



信息通信领域产学研合作特色期刊 十佳皖刊
第三届全国期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

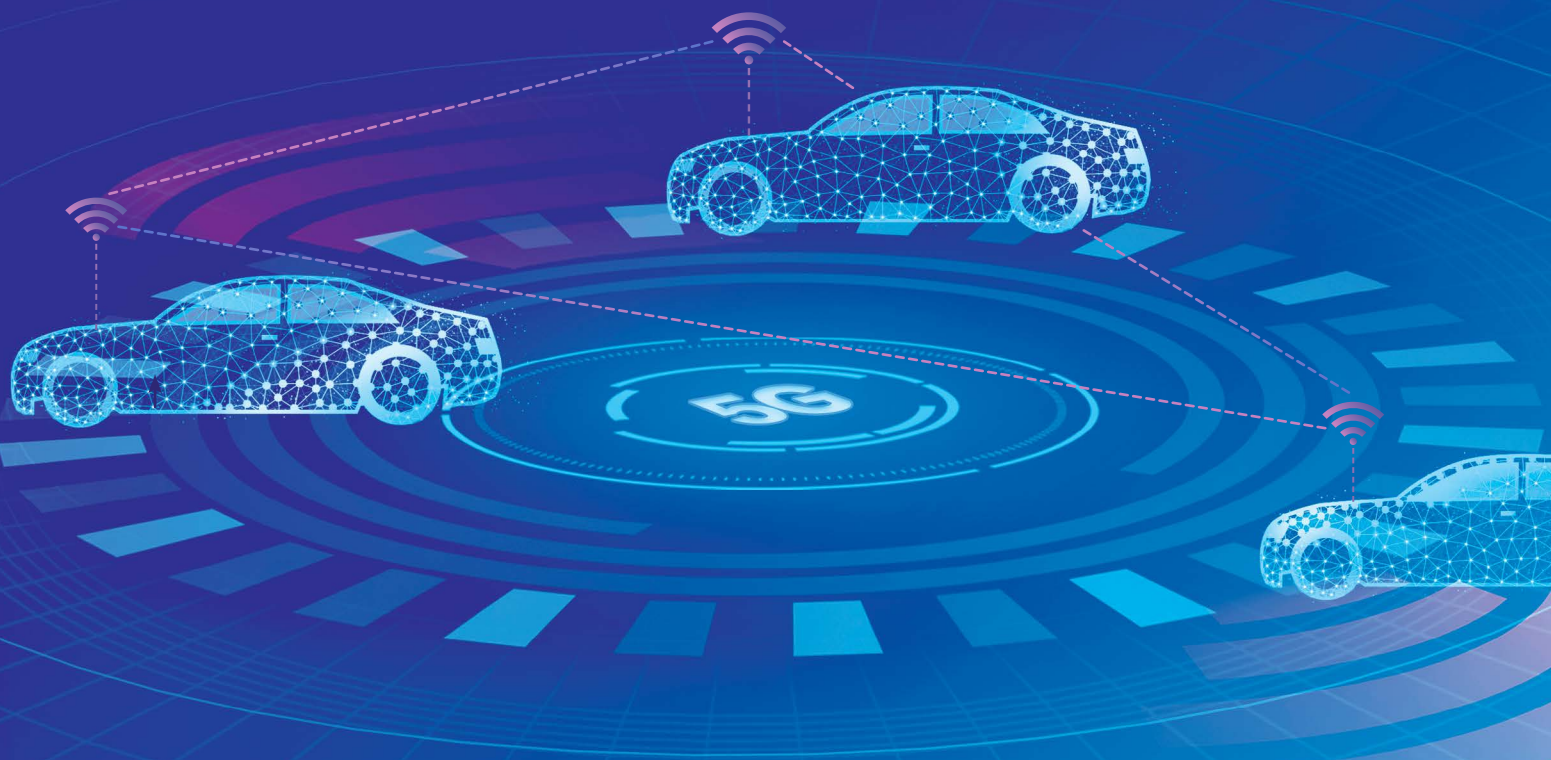
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2020年2月·第1期

专题：蜂窝车联网产业与技术



02>



9 771009 686205

《中兴通讯技术》第8届编辑委员会成员名单

顾问 侯为贵（中兴通讯股份有限公司创始人） | 钟义信（北京邮电大学教授） | 陈锡生（南京邮电大学教授）

主任 陆建华（中国科学院院士）

副主任 徐子阳（中兴通讯股份有限公司总裁） | 糜正琨（南京邮电大学教授）

编委（按姓名拼音排序）

陈建平	上海交通大学教授	唐雄燕	中国联通网络技术研究院首席科学家
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长	陶小峰	北京邮电大学教授
葛建华	西安电子科技大学教授	王文博	北京邮电大学教授、副校长
管海兵	上海交通大学教授	王文东	北京邮电大学教授
郭庆	哈尔滨工业大学教授	王喜瑜	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
洪波	中兴发展股份有限公司总裁	王翔	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
洪伟	东南大学教授	卫国	中国科学技术大学教授
黄宇红	中国移动研究院副院长	吴春明	浙江大学教授
纪越峰	北京邮电大学教授	邬贺铨	中国工程院院士
江涛	华中科技大学教授	肖甫	南京邮电大学教授
蒋林涛	中国信息通信研究院科技委主任	解冲锋	中国电信新兴信息技术研究所总工程师
李尔平	浙江大学教授	徐安士	北京大学教授
李红滨	北京大学教授	徐子阳	中兴通讯股份有限公司总裁
李厚强	中国科学技术大学教授	续合元	中国信息通信研究院副总工
李建东	合肥工业大学教授、副校长	薛向阳	复旦大学教授
李军	清华大学教授	薛一波	清华大学教授
李乐民	中国工程院院士	杨义先	北京邮电大学教授
李融林	华南理工大学教授	杨震	原南京邮电大学教授、校长
李少谦	电子科技大学教授	叶茂	电子科技大学教授
林晓东	中兴通讯股份有限公司副总裁	易芝玲	中国移动研究院首席科学家
刘健	中兴通讯股份有限公司高级副总裁	张宏科	北京交通大学教授
刘建伟	北京航空航天大学教授	张平	中国工程院院士
陆建华	中国科学院院士	张卫	复旦大学教授
马建国	广东工业大学教授	张云勇	中国联通研究院院长
孟洛明	北京邮电大学教授	赵慧玲	工业和信息化部科技委信息网络专家组组长
糜正琨	南京邮电大学教授	郑纬民	中国工程院院士
任品毅	西安交通大学教授	钟章队	北京交通大学教授
石光明	西安电子科技大学教授、副校长	周亮	南京邮电大学教授
孙知信	南京邮电大学教授	朱近康	中国科学技术大学教授
谈振辉	北京交通大学教授	祝宁华	中国科学院半导体研究所副所长

