

密级： 保密期限：

北京邮电大学

硕士学位论文



题目： 车联网中的资源管理关键技术研究

学 号： 2015110248

姓 名： 贺辰枫

专 业： 信息与通信工程

导 师： 牛凯

学 院： 信息与通信工程学院

2017 年 11 月 01 日

Confidentiality level:

Confidentiality period:

Beijing University of Posts and Telecommunications

Thesis for Master Degree



**Topic: RESEARCH ON KEY TECHNOLOGY OF
RADIO RESOURCE MANAGEMENT IN
VEHICLE NETWORKING**

Student No: 2015110248

Student Name: Chenfeng He

Specialty: Information and
Communication Engineering

Tutor: Kai Niu

Institute: Institute of Information
and Communication

1st November, 2017

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解并同意北京邮电大学有关保留、使用学位论文的规定，即：北京邮电大学拥有以下关于学位论文的无偿使用权，具体包括：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文，有权允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，有权允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

本人签名：_____ 日期：_____

导师签名：_____ 日期：_____

车联网中的资源管理关键技术研究

摘 要

物联网 (Internet of Things, IoT) 的概念自从 1999 年首次被提出之后, 立即在世界范围内得到迅速的发展。因此物联网也被誉为继通信、计算机、互联网之后的第三次信息发展浪潮。而车联网 (Internet of Vehicle, IoV), 作为物联网的重要应用之一, 在 2005 年被提出之后, 迅速成为学术领域的研究热点。车联网是车辆工程与通信工程、网络技术的高度融合, 它是实现智能交通系统 (Intelligent Transportation System, ITS) 的重要手段与理论基础。

传统的无线资源管理主要包含接入控制、资源分配、功率控制、信息反馈以及负载均衡等等。无线网络发展的必然趋势就是异构化, 在异构网络中, 无线资源管理方案需要协调不同的接入资源, 适配各个不同的协议, 并且能够提供跨业务的 QoS (Quality of Service) 保证, 以达到最大化系统容量的目标。但是目前的资源管理方案对于终端动态分布的自适应能力不强, 传统的无线资源管理方案并不能直接应用于新兴的车联网场景。本文将针对车联网下的无线资源分配 (Radio Resource Management, RRM)^[1] 展开研究, 主要工作如下:

首先, 针对 V2V 场景, 从提高时频资源复用率以及系统整体包到达率出发, 提出了基于载波侦听的随机选择算法以及基于地理位置的时分算法。仿真结果表明, 这两个资源分配算法适用于不同的场景, 且它们的包到达率性能都比作为参考方案的随机选择算法高 10% 左右。

其次, 针对 V2I 场景, 先后引入了基于地理位置的分簇策略、资源预留机制、冲突避让机制, 在提高时频资源复用率的同时尽可能降低车辆之间的同频干扰。并在此基础之上, 提出了基于分簇的轮询调度算法, 基于分簇的时分算法、基于分簇的簇间竞争算法。仿真结果表明, 基于分簇的时分算法适用于可靠性要求较高、时延要求较低的场景, 其包到达率达到 90% 以上; 基于分簇的簇间竞争算法适用于可靠性要求适中, 时延要求较高的场景。

最后, 搭建了一个 V2X 系统级车联网仿真平台, 涉及多个功能单元, 包括地理拓扑与传播单元、无线资源管理单元、路由单元、业务模型与控制单元。各个单元面向接口编程, 并利用反射以及 IoC 容

器实现功能单元之间的解耦、梳理并简化平台的配置，提高了平台的易用性以及可扩展性。

关键词：IoV RRM 分簇 冲突避让 资源预留

RESEARCH ON KEY TECHNOLOGY OF RADIO RESOURCE MANAGEMENT IN VEHICLE NETWORKING

ABSTRACT

The concept of the IoT has rapidly gained worldwide momentum since it was first introduced in 1999. Therefore, IoT is also hailed as the third wave of information development after communications, computers and the Internet. As one of the most important applications of IoT, IoV became a research hot spot in the academic field after it was put forward in 2005. Vehicle networking highly integrated vehicle engineering with communication engineering and network technology. It is the theoretical basis for implementing ITS.

The traditional wireless resource management mainly includes access control, resource allocation, power control, information feedback, and load balancing. The inevitable trend of the development of wireless networks is that of isomerization. In a heterogeneous network, a radio resource management solution needs to coordinate different access resources, adapt to different protocols, and provide cross-service QoS (Quality of Service) guarantees, in order to achieve the goal of maximizing system capacity. However, the current resource management solutions do not have strong adaptability to the dynamic distribution of terminals. The traditional radio resource management solutions can not be directly applied to the emerging car networking scenarios. In this paper, the research on Radio Resource Management (RRM) under car networking is carried out. The main work is as follows:

First of all, according to the V2V scenario, a random selection algorithm based on carrier sense and a location-based time division algorithm are proposed to improve the reuse rate of the time-frequency resource and the overall packet arrival rate of the system. The simulation

results show that these two resource allocation algorithms are suitable for different scenarios, and their packet arrival rate performance is about 10% higher than the random selection algorithm as the reference scheme.

Secondly, according to the V2I scenario, a geographic location-based clustering strategy, a resource reservation mechanism, and a collision avoidance mechanism are introduced successively to reduce the frequency interference between vehicles while improving the reuse rate of time-frequency resources. Based on this, a clustering-based polling scheduling algorithm, clustering-based time-sharing algorithm and clustering-based intercluster competition algorithm are proposed. The simulation results show that the clustering-based time-division algorithm is suitable for scenarios with high reliability and low latency requirements, and the packet arrival rate reaches more than 90%. The clustering-based intercluster competition algorithm is suitable for moderate reliability and high latency requirements.

Finally, a V2X system-level vehicle networking simulation platform is built, which involves multiple functional units, including geographic topology and propagation unit, wireless resource management unit, routing unit, business model and control unit. Each unit is interface-oriented and uses decoupling and IoC containers to decouple those functional units, grooming and simplifying platform configuration, and improving usability and scalability of the platform.

KEY WORDS: IoV RRM clustering conflict avoidance resource reservation

目 录

第一章 绪论	1
1.1 论文背景以及研究意义	1
1.2 车联网应用以及发展概述	2
1.3 论文研究内容与章节安排	5
第二章 车联网系统架构以及资源管理研究现状	7
2.1 车联网系统架构	7
2.2 传输模式	8
2.3 无线资源管理研究现状	9
2.4 仿真平台需求分析	11
2.5 本章小结	11
第三章 仿真平台搭建以及 V2V 资源分配算法	12
3.1 仿真平台搭建	12
3.1.1 整体架构与功能概述	12
3.1.2 地理拓扑与传播单元	13
3.1.2.1 曼哈顿街区	14
3.1.2.2 高速公路	15
3.1.2.3 车辆的撒点	16
3.1.2.4 车辆运动	17
3.1.2.5 传播模型与信道刷新	17
3.1.3 无线资源管理单元	18
3.1.4 路由单元	19
3.1.4.1 有反馈的多跳协议	20
3.1.4.2 无反馈的多跳协议	23
3.1.5 业务模型与控制单元	25
3.2 随机选择算法	26
3.3 基于载波侦听的随机选择算法	27
3.4 基于地理位置的时分算法	28
3.5 仿真及性能分析	31
3.5.1 车辆撒点	31
3.5.2 路径损耗	31

3.5.3	路由协议性能分析.....	32
3.5.4	V2V 资源分配算法仿真性能分析.....	34
3.6	本章小结.....	36
第四章	V2I 资源分配算法.....	38
4.1	分簇.....	38
4.2	接入算法.....	39
4.3	基于分簇的轮询调度算法.....	40
4.4	基于分簇的时分算法.....	42
4.4.1	资源预留机制.....	44
4.4.2	冲突避让机制.....	46
4.4.3	C-TDM 算法详细流程.....	47
4.5	基于分簇的簇间竞争算法.....	48
4.5.1	资源预留机制.....	49
4.5.2	冲突避让机制.....	50
4.5.3	C-ICC 算法详细流程.....	50
4.6	V2I 资源分配算法仿真性能分析	51
4.7	本章小结.....	58
第五章	总结与展望	59
5.1	全文工作总结.....	59
5.2	下一步的工作.....	59
参考文献	61
致谢	64
攻读学位期间取得的研究成果	65

第一章 绪论

1.1 论文背景以及研究意义

交通系统对国家的政治经济、文化教育、科学技术等方面的发展影响极大，也是城市建设的一个非常重要的方面。交通的便捷程度已经成为衡量一个城市乃至一个国家发展程度的重要标志^[2]。

近年来，随着世界经济的飞速发展，车辆在世界范围内得到广泛的普及，车辆的普及为人们的出行带来了极大的便利，但与此同时，各种问题也应运而生。各大城市严重的交通拥堵、频发的交通事故、低下的运输效率、燃料资源的严重浪费以及由此造成的环境污染已成为重要的全球性问题^[3]。发达国家和发展中国家都受到交通问题的困扰。频发的交通事故将造成巨大的生命和财产损失。据世界卫生组织（World Health Organization, WHO）的统计，全球超过 1 亿人死于交通事故，每年由此造成的经济损失高达 5000 亿美元^[4]。而且，城市交通拥堵使运输系统的效率下降，从而阻碍了经济的增长。因此，目前交通系统的安全和效率都有较大的提升空间。

车联网的概念引申自物联网，物联网的概念自从 1999 年首次被提出之后，立即在世界范围内得到迅速的发展。因此物联网也被誉为继通信、计算机、互联网之后的第三次信息发展浪潮。而车联网，作为物联网的重要应用之一，在 2005 年被提出之后，迅速成为学术领域的研究热点。车联网是车辆工程与通信工程、网络技术的高度融合，它是实现 ITS 的重要手段与理论基础^[3]。

车联网旨在通过车对车（V2V）以及车对基础设施（V2I）的通信来提供信息交换。据报道，超过 50% 的受访消费者对汽车通信有非常浓厚的兴趣，其中，将近 22% 的受访者愿意每月支付 30 至 65 美元用于车联网的增值服务^[5]。1999 年，FCC（Federal Communications Commission）分配了 75 MHz（从 5.850 GHz 到 5.925 GHz）专用短距离通信（Dedicated Short-Range Communications, DSRC）带宽。美国交通部（U.S. Department of Transportation, DOT）估计，基于 DSRC 的 V2V 通信可以减少美国所有道路交通事故的 82%，这将会拯救数千人的生命，同时挽回数十亿美元的经济损失^[6]。另外，移动蜂窝网络对车载业务的适用性也给予了极大的支持，为车载用户提供广覆盖和高数据速率的业务^[7]。

VANET^[8]是无线网络的一个新兴领域，通过车辆与车辆（V2V）之间的通信，车辆与城市或道路基础设施（V2I）之间的通信，以构建起一个实时、高效、可靠的交通信息网络^[9]。这个新兴技术领域旨在提高乘客的安全性，减缓交通流量，

减少污染,并为乘客提供丰富多样的车载娱乐应用。通过向驾驶员提供交通路况信息,例如碰撞警告,路面状况或交通状况汇报,可以协助驾驶员提前做出相应的预防措施,从而减少事故的发生。此外,乘客可以利用城市可用的基础设施连接到互联网进行娱乐活动^[10]。

车联网的网络结构具有以下特点:网络中车辆节点拓扑结构的快速变化会使得各个节点之间的通信链路的生命周期大幅缩减。此外,车辆的快速移动会导致信道严重衰落,并且路边的树木、建筑物等将产生严重的阴影衰落,进一步恶化信道质量。

传统的无线资源管理主要包含接入控制、资源分配、功率控制^[11]、信息反馈以及负载均衡等等。无线网络发展的必然趋势就是异构化^[12],具体表现为网络接入的异构性、终端的异构性、业务以及商业模式的异构性等。在异构网络中,无线资源管理方案需要协调不同的接入资源,适配各个不同的协议,并且能够提供跨业务的 QoS (Quality of Service) 保证,以达到最大化系统容量的目标^[13]。

现有的资源管理方案以及网络架构并不能很好地应对这些挑战。不足之处主要体现在以下方面:目前的资源管理方案对于终端动态分布的自适应能力不强。业务的潮汐效应^[14]将伴随着终端以及数据量的增加而变得明显。这是由于空载或者微负载的基站无法转移其处理能力从而导致资源浪费,另外,终端的集中化分布将会造成该区域内网络负荷过重,资源短缺,从而影响接入的可靠性以及时延,因此干扰和能效问题也不容忽视。

通常,在车辆通信的研究中存在两种情景,即非视距(Not Line of Sight, NLOS)和视距(Line of Sight, LOS)情景。在城市或曼哈顿街区模型中,存在着大量诸如建筑物和树木等障碍物,因此曼哈顿街区模型中的通信被认为是 NLOS,而高速公路模型中的通信被认为是 LOS 的。目前用于 V2V 通信的传统解决方案依赖于 IEEE 802.11p 标准中的自组织通信^[15]。由于车辆通信环境的动态特性以及较为严格的服务质量(Quality of Service, QoS)要求,如可靠性和延迟,这些传统解决方案并不能直接应用于新兴的 V2V 场景^[16]。因此,提出一个高效可靠的无线网络解决方案是我们目前面临的严峻挑战。

1.2 车联网应用以及发展概述

车联网的典型应用包括以下几类^[17]:

1) 语音通话服务:用户可以通过集成在车辆上的移动通信模块来进行语音通信业务。特别地,车辆可以同时提供第四代移动通信(4G)接口。车辆作为移动通信终端接入到移动通信网络中,利用车载音响提供基本的话音业务。

2) 定位服务:集成了卫星定位模块的车联网终端,可以利用卫星定位系统

完成车辆的定位功能。虽然车辆定位技术已经十分成熟并且早已商用普及，但是结合车联网技术，仍然可以带来许多性能以及功能上的增益。例如，车辆移动通信网络可以作为卫星定位系统的辅助完成车辆的定位，这样可以极大地提高定位的准确性以及时效性。此外，车辆定位产生的位置信息可以上传到车联网服务平台，开拓并发展其他车联网应用，例如车辆紧急救援、车辆防盗、车辆追踪、智能交通管理等功能。特别是智能交通管理系统，借助于车辆的位置信息，能够优化车辆的行进路线，提高道路的通行效率，极大程度地避免交通拥塞。

3) 导航服务：借助于上传到车联网服务平台的各种信息，包括车辆自身的相关信息，以及道路信息。利用车联网大数据以及云计算平台，为车辆规划并实时更新行驶路线。

4) 车辆服务中心连接服务：目前，各大汽车厂商都提供了基于无线接入的车载服务中心（Telematics Service Provider, TSP），TSP 服务基于车辆终端与服务中心之间点到点的语音通信，这样的 TSP 服务的可靠性难以保证，通用性也较差，因为各个汽车厂商都建造了自己的服务中心，而不同汽车厂商之间的服务中心是不互通的。而利用车联网提供的移动通信网络，中心连接服务的可靠性和稳定性以及相应的服务质量能够得到大幅度的提高，并且有利于制定并实现统一的服务接口。

5) 移动互联网接入：车联网也可以与互联网相互协作，理论上来说，大多数的互联网应用都可以移植到车联网系统中去。特别是在 4G 网络全面普及的今天，为车载大数据服务提供了良好的基础。

6) 第三方信息管理服务：现阶段，第三方信息管理服务大多采用 RFID（Radio Frequency Identification）技术，高科技园区、校园、商场、住宅区、商务中心等都在进出口通道安装了基于 RFID 技术的门禁设备。将进出车辆的授权信息写入 RFID 芯片，从而实现自动放行和收费的门禁系统。需要指出的是，这种技术需要额外地在车辆上安装一个 RFID 芯片，这必然会限制该项技术的应用。利用车联网终端上集成的短距离无线通信模块，以及安装在入口处的网络设备，车辆可以快速接入局域网络。在管理系统中，记录车辆的无线网卡地址即可进行授权管理。

7) 车辆紧急救援：借助于车联网系统，安装在车联网终端上的传感器以及通信设备可以自动拨打求救电话，并报告车辆具体位置信息，帮助救援人员准确快速地定位事故现场。这可以极大程度上提高伤员的存活概率。

8) 车辆数据和管理服务：车辆的静态信息一般都是存储在电子控制单元（Electronic Control Unit, ECU）之中。若要获取此类信息，必须经由专业人员并借助专业设备通过 OBD（On-Board Diagnostic）接口读取，十分的繁琐且不方便。

便。在车联网系统中，将车联网终端与 ECU 相连，车辆的静态信息就可以直接通过移动通信网络发送给相关服务提供商，极大地简化了提取过程。

美国对于车联网技术的发展^[17]可以追溯到 20 世纪 50 年代，用于车辆的自动控制系统的研究工作首先在美国部分中小型企业中开展。到了 20 世纪 60 年代，电子路径引导系统（Electronic Route Guidance Systems, ERGS）首先由美国交通部首次提出，并正式与部分大型企业共同开展研发工作。专用短程通信技术（DSRC）是 ITS 研究中的一个重要方向，作为车辆之间通信的首选技术，DSRC 的标准化、推广以及普及在很大程度上推动了整个车联网行业的发展。2004 年，ACM（Association for Computing Machinery）发起并组织了首次关于车联网标准的国际会议，车联网一词首次真正地进入了公众的视野。2006 年初，车辆基础设施一体化（Vehicle Infrastructure Integration, VII）的概念首次被提出，随即得到了各大汽车制造厂商的积极响应，各大厂商同步开展相关应用软硬件的研发工作。2009 年 12 月，美国交通运输部（DOT）发布了“ITS Strategic Research Plan, 2010–2014”计划，该计划旨在创建一个能够在车辆、道路硬件设施、各类通信设备之间进行信息交互的陆地通信系统。截至 2012 年初，美国在多个地区，针对车联网技术，进行了安全性驾驶测验，该测验用来评估人们对车联网技术的适应程度以及接纳程度，并于 2012 年 9 月至 2013 年 9 月期间，继续进行安全性驾驶模型的理论研究与测试工作。2012 年 12 月，美国交通运输部（DOT）发布了“US ITS Strategic Plan 2015-2019”计划，该计划以 2010-2014 年计划的进展为基础，在一个基于包容性、协作性、交互性和迭代性的全面视角下，确定了下一阶段 ITS 系统与车联网的研究方向与发展思路。现如今，美国的 VANET 领域正逐步向成熟阶段发展，硬件价格更加经济，人们更能接受，相关车联网业务的飞速发展，包括信息服务，即时通讯，多媒体娱乐等，极大地丰富了用户的体验。

日本对于车联网也有较为深入的研究^[18]。早在 20 世纪 70 年代初期，日本就启动了有关智能交通系统的研究工作，经过将近 25 年的发展，直至 20 世纪 90 年代中期，日本先后开展了有关车辆通信、交通管理、车辆定位以及导航、车辆安全等相关领域的研究。2000 年 4 月，日本开始建设电子不停车收费系统（Electronic Toll Collection, ETC），在各收费站部署该系统后，能够达到不停车收费、提高车辆通行效率的目的。“日本智能交通系统战略规划”由日本智能交通战略委员会于 2003 年 7 月发布，该战略提出了日本智能交通系统的发展构思以及中短期战略规划。截至 2013 年年底，日本已有 3000 万辆车安装了 VICS（Vehicle Information and Communication System）系统，其数量占比高达 40%。2011 年，日本拟引入智能交通技术，智能交通技术可以及时、高效地向车辆提供必要交通信息，很大程度缓解了交通拥堵的状况，从而改善了行驶环境。

我国对车联网技术的研究^[17]相对于国外而言，起步较晚。1986 年，在南京启动了我国第一套信号控制系统的研发工作，并于 1991 年完成开发，在南京主城区完成安装部署工作，顺利地完成了测试工作。2007 年底，上汽集团联合通用汽车公司成立了一家合资企业，名为“上海安吉星信息服务有限公司”，随即在亚洲市场推行了 Onstar 服务。2009 年，伴随着好帮手、城际通、赛格导航等多家大型企业前后推行应用无线通信技术的车载电脑系统，这意味着我国正式步入 Telematics（Telecommunications and Informatics）时代。2010 年在江苏无锡召开的中国物联网博览会中首次引入了“车联网”的相关概念。同年 10 月，国务院于“863”计划中明确指出要大力推动车联网基础设施的建设工作，开展有关智能交通领域的关键技术的研究工作，并在“十二五”期间，全面推进车联网产业链的发展。2011 年，在上海顺利召开了第二届“车联网”产业链合作研讨会。同年 7 月，在深圳国际会展中心成功举办中国车联网产业发展论坛（CNF2011），并于大会上以商业模式的视角，首次对车联网相关领域进行了深入的探讨与研究。同年 12 月，由北京邮电大学、国机汽车股份有限公司牵头，50 余家产业相关优势企业、高校及科研机构按照“自愿、平等、合作”的原则共同发起的中国车联网产业技术创新战略联盟在北京正式成立，该联盟旨在研究、跟踪国际前沿车联网技术，大力发展我国车联网相关产业，推动中国车联网健康、良性地发展。2015 年，工信部启动了“智能网联汽车”项目，拟在上海建造世界上最先进的智能网联汽车研发和生产基地。2016 年，多家大型汽车制造厂商以及通信厂商联合成立了 5G 汽车联盟（5GAA），该联盟在开发、测试、推动用于自动驾驶、业务泛在接入（无处不在、随时随地以任何方式接入网络）、智慧城市整合及智能交通等应用通信解决方案的同时，还将基于 5G 技术，对自动驾驶与未来汽车服务制定一系列认证、标准化及全球规范，并进行包括互通测试、大规模试点及外场试验联合创新及推动。2017 年 3 月，3GPP 宣布完成了 LTE-V2X 相关标准的制定与发布，车联网将进入一个蓬勃发展的时代。

1.3 论文研究内容与章节安排

本文主要研究针对 V2V 场景的资源分配算法以及针对 V2I 场景的资源分配算法，传输模式限定基于 PC5 接口的直传链路。在这种无中心自组织网络中，车辆之间独立地竞争时频资源将会产生严重的干扰，本文以提高时频资源复用率、提高系统整体包到达率、降低平均包传输时延为目标对资源分配算法进行深入的研究。主要的工作及创新点如下：

首先，针对 V2V 场景，从提高时频资源复用率以及系统整体包到达率出发，提出了基于载波侦听的随机选择算法以及基于地理位置的时分算法。这两个资源

分配算法适用于不同的场景，且它们的包到达率性能都比作为参考方案的随机选择算法高 10%左右。

其次，针对 V2I 场景，先后引入了基于地理位置的分簇策略、资源预留机制、冲突避让机制，在提高时频资源复用率的同时尽可能降低车辆之间的同频干扰。并在此基础之上，提出了基于分簇的轮询调度算法，基于分簇的时分算法、基于分簇的簇间竞争算法。其中基于分簇的时分算法适用于可靠性要求较高、时延要求较低的场景；基于分簇的簇间竞争算法适用于可靠性要求适中，时延要求较高的场景。

本论文各章节安排如下：

第一章首先介绍了车联网以及车联网中的资源分配算法的研究背景以及研究意义，对车联网的典型应用场景以及车联网的发展进行了简要的概述。最后对本文的研究内容、主要创新点以及论文的章节安排进行说明。

第二章首先介绍了车联网的经典系统架构以及车联网的传输模式，然后简要概述了无线资源管理的研究现状。最后对仿真平台的搭建进行需求分析。

第三章首先介绍了 V2X 系统级车联网仿真平台的总体架构以及功能单元的划分，并且详细介绍了各个功能单元的具体设计思路以及实现细节。然后，针对 V2V 通信场景，提出了基于载波侦听的随机选择算法以及基于地理位置的时分算法。最后给出了仿真平台的验证分析以及 2 种资源分配算法的性能评估。

第四章针对 V2I 场景，先后引入了基于地理位置的分簇策略、资源预留机制、冲突避让机制，在提高时频资源复用率的同时尽可能降低车辆之间的同频干扰。并在此基础之上，提出了基于分簇的轮询调度算法，基于分簇的时分算法、基于分簇的簇间竞争算法。最后，给出了上述 3 个方案的仿真性能评估。

