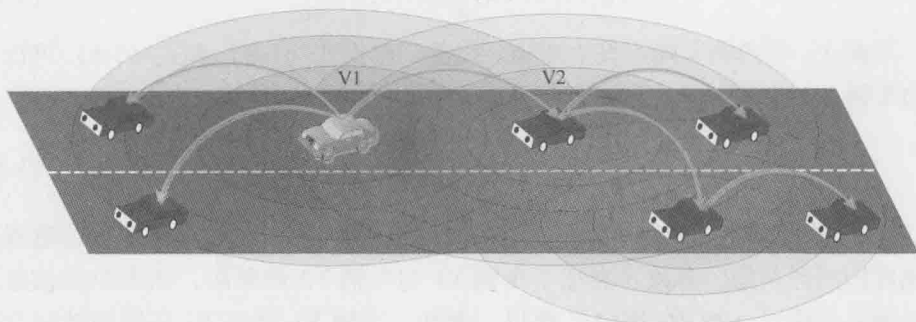


图 1-5 基于 DSRC 通信模式的安全消息广播

在前述模型场景下,首先对两车(车辆 V1 和车辆 V2)之间安全消息的广播域接收时延最大容忍值进行建模计算。记车辆 V1 与车辆 V2 之间的数据包传输时延为 t_c , 假设车辆驾驶人的反应时间为 t_r , 本书用 $(s_1(t), v_1(t))$ 和 $(s_2(t), v_2(t))$ 分别表示该两辆车的瞬时位置和车速。在匀加速直线运动假设下, 车辆 V1 在遇到紧急情况进行制动后, 车辆的运动方程可表示为($t \geq 0$)

$$s_1(t) = s_1^0 + v_1^0 t - \frac{1}{2} a t^2 \quad (1-1)$$

式中, s_1^0 和 v_1^0 分别表示车辆 V1 在 $t=0$ 时刻的位置和车速; 参数 a 表示车辆紧急制动的减速度。同理, 在式 (1-1) 的基础上建立车辆 V2 的运动方程:

$$s_2(t) = \begin{cases} s_2^0 + v_2^0 t, & t < t_c + t_r \\ s_2^0 + (v_2^0 + a(t_c + t_r))t - \frac{1}{2} a(t^2 + (t_c + t_r)^2), & t \geq t_c + t_r \end{cases} \quad (1-2)$$

经过 $(t_c + t_r)$ 的时间, 如果车辆 V2 尚未接收到前车 V1 发送的安全消息, 则后车 V2 以恒定车速巡航, V1 和 V2 之间发生碰撞的时间间隔为 $(t_c + t_r)$ 。为了进一步简化分析, 假设后车在进行制动前, 道路的局部交通流处于平衡状态。因此, 记平衡交通流的平均车速为 V , 则 $v_1 = v_2 = V$; 初始时刻两车的车间距离为 $S = s_1 - s_2$ 。记两辆车发生碰撞的时间为 $t_{\text{collision}}$, 则在式 (1-1) 和式 (1-2) 基础上求解 $s_1(t) = s_2(t)$, 得

$$t_{\text{collision}} = \begin{cases} \left(\frac{2S}{a}\right)^{\frac{1}{2}}, & t < t_c + t_r \\ \frac{1}{2}(t_r + t_c) + \frac{S}{a(t_c + t_r)}, & t_c + t_r < t \leq \frac{V}{a} + t_c + t_r \end{cases} \quad (1-3)$$

根据式 (1-3), 当给定条件:

$$(t_c + t_r) < \left(\frac{2S}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$



以及给定

$$(t_c + t_r)^2 + 2 \frac{V}{a}(t_c + t_r) < \frac{S}{2a} \quad (1-5)$$

时, 不成立, 即两辆车间不发生碰撞。由此, 根据式 (1-4) 和式 (1-5) 可以求解出车辆 V1 和车辆 V2 之间避免发生碰撞的最大可容忍消息传输时延, 记为 t_c^{\max} :

$$t_c^{\max} = \min \left\{ \left(\frac{2S}{a} \right)^{\frac{1}{2}}, \frac{V}{a} \left(\sqrt{1 + \frac{Sa}{2V^2}} - 1 \right) \right\} - t_r \quad (1-6)$$

在交通流平衡状态下, 参数 V 和参数 a 可通过车辆 V1 自身的速度传感器和加速度传感器获得, 参数 S 表征了车辆 V1 与车辆 V2 的间距, 该参数的信息可由其他通信模式 (如 3G 网络) 获得, 例如, 车辆 V1 通过 3G 车联网的后台交通数据中心和车辆 V2 共享局域实时位置信息。

算法采用丢包率衡量通信平台 DSRC 模式下的通信性能。在 DSRC 通信模式下, 为了使安全消息能够可靠地被发送到目的车载终端, 多模式通信系统采用周期性广播方式发送消息。因此, 前后跟驰的两辆车能够避免发送碰撞的条件, 即在最大可容忍消息传输时间约束 $0 \leq t \leq t_c^{\max}$ 条件下至少存在一个安全消息的数据包被接收方车辆成功接收。本书中, 将两车在 DSRC 信息交互方式下避免发生碰撞的概率为 DSRC 通信模式下安全消息广播丢包率 (记丢包发送的概率为 p_{loss}) 的函数。另外, 假设安全消息发送方车辆的消息广播频率为 f , 亦即每间隔 $T = 1/f$ 发送一次安全消息数据包。假设第 $n+1$ 次发送的数据包被接收方车辆第一次成功接收, 亦即前 n 次 ($n = 0, 1, 2, \dots$) 发送的数据包丢失, 该情况下的概率为 $(1 - p_{\text{loss}}) p_{\text{loss}}^n$, 则数据包被车辆 V2 成功接收时刻的概率分布函数可写为

$$P(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p_{\text{loss}}) p_{\text{loss}}^n \delta(t - (t_c + nT)) \quad (1-7)$$

当时间 $t < t_c^{\max}$ 时, 根据式 (1-6) 的分析可知, 车辆 V1 和车辆 V2 可避免发生碰撞, 于是, 在基于 DSRC 的数据广播模式下, 由式 (1-7) 可得前后两辆车避免发生碰撞的概率为

$$P_{\text{safety}} = \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p_{\text{loss}}) p_{\text{loss}}^n \Theta(t_c^{\max} - t_c - nT) = 1 - p_{\text{loss}}^{\left(\frac{t_c^{\max} - t_c}{T}\right)} \quad (1-8)$$

式中, δ 和 Θ 分别是 delta 函数和阶跃函数。于是, 基于式 (1-8), 进一步可得到 DSRC 消息广播最小的发包频率 f_r^{\min} :

$$f_r^{\min} = \frac{1}{t_c^{\max} - t_c} \left(\frac{\log(1 - P_{\text{safety}})}{\log(1 - p_{\text{loss}})} \right); \quad (0 \leq t_c \leq t_c^{\max}) \quad (1-9)$$

当给定 $(1 - P_{\text{safety}})$ 时, 利用模型式 (1-9) 可根据 DSRC 通信过程中的数据包传输时延 t_c , 最大可容忍消息传输时延 t_c^{\max} 以及数据丢包率 p_{loss} 动态计算最小发