目次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)
总第 150 期 第 26 卷 第 1 期 2020 年 2 月

卷首特稿

关于 5G 的十点思考 **02**
邬贺铨

专题：蜂窝车联网产业与技术

车联网产业进展及关键技术分析 **05**
Wai CHEN, 李源, 刘玮

基于车辆行为分析的
车联网超可靠低时延通信关键技术 **12**
张海霞, 刘文杰, 薛彤, 梁聪

C-V2X 与智能车路协同技术的深度融合 **19**
张杰

基于数字孪生的网联自动驾驶测试方法研究 **25**
葛雨明, 汪洋, 韩庆文

基于 C-V2X 直连通信的车辆编队行驶性能优化 **30**
付思雨, 姜之源, 张舜卿

车联网高层协议关键技术 **35**
罗薇, 汪梦珍, 许玲

5G NR-V2X 直连通信频率需求研究 **40**
李俨, 高路

45 感知 - 通信 - 计算融合的智能车联网挑战与趋势
尉志青, 马昊, 张奇勋, 冯志勇

50 中欧 V2X 联合试验关键场景及技术
陈涛, Matti KUTILA, 郑银香, 邓伟, 王江舟

专家论坛

56 车联网产业发展分析
汤立波

60 C-V2X 技术在智能网联行业中的应用探讨
宋蒙, 刘琪, 许幸荣, 王题

企业视界

64 5G: 期待中发展 质疑中生长
王喜瑜

67 5G 核心网演进需求及关键技术
王卫斌, 朱进国, 王全

技术广角

73 NR 中集中式网元和分布式网元架构现状与进展
高音, 韩济任, 刘壮

2020 年第 1—6 期专题计划及策划人

1. 蜂窝车联网产业与技术
中国移动通信研究院首席科学家 易芝玲
中国移动通信研究院技术经理 潘成康

2. 智能化通信应用芯片技术
中国科学院半导体研究所副所长 祝宁华

3. 5G 核心网技术与挑战
工业和信息化部科技委
信息网络专家组组长 赵慧玲

4. 无线网络空中计算
中国科学技术大学教授 卫国

5. 网络人工智能技术
电子科技大学教授 虞红芳

6. 工业互联网技术与应用
中国信息通信研究院副总工 续合元

CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 26 No. 1 Feb. 2020

Guest Paper

Ten Reflections on 5G **02**
WU Hequan

Special Topic:

Industry and Technologies of C-V2X

Industrial Progress and Key Technologies of Internet of Vehicles **05**
Wai CHEN, LI Yuan, LIU Wei

Vehicle Behavior Analysis Based Ultra-Reliable and Low-Latency Communication Technologies for Internet of Vehicles **12**
ZHANG Haixia, LIU Wenjie, XUE Tong, LIANG Cong

Deep Integration of C-V2X and Intelligent Vehicle-Infrastructure Cooperative Systems **19**
ZHANG Jie

Test Method of Connected and Automated Vehicles Based on Digital Twin **25**
GE Yuming, WANG Yang, HAN Qingwen

Driving Performance Optimization of Vehicle Platooning Based on C-V2X Sidelink **30**
FU Siyu, JIANG Zhiyuan, ZHANG Shunqing

Main Technologies Adopted in High Layer Protocol for Internet of Vehicles **35**
LUO Wei, WANG Mengzhen, XU Ling

5G NR-V2X Sidelink Spectrum Requirement **40**
LI Yan, GAO Lu

45 Challenge and Trend of Sensing, Communication and Computing Integrated Intelligent Internet of Vehicles
WEI Zhiqing, MA Hao, ZHANG Qixun, FENG Zhiyong

Key Scenarios and Technologies in EU-China V2X Trial Cooperation **50**
CHEN Tao, Matti KUTILA, ZHENG Yinxian, DENG Wei, WANG Jiangzhou

Expert Forum

56 Development of the Internet of Vehicles Industry
TANG Libo

60 Application of C-V2X Technology in Intelligent Connected Industry
SONG Meng, LIU Qi, XU Xingrong, WANG Ti

Enterprise View

64 5G: Striving for Sustainable Growth amid Expectations
WANG Xiyu

67 Evolution Requirements and Key Technologies of 5G Core Network
WANG Weibin, ZHU Jinguo, WANG Quan

Technology Perspective

73 Current Status and Process of CU-DU Architecture in NR
GAO Yin, HAN Jiren, LIU Zhuang

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*82*zh*P* ¥ 20.00*15000*16*2020-02

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。

蜂窝车联网产业与技术专题导读



专题策划人 易芝玲



中国移动通信研究院首席科学家，担任 IEEE 5G Initiative SC、WAIA 联盟指导委员会主席、WWRF 亚太区副主席和 Future Forum 副理事长等职务，发起成立 O-RAN 联盟，并担任执行委员会 EC 成员、技术委员会 TSC 联合主席；主要从事无线与移动通信领域研究；主持中国移动 5G、C-RAN、O-RAN 和网络节能等重大项目，荣获 2 项省部级奖项，获得 IEEE 2018 年度 Fred W. Ellersick Prize 最佳论文奖、IEEE 2018 亚太区年度杰出论文奖、IEEE 2015 产业引领创新奖、IEEE 莱斯论文奖；在旗舰期刊《IEEE Communications Magazine》中发表论文 28 篇，《IEEE JSAC》中发表论文 4 篇，发表 ESI 高被引论文 5 篇，排名前 0.05%，发表其他论文 130 余篇，持有国际和国家发明专利 100 余项。

专题策划人 潘成康



中国移动通信研究院技术经理；主要从事 5G 空口技术和垂直应用技术、6G 前沿技术研究等工作；作为子项目负责人和核心成员完成或正在参与“5G 支持 ICT 融合自动驾驶的关键技术研发与验证”等多项工业和信息化部重大专项项目；发表论文 30 余篇，持有专利 20 余项。