第五章对全文进行总结，列出了本文工作的不足之处，并对下一阶段的研究方向做出了展望。

第二章 车联网系统架构以及资源管理研究现状

本章节首先介绍车联网系统架构, 以及 3GPP-36.885 协议^[1]所涉及到的传输模式, 包括基于 PC5 接口的直传链路以及基于 Uu 接口的非直传链路。然后梳理并总结了目前车联网领域的资源管理方案的研究现状。最后对仿真平台的搭建进行需求分析。

2.1 车联网系统架构

车联网是将先进的传感器技术、自动控制技术、数据处理技术、通信技术、网络技术、信息发布技术有机地融合于整个交通运输管理体系而建立起来的一种准确、实时、高效的交通运输综合管理和控制系统。

根据物联网的网络体系结构以及车联网所需要提供的网络服务内容, 车联网系统架构大致可以分为三层: 传感层、网络层和应用层^[19]。示意图详见图 2-1。

最底层是车联网感知层, 感知层又可以细分为上下两个子层。其中, 下子层的主要作用是利用车联网系统中的各种终端设备的传感器, 进行数据的采集, 数据内容涉及车辆的地理位置、行驶速度、路况信息、天气信息等等。而上子层的主要作用是在车辆自组织网络中进行数据的有效传输。感知层所依赖的硬件设备主要是各类传感器, 例如 GPS 摄像头, 温度、速度传感器等等, 以及信息传输设备。此外, 可以采用 RFID 技术实现数据传输。

中间层是车联网网络层, 顾名思义, 网络层的主要作用就是负责各种车联网终端接入 Internet, 从而完成各类数据的传输、分析、处理以及反馈。另外, 网络层也可以用于监控和管理车联网网络内的节点。网络层依赖的设备主要有 CPS (Cyber-Physical Systems), 其作用类似于传统以太网中的路由器, 但同时增加了控制功能。车联网中所使用的协议并非传统的 TCP/IP 协议, 因此在车辆接入 Internet 时需要进行协议的转换。

最上层是车联网应用层, 同样, 应用层又可细分为上下两个子层。其中, 下子层的主要作用是对数据进行收集和处理, 常见的各种车联网服务也是在这一个子层中定义与实现的。中间件能够使得各个组件异步工作, 从而使得服务之间解耦, 因此中间件技术也被认为是实现车联网中各种服务的首选技术。而上子层的主要作用是定义与实现人机交互界面、方式与内容。应用层的应用多种多样, 包括车辆导航、车辆定位、车况实时监控与上报、车载娱乐服务、紧急救援、智能交通管理等。

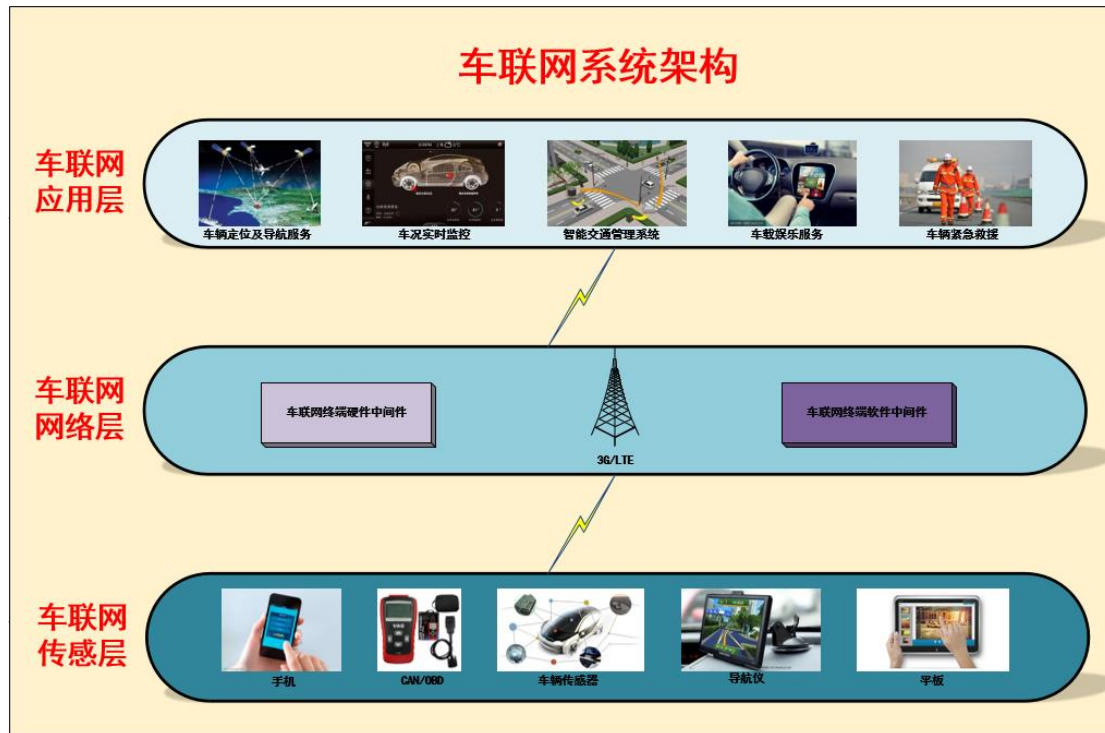


图 2-1 车联网系统架构

2.2 传输模式

V2X 中涉及的传输模式包含两种，一种适用于近距离传输；另一种适用于远距离传输。

近距离传输采用基于 PC5 接口的直传链路^[1]，并以 LTE (Long Term Evolution) 标准中基于 D2D (Device To Device) 的邻近通信服务 (ProSe) 为基础。利用基于最新标准设计的 PC5 接口，可以实现高速以及高密度通信。邻近设备可以在无 LTE 网络覆盖的条件下，进行直接通信。

远距离传输采用基于 Uu 接口的非直传链路^[1]，利用 LTE 广播技术，经过 V2X 服务器、基站、路边单元等中转，把信息传送到目的节点。

基于 PC5 接口的直传链路，网络示意图详见图 2-2。在该模式下，一个 UE 通过 Side Link，即直传链路，不进行基站接入，而是直接发送消息给周边的 UE 群。这里，UE 可以是车辆、行人或者是 RSU (Road Side Unit)。

基于 Uu 接口的非直传链路，网络示意图详见图 2-3。在该模式下，一个 UE 首先将信息通过上行链路 (Up Link) 传递给 E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network)，经过 E-UTRAN 网络中转传递后，由目的节点邻近的 E-UTRAN 通过下行链路传递给目的节点的 UE 群。UE 同样可以包括车辆、RSU 以及行人。

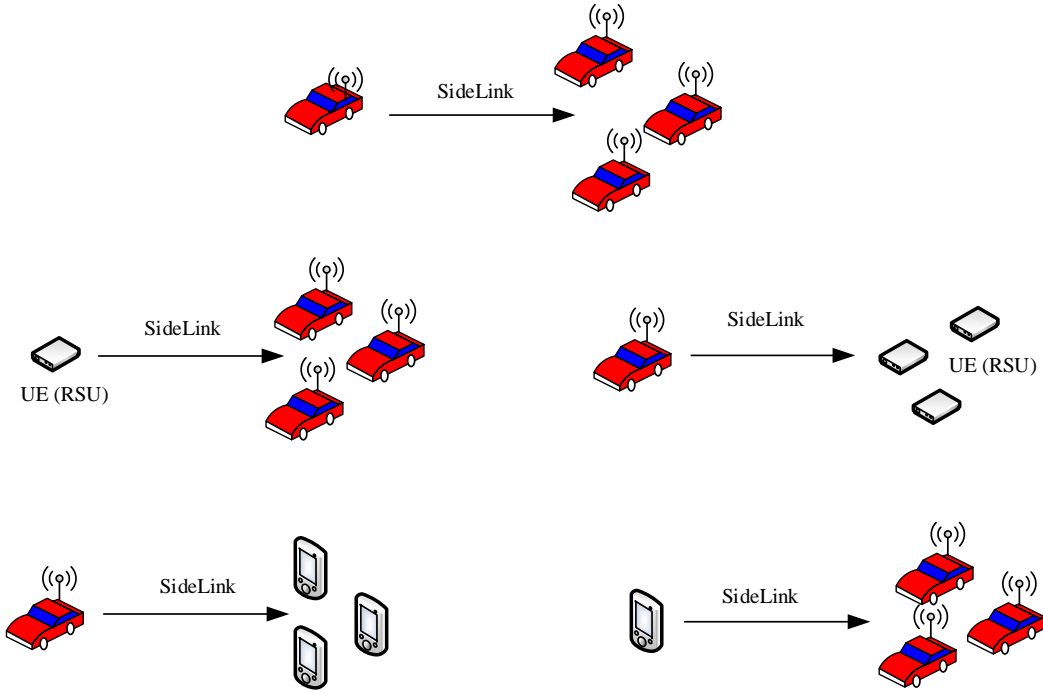


图 2-2 基于 PC 接口的直传链路

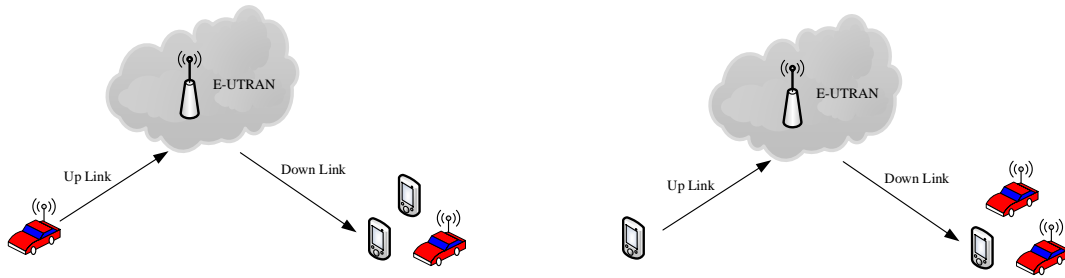


图 2-3 基于 Uu 接口的非直传链路

2.3 无线资源管理研究现状

目前，基于车联网的资源分配算法根据传输模式的不同，即基于 PC5 接口的直传链路以及基于 Uu 接口的非直传链路，大致上可以分成两类。

在基于 PC5 接口的传输模式中，V-UE 通过 Side Link 直接与周边的 V-UE、P-UE 以及 RSU 进行 V2V 以及 V2I 通信。在这种无中心自组织网络下，时频资源选择的冲突以及时频资源复用将带来极大的干扰。因此如何有效地避免干扰，并且同时提高时频资源复用效率，从而提高系统吞吐量，降低系统整体丢包率是该方向的研究核心。文献[20]中提出，可以将频域资源划分为多个不同的资源池，每个资源池分配一个优先级别，这样紧急消息就能够与非紧急的周期消息分开，

降低紧急消息与其他非紧急消息的碰撞概率,以提高紧急消息的可靠性。但是这样一来,如果在某一段时间内没有紧急消息触发,那么用于传输紧急消息的资源池将没有得到充分的利用,会造成资源的浪费以及其他非紧急消息拥塞的状况。文献[21]中提到,针对 V2V 通信场景,当前车辆在可用频段上随机进行选择,没有考虑到周边车辆的占用情况,应该根据周边车辆的占用情况,来调整当前车辆的选择结果。文献[22]中提出,车辆一旦完成时频资源的选择,就应当用该时频资源传输完毕所有的数据包,除非当前时频资源不满足新到达数据包的时延要求、分组大小或者由于干扰或者地理拓扑变化降低了信道质量。文献[23]中提出,无论如何选择资源分配算法,基于地理位置的资源分配算法都可以提高性能。许多参数包括发射功率、重传次数、载波侦听门限等等都是位置依赖的。同时基于地理位置的资源分配算法与基于随机选择和基于载波侦听的资源分配算法是不相关的。地理位置信息也可以分解为多个不同的方面,包括道路方向,车辆运动方向,车辆地理拓扑位置等等。文献[24]指出,在 3GPP 发布的标准中(Release 14),车辆之间可以通过 Side Link 进行短距离通信,而无须依赖蜂窝基础设施,在这种传输模型下,依赖分布式调度协议,车辆可以有效地进行资源竞争以及资源预留。文献[25]提出了一种基于资源正交覆盖的 D2D 通信模式,避免与传统蜂窝网络抢占时频资源,并在此基础之上,提出了基于位置的 D2D 资源分配算法 LB-DSA,该算法能够有效地提高资源利用效率,降低传输时延,提高传输精度。

在基于 Uu 接口的传输模式中,V-UE 通过 LTE 上行链路接入到基站,基站的计算资源以及时频资源十分有限,而 V-UE 的接入将大大增加接入的规模,如何高效利用有限的资源来同时满足 C-UE 以及 V-UE 的接入需求是该方向的研究核心。文献[26]将 V-UE 按照安全等级细分为安全性 V-UE、非安全性 V-UE。V-UE 通过重用 LTE 上行链路来进行通信,因此三种不同类型的 UE 之间存在着相互干扰。于是将 C-UE、安全性 V-UE、非安全性 V-UE 的资源分配问题表述为三维匹配问题,其目标是在满足 C-UE 和安全 V-UE 的要求的条件下,最大化非安全 V-UE 的总吞吐量。文献[27]提出了一种基于资源块共享和功率分配优化的资源分配算法,该算法提出了一种将 V2X 通信的严格等待时间和可靠性要求转换为仅依赖缓慢变化的 CSI 的优化约束问题。此外,为了允许 V-UE 通过 LTE 上行链路进行非正交接入,提出了为一组 C-UE 和 V-UE 集群分配多个 RB 以及发射功率的优化方案。文献[28]将 V2V 通信中的子信道分配问题转化为随机偶图的最大匹配问题。然后提出一种基于分布式混洗的 Hopcroft-Karp (DSHK) 算法来解决这个问题。文献[29]提出了一种车载网络下行资源共享的通信模式,该通信模式允许不同的 V2V 和 V2I 通信链路访问相同的资源并单独地进行数据传输。为了解决车载网络资源共享问题,利用图论的思想,提出了以下两种基于干扰图

的资源共享方案：1) 基于干扰感知图的资源共享方案；2) 基于干扰分类图的资源共享方案。文献[30]重点研究了博弈理论在车辆自组织网络（VANET）中的具体应用，提出了一种基于情境感知聚类机制的资源分配方案。文献[31]针对移动 D2D 通信提出了一种位置相关的资源分配方案，该方案可以在满足业务要求的同时降低信令开销。

2.4 仿真平台需求分析

V2X 系统级车联网仿真平台着重对网络层进行建模仿真，而对应用层以及传感层进行抽象处理。本论文仅在基于 PC5 接口的传输模式下，研究车联网 V2I 以及 V2V 的资源分配方案，也就是基于 Side Link 的 V2V 以及 V2I 通信。需要建模的内容包括以下几点：

- 1) 地理拓扑：包括曼哈顿街区以及高速公路，涉及的参数包括道路长度、道路宽度、道路方向、建筑位置、建筑高度等。
- 2) 车辆运动：包括车辆的初始化撒点、车辆速度、车辆的前进、向左/向右转弯、卷绕等。
- 3) 各类信道参数：包括大尺度衰落、小尺度衰落、阴影衰落、收发天线方向角，收发天线个数，收发天线高度，调制方式，编码码率等。
- 4) 消息的定义、触发以及传播：包括数据包大小，数据包个数，消息类型，允许最大时延，触发时刻，触发方式，传播方式等。
- 5) 载干比计算：包括接收算法，L2S 接口等。
- 6) 无线资源分配：包括总带宽大小，频域资源的划分等。

2.5 本章小结

本章主要介绍了车联网系统架构的组成，包括感知层、网络层和应用层。然后详细介绍了车联网的传输模式，包括基于 PC5 接口的直传链路以及基于 Uu 接口的非直传链路。接着，介绍了现阶段，车联网资源分配算法的研究现状，研究方向大致上可以分为两类，第一类通过 LTE 上行链路进行 V-UE 的接入，基站的计算资源以及时频资源十分有限，而 V-UE 的接入将大大增加接入的规模，如何高效利用有限的资源来同时满足 C-UE 以及 V-UE 的接入需求是该方向的研究核心。第二类则通过基于 PC5 接口的直传链路进行通信，大大减轻了基站的负担，在这种无中心自组织网络中，资源选择的冲突将会带来严重的干扰，因此，如何高效地避免冲突以及减少同频干扰，以提高系统整体吞吐量以及包到达率是该方向的研究核心。最后对仿真平台的搭建进行需求分析。

第三章 仿真平台搭建以及 V2V 资源分配算法

本章节首先介绍了 V2X 系统级车联网仿真平台的设计以及实现。包括仿真平台的总体设计架构以及功能单元的划分，给出了仿真平台的整体执行流程，并按照功能单元的划分详细给出各个功能单元的具体设计思路以及实现流程。其次，基于 V2V 通信场景，以提高时频资源复用效率，降低系统整体丢包率为目标，提出了 2 种资源分配算法，分别是基于载波侦听的随机选择算法以及基于地理位置的时分算法。最后，对仿真平台进行验证，并结合作为参考方案的随机选择算法，对 2 种 V2V 资源分配算法进行仿真性能评估与总结。

3.1 仿真平台搭建

本小节介绍 V2X 系统级车联网仿真平台的设计以及实现。首先，介绍了仿真平台的功能单元划分以及平台层次结构。然后，详细介绍了每个功能单元的具体设计以及实现。该仿真平台为资源分配算法以及路由算法的研究提供了一致性验证平台，具有至关重要的作用。

3.1.1 整体架构与功能概述

V2X 系统级车联网仿真平台模拟了位于网络层的 V2V、V2I 通信，选用基于 PC5 接口的传输模式。平台输出时延信息、冲突、吞吐量、丢包率等多项统计数据。利用 Visual Studio 集成开发环境以及 C++ 编程语言以面向对象思想进行搭建。

仿真平台系统架构图详见图 3-1。该仿真平台从功能上可以划分为以下 4 个功能单元：地理拓扑与传播单元、无线资源管理单元、路由单元、业务模型与控制单元。每个功能单元面向接口编程，提供了多个不同的具体实现。地理拓扑与传播单元包含了曼哈顿街区模型以及高速公路模型；无线资源管理单元包含了针对 V2V 通信场景的资源管理方案以及针对 V2I 通信场景的资源管理方案；业务模型与控制单元包含了安全性等级较高的紧急事件以及安全性等级较低的周期性事件；路由单元包含了面向可靠传输的有反馈路由协议以及面向传输速度的无反馈路由协议。仿真平台经过精心设计，在各种层次进行不同的抽象解耦，各种不同的实现可以通过配置文件进行自由组合，极大程度提高了平台的可扩展性以及易用性。

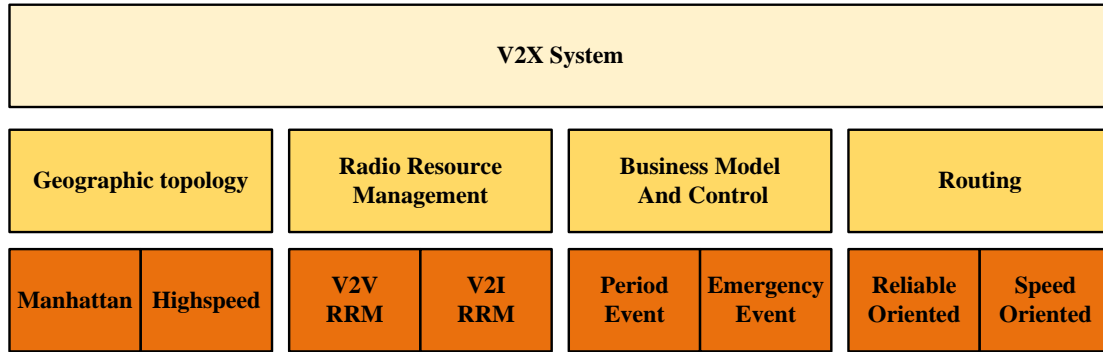


图 3-1 V2X 系统级仿真平台分层架构

仿真平台整体流程图详见图 3-2。首先，仿真平台启动时，读取配置文件，包括各种仿真参数，以及各个模块的具体实现的选择，并且根据配置初始化对应的功能单元。以 TTI 为最小粒度，依次调用各个功能单元进行状态更新：车辆运动以及信道响应状态的更新，触发新事件，然后调用无线资源管理单元进行状态更新。仿真结束前，进行数据的统计输出，包括时延信息，吞吐量，丢包率，冲突频率统计等等。

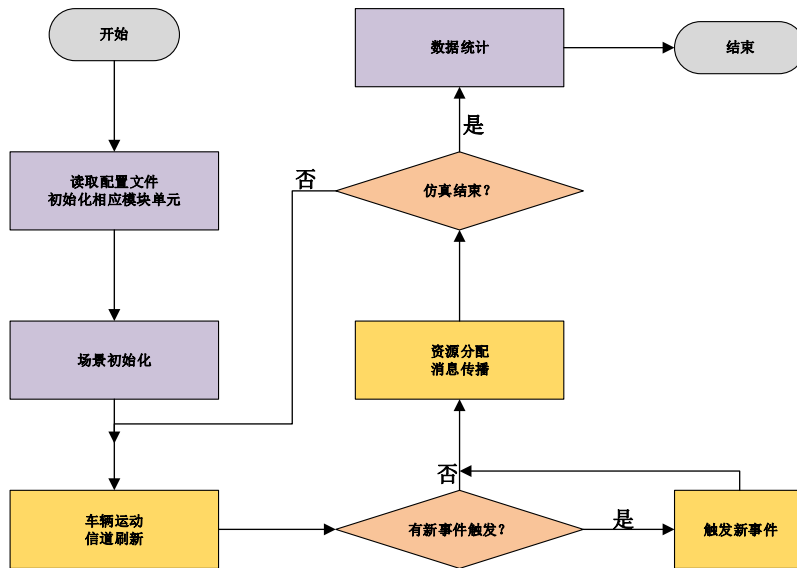


图 3-2 V2X 系统级车联网仿真平台总体流程

3.1.2 地理拓扑与传播单元

地理拓扑与传播单元是 V2X 系统级车联网仿真平台中最基础的功能单元，其功能包括车辆撒点，位置刷新，信道响应计算，衰落计算等等。根据 3GPP-36.885 协议规定，地理拓扑模型有曼哈顿街区模型和高速公路模型两种，每种模型依据相关协议选用相应的地理拓扑参数、信道模型、衰落模型以及参数。

在地理拓扑与传播单元中，设计了相应的子过程，包括地理拓扑建模、车辆撒点、车辆运动、传播模型与信道刷新 4 个子过程。各个子过程的调用关系详见图 3-3。

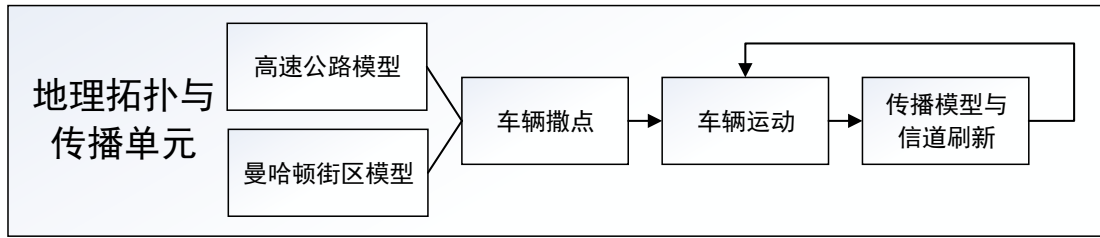


图 3-3 地理拓扑与传播单元各子过程调用关系

3.1.2.1 曼哈顿街区

曼哈顿街区模型如图 3-4 所示，城市道路可由多个矩形的 Road Grid 单元组成。根据 3GPP-36.885 协议规定，其中 Road Grid 单元长度为 433m，宽度为 250m，车道宽度为 3.5m，人行道宽度为 3m。各种数据均可通过修改平台配置文件进行动态地调整。具体的曼哈顿街区参数详见表 3-1。