蜂窝车用无线通信（C-V2X）技术是一种以蜂窝网络为基础的车辆通信与信息服务技术。随着车辆智能化和移动通信的快速演进，C-V2X 正从支持车载信息服务为主向支持自动驾驶和智慧交通应用发展，通过车-网、车-车、车-路、车-人通信实现车、路、人、云的全方位连接和有机结合，逐步建立起支持车辆协同和车路协同的协同感知、协同计算、协同决策和协同控制的智能信息服务能力。

当前，C-V2X 正从基于长期演进（LTE）-V2X 向新空口（NR）-V2X 演进。总体上，前者的技术、产品、测试逐渐成熟，后者的技术和标准正在攻关和验证中。

本期专题针对 C-V2X 的挑战、趋势、问题、机遇等开展讨论。首先，支持海量异构感知数据处理成为 C-V2X 面临的关键新问题。Wai CHEN 等在论文中提出了“通信+计算”的体系架构，采用“中心-区域-边缘”3 层平台部署架构，满足不同处理时延和处理量的需求。张杰等在论文中研究了车路协同 3.0 技术方案，建立感知能力和计算能力在车辆和道路之间进行动态分配的机制。尉志青等在论文中提出的感知通信计算融合车联网解决方案，是 C-V2X 重要的技术发展趋势。张海霞等则在论文中讨论了如何充分利用这些海量

异构数据价值的车辆行为分析技术。其次，C-V2X 无线资源优化一直是保障超可靠低时延通信的关键，付思雨、罗薇、张海霞等分别在其它论文中讨论了资源优化方案和资源分配、移动性管理等相关流程。另外，自动驾驶在试验场测试面临很多约束。葛雨明等在论文中提出了基于数字孪生的网联自动驾驶测试方法，利用 C-V2X 实现传感器数据上传和虚拟场景信息发布的全过程，支持更多场景的道路车辆测试。利用类似数字孪生的仿真推演手段，可以实现交通优化，这点在张杰论文中也有涉及。最后，C-V2X 中同步技术、定位技术等，在相关论文中都有所论述。

除了技术攻关外，C-V2X 的发展需要全球产业合作，包括全球协调的频谱规划、全球规范一致的测试场景。相关国家已经为 C-V2X 分配频率或正在开展可行性研究。李俨等在论文中讨论了 5G 车联网业务对频谱带宽的总量需求。陈涛等在论文中介绍了中欧车联网项目合作情况以及相应测试结果。

本专题论文来自高校、运营商、设备商和全球研究机构等 C-V2X 技术研究优势单位的专家学者，凝聚了他们多年的研究成果和工作经验，希望能给读者提供有益的启示和参考。在此，对各位作者的大力支持表示衷心感谢。

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001001

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200224.1052.002.html>

网络出版日期: 2020-02-24

收稿日期: 2020-01-22

易芝玲 潘成康

2020 年 1 月 19 日



关于 5G 的十点思考

Ten Reflections on 5G

邬贺铨 /WU Hequan

(中国信息通信科技集团有限公司, 北京 100083)
(China Information Communication Technologies Group Corporation, Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200115.1606.002.html>

网络出版日期: 2020-01-16

收稿日期: 2019-12-27

摘要: 面向工业互联网和智慧城市的高可靠、低时延等要求, 5G 以用户服务为本的理念代替了互联网的网络效率优先原则; 为适应未来业务的不确定性, 5G 将从传统电信网的封闭性转为业务开放化和协议互联网化。5G 试图兼具互联网与电信网的优势, 但在实现上仍面临诸多挑战。文章提出了在网络建设与业务组织上需要重视的十个问题。

关键词: 5G; 软件定义网(SDN); 网络功能虚拟化(NFV); 网络切片; 基于服务的架构(SBA); 移动边缘计算(MEC)

Abstract: 5G takes the concept of service-oriented architecture to replace the priority principle of network efficiency in the Internet to meet the requirements of the industrial Internet and smart cities, such as high reliability and low latency. On the other hand, in order to adapt to the uncertainty of future business, 5G features the openness of services and the Internet protocols, different from the closeness of traditional telecommunication networks. Although 5G tries to have the advantages of both the Internet and telecommunication network, its realization still faces many challenges. In this paper, ten major issues concerning 5G networking and service offering are discussed.

Keywords: 5G; software defined networking (SDN); network functions virtualization (NFV); network slices; service-based architecture (SBA); mobile edge computing (MEC)



邬贺铨

中国工程院院士, 曾任中国工程院副院长, 现任国家信息化专家咨询委员会副主任、国家标准化专家委员会主任、国家“互联网+”专家委员会主任、国家物联网专家组组长、国家新一代宽带无线移动通信网重大科技专项总工程师、中国互联网协会咨询委员会主任, 以及 IEEE 高级会员等; 长期从事数字和光纤通信系统的研究开发工作, 近十多年来负责中国下一代互联网示范工程和 3G/4G/5G 等研发项目的技术管理及重要工程科技咨询项目研究; 曾获全国科学大会奖、国家科技进步二等奖、邮电科技进步一等奖等多个奖项; 出版专著 1 部。

2019 年 5G 开始商用。除中国外, 目前已经开始 5G 商用的其他国家的运营商都基于非独立组网 (NSA) 方式起步, 即沿用 4G 核心网, 仅增加了 5G 基站。5G 终端从而可获得比 4G 更高的宽带能力。中国决定 2020 年要直接采用独立组网 (SA) 方式建设 5G 核心网^[1]。SA 能够提供 NSA 不具备的高可靠、低时延和广覆盖、大连接能力, 在增强移动宽带能力方面也比 NSA 方式有更高的效率。因此, 可以说 2020

年才是真正的 5G 元年。

为了适应多业务、低时延、高可靠的业务要求, 与 4G 相比, 5G 核心网采用基于服务的架构 (SBA)^[2], 从而实现业务开放性和切片化、网络功能虚拟化 (NFV)^[3]、计算能力边缘化、协议互联网化等特点。从 50 年前互联网诞生到现在, 互联网协议如传输控制协议 / 因特网互联协议 (TCP/IP) 是基于无连接模式逐包选路转发的; 而