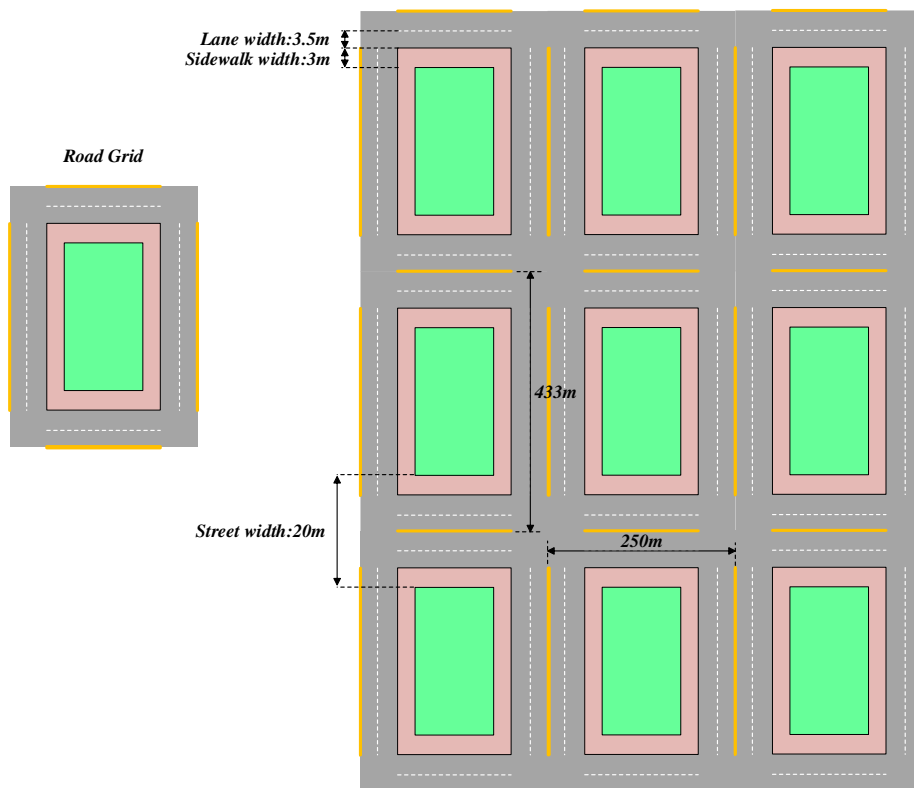


图 3-4 曼哈顿街区模型

表 3-1 曼哈顿街区模型参数配置

参数	说明
车道数量	每个方向有两条车道，即一条街区道路有 4 条车道
车道宽度	3.5m
“道路-建筑”网格单元大小（即被四条街区道路包围的区域，每条街区道路取内侧道路属于该网格单元）	433*250m ² ，该区域保留了行人通道，即该区域内既没有车辆也没有建筑
仿真区域大小	1299*750m ²
车辆密度	在同一个车道上，平均车辆间距为 $d = 2.5 \cdot v$ (m)， v 表示车辆绝对速度，在一个仿真区域中所有道路的“密度/速度”之比保持一致
绝对车速	15km/h-60km/h

3.1.2.2 高速公路

高速公路模型示意图详见图 3-5。在高速公路模型中，共有两个方向，每个方向三条道路，总共六条道路。其中，每条道路宽度为 4m，总的仿真长度根据仿真的需求设定，一般大于 2km。具体的高速公路模型参数详见表 3-2。

表 3-2 高速公路模型参数配置

参数	说明
车道数量	每个方向 3 个车道，总共 6 个车道
车道宽度	4m
仿真区域大小	$24 \times L$ (m ²)， L 表示仿真区域长度
车辆密度	在同一个车道上，平均车辆间距为 $d = 2.5 \cdot v$ (m)， v 表示车辆绝对速度，在一个仿真区域中所有道路的“密度/速度”之比保持一致
绝对车速	70km/h-140km/h

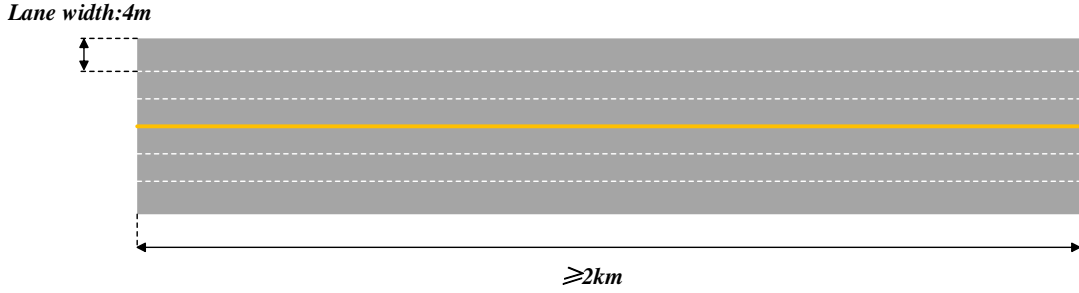


图 3-5 高速公路模型

3.1.2.3 车辆的撒点

A. 曼哈顿街区

车辆的位置在空间上服从泊松分布，而车辆的密度是依据车辆的实际速度计算得到。根据 3GPP-36.885 协议的规定，同一车道中的平均车间距与车辆的实际速度之间满足如下关系：

$$d = 2.5 \cdot v \quad (3-1)$$

其中， d 表示同一车道中的平均车间距， v 表示车辆的实际速度，取值为 $15\text{km/h} - 60\text{km/h}$ ，从而根据给定的车辆速度能够计算得到相应道路的车辆之间的平均间隔距离。通过车辆间的平均间隔距离乘以道路宽度就可以求得该道路上的泊松分布系数，再根据总车道面积就能够通过空间泊松分布计算得到该车道的车辆数。

以地理拓扑的最中心点为坐标原点，建立坐标系，如图 3-6 所示。

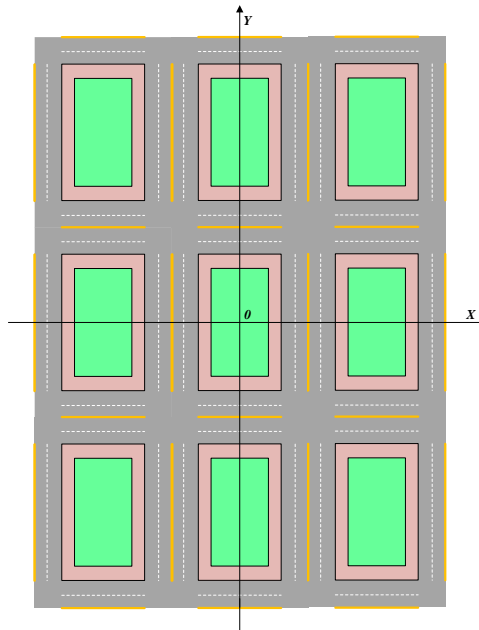


图 3-6 曼哈顿街区坐标系建立

B. 高速公路

车辆到达的时间间隔满足服从参数为 λ 的负指数分布，根据 3GPP-36.885 协议规定， λ 的取值为 $1/2.5$ 。首先生成数量足够多的到达时间间隔，然后再根据车辆速度与到达时间来计算每个车辆的初始坐标。

以地理拓扑的最中心点为坐标原点，建立坐标系，详见图 3-7。

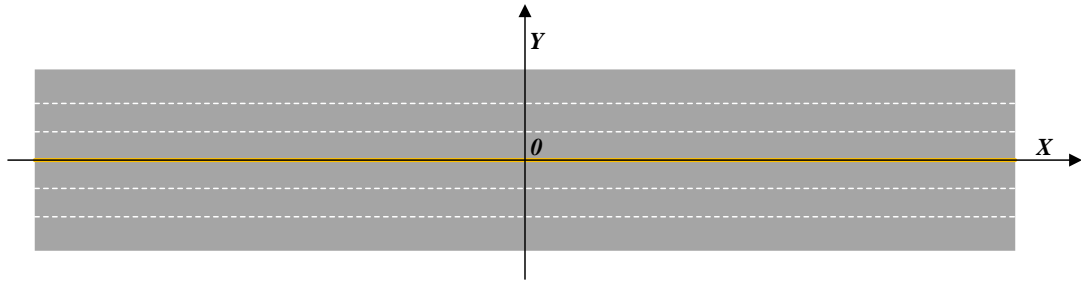


图 3-7 高速公路坐标系建立

3.1.2.4 车辆运动

A. 曼哈顿街区

在曼哈顿街区模型中，车辆运动采用靠右行驶的原则，同时在同一方向的道路上存在两条车道，车辆的速度为 $15\text{km/h} - 60\text{km/h}$ 。每 100TTI 的仿真时间会更新一次车辆的坐标位置。当车辆行驶至交叉路口时，车辆的行驶方向按照如下概率更新：0.5 的概率直行；0.25 的概率右转；0.25 的概率左转。当车辆到达道路边缘时，采用简单卷绕的方式让车辆重新进入地理拓扑区域，继续行驶。

B. 高速公路

在高速公路模型中，车辆同样采用靠右行驶的原则，同侧的三个车道行驶方向相同，速度为 $70\text{km/h} - 140\text{km/h}$ ，分别对应中等以及稀疏的车辆分布情形。当车辆到达道路边缘时，采用简单卷绕的方式让车辆重新进入地理拓扑区域，继续行驶。

3.1.2.5 传播模型与信道刷新

车辆与车辆之间的传播模型参数详见表 3-3。

表 3-3 车辆与车辆传播模型参数

地理拓扑模型	曼哈顿街区	高速公路
路径损耗模型	WINNER+ B1 manhattan (天线高度设为 1.5m)。如果距离少于 3m 按照 3m 计算路径损耗	LOS in WINNER+ B1 (天线高度设为 1.5m)。如果距离少于 3m 按照 3m 计算路径损耗
阴影分布	对数正态分布	
阴影衰落标准差	LOS 为 3dB; NLOS 为 4dB	3dB
非相关距离	10m	25m
快衰落	由于篇幅原因, 不再详细列出, 如有兴趣, 请参考文献 [32] 的 A.2.1.2.1.1 以及 A.2.1.2.1.2 小节	

初始化时, 假设 N 为所有车辆数。 N 个车辆的位置按照撒点模型产生。路径损耗 $P_L(0)$ 按照车辆位置和相应的路径损耗模型产生 $N \times N$ 的矩阵。阴影衰落 (使用 \log 域) $S(0)$, 根据相应的阴影衰落模型产生 $N \times N$ 的矩阵。快速衰落 $F(0)$, 根据相应的快衰落模型产生 $N \times N$ 的矩阵。

车辆与路边单元的传播模型, 仅改变路边单元的天线高度为 5m。因而这里统一为车辆与车辆之间的传播模型。

车辆与车辆之间的信道刷新, 信道刷新的周期为 100TTI。车辆位置按照运动模型进行更新。 $P_L(n)$ 的 $N \times N$ 矩阵根据车辆更新后的位置进行更新。

阴影衰落依据公式 (3-2) 计算得到:

$$S(n) = e^{-\frac{D}{D_{decor}}} * S(n-1) + \sqrt{1 - e^{-\frac{2D}{D_{decor}}}} * N_s(n) \quad (3-2)$$

其中, $N_s(n)$ 是按照相应的阴影衰落模型产生的 $N \times N$ 的矩阵; D 是更新后两个车辆之间的距离变化量; D_{decor} 表示非相关距离, 具体数值详见表 3-3; 快衰落根据时间变化而不根据车辆位置变化。

3.1.3 无线资源管理单元

在车联网系统中, 时频资源是非常稀有的共享资源。从某种程度上, 资源管理算法的好坏将决定了整个车联网系统的性能, 包括整体的吞吐量、丢包率、冲突频率、时延等性能指标。因此无线资源管理单元在 V2X 系统级车联网仿真平台中起到至关重要的作用。

无线资源管理算法要解决的问题是, 尽可能地提高时频资源利用率, 降低消息传输时延, 减少冲突频率。

在资源分配的过程当中，依据不同的情景，冲突可以细分为以下两类：

选择冲突：即某车辆节点进行时频资源选择时，选取了邻近车辆已经占用的时频资源块。选择冲突必然会导致传输冲突。

传输冲突：即由于不同车辆选择了相同的时频资源块并进行消息的传输，此时产生了非常严重的干扰，极大地降低了包到达率性能。

V2X 消息可以细分为 V2I 消息、V2V 消息以及 V2P 消息，其中 V2P 消息类似于 V2V 消息，不做单独讨论。总体上，在 VANET 网络下，资源管理算法包含如下三种策略：

Collision avoidance based on sensing：基于载波侦听的选择冲突避让机制^[21]，车辆在自由选择资源块进行数据包传输前，首先会检测当前选择的资源块是否被占用，如果检测到该资源块已被占用，那么会执行选择冲突避让策略，即当前车辆不会选择该资源块，进而选择其他未被占用的资源块，从而达到避免选择冲突的效果。

Enhanced random resource selection：最基本的随机选择算法是状态无关的随机选择算法，其性能较差，如果能够充分利用车辆的状态（车辆自身的信息，以及车辆搜集到的周边信息）来加强随机选择算法^[20]，那么同样能够得到非常显著的增益。

Location-based resource allocation：虽然研究的是自组织网络的资源分配算法，但同样也可以借助基站、RSU 等基础设施提供的信息，来协助资源分配^[33]。

具体的资源分配算法，将在本章节以及第四章中进行详细介绍，在此不再赘述。

3.1.4 路由单元

路由单元是 V2X 系统级车联网仿真平台中位于网络层的一个功能单元。在无中心自组织的车联网网络中，每个车辆节点同时扮演着不同的角色：既可以是信源，即消息的发送端；也可以是信宿，即消息的接收端；还可以充当一个中间节点，即路由节点，起到转发消息的作用，将来自上一节点的消息转发给下一个节点。

路由单元在 V2X 系统级车联网仿真平台中起到至关重要的作用。首先，它屏蔽了底层地理拓扑的具体建模信息；其次，提供完备、可靠的消息转发协议；最后，为各种不同的路由算法提供统一的接口。

在车联网系统中的每个车辆都可以作为路由节点，接收来自上一个车辆节点的消息，并将其转发给下一个车辆节点。不同的消息转发协议将对消息传递的效率，消息传递的可靠性产生非常大的影响。本文将给出两种不同的消息转发协议，

一种面向消息传递的可靠性，另一种面向消息传递的时效性。

3.1.4.1 有反馈的多跳协议

顾名思义，有反馈的多跳协议在消息转发的过程中，有类似于 TCP 协议的握手阶段，并且包含了消息重传机制，以此来保证消息转发的可靠性。正因为如此，有反馈的多跳协议的时效性较差。另一方面，TCP 协议位于 OSI 七层协议的传输层，各层之间以低耦合的方式协作，TCP 协议自然不必考虑位于物理层以及链路层的时频资源分配情况。但是，在本章设计的 V2X 系统级车联网仿真平台中，并不是严格按照 OSI 七层协议进行设计的，因此在网络层包含了有关时频资源的调度情况，因此当前车辆在进行下一跳车辆节点选取的过程中，还必须依赖资源管理算法进行时频资源的实时分配。

在 V2X 系统级车联网仿真平台的设计中，整个频域资源被划分成多个 RBG (Resource Block Group)，每个 RBG 包含 1 个或多个 RB，从而资源分配的基本单位不再是 RB 而是 RBG。针对有反馈的多跳协议，设计了以下 5 种节点的状态（状态的最小粒度是 RBG，意味着一个车辆节点的不同 RBG 可以处于不同的状态）：

$IDLE(i,k)$ ：车辆节点 i 的第 k 个 RBG 处于空闲状态。

$SEND_SYN(i,j,k)$ ：车辆节点 i 通过第 k 个 RBG 发送请求信号 (SYN) 到下一跳车辆节点 j 。

$SEND_ACK(j,i,k)$ ：车辆节点 j 的第 k 个 RBG 收到来自其他一个或多个车辆节点的 SYN 信号。车辆节点 j 的第 k 个 RBG 此时可以转发消息，因此车辆节点 j 选择帮其中一个请求车辆节点 i 转发消息，此时在第 k 个 RBG 发送确认信号 (ACK) 给被选中的请求车辆节点 i 。对于其他未被选中的请求车辆节点，依次在第 k 个 RBG 发送拒绝信号 (REFUSE)。

$SEND_MESSAGE(i,j,k)$ ：车辆节点 i 和车辆节点 j 的“连接”已经建立，现在在第 k 个 RBG 上进行消息的传输，该状态表示源车辆节点 i 的状态。

$RECEIVE_MESSAGE(j,i,k)$ ：车辆节点 i 和车辆节点 j 的“连接”已经建立，现在在第 k 个 RBG 上进行消息的传输，该状态表示目的车辆节点 j 的状态。

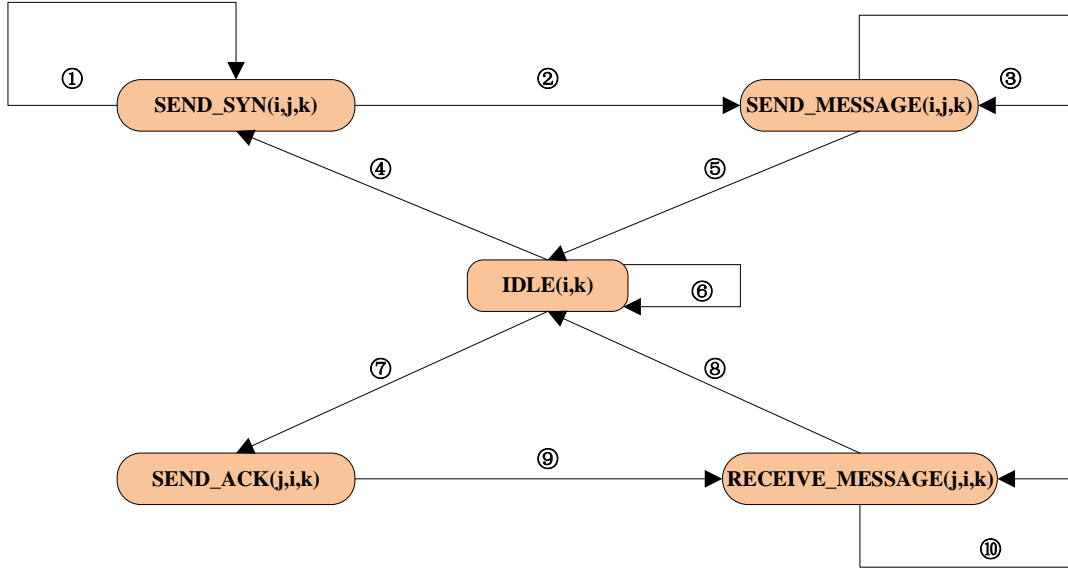


图 3-8 有反馈多跳协议状态转移图

各个状态之间的状态转移如图 3-8 所示，图中各种转移过程详细解释如下：

①：车辆节点 i 的第 k 个 RBG 由于严重的干扰或者衰落，尚未收到下一跳车辆节点 j 的 ACK 确认信号或者明确收到下一跳车辆节点 j 的 REFUSE 信号。此时需要重新根据路由算法以及资源分配算法选择下一跳车辆节点以及传输的 RBG。

②：车辆节点 i 的第 k 个 RBG 收到下一跳车辆节点 j 的 ACK 确认信号，于是进入到消息发送阶段。

③：消息发送可能会经过多个 TTI，直至消息的所有数据包全部发送完毕之前，当前车辆节点始终处于该状态。

④：车辆节点 i 有消息要进行转发，于是经过路由算法选择下一跳车辆节点 j 以及经过资源分配算法选择传输的 RBG 之后（假设选中了第 k 个 RBG），向选中的车辆节点 j 的第 k 个 RBG 发送 SYN 信号，请求下一跳车辆节点 j 转发消息。

⑤：消息传输完毕之后，车辆节点 i 的第 k 个 RBG 进入空闲状态。

⑥：车辆节点 i 的第 k 个 RBG 持续处于空闲状态。

⑦：车辆节点 i 的第 k 个 RBG 收到了至少一个来自其他车辆节点的 SYN 信号，于是通过相应的选择策略，选择某个请求车辆节点 j ，并通过第 k 个 RBG 发送 ACK 信号，确认转发。至于其他未被选中的请求车辆节点，则全部发送 REFUSE 信号，拒绝转发。

⑧：消息传输完毕后，车辆节点 i 的第 k 个 RBG 进入空闲状态。

⑨：车辆节点 i 的第 k 个 RBG 发出 ACK 确认信号确认转发后，进入到消息接收阶段。

⑩：消息发送可能会经过多个 TTI，直至消息的所有数据包全部发送完毕之

前，当前车辆节点始终处于该状态。

可以看出，消息在每次转发的时候都必须有 2 个 TTI 来进行发送 SYN 信号以及发送 ACK 信号的步骤，这势必会增加消息的整个传输时延。伴随着车辆数量的提高，还可能出现多次“连接失败”的情况，也就是被请求的车辆拒绝转发消息，此时将花费一个或更多 TTI 来进行“连接”操作。另外，随着多跳数量的增加，2 个 TTI 的额外时延也会同步增长。

为了保证有反馈多跳协议的可靠性，在消息传输过程中，需要增加重传机制，详细过程如下，流程图详见图 3-9。假设目前“连接”已建立，已经开始传输数据包

- 1) 车辆节点 i 在第 k 个 RBG 向车辆节点 j 发送数据包，并等待车辆节点 j 的反馈信息。
- 2) 对于车辆节点 j 收到的每一个数据包，都要进行 CRC 校验，以验证数据包的完整性以及数据的正确性。并将校验结果 (RESEND/CONTINUE) 发送给车辆节点 i ，进入步骤 3 或步骤 4。
- 3) 如果车辆节点 i 收到的反馈信息是 RESEND，意味着上一次发送的数据包发生了误码，如果此时重传次数已经超过了最大的重传限制，那么直接判定该数据包丢失，否则重新传输该数据包。
- 4) 如果车辆节点 i 收到的反馈信息是 CONTINUE，意味着上一次发送的数据包被正确接收，因此继续传输下一个数据包。

可以看到，由于反馈机制以及重传机制的引入，数据包传输的可靠性得到非常大的提升，但与此同时，数据包的传输时延将会大大增加。

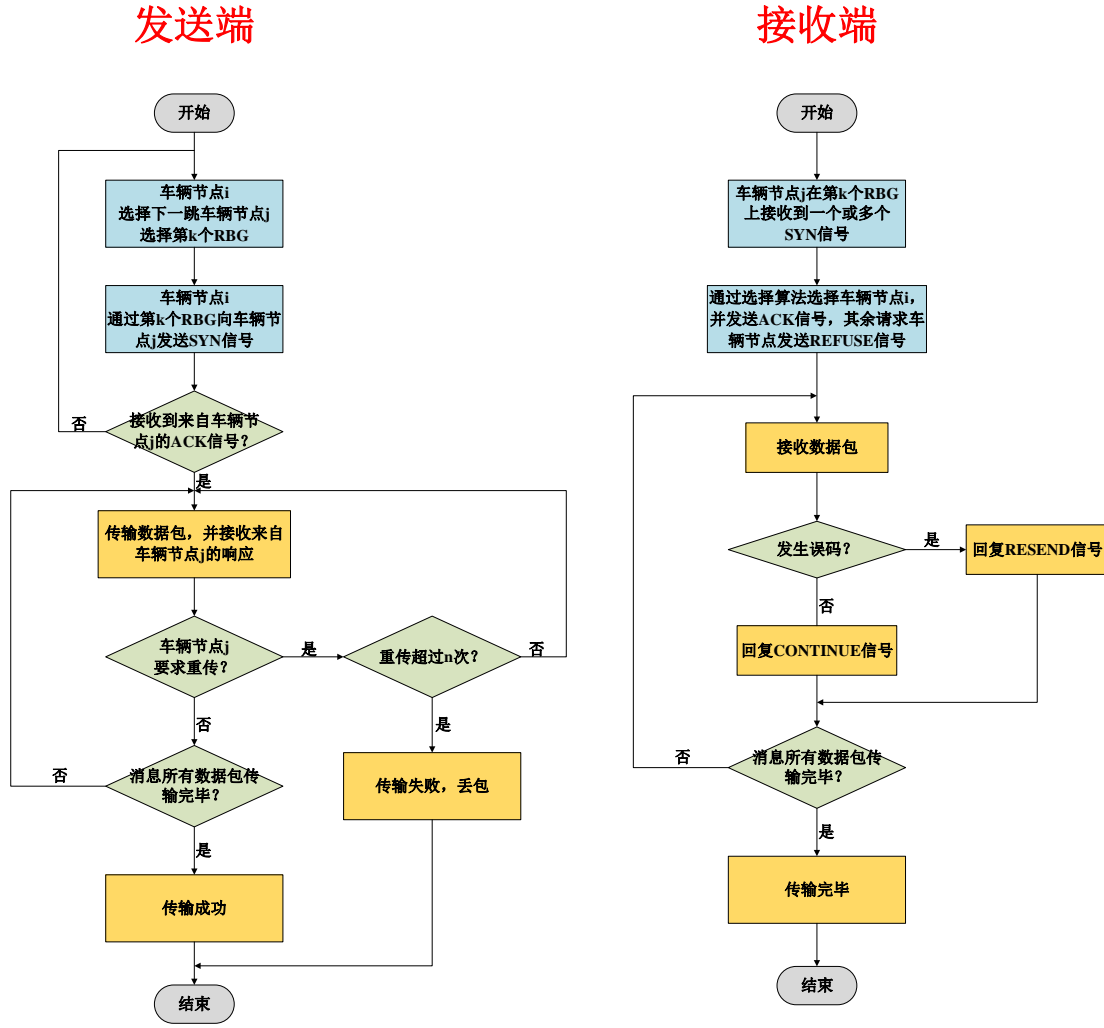


图 3-9 有反馈多跳协议消息转发流程

3.1.4.2 无反馈的多跳协议

类似地，无反馈的多跳协议在消息转发的过程中，类似于 UDP 协议。同样地，UDP 协议位于 OSI 七层协议的传输层，各层之间以低耦合的方式协作，UDP 协议自然不必考虑位于物理层以及链路层的时频资源分配情况。但是，在本章设计的 V2X 系统级车联网仿真平台中，并不是按照 OSI 七层协议进行设计的，因此在路由单元中包含了有关时频资源分配的相关信息。