现在 5G 核心网具有面向连接的能力, 第三层的 IP 包不再是唯一的转发单元。如上所述的网络体系变革之大是互联网诞生以来从未有过的, 5G 大规模应用要达到预期的性能将面临诸多挑战。

(1) 5G 将要大规模使用软件定义网络 (SDN)。SDN 实现传送与控制分离, 利用网络操作系统集中管理网络, 并基于大数据和人工智能为每一个业务流计算出端到端的路由, 再

将路由信息嵌入源节点的 IPv6 扩展报头的标签栈,并沿路径传递到各节点,实现源选路(SRv6)^[4]。中间节点只须转发,无须选路,减少或省去了排队时间,以面向连接模式保证低时延转发。我们虽然期待能够通过 SDN 对所有业务流和节点实时优化,但大规模网络低时延响应的多目标优化是难题——路由可能冲突或不收敛。有两种方法可以解决该难题:一种方法是分区域设置 SDN,但跨区域的路由组织需要 SDN 间交换业务流与网络资源数据,增加实现的复杂性;另一种方法是仅对部分业务流按面向连接转发,对其他业务流将仍按无连接方式处理,以降低对 SDN 处理能力的压力。

(2) 5G 颠覆传统网元的构成方式。通过硬件通用化(白盒化)和软件定义网元功能,NFV 可以根据业务流的需要灵活采用 1.5 层、2 层或 3 层转发,提高转发效率并显著降低时延。针对不同业务,NFV 要求网元在同一时间呈现不同功能,且这些功能随业务变化而变化。这就需要 NFV 对全局业务流和网络资源数据实现精准获取。NFV 通过虚拟化实现软硬件解耦,并向硬件资源池化和软件微服务重构发展;但微服务架构缺乏标准,无法实现开放和互操作的初衷,且 SDN 与 NFV 同时操作难以避免网络资源冲突问题。另外,与专用设备相比,白盒化的转发时延可能还要大一些。更大的问题在于当白盒化网元与原有网元共存于一个网络时,NFV 的效果将很难体现。

(3) 网络切片是 5G 网络与业务的一大特色。网络切片^[5]按照业务流的带宽、时延、可靠性等需求,在集

中的网络运维系统管理下组织网络资源,为各业务流提供与其业务属性相对应的虚拟专用网络(VPN)通道,支持个性化服务,尤其适应不同垂直行业的需求。虽然 VPN 服务在电信网中早就存在,但过去都是预约建立而非实时提供的,且仅对极少数业务流开通。现在 5G 网络切片面临着 VPN 海量规模、实时性、端到端通道组织等特点,对业务流进行逐一切片未免太理想化了,如 30 年前的异步传输模式(ATM)就是前车之鉴。如果网络切片从核心网扩展到接入网,则端到端的切片要随用户移动而变更,这就增加了切片管理的复杂性。至于将 VPN 开放给客户以发现、选择、生成、管理并提供按需实时动态调整权限,是前所未有的挑战。跨运营商网络建立 VPN 连接更是难以想象的任务,这需要运营商间相互开放网络资源与业务数据,但这基本没有可操作性。可取的办法是仅对时延、丢包率和可靠性等有较严格要求的业务流提供网络切片。与现有 4G 网络的 VPN 相比,以上方法可以使 VPN 实时生成而无须预约。另外,在流量计费的模式下,仅对高端用户提供能够保障服务质量(QoS)的 VPN 服务,但对一般用户有失公平性,因此需要考虑采用以用户价值为中心并考虑 QoS 计费模式。

(4) SBA 是 5G 的重要创新。SBA 构建了一个业务开放平台,承接各种业务智能单元,像手机上的应用程序(APP)那样实现按需添加。通过智能单元的组合可以产生相应的智能,通过业务的解耦和模块化可以实现灵活调用网络服务,以此来适应 5G 新业态的不可预见性。SBA 与电话网

中的智能网类似,在海量用户且网络资源有限的环境下,同样会出现智能网中各业务智能单元组合可能冲突的问题。与智能网不同的是,SBA 是开放的平台,极大丰富了业务智能 APP 的来源;但与传统运营商封闭的业务能力相比,SBA 的业务平台开放性存在安全风险。与 SBA 相配合,5G 移动通信协议全面互联网化,这样一来互联网上的应用可以直接移植到 5G,增强了业务能力。但与过去移动通信采用的专用协议相比,5G 移动通信协议互联网化为互联网上的病毒和木马留下了方便之门。为此,5G 在网络安全与信息安全的防护方面需要比 4G 下更大的功夫。

(5) 移动边缘计算(MEC)与 5G 相伴而行。MEC 实现了云计算能力部分下沉,包括存储与内容分发能力,以适应时延敏感业务的快速处理。在工程上如何合理设置 MEC 的粒度是实践中需要探索的问题。移动终端、机器人、网联车等应用需要在 MEC 间切换,这就涉及 MEC 间协同以及 MEC 与中心云间功能合理分配的问题。它不仅可能会产生 MEC 间大量的开销、MEC 与中心云的大量交互,还会引入时延。MEC 特别适合于面向垂直行业的应用,因为垂直行业希望运营商开放 MEC 能力。为此,需要为 MEC 配置开源平台与容器等轻量级云技术以支持第三方边缘应用。另外,开放 MEC 能力对运营商网络管理与信息安全的影响也难以估量。

(6) 5G 对同步提出严格要求。SDN/NFV 都需要获得所有网元的业务流和网络资源的大数据,各网元的数据需要同步和绝对时间对齐。如果各

网元上报的数据时间不够精准,就不可能得到全局视觉。如此一来,按不那么精准的数据来做出网络调度的决策可能更糟糕。现有电气与电子工程师协会标准(IEEE 1588)的同步机制也难以保证所需要的精度,在实际应用中很难满足 IEEE 1588 假定双向信道的传输时延相同的前提。

(7) 5G 推动运营支撑系统的变革。5G 需要实时地对网元实行 NFV 功能的指配,对业务实现切片的组织及生命周期的管理。5G 运营支撑系统(OSS)需要基于业务与网络资源大数据的统计与智能分析,自动生成通信设备与服务的编排方案。为了实时响应,不可能再采取人工网管操作而必须依靠信令控制。全网集中一个 OSS 有利于全局掌控,但处理能力与处理时延难以满足要求。如果按区域设置 OSS,则各 OSS 需要互通数据,且还需要有上层中央 OSS 来协同。

(8) 车联网是 5G 全新的应用场景。为此,5G 专门在无线接入和核心网两个方面都考虑保证低时延的措施。但面向个人的通信与车联网有很大的不同:前者平均经过十多个节点;而后者可能只是一两跳,在多跳的环境下对控制时延有显著作用的 NFV 和网络切片及 SRv6 在车联网场景下并不显优势。车联网通常是短包,而传统的 TCP/IP 协议对短包的传输效率不高。传统的个人通信在接入段通常是点对点方式,而车联网在车到车

(V2V) 场景下是点到多点以及多点到多点方式,甚至是广播方式。这将增加频率安排的难度,因为难以采用设备到设备(D2D)连接,需要借助网络转接即车-网-车(V2N2V),但时延会略有增加。对于面向个人的通信,目前中国多个省公用一个网间直连点来实现运营商间互通;但车联网对时延特别敏感,归属不同运营商的汽车间的通信需要就近实现网间直连,至少不宜跨出城市范围。也就是说,需要为车联网专门设置城市内的网间直连点。

(9) 大连接是 5G 应用的一个重要特征。5G 能够实现每平方公里可接入上百万物联网(IoT)连接,端到端传输时延不超过 10 s,丢包率不高于 1%。对海量的物联网终端需要使用群组认证,否则会引发信令风暴。安全算法和协议也要考虑轻量级,以免引入不必要的时延和增加物联网终端的能耗。鉴于物联网终端的多种类型,5G 的用户身份管理要适应从全球用户识别卡(USIM)向灵活多样的方式转变。

(10) 工业互联网催生 5G 专网。产业数字化首先需要将企业的生产装备联网。为了能使机器人、物料小车和生产线上的工件实现联网,需要使用无线技术;但已有无线技术的可靠性、可扩展性与抗干扰能力不适应工业互联网要求。5G 将工业互联网应用视为己命,企业可以利用 5G 作为企业内网或广域网的传输手段,5G 运营

商可为企业提供网络切片,但运营商的 5G 网络主要是面向公众用户而设计的。考虑到公众通信特别是视频业务的下行数据流规模远高于上行,在时分双工(TDD)模式的同一载频中时隙数的分配是上行少下行多;但工业互联网中传感器通常上报数据多而接受网络指令的数据少,对应的 TDD 上下行时隙是上行多下行少。如果 TDD 上下行时隙两种不同的分配方案共处同一运营商基站中,那么需要设置在不同载频以避免互相干扰,但这又限制了载频配置的灵活性和有效性。另外,从管理和安全角度考虑,大企业希望建设 5G 专网,频率主管部门需要为企业建设 5G 专网划出专用频率。

综上所述,建设 SA 网络和开发 SA 应用可以说是 5G 新一轮创新的起点。中国率先走 SA 之路会面临试错的风险,也有很多值得思考的问题。5G 创新之路还很长。

参考文献

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 明年我国将大规模投入建设独立组网的 5G 网络 [EB/OL]. (2019-09-21)[2019-12-23]. http://www.cac.gov.cn/2019-09/21/c_1570598110843638.htm
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 5G 移动通信网核心网总体技术要求: YD/T 3615—2019[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2019
- [3] ETSI. Network Functions Virtualisation (NFV); Virtual Network Functions Architecture: GS NFV-SWA 001 V1.1.1 [S]. 2014
- [4] IETF. Segment Routing IPv6 for Mobile User Plane [EB/OL]. (2019-11-04) [2019-12-23]. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-dmm-srv6-mobile-uplane/>
- [5] 3GPP. Study on Management and Orchestration of Network Slicing for Next Generation Network (Rel-15): 3GPP TR 28.801 V15.1.0[S]. 2018



车联网产业进展及关键技术分析

Industrial Progress and Key Technologies of Internet of Vehicles

Wai CHEN, 李源 /LI Yuan, 刘玮 /LIU Wei

(中国移动通信研究院, 北京 100032)
(China Mobile Research Institute, Beijing 100032, China)

摘要: 车联网正在从以车载信息服务为主向以支持辅助驾驶、自动驾驶和智慧交通的应用发展, 车联网的通信也从车到网络(V2N)向车到车(V2V)、车到基础设施(V2I)、车到行人(V2P)扩展。介绍了车联网的产业及标准进展, 分析了车联网典型场景及应用需求和关键技术。

关键词: 蜂窝车用无线通信(C-V2X); 自动驾驶; 智能交通系统; 车路协同

Abstract: The Internet of Vehicles (IoV) is developing from telematics to applications that support the assisted driving, autonomous driving and intelligent transportation. Meanwhile the communications for IoV is expanding from Vehicle to Network (V2N) to Vehicle to Vehicle (V2V), Vehicle to Infrastructure (V2I) and Vehicle to Pedestrian (V2P) communications. An overview of recent advances in standards, development of technology ecosystem, major application scenarios and requirement, as well as key technologies of IoV is introduced.

Keywords: Cellular-Vehicle to Everything (C-V2X); autonomous driving; intelligent transportation system; cooperative vehicle infrastructure system

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200217.1748.004.html>

网络出版时间: 2020-02-18

收稿日期: 2019-12-27

随着车辆智能化的发展以及通信技术的快速演进, 车联网从以支持车载信息服务为主向以支持智能化和网联化为基础的辅助驾驶、自动驾驶和智慧交通的应用发展。在车载信息服务阶段, 车辆通过蜂窝网络与云端服务器通信, 实现娱乐、车载导航等应用; 在辅助驾驶阶段, 车辆通过与周围的车辆、路侧交通基础设施、人、云端服务通信, 获得周围车辆的状态、路侧的交通信号灯、交通标志等信息, 辅助提升车辆的安全行驶能力; 在自动驾驶和智慧交通阶段, 将实现车、路、人、云的全方位连接, 在进行智能感知信息的共享与交换同

时共享部分决策信息, 具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能, 从而实现最终的全天候无人驾驶和高度协同的智慧交通^[1]。