同样，在无反馈的多跳协议中，资源分配的基本单元是 RBG 而不是 RB。无反馈多跳协议转发过程类似于 UDP 协议，当前车辆节点在有消息要转发的时候，首先根据路由算法选择下一跳车辆节点，然后根据无线资源管理算法进行 RBG 的选取。针对无反馈的多跳协议，设计了以下 3 种节点的状态（状态的最小粒度是 RBG，意味着一个车辆节点的不同 RBG 可以处于不同的状态）：

$IDLE(i,k)$ ：车辆节点 i 的第 k 个 RBG 处于空闲状态。

$SEND_MESSAGE(i, j, k)$: 车辆节点 i 直接在第 k 个 RBG 将消息发送给车辆节点 j , 该状态表示源车辆节点 i 的状态。

$RECEIVE_MESSAGE(j, k)$: 车辆节点 j 在第 k 个 RBG 上检测到有消息到达, 因此处于接收状态, 该状态表示目的车辆节点 j 的状态。

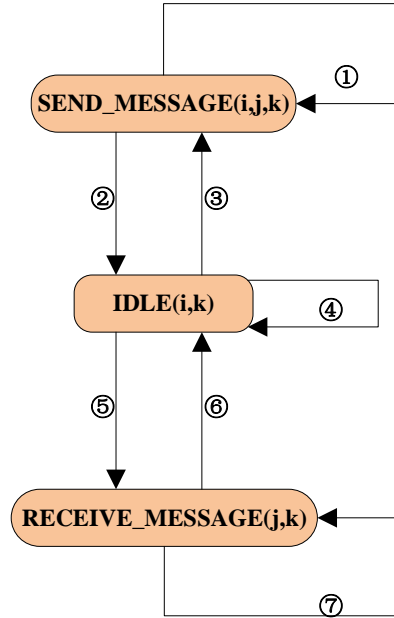


图 3-10 无反馈多跳协议状态转移图

各个状态之间的状态转移如图 3-10 所示,图中各种转移过程详细解释如下:

①: 消息发送可能会经过多个 TTI, 直至消息的所有数据包全部发送完毕之前, 当前车辆节点始终处于该状态。

②: 车辆节点 i 的所有消息发送完毕, 第 k 个 RBG 进入空闲状态。

③: 车辆节点 i 有消息要转发, 通过路由算法选择下一跳车辆节点 j , 并且通过无线资源管理算法选择相应的 RBG, 即将进入到发送消息的状态。

④: 车辆节点 i 的第 k 个 RBG 持续处于空闲状态。

⑤: 车辆节点 j 在第 k 个 RBG 上检测到有消息到达, 即将进入到接收消息的状态。

⑥: 车辆节点 j 在第 k 个 RBG 上接收的消息已经传输完毕, 第 k 个 RBG 进入空闲状态。

⑦: 消息发送可能会经过多个 TTI, 直至消息的所有数据包全部发送完毕之前, 当前车辆节点始终处于该状态。

在该多跳协议中, 一个非常显著的特点是, 作为接收方的车辆节点 j , 并不知道此时在第 k 个 RBG 上接收的是哪个车辆的消息, 或者说同时接收了多个不同车辆的数据包, 此时势必产生大量的冲突, 但是由于没有类似于有反馈多跳协

议中的重传以及确认连接的机制，传输时延将非常小。另外，在车辆密度较小，消息产生频率较低的情况下，该协议并不会产生很多的冲突，此时，无反馈多跳协议往往要优于有反馈多跳协议。

无反馈多跳协议的流程图如图 3-11 所示：

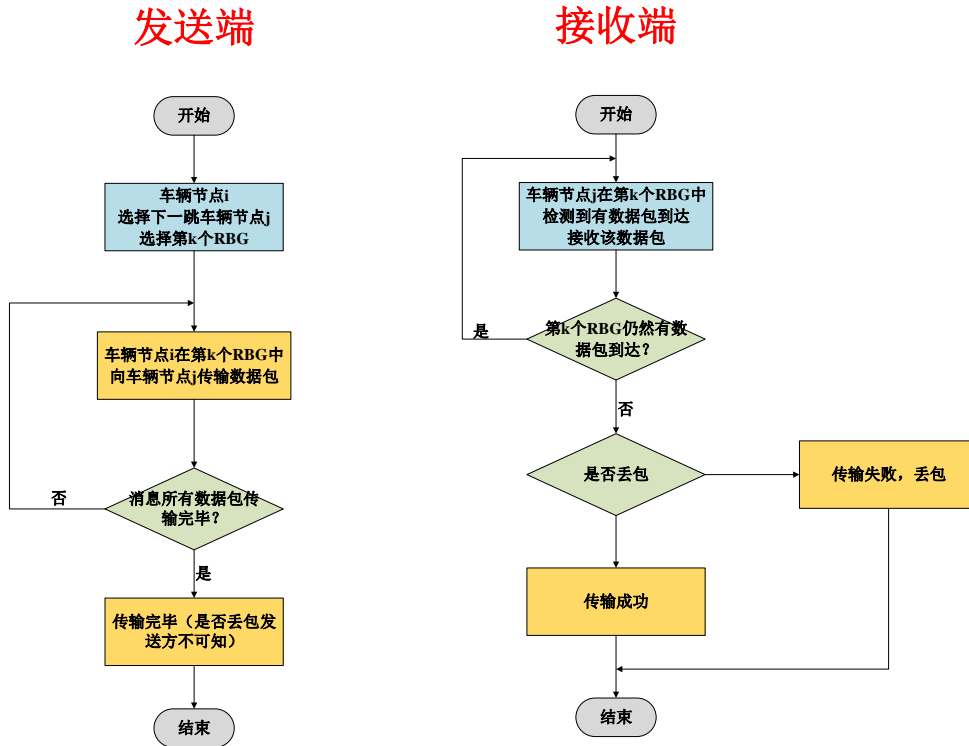


图 3-11 无反馈多跳协议消息转发流程

3.1.5 业务模型与控制单元

根据 3GPP-36.885 协议的规定，车联网中的消息类型大致上可以分为两类：优先级较高的紧急消息以及优先级较低的周期消息^[1]。其中优先级较高的紧急消息主要包括交通事故预警、交通拥堵汇报、救援车辆避让等等；优先级较低的周期消息主要是车辆自身的状态信息，包括车辆行驶速度、车辆行驶方向、车辆位置信息、车辆引擎状态、车胎状态等等。此外，还可能有非安全相关的业务，包括各类车载应用软件产生的个人数据，例如网页浏览、车载娱乐、车载语音、视频等。

V2X 系统级车联网仿真平台支持安全等级较高的紧急消息以及安全等级较低的周期消息。对于周期性消息的产生周期，3GPP-36.885 协议有着明确的定义，如表 3-4 所示。

表 3-4 周期性消息在不同地理拓扑模型下的周期

车辆撒点情景	车辆绝对速度 (km/h)	消息产生周期 (TTI)
高速公路	140	100
高速公路	70	100
曼哈顿街区	60	100
曼哈顿街区	15	100
曼哈顿街区	15	500

此外，对于周期性消息，信息的组成结构以及具体大小如下：一个 300-bytes 的数据包，加上四个 190-bytes 的数据包。不同的车辆之间产生数据包的时刻完全随机，仅需要保证对于每个车辆而言数据包的产生是周期性触发的。

对于非周期性消息，其优先级一般要高于周期性消息。可以采用简单的随机触发算法来产生非周期性消息，同时各个车辆对于非周期性消息的产生相互独立。

3.2 随机选择算法

在随机选择算法(Random)中，将整个频域资源划分成多个 RBG，一个 RBG 包含一个或多个 RB。随机选择算法非常简单，就是在可选的 RBG 集合中，挑选一个 RBG 用于广播本次消息。在车辆密度较小的场景，随机选择算法可以取得非常好的效果，并且算法实现复杂度极低，效率非常高，但是在车辆密度较高的场景，该算法的效果就会急剧下降，因为在同一时间段内，可能会有许多地理位置相近的车辆同时占用同一个 RBG 进行传输，会产生严重的干扰。

Random 算法流程图详见图 3-12。车辆在所有 RBG 集合中随机选择一个 RBG，作为本次消息发送的频段，然后进行消息的发送，直至消息的所有数据包发送完毕。

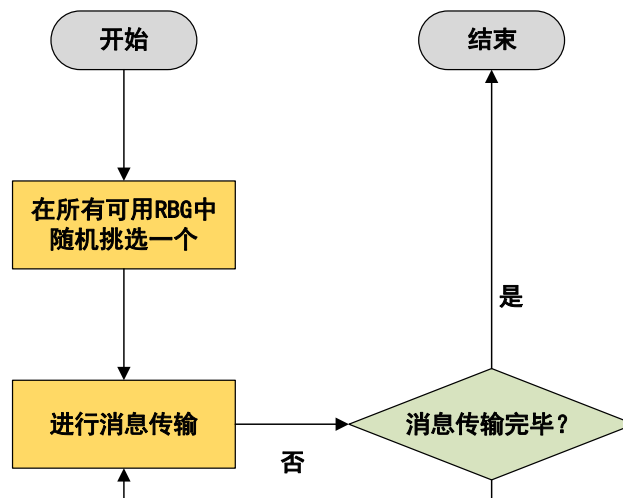


图 3-12 随机选择算法流程图

3.3 基于载波侦听的随机选择算法

在 3.2 小节所述的随机选择算法中，一个车辆节点独立地在所有 RBG 集合中随机选择一个 RBG 用于广播消息，而完全没有考虑到该 RBG 是否已被其他邻近车辆占用。因此，可以引入载波侦听机制，尽可能避免选择已被邻近车辆占用的 RBG。

在基于载波侦听的随机选择算法中（Sensing Based Random, S-Random），车辆节点在进行 RBG 选取的时候，首先会侦听所有 RBG 上的平均载波功率，若功率强度低于阈值，即可认为该 RBG 未被邻近车辆占用，因此可以维护一个空闲 RBG 集合。然后在这个空闲 RBG 集合中挑选一个平均载波功率最小的 RBG，用于本次消息的传输。这样，可以大大缓解 V2V 消息相互干扰的情况。

上面这种选择策略在某种情况下可能仍然会出现较多的干扰，原因如下：假设车辆 A 和车辆 B 在 T_1 时刻要广播 V2V 消息给周边车辆，又因为车辆 A 和车辆 B 地理位置相近，因此信道状况也可能相近，于是它们同时选择了某一个 RBG。这样一来，仍然产生了冲突。因此可以进行如下优化：

假设车辆 A 检测到第 i_1 个 RBG、第 i_2 个 RBG、...、第 i_n 个 RBG 未被占用，其平均载波功率分别为： $P(i_1)$ 、 $P(i_2)$ 、...、 $P(i_n)$ 。现在给第 i_k ($1 \leq k \leq n$) 个 RBG 分配一个概率 $p(i_k)$ ，满足：

$$P(i_1) \cdot p(i_1) = P(i_2) \cdot p(i_2) = \dots = P(i_n) \cdot p(i_n), \sum_{k=1}^n p(i_k) = 1 \quad (3-3)$$

然后计算 $p(i_k)$ ($1 \leq k \leq n$) 的累计概率 $c_p(i_k)$ ($1 \leq k \leq n$)：

$$c_p(i_k) = \begin{cases} p(i_k) & , k = 1 \\ c_p(i_{k-1}) + p(i_k) & , 1 < k \leq n \end{cases} \quad (3-4)$$

$c_p(i_k)$ ($1 \leq k \leq n$) 将 [0-1] 区间划分成多个长度不等的片段。生成一个 [0,1] 范围的随机数，这个随机数落在哪个片段，本次选择的结果就为该片段对应的 RBG。

算法流程图详见图 3-13。车辆首先检测所有 RBG 的平均载波功率，然后进行上述优化的随机选择。随后，在选择的 RBG 上广播数据包，直至消息的所有数据包发送完毕。

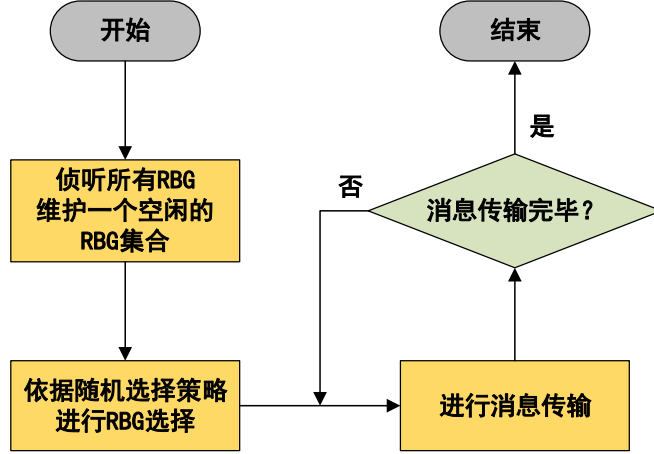


图 3-13 基于载波侦听的随机选择算法流程图

3.4 基于地理位置的时分算法

车辆之间的同频干扰随着距离增大而降低，示意图详见图 3-14(a)。在此示意图中，A、B、C、D 四辆车占用同一个 RBG，以车辆 A 为中心进行分析，将干扰区域划分为三段，每段的边界分别是 D_{A-1} 、 D_{A-2} 、 D_{A-3} ，其中 D_{A-3} 表示信号可达的最远距离。 $d_A(\mu)$ 表示位置 μ 与车辆 A 的距离， γ_A 表示冲突区域， β_A 表示强干扰区域， α_A 表示弱干扰区域，其定义如下：

$$\gamma_A = \{\mu | 0 < d_A(\mu) \leq D_{A-1}\} \quad (3-5)$$

$$\beta_A = \{\mu | D_{A-1} < d_A(\mu) \leq D_{A-2}\} \quad (3-6)$$

$$\alpha_A = \{\mu | D_{A-2} < d_A(\mu) \leq D_{A-3}\} \quad (3-7)$$

车辆 B 位于 γ_A 区域，在进行载波功率检测时，能够检测到该 RBG 上的功率大于阈值，于是根据 3.3 小节所述的 S-Random 算法，车辆 B 将不会选用该 RBG 来传输消息，从而有效地避免冲突。

车辆 C 位于 β_A 区域，在进行载波功率检测时，能够检测到该 RBG 上的功率小于阈值，于是根据 3.3 小节所述的 S-Random 算法，车辆 C 有可能选用该 RBG 来传输消息，详见示意图 3-14(b)，此时，车辆 A、C 复用同一个 RBG，这将会导致位于车辆 A、C 之间的区域 β_{AC} 产生较大的干扰：

$$\beta_{AC} = \{\mu | D_{A-1} < d_A(\mu) \leq D_{A-2}, D_{C-1} < d_C(\mu) \leq D_{C-2}\} \quad (3-8)$$

该区域内的车辆由于存在强干扰，可能无法收到 A、C 任何一方发送的消息。

车辆 D 位于 α_A 区域，车辆 A、D 复用同一个 RBG 所造成的干扰微乎其微，因此可以忽略不计。

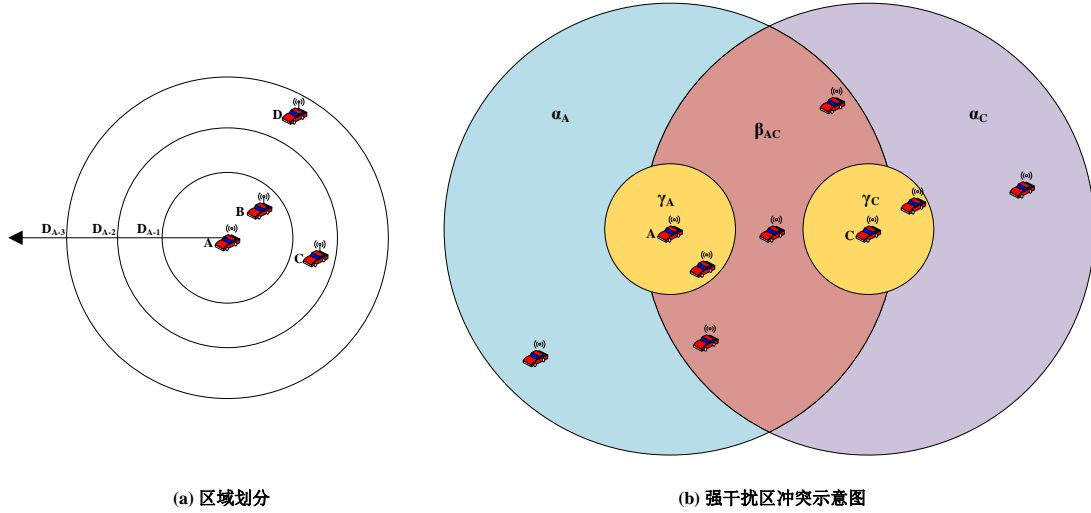


图 3-14 同频干扰示意图

经过上述分析，如果可以有效地规避车辆 A、C 复用同一个 RBG，在一定程度上可以降低丢包率，即减少那些位于图 3-14(b)中的 β_{AC} 区域的车辆的丢包率。基于地理位置进行时分复用不失为一种简单有效的方法，因此将高速公路以及曼哈顿街区按地理位置进行划分，详见图 3-15。

曼哈顿街区划分为 4 类区域，即图 3-15(a)中所示的 1、2、3、4；高速公路划分为 2 类区域，即图 3-15(b)中所示的 1、2。同类区域占用相同的时段，不同类型的区域之间进行时分复用。同一时刻只有一个区域内的车辆才可以进行消息的传输。车辆可以通过 GPS 定位装置获取位置信息以及相应的分区信息。

基于地理位置的时分随机选择算法（Location Based Time Division Multiplexing Random, LTDM-Random）与其他资源分配算法是可以结合使用的，例如图 3-16 所示的流程图中，就结合了基于载波侦听的随机选择算法。这种基于地理位置的时分算法可以减少某一区域内的干扰^[23]，从而减小丢包率。但是由于进行了时分复用，这会导致消息的传输时延增大数倍。因此适用于对时效性要求不高的场景。

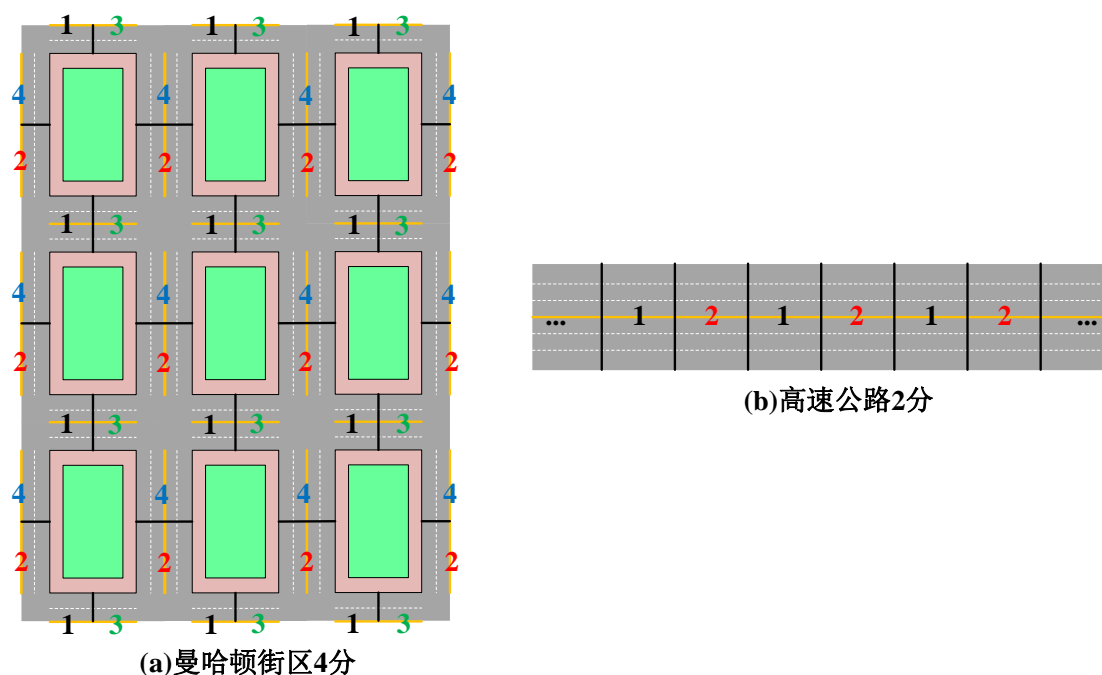


图 3-15 区域分割示意图

LTDM-Random 算法的流程图详见图 3-16。车辆通过 GPS 定位装置获取目前所属的分区编号，采用 Random 算法或者 S-Random 算法进行 RBG 的选取，随后在当前分区编号所对应的时段内进行消息的广播，直至消息的所有数据包发送完毕。

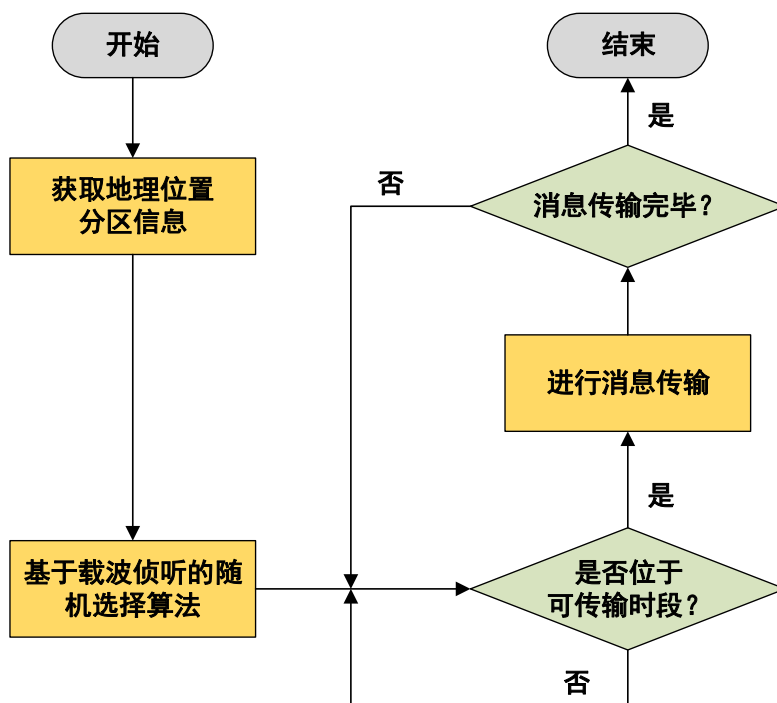


图 3-16 基于地理位置的时分算法流程图

3.5 仿真及性能分析

V2X 系统级车联网仿真平台可搭载的地理拓扑有曼哈顿街区以及高速公路两种，本小节将验证这两个地理拓扑建模的正确性。主要内容包括车辆撒点、路径损耗等。另外，对本章节提出的 2 种基于 V2V 通信场景的资源分配算法 S-Random 算法以及 LTDM-Random 算法进行仿真性能评估，并与作为参考方案的 Random 算法进行性能对比。