现阶段, 全球车联网界正在重点开展辅助驾驶的产业化推进及自动驾驶的技术研发, 并积极探索商业模式及典型应用。

1 车联网政策及产业情况

1.1 全球政策现状

从全球来看, 现阶段的车联网无线通信技术主要包括2种: 以电气和电子工程师协会标准(IEEE 802.11p)

为基础的专用短程通信(DSRC)技术和蜂窝车用无线通信(C-V2X)技术。美国、日本、欧洲等发达国家和地区普遍非常重视车联网发展, 均已开展了相关的技术研究和测试验证工作。

美国的车联网研发依托于智能交通系统(ITS)的整体发展, 由政府主导, 起步较早。美国交通部于2016年提案以立法形式推动2023年美国所有轻型车辆强制安装DSRC(基于IEEE 802.11p技术)车载设备; 但由于各州法律不同、产业意见不一致等问题被搁置。2019年3月, 福特表示计划于2021年在中国的车辆优先搭载C-V2X技术。目前C-V2X技术

已在圣迭戈和底特律进行初步试验。2019年12月,美国联邦通信委员会(FCC)发布消息,为C-V2X分配了20 MHz(5 905~5 925 MHz)频段,为C-V2X技术在美国应用带来了可能。

日本政府推进“自动驾驶系统研发计划”,设定短期(2014—2016年,开展车联网协同系统和终端设备研发以及市场战略部署)、中期(2017—2020年,完成驾驶安全支持系统研发和Level 1/2市场部署)以及远期(2021—2030年,完成Level 3/4系统研发和市场部署)的发展阶段和目标。日本内阁也于2019年通过《道路运输车辆法》修正案。除了现有的ITS频谱(760 MHz、5.8 GHz等)之外,日本正在开展为C-V2X分配其他频率的可行性研究。

欧洲在2008年已为智能交通系统分配5.9 GHz频段;欧盟委员会于2019年3月宣布通过“在欧洲道路上实施清洁的、连接和自动驾驶的法案”,车辆、交通标识牌和高速公路将于2019年安装网联设备。经过产业各界的反馈及讨论,最终该法案否决议支持IEEE 802.11p的提案,为C-V2X的商用部署保留机会。

中国政府高度重视车联网相关技术和产业发展,自从把加快车联网构建纳入国家“十三五”规划以来,工业和信息化部(简称为工信部)、交通部、科技部、发展和改革委员会(简称为发改委)等多部委联合出台一系列规划,从政策、法规、技术、标准、测试示范等多个维度支持中国车联网产业发展:2017年成立了“国家制造强国领导小组车联网产业发展专项委员会”,2018年确定5.9 GHz用于车联网直连通信,2019年启动车联网(智能网联汽车)和自动驾驶地图应用试点。同时,各部委自2016年开始积极与地方政府合作,推进了中国示范区

建设。

1.2 标准进展

当前支持车联网的无线通信技术主要有2种:一种是IEEE组织制定的802.11p技术,一种是第三代合作伙伴计划(3GPP)组织制定的C-V2X技术。其中,802.11p是IEEE于2003年以802.11a为基础制定并于2010年完成标准化,其后续演进版本802.11bd预计将于2021年10月完成。

C-V2X技术包含长期演进(LTE)-V2X和5G-V2X。LTE-V2X是5G-V2X的先导技术,5G-V2X的标准后向兼容LTE-V2X标准。3GPP于2017年6月完成基本版本(R14)的国际标准制定,于2018年6月完成增强版LTE-eV2X(R15)的制定。5G-V2X通信标准(R16)正在制定中。

在中国,中国通信标准化协会(CCSA)、中国智能交通产业联盟(C-ITS)、中国汽车工程学会(C-SAE)、国际移动通信系统(IMT)-2020 C-V2X工作组等组织积极推进LTE-V2X端到端标准体系的构建。目前已基本建设完成LTE-V2X标准体系和核心标准规范制定,包括总体技术、空中接口、安全以及网络层与应用消息层、车载终端和路侧设备等各个部分,初步形成了覆盖LTE-V2X标准协议栈各层次、各层面、设备的标准体系。

5G-V2X的标准正在推进中,CCSA及C-V2X工作组已开展C-V2X业务需求增强研究,已立项基于5G的车联网通信技术研究。此外,C-ITS/C-SAE等也开始启动应用层数据规范第2阶段研究。

1.3 产业进展

1.3.1 国际进展

下一代移动通信网(NGMN)、

5G汽车联盟(5GAA)积极推进C-V2X技术在国际上发展。NGMN于2016年成立了专门的V2X工作组,主要针对LTE-V2X的应用场景、性能分析、商业价值等内容进行研究。V2X工作组发布V2X白皮书,充分证明C-V2X的技术先进性,同时也促进了全球对通信企业支持C-V2X技术的车联网的统一认识,并对整个车联网的商用化部署提供了指导建议,开启全球加速促进车联网相关产品的成熟与应用工作。

5GAA于2016年9月由通信和汽车企业发起成立,旨在推动智能车联、智慧交通、自动驾驶等信息通信解决方案和应用,及端到端产业生态发展。5GAA自成立以来,充分吸引产业各方支持,积极与3GPP、欧洲电信标准化协会(ETSI)等标准组织进行技术交流,同时向欧盟委员会展示C-V2X技术的先进性,成功推动欧盟理事会否决议使用ITS-G5技术实现车联网应用的决议,为C-V2X的应用发展赢取空间。

1.3.2 中国进展

中国政府以及产业各方正大力推进C-V2X产业发展,加速建立完善的端到端产业体系。

(1) LTE-V2X。

目前中国的产品已覆盖芯片、模组、车载终端、路侧终端、平台、应用等端到端的全产业链。支持LTE-V2X的通信芯片有3家厂商,车规级通信模组有4家厂商,C-V2X车载终端有10余家厂商,路侧终端有8家厂商。在车联网V2X基础数据平台、车企业务平台、示范区测试数据平台、第三方应用平台等均有产品,并在各地车联网示范区开始部署验证。另外,各家车企也针对辅助驾驶业务开发相关应用,并在各地示范区进行联合测试。2019年4月,上海汽车、中国第