3.5.1 车辆撒点

曼哈顿街区拓扑参数详见表 3-1，高速公路拓扑参数详见表 3-2。车辆位置服从泊松空间分布，地理拓扑与传播单元初始化完毕后，车辆分布详见图 3-17。

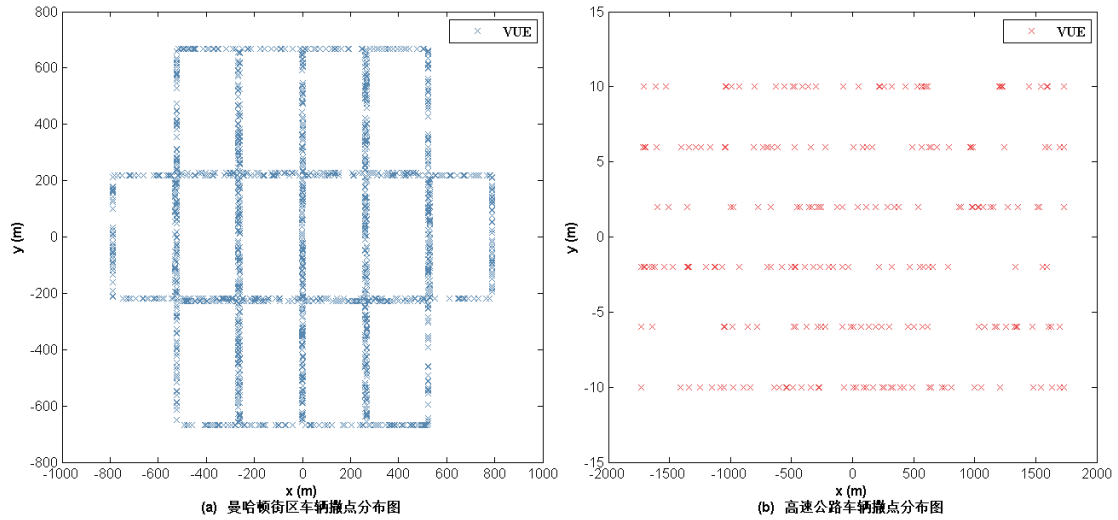


图 3-17 曼哈顿街区、高速公路车辆撒点分布图

3.5.2 路径损耗

曼哈顿街区路径损耗(Pathloss, PL)与高速公路路径损耗分布详见图 3-18。由于在曼哈顿街区模型中，存在着许多建筑物，车辆与车辆之间根据是否有建筑物格挡可以分为视距传播(LOS)与非视距传播(NLOS)，因此路径损耗曲线图中存在上下两部分，上面一部分为 LOS，PL 随着距离平滑变化，下面一部分为 NLOS。高速公路模型中，由于车辆与车辆之间都是视距传播，因此 PL 随距离平滑变化。

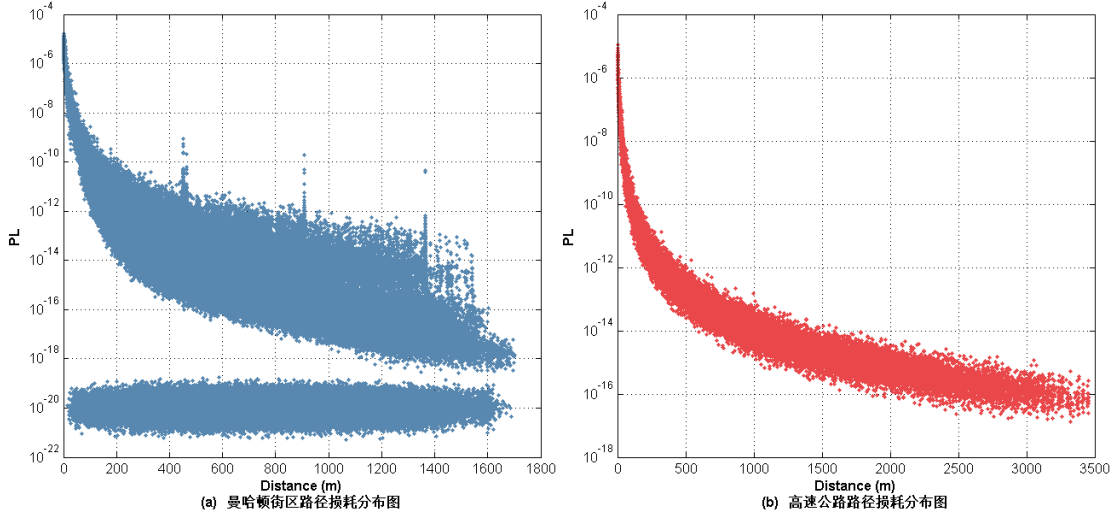


图 3-18 曼哈顿街区、高速公路路径损耗分布图

3.5.3 路由协议性能分析

本小节对 3.1.4 小节提出的有反馈路由协议以及无反馈路由协议进行仿真性能评估。衡量性能的指标包括：时延、成功接收率 RR (Reception Ratio)。其中，时延指从消息触发开始到消息传递到目的节点所经历的时间间隔；成功接收率 RR 的计算公式如下：

$$P_{rr} = \frac{N_R}{N_A} \quad (3-9)$$

其中， N_R 表示所有车辆成功接收的消息的总数目， N_A 表示所有车辆产生的消息的总数目。有反馈以及无反馈路由协议的仿真参数详见表 3-5。

在曼哈顿街区模型，消息触发概率为 0.01 的情况下，有反馈路由协议以及无反馈路由协议的消息传输时延分布图详见图 3-19。从图中可以看出，有反馈路由协议的消息传输时延分布在 0-60TTI 的区间内，且集中分布于 7、14、28、35、42、49 这几个时刻；无反馈路由协议的消息传输时延分布在 0-25TTI 的区间内，且集中分布于 5、10、15、20 这几个时刻。每个消息在单链路下的传输时延为 $5 \times \lceil (100 \times 8 / 2 \times 2) / (180 \times 5) \rceil = 0.005(s) = 5(TTI)$ ，其中，100 是字节数量；8 是 byte 与 bit 的换算比例；调制方式采用 QPSK，一个符号为 2 个 bit；0.5 码率的信道编码，冗余 50%；一个 RB 的带宽是 180bit/s，一个 RBG 由 5 个连续的 RB 构成。在有反馈的路由协议中，每次“握手”都需要耗费 2 个额外的 TTI，因此，如果不考虑等待时延，那么总的传输时延应该是 7 的倍数；而在无反馈的路由协议中，不存在“握手”阶段，不需要耗费额外的 TTI，因此，如果不考虑等待时延，那么总的传输时延应该是 5 的倍数。所以上述时延分布结果基本符合预期。

此外，由于有反馈的路由协议存在重传机制，因此还可能增加额外的时延。

表 3-5 两类路由协议仿真详细参数

参数 \ 方案	有反馈的路由协议	无反馈的路由协议
地理拓扑，详细参数请参考表 3-1 表 3-2	1)曼哈顿街区 2)高速公路	1)曼哈顿街区 2)高速公路
消息产生概率 (次/TTI/车)	1)0.1 2)0.01 3)0.001	1)0.1 2)0.01 3)0.001
允许链路重传次数	3	
允许多跳次数	4	4
消息数据包大小 (byte)	100	100
消息数据包数量	5	5
每个 RBG 包含的 RB 数量	5	5
总带宽 (Mb)	10	10
调制方式	QPSK	QPSK
信道编码码率	0.5	0.5
仿真时长 (min)	60	60

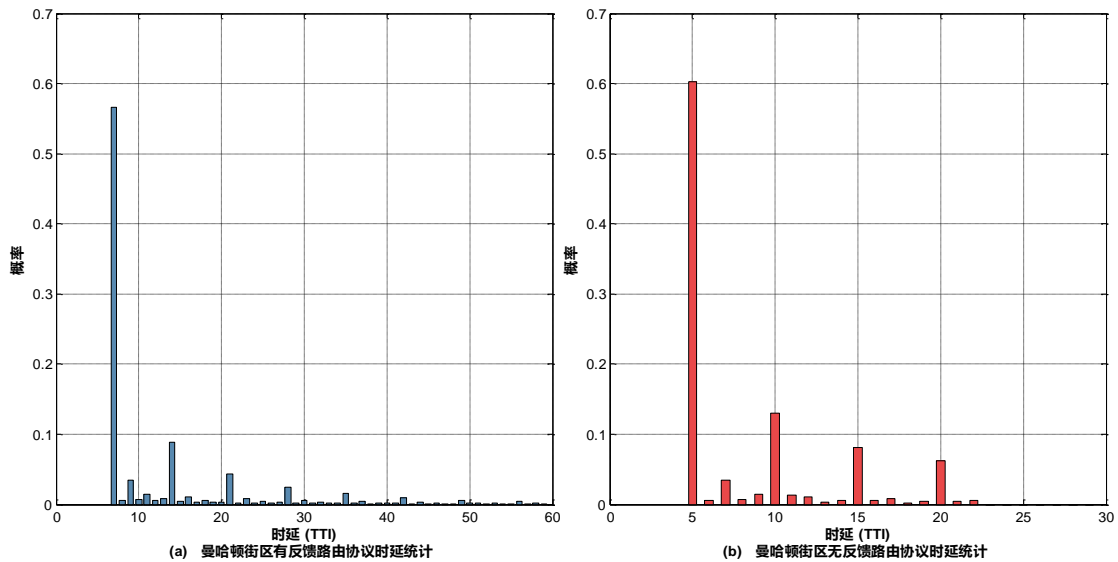


图 3-19 消息触发概率为 0.01 时曼哈顿街区路由时延统计图

有反馈路由协议以及无反馈路由协议在不同的仿真条件下，成功接收率 RR 的统计详见表 3-6。从表中可以看出，在消息密度较高的情况下，有反馈路由协议的成功接收率要高于无反馈路由协议，在曼哈顿街区模型中，相差 33.68%；

在高速公路模型中，相差 17.85%。随着消息密度逐渐缩小，两个路由协议的成功接收率逐渐接近。在消息触发概率 0.001 的情况下，两个地理拓扑下的成功接收率差值均小于 5%，但同时，由于无反馈路由协议不存在“握手阶段”，因此传输时延要比有反馈的路由协议要少。

综上所述，有反馈路由协议适用于消息密度较高，对消息可靠性要求较高，对时延要求较低的场景；无反馈路由协议适用于消息密度较低，对消息可靠性要求较低，对时延要求较高的场景。

表 3-6 路由协议 RR 统计表

参数 \ 方案	有反馈的路由协议	无反馈的路由协议	差值
曼哈顿街区 消息触发概率 0.1	45.36%	11.68%	33.68%
曼哈顿街区 消息触发概率 0.01	67.03%	52.39%	14.64%
曼哈顿街区 消息触发概率 0.001	87.80%	83.03%	4.77%
高速公路 消息触发概率 0.1	79.29%	61.44%	17.85%
高速公路 消息触发概率 0.01	88.79%	81.17%	7.62%
高速公路 消息触发概率 0.001	91.06%	88.68%	2.38%

3.5.4 V2V 资源分配算法仿真性能分析

本小节对本章节中提出的 3 种资源分配算法进行对比，衡量性能的指标包括：PRR（Packet Reception Ratio）。其中 PRR 计算公式如下：

$$P_{pr}r(a,b) = \frac{N_s(a,b)}{N_A(a,b)} \quad (3-10)$$

其中， $N_s(a,b)$ 表示发送车辆与接收车辆之间的距离满足 $d_{v2v} \in [a,b)$ 时，接收车辆成功接收数据包的数量； $N_A(a,b)$ 表示发送车辆与接收车辆之间的距离满足 $d_{v2v} \in [a,b)$ 时，发送车辆发送的所有数据包的数量。

各个方案的详细仿真参数见表 3-7。

表 3-7 各类 V2V 资源分配算法详细参数

方案 参数	Random	S-Random	LTDM-Random
地理拓扑, 详细 参数请参考表 3- 1 表 3-2	1)曼哈顿街区 2)高速公路	1)曼哈顿街区 2)高速公路	1)曼哈顿街区 2)高速公路
周期消息周期 (TTI)	1)100 2)500	1)100 2)500	1)100 2)500
周期消息数据包 大小 (byte)	1 个 300,4 个 190	1 个 300,4 个 190	1 个 300,4 个 190
每个 RBG 包含的 RB 数量	10	10	10
总带宽 (Mb)	10	10	10
仿真时长 (min)	60	60	60

LTDM-Random 时分区域详细拓扑见图 3-20。该算法可以为 β 区域带来 3%-5%的包到达率增益,但是引入了成倍的时延,因此适用于可靠性要求较高,但是时延要求较低的场景。S-Random 算法虽然在 β 区域的包到达率性能比 LTDM-Random 算法较差,但整体上性能与 LTDM-Random 算法接近,且不引入额外的时延,适用于时延要求较高的场景。

曼哈顿街区以及高速公路在周期消息的周期为 100TTI/500TTI 下的 PRR 曲线如图 3-21 所示。从图中可以看出,无论在何种场景下, S-Random 算法以及 TDM-Random 算法都要优于 Random 算法,且平均包到达率提升在 10%左右。这是由于 S-Random 算法利用载波侦听机制,可以很好地降低邻近车辆占用相同频段的概率,即扩大了占用相同频段的车辆之间的距离。

此外,在曼哈顿街区模型中,0m 至 100m 范围内, S-Random 算法的包到达率性能要优于 LTDM-Random 算法,增益在 5%-10%左右。在这个距离范围内,由于 LTDM-Random 算法采用时分方式,假设同分区的车辆 i_1, i_2, \dots, i_n 原本会在不同的时刻进行资源的抢占,但是由于时分方式,这些车辆不得不同时进行资源的抢占,因此会造成较大的干扰,因此包到达率在这个距离范围内会有负增益。而在 100m 至 300m 范围内, LTDM-Random 算法的包到达率要高于 S-Random,增益在 5%左右,这同样是由于 LTDM-Random 的时分策略,使得占用同一个 RBG 的车辆尽可能分布在不同的区域,因此会带来 β 区域的增益。同理,在高速公路模型中,0m 至 400m 范围内, S-Random 算法的包到达率高于 LTDM-Random 算法;在 400m 至 800m 范围内, LTDM-Random 算法的包到达率提升了 3%左右。

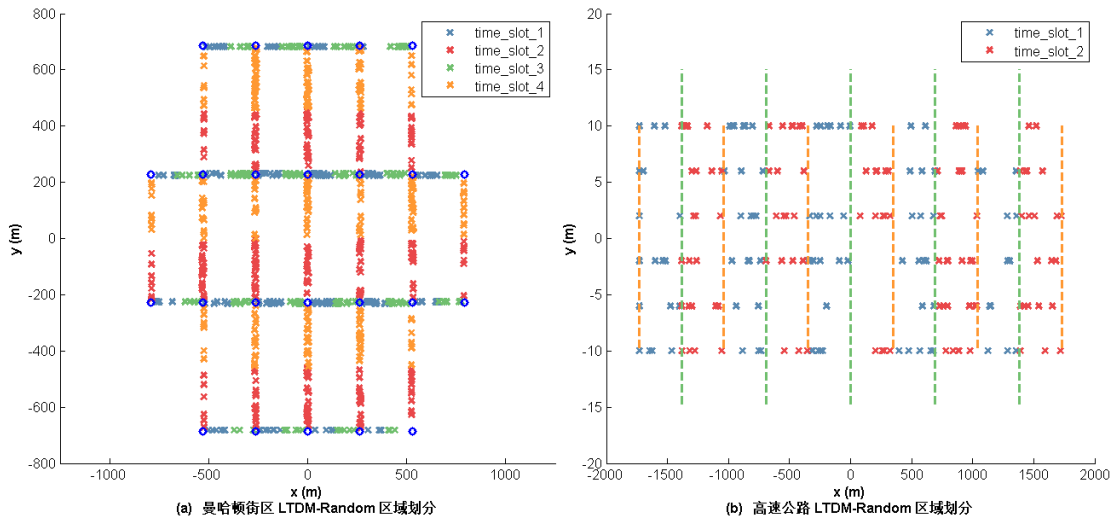


图 3-20 LTM-Random 区域划分统计图

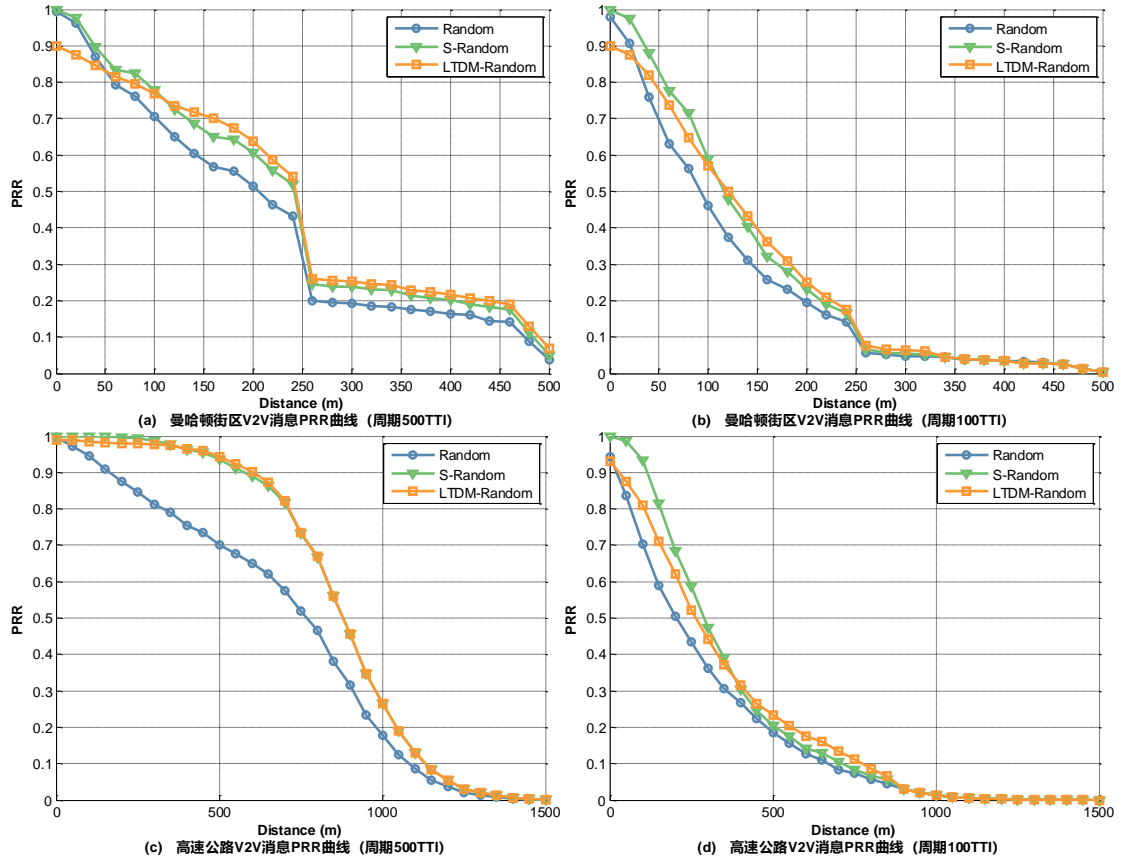


图 3-21 周期消息 PRR 曲线图

3.6 本章小结

本章详细阐述了 V2X 系统级车联网仿真平台的总体设计架构，将仿真平台从功能上拆分为多个独立的功能单元，给出了各个功能单元的实现原理、细节以

及具体流程，为后续的资源分配算法的研究奠定了坚实的基础。另外，本章研究了基于 V2V 通信场景的资源分配算法，以提高时频资源复用效率以及降低系统整体丢包率为目标，依据无中心自组织网络资源分配的经典思路，提出了 S-Random 算法以及 LTDM-Random 算法，这两种方案实现简单，性能可观，具有较高的理论以及实用价值。

第四章 V2I 资源分配算法

本章节将讨论几种基于 V2I 通信场景的资源分配算法，总共提出了 3 种方案：基于分簇的轮询调度算法；基于分簇的时分算法；基于分簇的簇间竞争算法。此外，还引入了分簇的策略，以及相应的接入算法。针对基于分簇的时分算法以及基于分簇的簇间竞争算法还引入了资源预留机制以及冲突避让机制，在提高时频资源复用率的基础上，尽可能降低簇间干扰以及 RSU 间干扰，从而提升包到达率性能。

4.1 分簇

V2I 通信需要 RSU 的支持，RSU 应当尽可能地均匀分布，以降低 RSU 间的同频干扰。以曼哈顿街区模型为例，将 RSU 按一定规则撒在街区的指定位置。一般地，将 RSU 布置在十字路口中央。如图 4-1 所示。

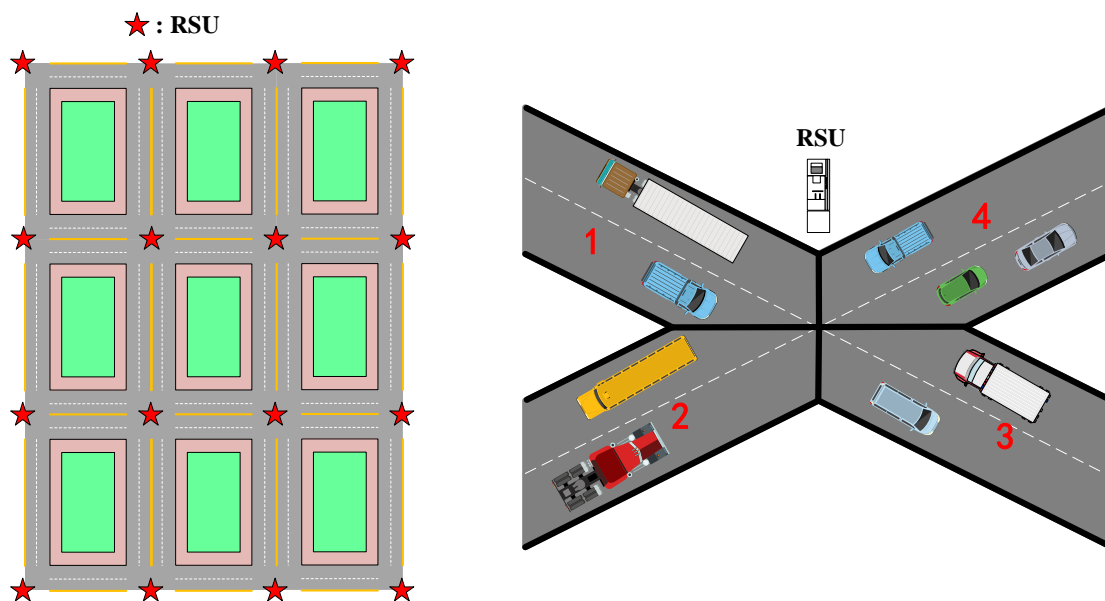


图 4-1 曼哈顿街区 RSU 撒点以及分簇示意图

为了增加时频资源的复用率，依据地理位置，将一个 RSU 覆盖范围内的区域进行更小粒度的划分，划分后的单元称为簇。对于位于十字路口中央的 RSU 而言，将覆盖范围分成 4 个簇，示意图详见图 4-1。

对于高速公路模型，RSU 一般等间距地分布在道路中央，详见图 4-2。RSU 以 100m 为间距均匀分布，同一个 RSU 覆盖范围内按行驶方向不同还可以划分为 2 个簇。

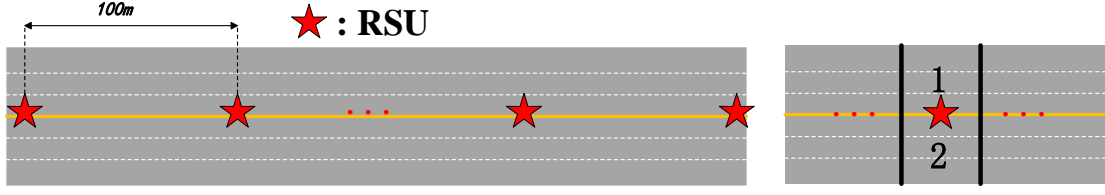


图 4-2 高速公路 RSU 撒点以及分簇示意图

4.2 接入算法

分簇策略的引入,使得地理拓扑分为三层结构: 1) 整个地理拓扑区域; 2) 以 RSU 为单位的区域; 3) 以簇为单位的区域。车辆除了通过 GPS 装置获取自身的坐标之外,还必须知道所属的 RSU 编号以及所属的簇编号。车辆可以通过询问 RSU 来获取这两个信息。具体的接入算法描述如下:

A. 对于 id 为 i 的接入车辆:

BEGIN

(1)**WHILE**(TRUE)

(2)车辆 i 通过 GPS 定位装置获取自身的地理位置信息,转换成横纵坐标 x_i 和 y_i ;

(3)车辆 i 随机生成一个用于 RSU 回复数据包的频段 f_{i-ans} , 然后从集合 F_{ask} 中随机选择一个频段 f_{i-ask} , 并将 i , x_i , y_i , f_{i-ans} 打包成数据包 P_{i-ask} , 在 f_{i-ask} 频段上进行广播;

(4) **IF** 车辆在 f_{i-ans} 频段成功接收到数据包 P_{i-ans}

(5)从数据包 P_{i-ans} 中解析出 RSU 的 id 以及簇 id 作为本次接入的 RSU 以及相应的簇。

(6) **ELSE**

(7)跳转到步骤(2);

(8)进入时长为 τ 的休眠, τ 为更新 RSU 的 id 以及簇 id 的周期;

(9)**END WHILE**

END

B. 对于 id 为 p 的 RSU:

BEGIN

(1)**WHILE**(TRUE)

(2)**FOR** $f_{i-ask} \in F_{ask}$ (F_{ask} 对于所有 RSU 都是已知的)

(3)**IF** 在 f_{i-ask} 频段成功接收到数据包 P_{s-ask}

(4)从数据包 P_{s-ask} 中解析出 s , x_s , y_s , f_{s-ans} ;

(5)IF $(x_s, y_s) \in \Pi(p, q)$
 (6)将 s , p , q 打包成数据包 P_{s-ans} , 在频段 f_{s-ans} 上发送;
 (7)ELSE
 (8)直接丢弃数据包 P_{s-ask} , 不做任何处理;
 (9)END IF
 (10)END IF
 (11)END FOR
 (12)END WHILE
 END

其中, x_i 和 y_i 表示车辆 i 的横纵坐标; F_{ask} 表示可用来发送车辆位置信息的频段集合, 所有 RSU 均已知该集合; f_{i-ans} 表示用于 RSU 回复车辆 i 分簇信息所用的频段; f_{i-ask} 表示车辆 i 发送自身信息所用的频段, 且满足 $f_{i-ask} \in F_{ask}$; P_{i-ask} 表示车辆 i 发送的数据包; P_{i-ans} 表示某个 RSU 回复给车辆 i 的数据包。

在上述的接入算法中, 如果满足以下关系, 即地理拓扑进行完全划分, 那么车辆必定能够成功且唯一地接入。

$$\forall p_1 \neq p_2 \text{ or } q_1 \neq q_2, \Pi(p_1, q_1) \cap \Pi(p_2, q_2) = \emptyset \quad (4-1)$$

且

$$\sum_{p=1}^{N_R} \sum_{q=1}^{N_C} \Pi(p, q) = D \quad (4-2)$$

其中, D 表示整个地理拓扑的区域; $\Pi(p, q)$ 表示 id 为 p 的 RSU 且 id 为 q 的簇所表示的地理拓扑的区域; N_R 表示 RSU 的总数; N_C 表示 RSU 内簇的总数。

4.3 基于分簇的轮询调度算法

本小节介绍基于分簇的轮询调度算法(Clustering Based Round Robin, C-RR), 轮询调度算法本质上属于集中式资源管理方案, 此时, RSU 不仅仅是一个静态基础设施节点, 同时它还具有类似于基站的接入、调度等功能, 时频资源的分配完全由 RSU 控制。

根据 3GPP-36.885 协议规定, 分配给车联网的总带宽为 10M, 大约 50 个 RB 左右, 若以 RB 为单位进行频域资源的分配, 则粒度太小, 若以若干个不连续的 RB 作为一个调度单元, 则算法复杂度将会急剧上升, 因此, 为了方便起见, 采用连续若干个 RB 作为一个调度单元, 这里将整个频域资源划分成 N_G 个 RBG, 每个 RBG 包含一个或者多个 RB。C-RR 算法的时频资源复用的最小单位是簇,

而不是 RSU，这样可以大幅度增加系统整体的吞吐量。此外，RSU 为每个簇分别维护一个调度节点列表，RSU 每个 TTI 遍历该调度节点列表，以 RBG 为资源分配单元进行轮询调度。

V2I 消息按照安全等级来划分可以分为安全等级较高的紧急消息，以及安全等级较低的周期消息，C-RR 算法为了支持这两种不同的优先级，在 RSU 维护的调度节点列表中增加优先级信息。优先级可以是静态优先级也可以是动态优先级。为了量化紧急消息以及周期消息的优先级，令 Ω_e 代表紧急消息的优先级；令 Ω_p 代表周期消息的优先级。

消息 i 的静态优先级 Ω_{i-s} 定义如下：

$$\Omega_{i-s} \in \{\Omega_e, \Omega_p\} \quad (4-3)$$

于是，RSU 的调度节点列表中的节点包含如下信息：1) 车辆 id；2) 传输消息的类型；3) 待传 byte 数量；4) 节点静态优先级。对于支持静态优先级的 C-RR 算法，在 RSU 的调度节点列表中，静态优先级较高的节点总是位于静态优先级较低的节点之前（类似于一个优先队列），即优先级较高的节点，总能够优先参与调度。因此支持静态优先级的 C-RR 算法可以很好地解决紧急消息的时效性问题。但是，支持静态优先级的 C-RR 算法可能会产生饥饿问题，即某个优先级较低的消息，在 RSU 负载较高的情况下，始终得不到调度，以至于被“饿死”。

为了解决上述静态优先级所导致的饥饿问题，采用了动态优先级策略，消息 i 的动态优先级定义如下：

$$\Omega_{i-d} = \begin{cases} \Omega_{i-s} & , \tau \leq \tau_0 \\ \Omega_{i-s} \cdot e^{\tau - \tau_0} & , \tau > \tau_0 \end{cases} \quad (4-4)$$

其中， τ 表示消息 i 的等待时长（单位 TTI）， τ_0 表示可忍受的饥饿时长（单位 TTI）。这样一来，动态优先级一开始与静态优先级相同，在超过可忍受的饥饿时长之后，优先级逐渐增大。这样既可以避免在低负载情况下低优先级的消息动态优先级增长过快，又可以在高负载的情况下维持不同优先级消息的相对公平性。此时，RSU 的调度节点列表中的节点包含如下信息：1) 车辆 id；2) 传输消息的类型；3) 待传 byte 数量；4) 节点动态优先级。同样地，优先级较高的节点总是位于优先级较低的节点之前。

由于 C-RR 算法对于每个簇的轮询调度是完全独立的，因此不同簇之间可能会同时占用同一个 RBG，从而造成较大的簇间干扰。此外，相邻 RSU 间的轮询调度也是完全独立的，因此不同 RSU 也可能同时占用同一个 RBG，从而造成 RSU 间干扰。簇间干扰以及 RSU 间干扰会影响系统的整体丢包率。

C-RR 算法的流程图详见图 4-3。对于车辆端，首先需要根据 4.2 小节所介

绍的接入算法进行接入，获取 RSU 以及分簇信息。另外对于 4.2 小节的接入算法，需要有一点改动，在 RSU 回复分簇信息时，必须保证车辆 i 所指定的 f_{i-ans} 在本 RSU 内唯一，否则拒绝回复分簇信息，迫使车辆端重新生成 f_{i-ans} 来监听回复数据包。一旦接入成功，车辆 i 与 RSU 之间的控制信号通信就在 f_{i-ans} 频段进行，这种措施可以有效地避免控制信号之间的干扰。在获取分簇信息后，车辆 i 通过频段 f_{i-ans} 发送 RBG 分配请求，然后在 f_{i-ans} 上等待 RSU 回复调度信息。当接收到调度信息后，在相应的 RBG 上进行数据包的发送，直至传输完毕。对于 RSU 端，同样需要根据修改后的接入算法进行接入操作，同时在不同的 $f_{s-ans} \in F_{ans}$ （ F_{ans} 表示 RSU 在执行成功接入后所保存的车辆指定回复频段集合）频段上监听 RBG 请求信息，将其加入调度节点列表，并依据动态优先级策略更新列表顺序，然后取调度列表前 N 个（最大同时可调度的 RBG 数量，若列表节点数小于 N ，则取全部节点）进行 RBG 的随机分配，并将分配结果通过相应车辆的 f_{i-ans} 频段发送给车辆 i 。

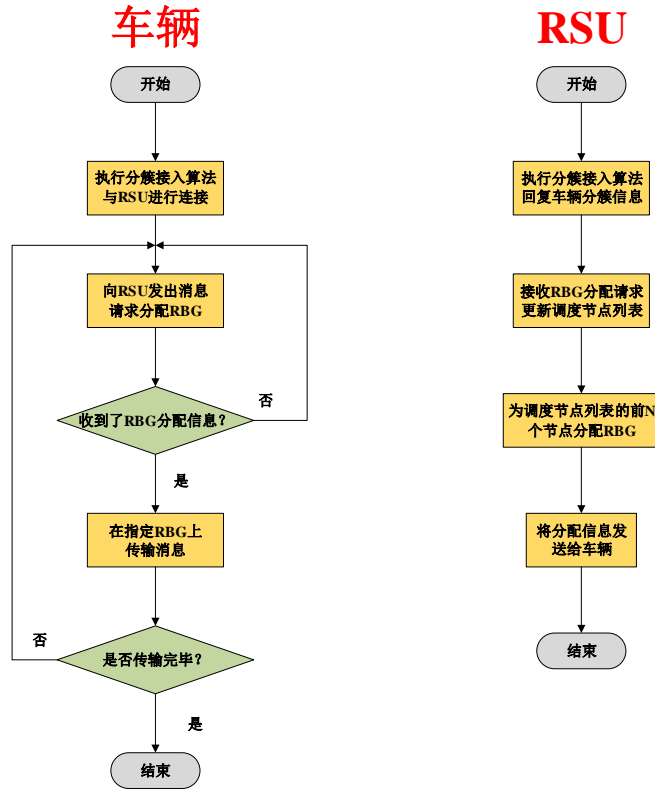


图 4-3 C-RR 算法流程图

4.4 基于分簇的时分算法

基于分簇的时分算法（Clustering Based Time Division Multiplexing, C-TDM）是一种基于时分、频分的竞争式资源管理方案，其时域复用的最小单元是 RSU，

而频域复用的最小单元是簇。同样地，C-TDM 算法采用连续若干个 RB 作为一个调度单元，这里将整个频域资源划分成 N_G 个 RBG，每个 RBG 包含一个或者多个 RB。按 4.1 小节所述的 RSU 撒点策略以及分簇策略对地理拓扑进行划分后，将 RSU 的一个时域调度单元 Γ ，依据簇大小映射为多个时段：

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{N_C} \beta_i \quad (4-5)$$

其中， N_C 表示簇的数量。且各个时段两两不相交：

$$\beta_i \cdot \beta_j = \emptyset, 1 \leq i, j \leq N_C, i \neq j \quad (4-6)$$

每个车辆只能在该车辆所属的簇所分配的时段内才能进行数据包的发送。示意图详见图 4-4，示意图中 RSU 的时域调度单元被分为了 4 个时段，不同簇所对应时段的长度非固定，而是根据前一个时域调度单元，该簇内车辆的数目进行动态调整，车辆数目越多，分配的时段就越长。时域分配算法详细描述如下：

INPUT: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_C}, \Delta = \sum \alpha_i$ 。其中， α_i 表示在上一个时域调度单元中簇 i 的车辆数目； Δ 表示在上一个时域调度单元中，所有簇中车辆的总和。

OUTPUT: $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_C}$ 。其中， β_i 表示在当前时域调度单元中，簇 i 所分配到的时域段，一个左闭右开的区间。

BEGIN

(1) $\delta = \Delta / \Gamma$ 。计算切片因子；

(2) $\sigma = \Gamma$ ；

(3) $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_{N_C} = 1$ 。 γ_i 用于保存簇 i 所分配的时隙的数量，单位

TTI。至少给每个簇分配一个时隙，避免某簇因为车辆数目太少而分配不到任何时隙，造成该簇内车辆无法传输消息而被饿死；

(4) $\sigma = \sigma - N_C$ ；

(5) $\alpha_i = \alpha_i - \delta, 1 \leq i \leq N_C$ ；

(6) **WHILE** $\sigma > 0$

(7) $\alpha_i = \max(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_C})$ ；

(8) $\gamma_i = \gamma_i + 1$ ；

(9) $\alpha_i = \alpha_i - \delta$ ；

(10) $\sigma = \sigma - 1$ ；

(7) **END WHILE**

(11) $\beta_i = [\tau_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_{i-1}, \tau_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_i], 1 \leq i \leq N_c$ 。 τ_0 为当前时域调度单元的起始时刻。

END

V2I 消息按照安全等级来划分可以分为安全等级较高的紧急消息，以及安全等级较低的周期消息。C-TDM 算法为了保证紧急消息的高时效性与高优先级，单独划分出一个频段用于传输紧急消息^[20]，而该频段在时域上不进行划分，即只要紧急消息触发，在任何时段都可以进行接入，保证了紧急消息具有较低的时延特性。

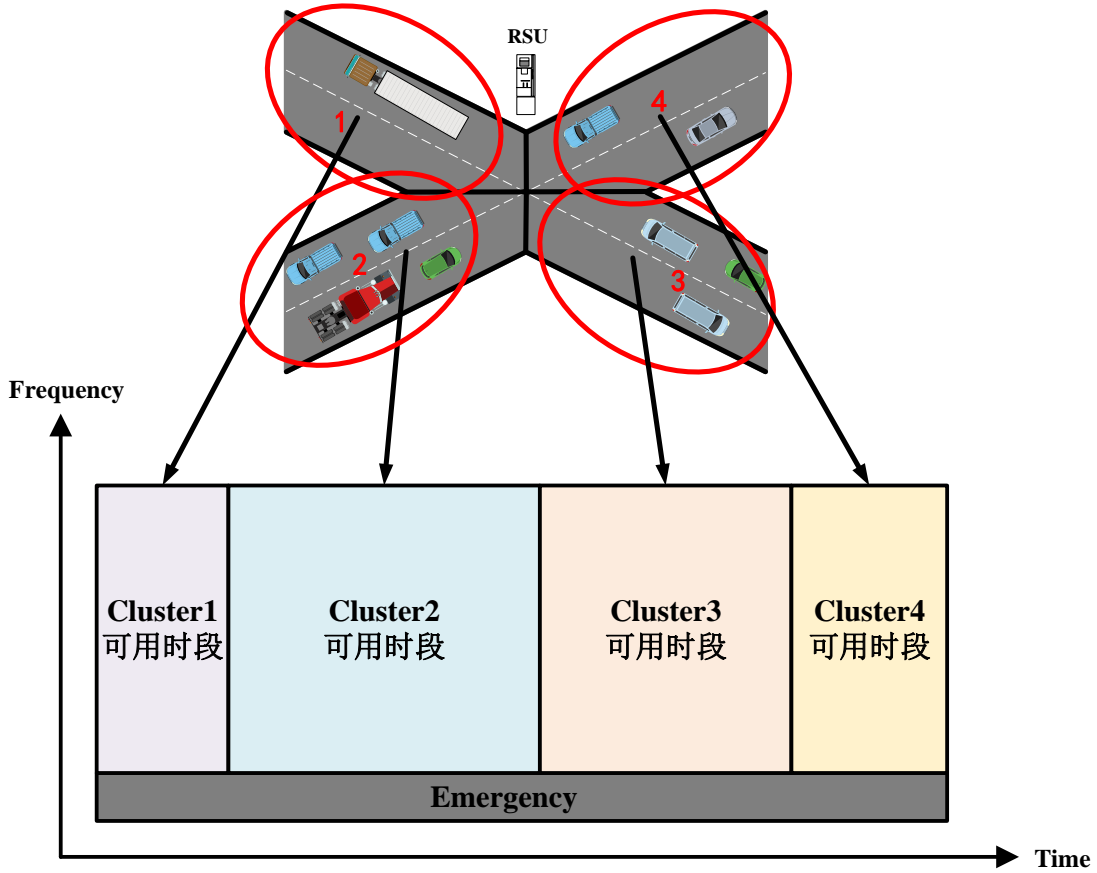


图 4-4 C-TDM 算法的时域资源划分

4.4.1 资源预留机制

在 C-TDM 算法中，为了让车辆在成功竞争频域资源后持续占用该 RBG 进行消息传输^[22]，同时避免其他同簇车辆占用同一个 RBG，引入了资源预留机制。资源预留机制可以大概率降低车辆抢占其他车辆早已占用的频段而造成的簇间或 RSU 间干扰。

现将一个 RBG 进行拆分，拆分成 N_c 个参考信号频段以及一个主频段：

$$F_k = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_{k-i} + f_k \quad (4-7)$$

其中, F_k 表示第 k 个 RBG 的总带宽; σ_{k-i} 表示第 k 个 RBG、第 i 个簇的参考信号频段; f_k 表示第 k 个 RBG 用于传输消息所占用的频段;

基于资源预留机制的资源竞争算法详细描述如下:

INPUT: i, p, q, t 。其中, i 表示车辆编号; p 表示车辆 i 所属的 RSU 编号; q 表示车辆 i 所属的簇编号; t 表示当前时刻。

OUTPUT: k 。其中, k 表示选择的 RBG 编号。

BEGIN

(1) **IF** $t \in \beta_q$

(2) 令 S 为一个空集合;

(3) **FOR** $j = 1: N_G$

(4) **IF** σ_{j-q} 频段上参考信号功率小于阈值

(5) 将 j 加入到集合 S 中;

(6) **END FOR**

(7) **IF** S 非空

(8) 在 S 中随机选择一个元素 k ;

(9) 在消息传输完毕之前, 持续在 σ_{k-q} 频段上发送参考信号;

(10) **END IF**

(11) **END IF**

END

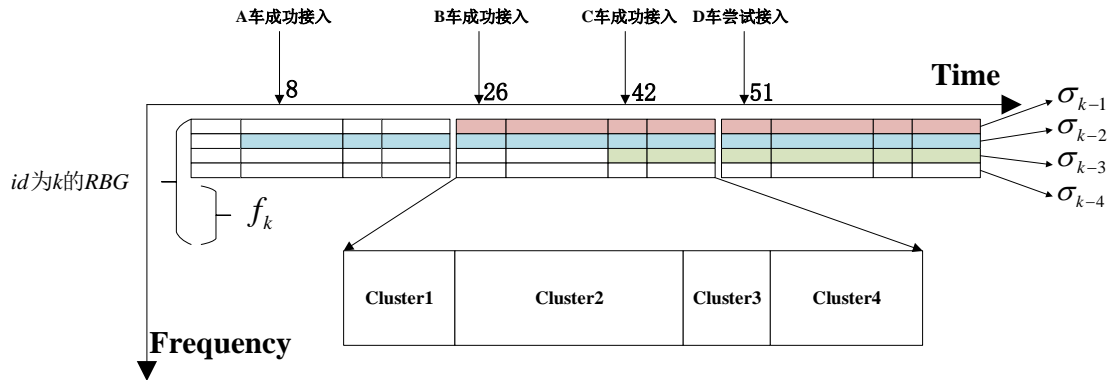


图 4-5 C-TDM 资源预留机制

示意图详见图 4-5。位于簇 1 的车辆 B, 在 $TTI=26$ 时刻尝试进行接入, 接入前车辆 B 在簇 1 所对应的参考信号频段 $\sigma_{i-1}, 1 \leq i \leq N_G$ 进行参考信号功率检测,

σ_{k-1} 频段上功率小于阈值，因此将第 k 个 RBG 标记为可占用，并假设车辆 B 在可用 RBG 集合中随机选取了第 k 个 RBG。于是车辆 B 成功占用第 k 个 RBG，并且在簇 1 对应的可调用时段 β_1 内，车辆 B 可以在该 RBG 内进行数据包的发送。随后在 TTI=51 时刻，同样位于簇 1 的车辆 D 要在该时段内选择可用的 RBG 来进行数据包的发送，在发送前车辆 D 在簇 1 所对应的参考信号频段 $\sigma_{i-1}, 1 \leq i \leq N_G$ 进行参考信号功率检测，在 σ_{k-1} 频段检测到的参考信号功率大于阈值，于是车辆 D 将第 k 个 RBG 排除在可用的 RBG 集合之外，于是车辆 D 避免抢占其他已被占用的 RBG。

4.4.2 冲突避让机制

上一小节引入的资源预留机制可以很好地避免车辆抢占其他已被占用的 RBG，但是在抢占阶段会出现一个问题：假设车辆 i_1 和 i_2 在同一时刻进行 RBG 的抢占（假设这两个车辆都位于簇 1），他们都检测到 σ_{k-1} 频段上参考信号功率小于阈值，且同时选择了第 k 个 RBG 作为传输频段进行消息的传输。那么在接下来消息传输的所有时刻，这两个车辆的发送信号将产生强烈的干扰，导致 RSU 无法正确接收到任何一方发送的消息。

为了解决上述问题，本文引入了冲突避让机制^[21]，来避免车辆竞争时的冲突。冲突避让机制的控制过程包含 3 个处理内容：发送、检测、冲突处理：

发送：在选定的 RBG 上进行数据包的发送。

检测：数据包发送后，也可能发生数据传输冲突。因此，要在传输数据包的同时，对数据包进行接收，以判断是否产生了冲突。如果在一段时间的检测中，没有发生冲突，那么在资源预留机制的保证下，在消息传输完毕之前，都不会产生冲突。冲突避让机制结束处理；否则进入冲突处理过程。

冲突处理：当检测到发生冲突后，进入冲突处理程序。根据退避算法计算出一个退避时间 T 。在退避 T 时间后，重新利用 4.4.1 小节所述的基于资源预留机制的资源竞争算法来进行 RBG 的抢占，并且重新进入冲突避让机制的发送阶段。

当出现线路冲突时，如果所有的冲突车辆都采用同样的退避时间间隔 T ，则很容易产生第二次、第三次乃至多次的冲突。因此，要求各个车辆的退避时间间隔 T 具有差异性。本文采用截断的二进制指数退避算法（退避算法之一）：当车辆检测到冲突时，要等待一个时延 T ，然后再重新进行 RBG 的抢占。等待时延 T 通过以下算法决定：

$$T = \text{random_select}[0, \min(t \cdot 2^K, T_{\max})] \quad (4-8)$$

其中， t 表示最小时隙， K 表示此刻已经冲突的次数， T_{\max} 表示最大时隙。该表

达式的含义是：在 $[0, \min(t \cdot 2^K, T_{\max}))$ 范围内随机选择整数，作为本次资源抢占前等待的时隙数目。当 $t \cdot 2^K$ 超过 T_{\max} 时，为避免等待时间过长，作特殊处理。结合资源预留机制的冲突避让机制的流程详见图 4-6。

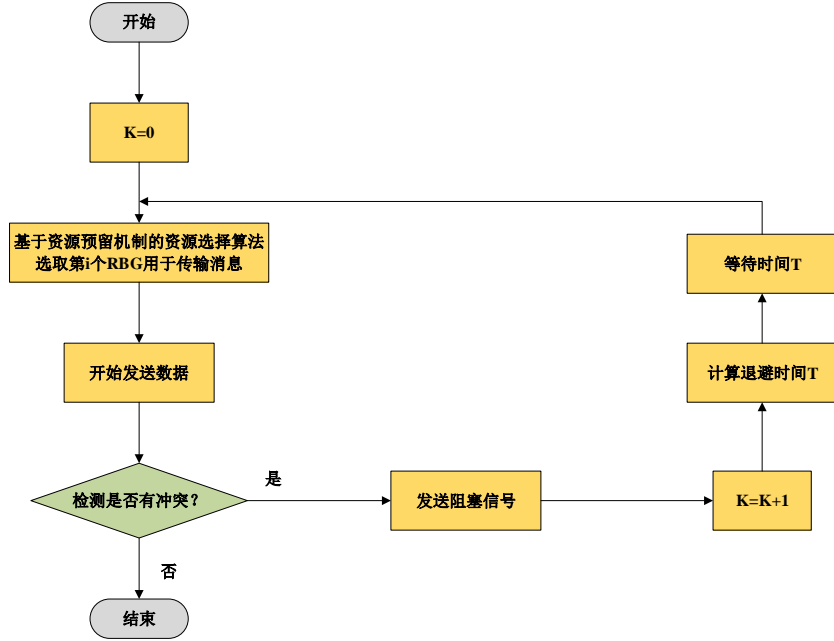


图 4-6 冲突避让机制流程图

4.4.3 C-TDM 算法详细流程

C-TDM 算法依赖 4.2 小节所述的接入算法，并且 RSU 需要根据时域分配算法计算每个簇对应的时段，即 $\beta_i, 1 \leq i \leq N_c$ ，并且将接入车辆对应的时段信息返回给该车辆。除此之外，流程与 4.2 小节所述的接入算法完全一致，这里不再赘述。C-TDM 算法流程图详见图 4-7。

对于车辆端，车辆通过改进后的接入算法获取所属 RSU、所属簇的信息以及该簇所属的时段信息。然后根据基于资源预留机制的资源竞争算法进行频域资源 RBG 的选择。若无可用 RBG，那么当前时刻不再进行接入；若成功选择 RBG 后，进入冲突避让处理程序，在随后一小段时间内，在发送数据包的同时进行数据包的接收。如果在冲突避让处理过程中发生冲突，通过退避算法计算出退避时间 T ，那么在退避一段时间 T 后，重新利用基于资源预留机制的资源竞争算法进行 RBG 的选择，直至检测不到冲突后，抢占流程结束，进入消息传输阶段，此时资源预留机制能够最大化地降低簇间乃至 RSU 间干扰。

对于 RSU 端，RSU 通过改进后的接入算法返回所有接入车辆相关的分簇信息以及可传输的时段信息 $\beta_i, 1 \leq i \leq N_c$ 。然后 RSU 在每个 RBG 上接收数据包，如果接收到了阻塞数据包，那么 RSU 将该 RBG、该时段上所接收到的、该车辆

（阻塞数据包中包含了车辆信息）发送的所有数据包丢弃。否则，接收所有数据包。

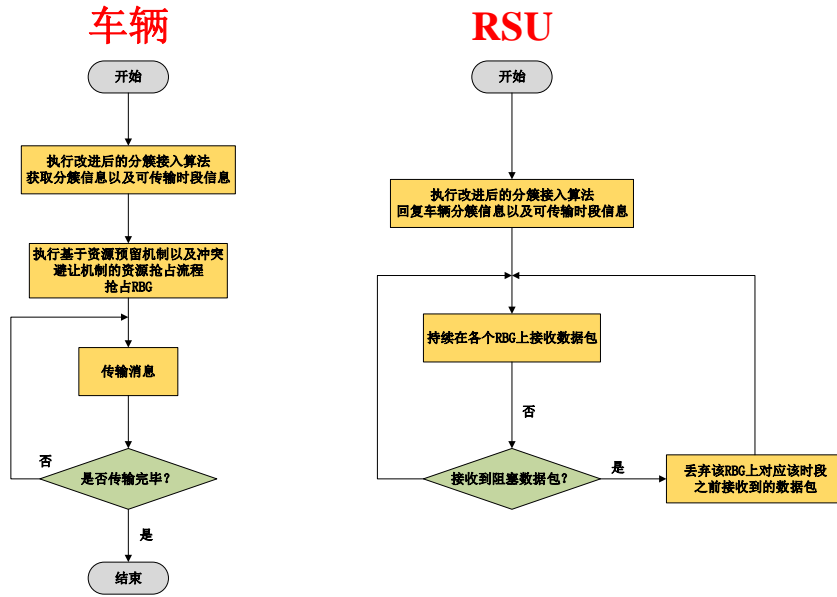


图 4-7 C-TDM 算法流程

4.5 基于分簇的簇间竞争算法

C-TDM 算法可以很好地保证消息传输的可靠性，很大程度上降低了冲突的概率，减少了簇间干扰、乃至 RSU 间干扰。但是由于簇间时分的引入，会导致消息的等待时延（若当前时刻不属于车辆 i 的可调度时段，那么车辆 i 便处于等待状态）变得非常大。

基于分簇的簇间竞争算法（Clustering Based Inter-Cluster Competition, C-ICC）不再进行时域资源的分割，同一 RSU 覆盖范围内的车辆可以在任意时刻进行频域资源的抢占。RSU 仍然按照 4.1 小节所述的方式进行撒点，以及簇的划分。在 C-ICC 算法中，时频资源复用的最小单位是簇而不是 RSU。在接入算法上，与 4.2 小节所述的接入算法完全一致。同样地，C-ICC 算法采用连续若干个 RB 作为一个调度单元，这里将整个频域资源划分成 N_G 个 RBG，每个 RBG 包含一个或者多个 RB。

此外，在频域资源的划分上，C-ICC 算法与 C-TDM 算法也有所不同，C-ICC 算法不再为安全性等级较高的紧急消息额外划分频域资源，即各种不同优先级的消息共用同一个频域资源。这样做能够提高频域资源的利用率，避免由于紧急消息触发概率较低而导致的资源浪费。

4.5.1 资源预留机制

在 C-ICC 算法中,为了让车辆在成功竞争频域资源后持续占用该 RBG 进行消息传输^[22],同时避免其他同簇车辆占用同一个 RBG,这里引入了类似于 4.4.1 小节所述的资源预留机制。资源预留机制可以大概率降低车辆抢占其他车辆早已占用的频段而造成的簇间或 RSU 间干扰。

同样地,按照公式 (4-7) 进行频域资源的拆分,拆分成 N_c 个参考信号频段以及一个主频段,基于资源预留机制的资源竞争算法详细描述如下:

INPUT: i, p, q 。其中, i 表示车辆编号; p 表示车辆 i 所属的 RSU 编号; q 表示车辆 i 所属的簇编号。

OUTPUT: k 。其中, k 表示选择的 RBG 编号。

BEGIN

(1) 令 S 为一个空集合;

(2) **FOR** $j=1:N_G$

(3) **IF** σ_{j-q} 频段上参考信号功率小于阈值

(4) 将 j 加入到集合 S 中;

(5) **END FOR**

(6) **IF** S 非空

(7) 在 S 中随机选择一个元素 k ;

(8) 在消息传输完毕之前,持续在 σ_{k-q} 频段上发送参考信号;

(9) **END IF**

END

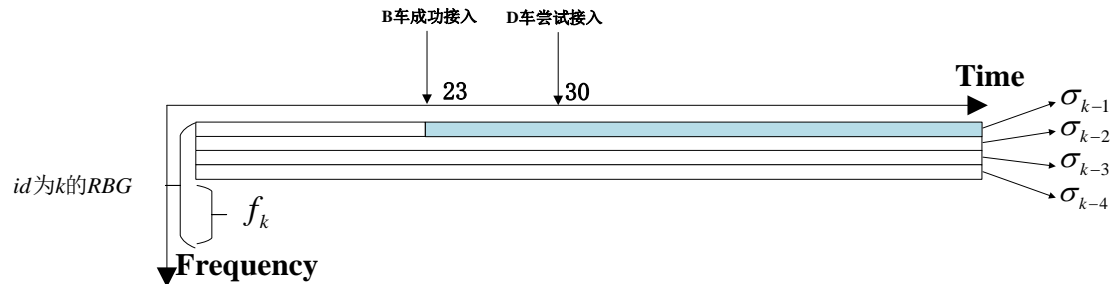


图 4-8 C-ICC 资源预留机制

C-ICC 算法的资源预留机制示意图详见图 4-8。位于簇 2 的车辆 B,在 TTI=23 时刻尝试进行接入,在接入前车辆 B 在簇 2 所对应的参考信号频段 $\sigma_{i-2}, 1 \leq i \leq N_G$ 进行参考信号功率检测, σ_{k-2} 频段上功率小于阈值,因此将第 k 个 RBG 标记为可占用,并假设车辆 B 在可用 RBG 集合中随机选取了第 k 个 RBG。于是车辆 B

成功占用第 k 个 RBG，并且开始发送数据包。随后在 $TTI=30$ 时刻，同样位于簇 2 的车辆 D 要选择可用的 RBG 来进行数据包的发送，在发送前车辆 D 在簇 2 所对应的参考信号频段 $\sigma_{i-2}, 1 \leq i \leq N_G$ 进行参考信号功率检测，在 σ_{k-2} 频段检测到的参考信号功率大于阈值，于是车辆 D 将第 k 个 RBG 排除在可用的 RBG 集合之外，于是车辆 D 避免抢占其他已被占用的 RBG。

4.5.2 冲突避让机制

上一小节引入的资源预留机制可以很好地避免车辆抢占其他已被占用的 RBG，但是在抢占阶段会出现一个问题：假设车辆 i_1 和 i_2 在同一时刻进行 RBG 的抢占（假设这两个车辆都位于簇 1），他们都检测到 σ_{k-1} 频段上参考信号功率小于阈值，且同时选择了第 k 个 RBG 作为传输频段进行消息的传输。那么在接下来消息传输的所有时刻，这两个车辆的发送信号将产生强烈的干扰，导致 RSU 无法正确接收到任何一方发送的消息。

为了解决上述问题，这里引入了冲突避让机制^[21]，具体的原理以及工作流程与 4.4.2 小节所述的冲突避让机制完全一致，这里不再赘述。

由于 C-ICC 算法不再为紧急消息划分出额外的频段，为了区分不同优先等级的消息的优先级，可以通过给不同优先等级的消息设置不同的退避窗口，通过这种方式，尽量减少紧急消息的退避时长以及退避次数，在不同优先等级的消息发生冲突时，尽量让优先级较高的消息抢占资源。具体可以设置的参数包括冲突上线次数 K ，最大阻塞时延 T 以及最小时隙 t 等等。

4.5.3 C-ICC 算法详细流程

C-ICC 算法流程详见图 4-9。

对于车辆端，车辆通过 4.2 小节所述的接入算法获取所属 RSU、所属簇的信息。然后根据基于资源预留机制的资源竞争算法进行频域资源 RBG 的选择。若无可用 RBG，那么当前 TTI 时刻不再进行接入；在成功选择 RBG 后，进入冲突避让处理程序，在随后一小段时间内，在发送数据包的同时进行数据包的接收。如果在数据包接收过程中发生冲突，通过退避算法依据不同消息的优先等级，计算出退避时间 T ，那么在退避一段时间 T 后，重新利用基于资源预留机制的资源竞争算法进行 RBG 的选择，直至检测不到冲突后，抢占流程结束，进入消息传输阶段，此时资源预留机制能够最大化地降低簇间乃至 RSU 间干扰。

对于 RSU 端，RSU 通过 4.2 小节所述的接入算法返回所有接入车辆相关的分簇信息。然后 RSU 在每个 RBG 上接收数据包，如果接收到了阻塞数据包，那

么 RSU 将该 RBG、该车辆（阻塞数据包中包含了车辆信息）发送的所有数据包丢弃。否则，接收所有数据包。

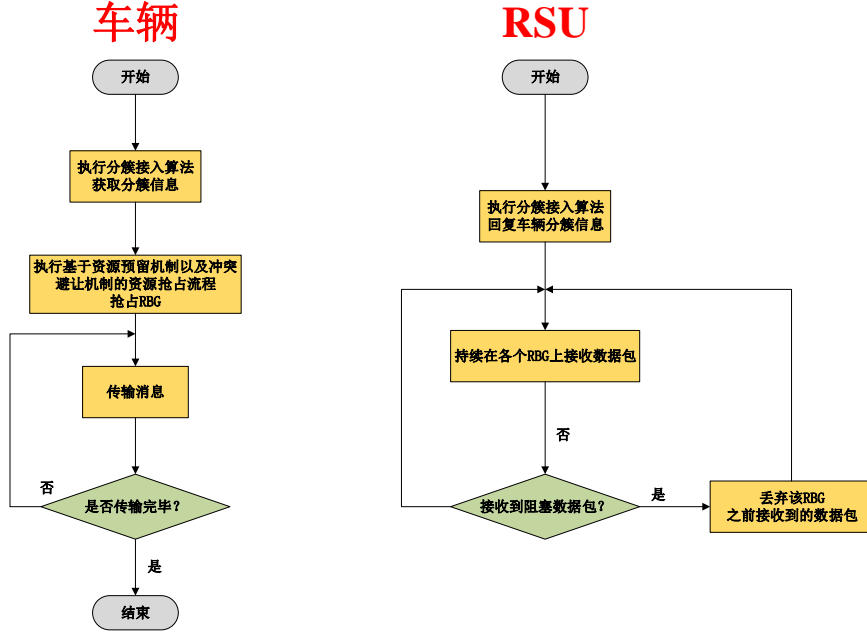


图 4-9 C-ICC 算法流程图

4.6 V2I 资源分配算法仿真性能分析

本小节对本章节中提出的 3 种资源分配算法进行仿真性能评估，衡量性能的指标包括：PRR（Packet Reception Ratio）、消息的传输时延、消息的等待时延、系统吞吐量、消息的冲突概率等等。

其中 PRR 计算公式如下：

$$P_{pr}r(a,b) = \frac{N_s(a,b)}{N_A(a,b)} \quad (4-9)$$

其中， $N_s(a,b)$ 表示车辆与所属 RSU 之间的距离满足 $d_{v2I} \in [a,b]$ 时，RSU 成功接收数据包的数量； $N_A(a,b)$ 表示车辆与所属 RSU 之间的距离满足 $d_{v2I} \in [a,b]$ 时，车辆发送的所有数据包的数量。

消息的传输时延表示对于一个消息，车辆发送完毕该消息所占用所有 TTI 数量；消息的等待时延表示对于一个消息，车辆处于等待状态，即不发送数据包的所有 TTI 数量。消息的冲突概率表示，在冲突避让处理过程中，出现冲突避让的概率。

系统吞吐量表示对于每一个 TTI，系统内所有 RSU 所接收到的数据包所包含的 bit 数量。

各个方案的详细仿真参数见表 4-1。

表 4-1 各类 V2I 资源分配算法详细参数

方案 参数	C-RR	C-TDM	C-ICC
地理拓扑, 详细 参数请参考表 3-1 表 3-2	1)曼哈顿街区 2)高速公路	1)曼哈顿街区 2)高速公路	1)曼哈顿街区 2)高速公路
周期消息周期 (TTI)	1)100 2)500	1)100 2)500	1)100 2)500
周期消息数据包 大小 (byte)	1 个 300,4 个 190	1 个 300,4 个 190	1 个 300,4 个 190
退避窗初始大小 (TTI)		5	5
退避窗最大大小 (TTI)		40	40
最大退避次数		3	3
时分策略		1) 基于簇大小的 时分策略 2) 均匀时分策略	
时分周期 (TTI)		100	
冲突避让机制		开启	开启
资源预留机制		开启	开启
每个 RBG 包含的 RB 数量	5	5	5
调制方式	QPSK	QPSK	QPSK
信道编码码率	0.5	0.5	0.5
总带宽 (Mb)	10	10	10
仿真时长 (min)	60	60	60

PRR 曲线图详见图 4-10。从图中可以看出, 在曼哈顿街区以及高速公路模型、周期消息的周期为 100TTI 以及 500TTI 时, C-TDM 方案的 PRR 性能都要优于其余两个方案, 同时 C-ICC 方案优于 C-RR 方案。图 4-10(b)中, C-TDM 方案的包到达率比 C-RR 方案的包到达率高出接近 70%, 比 C-ICC 方案的包到达率高出接近 50%。这是由于 C-TDM 方案对不同簇进行时分复用, 因此不存在簇间干扰, 仅存在 RSU 间干扰, 因此干扰非常少, 但是在消息频率较高的场景下,

这种性能提升是以消息不断堆积为代价的。同时，冲突避让机制以及资源预留机制能够进一步提升该方案的包到达率。C-ICC 方案相比于 C-RR 方案的优势来源于冲突避让机制以及资源预留机制，尽管 C-RR 方案不存在选择冲突，即在 RSU 的调配下，相同簇内的车辆不会占用同一频域资源段，但是由于不同簇内的车辆仍然可能会占用同一个频段，因此会产生较大的簇间干扰。而 C-ICC 采用了冲突避让机制以及资源预留机制，车辆可能检测到邻簇车辆的占用参考信号从而避免占用该干扰较大的频段，因此可以大大地降低簇间干扰乃至 RSU 间干扰，PRR 性能比 C-RR 提升了不少。

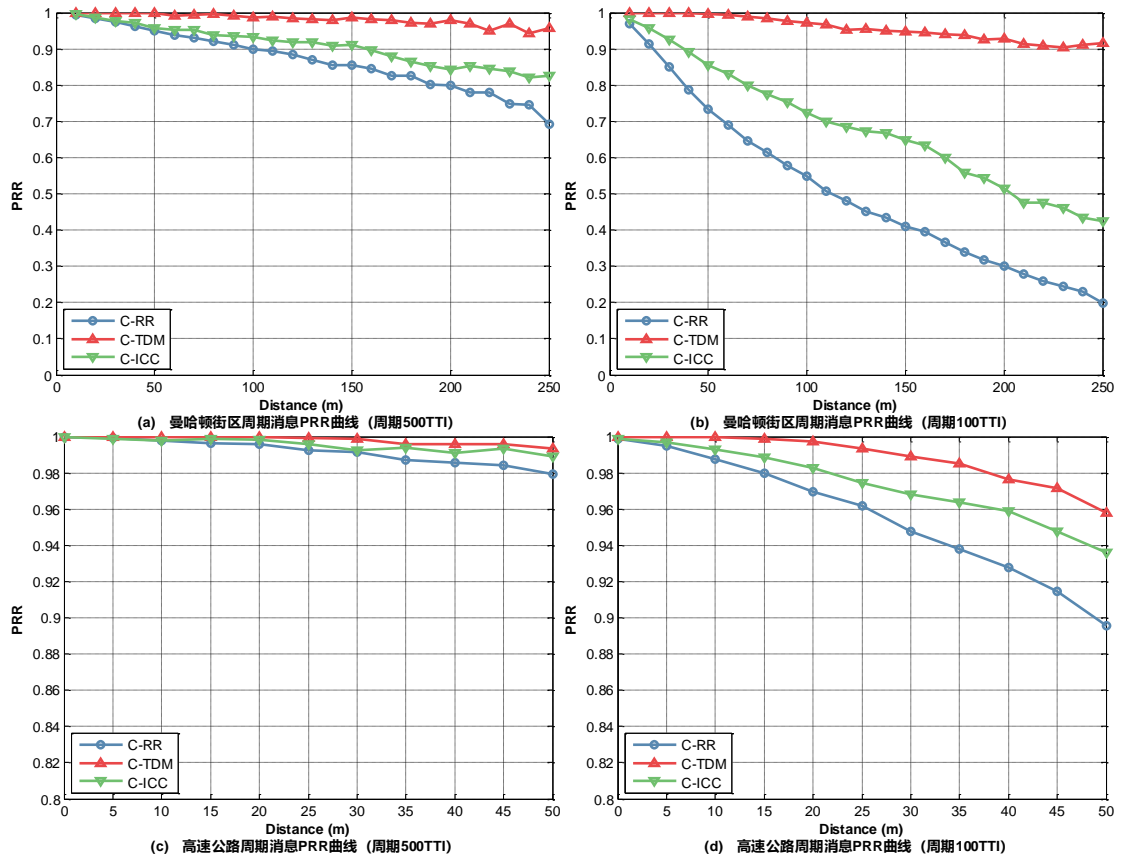


图 4-10 周期消息 PRR 曲线图

以曼哈顿街区模型、周期为 500TTI 的周期消息为例，等待时延频率统计详见图 4-11。从图中可以看出，C-RR 方案，几乎不存在等待时延，因为在这种仿真场景下，资源利用效率尚未达到瓶颈，即不会出现调度列表中待调度的节点数量多于 N_G 的情形， N_G 是 RBG 的总数量。C-ICC 方案的等待时延由于存在冲突避让机制，等待时延以小概率分布在 0-10TTI 范围内。C-TDM 方案的等待时延，大致分布在 0-100TTI 之内，这与表 4-1 设置的时分周期 $\Gamma = 100 \text{ TTI}$ 相吻合，车辆仅能在所分配的时段内才能进行数据包的发送，而在其他时段只能处于等待状态，且发送与等待之比大约为 1:3，因此等待时延分布广泛。由此可见 C-TDM 方案虽

然丢包率极低，但是时延相比其他方案要高不少。

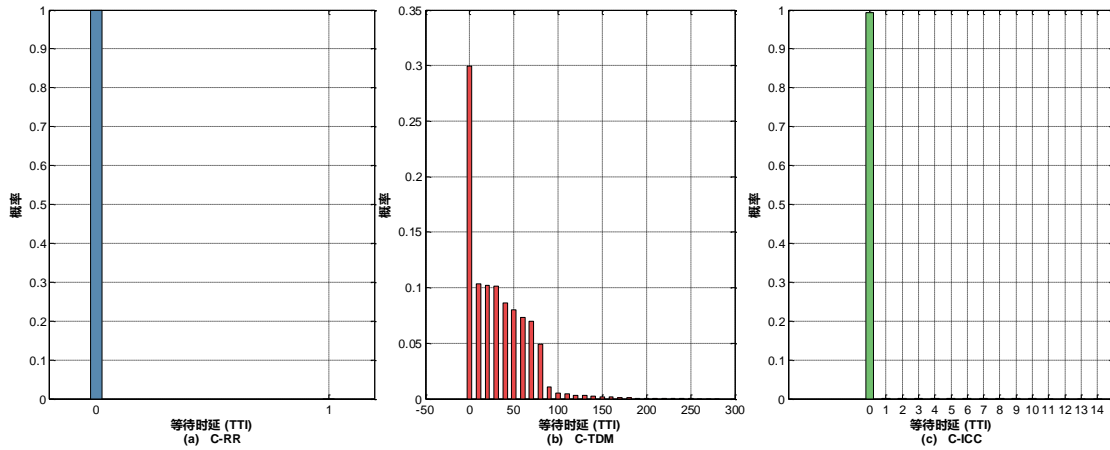


图 4-11 曼哈顿街区周期消息（500TTI）等待时延概率统计图

同样地，以曼哈顿街区模型、周期为 500TTI 的周期消息为例，传输时延频率统计详见图 4-12。从图中可以看出，C-RR 方案的传输时延几乎都是 11TTI，这与表 4-1 设定的数据包数量、数据包大小以及调制、编码方式相吻合： $\lceil (300 \times 8 / 2 \times 2) / (180 \times 5) \rceil + 4 \times \lceil (190 \times 8 / 2 \times 2) / (180 \times 5) \rceil = 0.011(s)$ ，其中，300 与 190 是字节数量；8 是 byte 与 bit 的换算比例；调制方式采用 QPSK，一个符号为 2 个 bit；0.5 码率的信道编码，冗余 50%；一个 RB 的带宽是 180bit/s，一个 RBG 由 5 个连续的 RB 构成。C-RR 方案存在高于 11TTI 的传输时延是因为当前车辆在消息传输完毕之前发生了 RSU 切换，导致消息的所有数据包重新传输。C-ICC 方案由于存在冲突避让机制，其传输时延会因为冲突避让而增加（意味着数据包重传），同时，RSU 切换也会导致传输时延增加。对于 C-TDM 方案，传输时延为 12TTI 的概率远高于 C-ICC 方案，这是由于 C-TDM 方案采用簇间时分复用，导致本可以分散传输的车辆集中在某一个时段进行频域资源的抢占，因此冲突概率较大。这与图 4-13 中的冲突概率统计也是相吻合的。