一汽车、东风、长安等 14 家车企共同发布 C-V2X 商用路标, 预计在 2020 年上半年到 2021 年下半年量产 C-V2X 汽车^[2]。

测试验证方面, 大唐电信、万集科技等 9 家终端设备厂商完成了 IMT-2020 (5G) 推进组 C-V2X 工作组组织的网络层应用层互操作、协议一致性测试。2018 年 11 月, 共有中外 11 家整车企业、8 家 LTE-V2X 终端提供商和 3 家通信模组厂商共同参与世界首例“跨芯片模组、跨终端、跨整车”的 LTE-V2X “三跨”互联互通应用示范。2019 年 10 月 22—24 日, 共有 26 家整车厂商、11 家通信模组厂商、28 家终端提供商、6 家安全厂商和位置服务提供商共同参与 C-V2X “四跨”(在“三跨”基础上增加了“跨安全平台”) 互联互通应用示范活动。

为了推进车联网产业和应用落地, 工信部、交通部、公安部设立 30 多个应用示范区, 一方面在北京、上海、重庆等地建立了多场景、多环境测试场, 验证 C-V2X 端到端的关键技术, 推进了车联网产品商用研发进程。另一方面开展车联网业务的规模示范应用, 探索车联网可行的商业模式。例如, 由中国移动作为牵头单位, 在工信部、公安部、江苏省无锡市政府的指导下, 联合公安部交通管理科学研究、无锡交警、中国信息通信研究院(简称信通院)等近 30 家单位, 在无锡持续开展了 C-V2X 应用示范: 2017 年建成了全球首个 LTE-V2X 开放道路示范样板, 2018 年打造全球首个 LTE-V2X 城市级规模应用; 2019 年获批成为工信部推选的中国首个车联网先导区, 后续将进一步推进完成无锡 C-V2X 服务覆盖, 实现 V2X 的持续运营。目前, 北京、上海、武汉等地也在逐步推进 C-V2X 城市级应用。

(2) 5G-V2X。

早在 2017 年, 中国移动等单位在上海实现首个 5G 远程遥控驾驶, 并在 2018 年世界移动通信大会 (MWC) 期间演示了 5G 远程自动编队驾驶, 对基于 5G 的车联网应用进行了概念验证; 随着中国 5G 商用, 基于 5G 新空口 (NR) 的增强移动宽带 (eMBB) 芯片已商用; 随着高通等 5G 芯片的陆续发布, 移远、LG 等纷纷发布 5G 车载模组。在网络方面, 中国从 2018 年底到 2019 年初陆续部署 5G NR eMBB 网络, 3 大运营商已于 2019 年 10 月 31 日正式推出 5G 商用套餐。中国移动计划 2020 年将为全国超过 340 个城市提供 5G 商用服务; 中国联通计划将在 7 个城市正式开通 5G 实验网, 在 33 个城市实现热点区域覆盖, 在 n 个城市定制了 5G 网中专网; 中国电信也计划在 2019 年年底建设 4 万个 5G 基站, 分布在约 50 个城市中。此外, 目前基于 5G NR (超可靠低时延车联网) 以及 PC5 (直连通信) 的研发工作尚未开始。

总体来看, 基于 LTE-V2X 的车联网端到端技术、产品、应用、测试

已成熟, 已具备预商用条件; 而基于 5G-V2X 的车联网技术、标准及产品仍在推进中, 有待后续进一步的技术验证及测试。

2 车联网典型应用场景及需求分析

借助于人、车、路、云平台之间的全方位连接和高效信息交互, C-V2X 目前正从信息服务类应用向交通安全和效率类应用发展, 并将逐步向支持实现自动驾驶的协同服务类应用演进。

2.1 辅助驾驶典型应用场景及需求

针对 C-V2X 辅助驾驶典型场景(具体如表 1 所示), 通过 C-V2X 工作组、C-SAE、C-ITS 等中国标准及产业组织共同研究, 面向辅助驾驶阶段定义了 17 个 C-V2X 的基础应用场景。这些应用场景基于 C-V2X 信息交互, 实现车辆、道路设施、行人等交通参与者之间的实时状态共享, 辅助驾驶员进行决策^[3]。

此外, 5GAA 也定义了辅助驾驶典型应用场景, 包括安全、效率、高级辅助驾驶、行人保护 4 大类共计 12

▼ 表 1 辅助驾驶典型应用场景

序号	类别	应用名称
1	安全	前向碰撞预警
2	安全	交叉路口碰撞预警
3	安全	左转辅助
4	安全	盲区预警 / 变道辅助
5	安全	逆向超车预警
6	安全	紧急制动预警
7	安全	异常车辆提醒
8	安全	车辆失控预警
9	安全	道路危险状况提示
10	安全	限速预警
11	安全	闯红灯预警
12	安全	弱势交通参与者碰撞预警
13	效率	绿波车速引导
14	效率	车内标牌
15	效率	前方拥堵提醒
16	效率	紧急车辆提醒
17	信息服务	汽车近场支付

个场景，具体场景与中国定义类似。

辅助驾驶典型应用场景的部署，对通信网络、数据处理、定位等方面提出了具体需求。在通信方面，时延要求小于 100 ms（在特殊情况下小于 20 ms），可靠性需满足 90% ~ 99%，典型数据包大小为 50 ~ 300 B，最大 1 200 B；在数据处理方面，据统计单车产生的数据每天约为 GB 级，对大量车辆、道路、交通等数据的汇聚，需要满足海量数据储存的需求，同时对这些数据提出实时共享、分析和开放的需求；在定位方面，定位精度需满足车道级定位，即米级定位，并且车辆需要获取道路拓扑结构。

2.2 自动驾驶典型应用场景及技术需求

5G 技术的更大数据吞吐量、更低时延、更高安全性和更海量连接等特性，极大地促进了智能驾驶和智慧交通发展。产业各方开始了面向自动驾驶的增强型应用场景的研究与制定，一方面从基础典型应用场景的实时状态共享过渡到车与车、车与路、车与

云的协同控制，增强了信息交互复杂程度，可实现协同自动驾驶与智慧交通的应用；另一方面基于通信与计算技术的提升，交通参与者之间可以实时传输高精度视频、传感器数据，甚至是局部动态高精度地图数据，提高了感知精度与数据丰富程度^{[2]、[4]}。