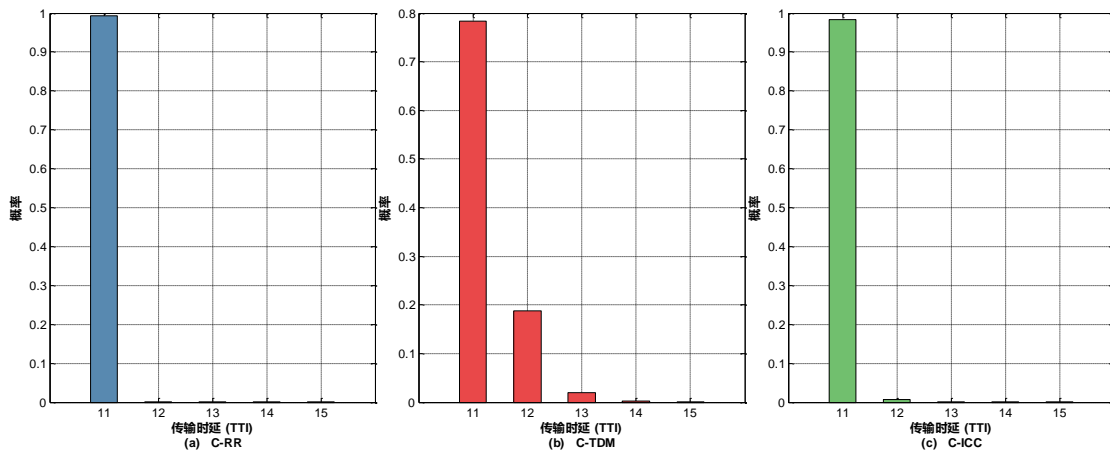


图 4-12 曼哈顿街区周期消息（500TTI）传输时延概率统计图

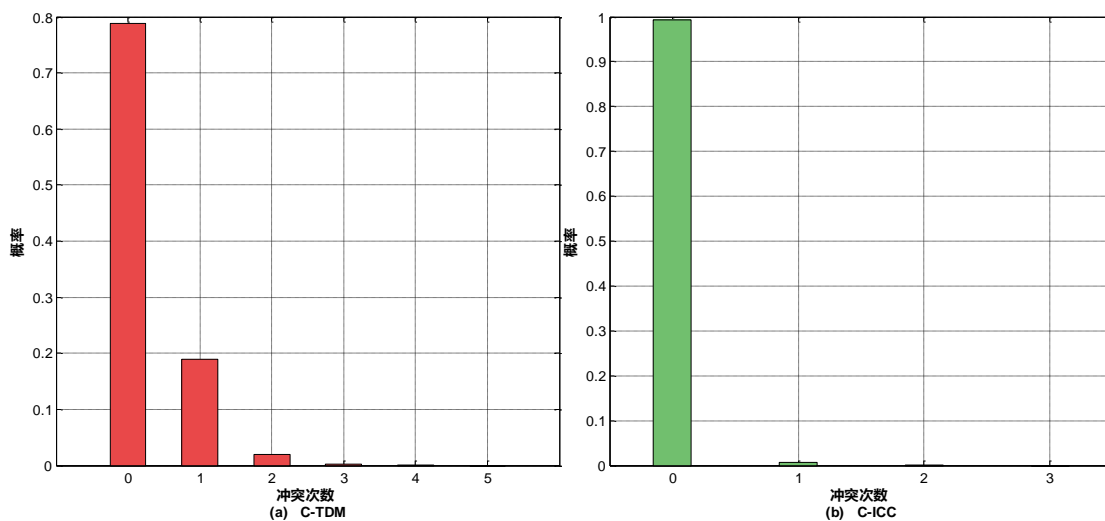


图 4-13 曼哈顿街区周期消息 (500TTI) 冲突概率统计图

系统每 TTI 吞吐量 CDF 曲线详见图 4-14。从图中可以看出，在周期消息周期较大的情况下，三种方案的吞吐量相近，C-RR 方案与 C-ICC 方案几乎完全重合，而在周期较小系统负载较大的情况下，见图 4-14(b)，C-TDM 方案的系统吞吐量明显小于 C-ICC 与 C-RR 方案，而 C-ICC 方案与 C-RR 方案较为相近。

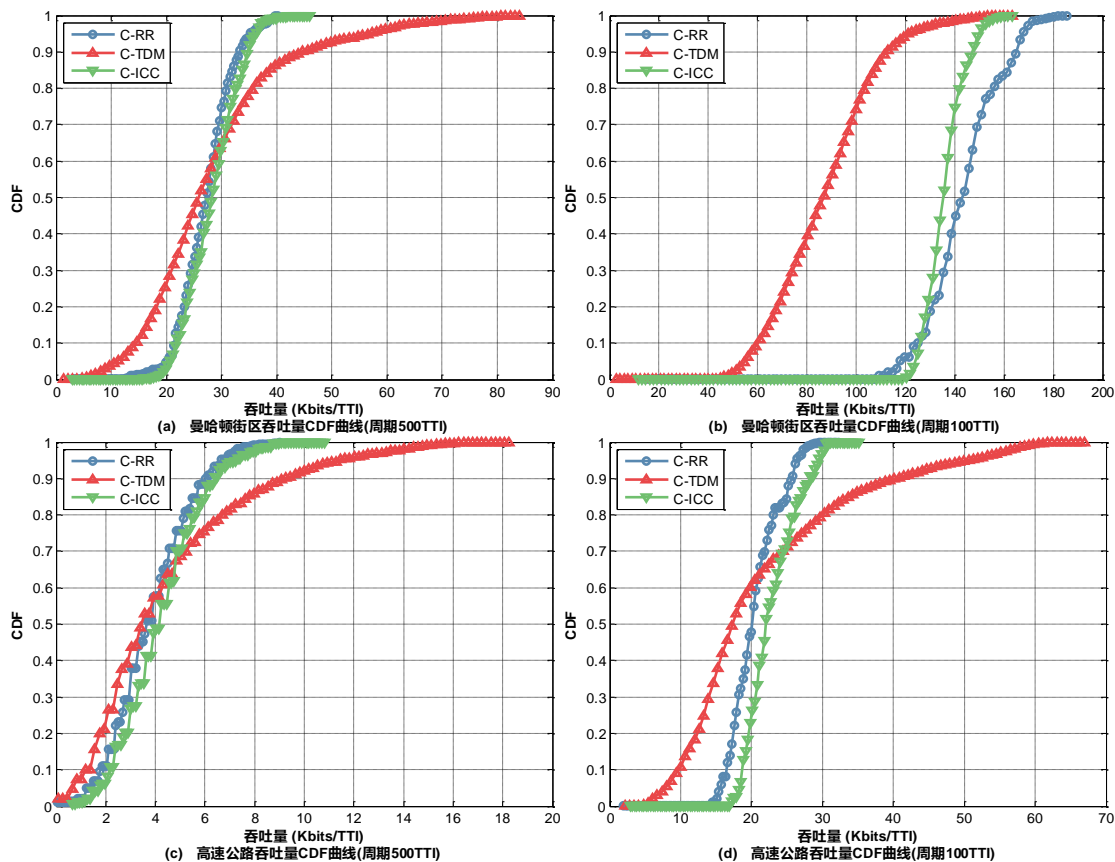


图 4-14 系统吞吐量 CDF 曲线图

另外从图 4-15 中可以得出，退避窗口的最大大小对于包到达率有着微弱的

影响,退避窗口大约在 40TTI 时,达到一个顶峰,与退避窗口大小为 10TTI 的包到达率相差 5-10%左右。

根据上述的分析,得出以下结论:C-TDM 方案在不同地理拓扑以及不同消息密度的场景下,有着较低的丢包率,适用于可靠性要求较高的场景,但是其等待时延和传输时延较大,即可容纳的吞吐量较小,不适用于消息密度较高的场景。C-ICC 方案,其包到达率以及时延特性处于 C-RR 方案与 C-TDM 方案之间,可以适用于多种不同的场景,且性能适中。

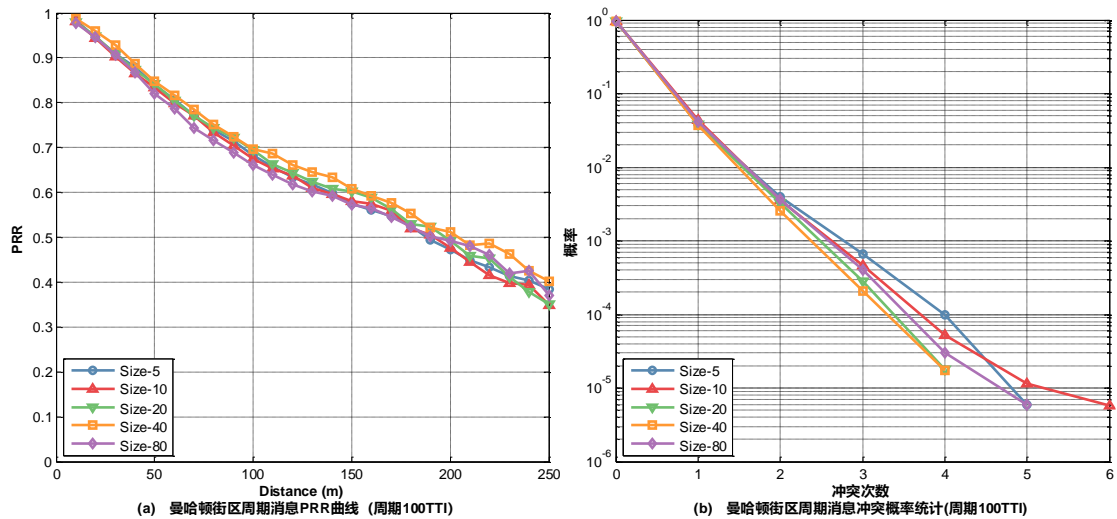


图 4-15 曼哈顿街区 PRR 以及冲突概率随最大退避窗口变化曲线图

另外, C-RR、C-TDM、C-ICC 方案对于紧急消息的优先级性能,做了如下的仿真,仿真参数详见表 4-2。衡量优先级性能的指标为等待时延。

表 4-2 各类 V2I 资源分配算法优先级性能仿真参数表

方案 参数	C-RR	C-TDM	C-ICC
地理拓扑, 详细 参数请参考表 3-1	曼哈顿街区	曼哈顿街区	曼哈顿街区
周期消息周期 (TTI)	100	100	100
紧急消息触发概 率(次/TTI/车)	0.005	0.005	0.005
周期/紧急消息数 据包大小(byte)	1 个 300,4 个 190	1 个 300,4 个 190	1 个 300,4 个 190

(续上表)

方案 参数	C-RR	C-TDM	C-ICC
周期消息退避窗 初始大小 (TTI)		5	5
周期消息退避窗 最大大小 (TTI)		40	40
紧急消息退避窗 初始大小 (TTI)		5	5
紧急消息退避窗 最大大小 (TTI)		40	5
最大退避次数		3	3
时分策略		1) 基于簇大小的 时分策略 2) 均匀时分策略	
时分周期 (TTI)		100	
冲突避让机制		开启	开启
资源预留机制		开启	开启
每个 RBG 包含的 RB 数量	5	5 (紧急消息占用 1 个 RBG; 其余 RBG 用于传输周 期消息)	5
调制方式	QPSK	QPSK	QPSK
信道编码码率	0.5	0.5	0.5
总带宽 (Mb)	10	10	10
仿真时长 (min)	60	60	60

C-RR、C-TDM、C-ICC 方案对于不同优先级消息的时延统计图见图 4-16。在 C-RR 方案中, 紧急消息会优先占用所有可用的 RBG, 因此, 在这种紧急消息触发概率下, 几乎不可能导致满负载, 因此紧急消息几乎不存在等待时延; 在 C-TDM 方案中, 由于为紧急消息额外划分了 1 个 RBG, 且该 RBG 不进行时分复用, 紧急消息一旦触发, 就可以进行 RBG 抢占然后进行传输, 因此紧急消息的优先级性能得到很大的提升, 但与此同时, 由于紧急消息可占用的 RBG 只有 1 个, 因此当紧急消息触发概率较大时, 可能会产生冲突, 于是退避算法介入, 造成额外的等待时延; 在 C-ICC 方案中, 没有为紧急消息划分额外的频段, 紧急消

息和周期消息均可使用所有的 RBG，同时，通过设置最大退避窗口的大小来提高紧急消息在发生碰撞时的优先级，因此紧急消息的优先级得到了有效的提升。

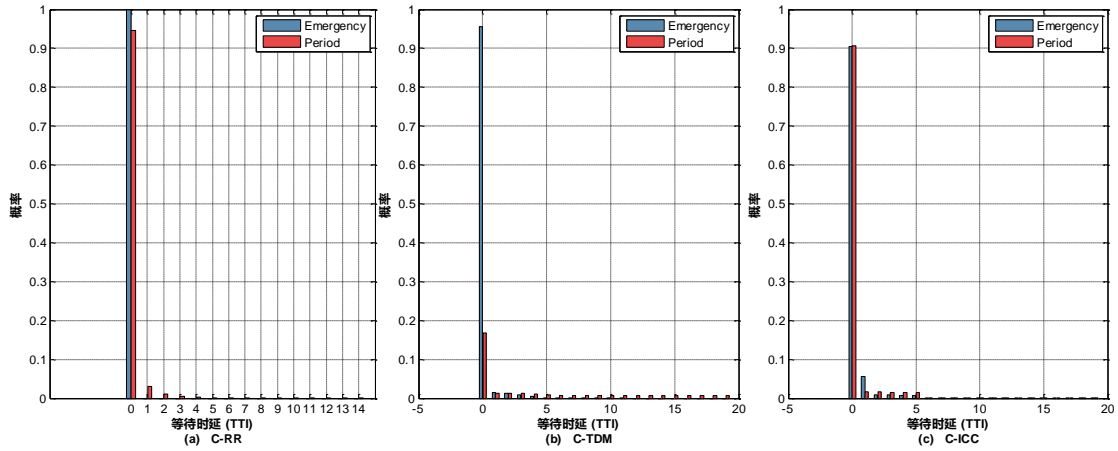


图 4-16 曼哈顿街区紧急消息与周期消息时延信息对比统计图

4.7 本章小结

本章针对 V2I 通信场景先后提出了 3 种资源分配算法，分别是 C-RR 算法、C-TDM 算法、C-ICC 算法。另外，还引入分簇策略，以及相应的接入算法；引入了资源预留机制，极大程度降低簇间以及 RSU 间干扰；引入冲突避让机制，进一步提升包到达率性能。最后，对不同的资源分配方案，进行了充分的仿真，并对仿真结果进行分析并给出各个方案的性能评估以及适用场景。

第五章 总结与展望

物联网被称为“继计算机、互联网、通信网之后的第三次信息浪潮”，车联网技术是实现、推广并发展物联网技术的关键途径之一。车联网网络是一种无中心的自组织网络，传统的资源调度策略以及传输协议将不再适用，本文针对典型的 LTE 架构下的车联网通信模式，对 V2V 以及 V2I 消息的资源分配算法进行了研究，并提出了若干资源分配算法，这些资源分配算法围绕的核心就是提高时频资源复用效率，降低干扰。本章首先对本文的主要工作进行总结，然后给出下一阶段的研究计划。

5.1 全文工作总结

本文的主要工作可以分为 3 部分。第一部分着重于 V2X 系统级车联网仿真平台的设计与实现。第二部分针对 V2V 场景提出了 2 种资源分配方案。第三部分针对 V2I 场景提出了 3 种资源分配方案。主要的工作及创新点如下：

首先，针对 V2V 场景，从提高时频资源复用率以及系统整体包到达率出发，提出了基于载波侦听的随机选择算法以及基于地理位置的时分算法。这两个资源分配算法适用于不同的场景，且它们的包到达率性能都比作为参考方案的随机选择算法高 10% 左右。

其次，针对 V2I 场景，先后引入了基于地理位置的分簇策略、资源预留机制、冲突避让机制，在提高时频资源复用率的同时尽可能降低车辆之间的同频干扰。并在此基础之上，提出了基于分簇的轮询调度算法，基于分簇的时分算法、基于分簇的簇间竞争算法。其中基于分簇的时分算法适用于可靠性要求较高、时延要求较低的场景；基于分簇的簇间竞争算法适用于可靠性要求适中，时延要求较高的场景。

最后，搭建了一个 V2X 系统级车联网仿真平台，涉及多个功能单元，包括地理拓扑与传播单元、无线资源管理单元、路由单元、业务模型与控制单元。各个单元面向接口编程，并利用反射以及 IoC 容器实现功能单元之间的解耦、梳理并简化平台的配置，提高了平台的易用性以及可扩展性。

5.2 下一步的工作

依据本文已经完成的工作，将在以下方面做进一步的探究：

目前仿真平台所支持的地理拓扑有曼哈顿街区以及高速公路，这两种模型都

过于理想化，以至于仿真结果和实际实验可能会存在较大的误差。在下一阶段，将会对地理拓扑进行不同层次的抽象，并允许各种地形相互组合，提高配置的自由度。

针对 V2I 消息，分簇无疑是一种很好的资源复用的策略，但是目前的分簇仅仅依据地理位置，且划分的方式较为单一、理想。因此，如何根据地理拓扑以及 RSU 分布、车辆分布，对分簇策略进行优化，是下一阶段的工作重心。

对于 V2V 消息，如何优化区域的划分，以达到提高资源复用率，同时尽量不引入过多的传输时延，也是下一阶段的工作重心。另外，对于基于地理位置的时分算法，现阶段的区域划分策略是静态的，在下一阶段中将研究动态的地理位置划分策略。

参考文献

- [1] 3GPP TR 36.885: "Study on LTE-based V2X Services".
- [2] 胡欣宇,张洁.车联网的发展与挑战[J].物联网技术,2017,7(02):56-59+62.
- [3] 邱佳慧,陈祎,刘珊,刘琪.车联网关键技术及演进方案研究[J].邮电设计技术,2017(08):29-34.
- [4] F. J. Martinez, C. K. Toh, J. C. Cano, C. T. Calafate and P. Manzoni, "Emergency Services in Future Intelligent Transportation Systems Based on Vehicular Communication Networks," in *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 6-20, Summer 2010.
- [5] G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Iera and A. Molinaro, "LTE for vehicular networking: a survey," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 5, pp. 148-157, May 2013.
- [6] J. B. Kenney, "Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1162-1182, July 2011.
- [7] H. Hartenstein and L. P. Laberteaux, "A tutorial survey on vehicular ad hoc networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 6, pp. 164-171, June 2008.
- [8] Olariu S, Weigle M C, "Vehicular Networks: From Theory to Practice," *Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series*, USA, 2009.
- [9] HanesHartenstein, KennethP.Laberteaux. VANET:车载网技术及应用:vehicular applications and inter-networking technologies[M]. 清华大学出版社, 2013.
- [10] P. Papadimitratos, A. D. La Fortelle, K. Evenssen, R. Brignolo and S. Cosenza, "Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 84-95, November 2009.
- [11] X. Liu, Y. Li, L. Xiao and J. Wang, "Power control in D2D-based multi-antenna V2V underlay cellular networks with rate constraints," MILCOM 2017 - 2017 IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Baltimore, MD, USA, 2017, pp. 197-202.
- [12] 杨琼,胡静,夏玮玮.异构网络融合场景下车联网的移动性管理和资源管理[J].电信科学,2015,31(09):67-72.
- [13] Y. Bi, X. Ca, X. Shen, and H. Zhao, "Medium access control for QoS provisioning

- in vehicle to-infrastructure communication networks," in *Mobile Netw Appl*, vol. 18, no. 2, pp. 174–185, Apr. 2008.
- [14] L. Saker, S. E. Elayoubi and H. O. Scheck, "System Selection and Sleep Mode for Energy Saving in Cooperative 2G/3G Networks," *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, Anchorage, AK, 2009, pp. 1-5.
- [15] A. Vinel, "3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE: Which Technology is Able to Support Cooperative Vehicular Safety Applications?," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 125-128, April 2012.
- [16] W. Xing, N. Wang, C. Wang, F. Liu and Y. Ji, "Resource Allocation Schemes for D2D Communication Used in VANETs," *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, Vancouver, BC, 2014, pp. 1-6.
- [17] 武文科. 车联网技术发展与应用综述[J]. 汽车实用技术, 2017, (03):88-91.
- [18] 苏静, 王冬, 张菲菲. 车联网技术应用综述[J]. 物联网技术, 2014, 4(06):69-72.
- [19] 王建强, 吴辰文, 李晓军. 车联网架构与关键技术研究[J]. 微计算机信息, 2011, 27(04):156-158+130.
- [20] R1-157534, "Discussion on enhancement of V2X resource allocation", Beijing Xinwei Telecom Techn., Nov. 2015.
- [21] R1-157438, "Discussion on Resource Allocation Enhancement for PC5 based V2V Communications", NTT DOCOMO., Nov. 2015.
- [22] R1-157449, "Further discussion on resource allocation mechanism in PC5-based V2V", CATT., Nov. 2015.
- [23] R1-157435, "Discussion on enhancement for PC5 based V2V resource allocation", LG Electronics., Nov. 2015.
- [24] R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and Its Distributed Scheduling," *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Sydney, NSW, 2017, pp. 1-5.
- [25] X. Zhang, Y. Shang, X. Li and J. Fang, "Research on Overlay D2D Resource Scheduling Algorithms for V2V Broadcast Service," *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Montreal, QC, 2016, pp. 1-5.
- [26] Q. Wei, W. Sun, B. Bai, L. Wang, E. G. Ström and M. Song, "Resource allocation for V2X communications: A local search based 3D matching approach," *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, 2017, pp. 1-6.
- [27] W. Sun, D. Yuan, E. G. Ström and F. Brännström, "Resource Sharing and Power Allocation for D2D-based safety-critical V2X communications," *2015 IEEE*

-
- International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2399-2405.
- [28] B. Bai, W. Chen, K. B. Letaief and Z. Cao, "Low Complexity Outage Optimal Distributed Channel Allocation for Vehicle-to-Vehicle Communications," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 1, pp. 161-172, January 2011.
- [29] R. Zhang, X. Cheng, Q. Yao, C. X. Wang, Y. Yang and B. Jiao, "Interference Graph-Based Resource-Sharing Schemes for Vehicular Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 8, pp. 4028-4039, Oct. 2013.
- [30] F. Chiti, R. Fantacci, E. Dei and Z. Han, "Context aware clustering in VANETs: A game theoretic perspective," *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, 2015, pp. 6584-6588.
- [31] M. Botsov, M. Klügel, W. Kellerer and P. Fertl, "Location dependent resource allocation for mobile device-to-device communications," *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Istanbul, 2014, pp. 1679-1684.
- [32] 3GPP TR 36.843: "Study on LTE Device to Device Proximity Services".
- [33] G. Cecchini, A. Bazzi, B. M. Masini and A. Zanella, "Localization-based resource selection schemes for network-controlled LTE-V2V," *2017 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Bologna, 2017, pp. 396-401.

致谢

在毫无心理准备的情况下马上就面临着毕业了，在北邮呆了 6 年多，从当年懵懂幼稚的少年变成一个即将硕士毕业的老学长，我一年年地看着北邮的变化，北邮也一步步地见证了我的成长。在这个小小的校园里，我收获了知识、友谊和成长，尤其是攻读硕士研究生的两年半时间里，无论是学术还是生活，都是我人生中最珍贵的一段时光。感谢这段时间指导我的老师们，感谢这段时间关心我的亲人们，感谢这段时间温暖我的朋友们。

首先感谢我的导师牛凯老师以及贺志强老师。他们学识渊博、治学严谨、工作认真，在学术上给予我悉心地指导和帮助，他们如我人生的一座灯塔，在我感到最迷茫的时候给了我关键的指引和帮助。此外，他们幽默风趣、豁达乐观的生活态度也深深地感染了我，让我受益匪浅。

然后感谢实验室的学长学姐，尤其是戴金晟学长、张进年学长给了我无数的关心和帮助，他们的幽默、乐观和热情让我觉得生活如此精彩。

同时我还要感谢宿舍的小伙伴们，他们的风趣和没节操，让我的研究生生活充满了乐趣和欢笑，他们的关心和爱心，让我感受到了如家一般的温暖。谢谢他们这些没节操的小伙伴陪我度过 3 年的硕士生涯。

同时，我还要向我的家人和朋友表示由衷的感谢，一路走来，是你们的支持与鼓励让我战胜了学习和生活中的困难，你们永远是我坚强的后盾。今后我定当更加努力，不辜负你们的期望。

最后，感谢负责论文评审和答辩的各位专家，祝你们工作顺利。

攻读学位期间取得的研究成果

学术论文:

- [1] Chenfeng. He, Huachan. Qin, Zhiqiang. He and Kai. Niu, "Adaptive GoP dividing video coding for wireless broadcast based on power allocation optimization," 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Yangzhou, 2016, pp. 1-5.