产业界正逐步提出并对表 2 中增强的业务场景进行定义、研究和探索。

3GPP 将增强的应用场景分为 4 类，包括车辆编队行驶、半 / 全自动驾驶、传感器信息交互和远程驾驶；5GAA 也针对面向自动驾驶的增强应用场景进行了定义，涉及安全、效率、自动驾驶、公共服务等方面。

面向自动驾驶的增强应用场景对数据交互技术、高精度定位技术、多传感器融合技术、高性能处理平台、高精度地图等提出了新的需求。在通信方面，单车上下行数据速率需求大于 10 Mbit/s，部分场景需求 50 Mbit/s，时延需求为 3 ~ 50 ms，可靠性需大于 99.999%；在信息交互方面，需实时交互车辆、道路、行人的全量数据，利

用多传感器融合技术获取实时动态交通高精度地图；在数据处理方面，单车每天将产生高达 PB 级的数据，对数据的存储、分析等计算能力提出了更高的要求；在定位方面，需达到亚米级甚至厘米级的定位精度。

3 车联网关键技术

3.1 整体架构

基于 C-V2X 通信技术的“人-车-路-网”多方协同的车联网不同于传统 Telematics 网络，它对数据传输的传输速率、时延、可靠性等方面提出了更高的要求。网络除了进行数据传输，还需要辅助实现协同计算；因此，运营商需要将传统通信网络升级为“通信+计算”的网络，以满足新的车联网应用场景需求。

图 1 所示为基于“通信+计算”网络的车联网体系架构。首先，运营商网络需在通信技术升级更新，引入直连通信，并随大网演进至 5G 及更高级网络；其次，引入计算能力，按需在网络中部署多级计算平台；再者，引入多形态智能车联网终端。在端到端的网络架构中，还要引入针对车联网的安全机制，以保证通信安全、可靠。

3.2 平台的关键技术

从整体架构的演进可以看出，为满足车联网新的需求，通信网络将逐步引入“计算”能力，辅助实现海量数据的实时计算；因此，V2X 平台应具备以下能力：

（1）提供海量终端管理、用户管理、计费管理、应用管理、安全管控、系统监测控制等运营、运维管理能力；

（2）提供海量终端数据统一接入、业务鉴权、交通数据汇聚及分析、应用托管、高性能数据存储、交通信息开放、边缘节点资源调度、路侧传感数据融合

▼ 表 2 面向自动驾驶的增强应用场景

序号	类别	应用名称
1	安全	协作式变道
2	安全	协作式匝道汇入
3	安全	协作式交叉口通行
4	安全	感知数据共享 / 车路协同感知
5	安全	道路障碍物提醒
6	安全	慢行交通轨迹识别及行为分析
7	效率	车辆编队
8	效率	协作式车队管理
9	效率	特殊车辆信号优先
10	效率	动态车道管理
11	效率	车辆路径引导
12	效率	场站进出服务
13	效率	基于实时网联数据的交通信号配时动态优化
14	效率	高速公路专用道柔性管理
15	效率	智能停车引导
16	信息服务	浮动车数据采集
17	信息服务	差分数据服务
18	信息服务	基于车路协同的主被动电子收费
19	信息服务	基于车路协同的远程软件升级

计算、业务连续性保持等业务支撑能力。V2X 平台参考架构见图 2^[5]。

由于车联网对海量数据高性能处理的需求,除增强平台自身能力之外,对于部署方案也应进行优化。相对传统的“中心平台-终端”架构,新的车联网需要更贴近用户、灵活性更高的部署方案。由此,引入 V2X 多级平台系统架构。平台各级能力可根据 V2X 业务对时延、数据计算量、部署

等方面的需求,分层提供不同的服务能力,如图 3 所示(初步考虑基于“中心-区域-边缘”三层架构满足车联网业务需求)。

3.3 通信网络的关键技术

C-V2X 通信技术包含 LTE-V2X 和 5G-V2X。LTE-V2X 主要是针对百毫秒时延的辅助驾驶场景,一方面引入直连通信,支持终端之间直接通

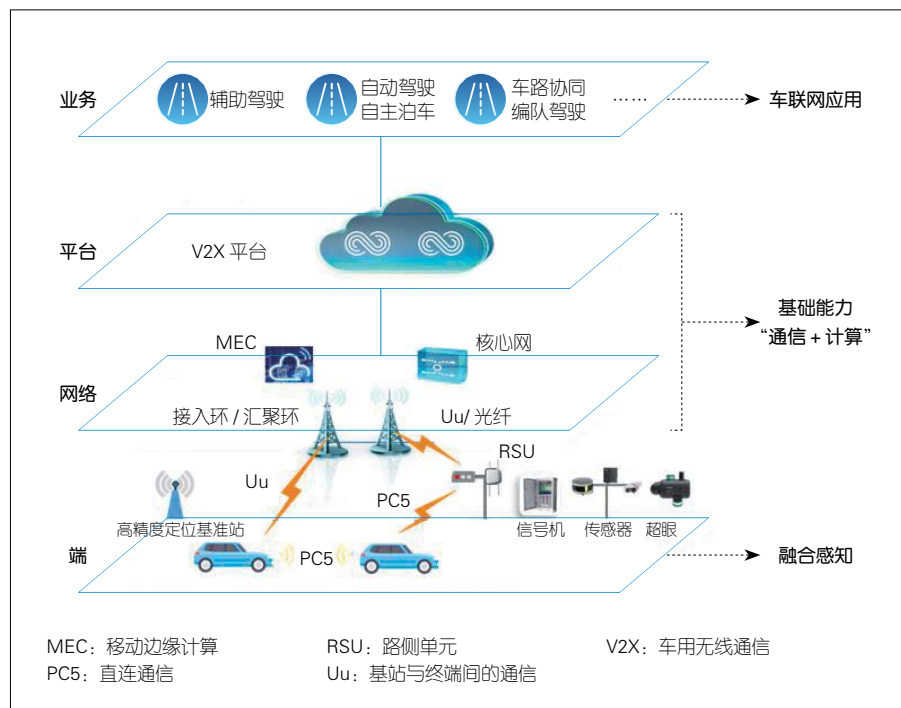
信,降低时延,增强终端在无网络覆盖时通信能力;另一方面对公众网 Uu (基站与终端间的通信)接口进行性能优化,定义应用于 V2X 的服务质量等级标识(QCI)、缩短多播控制信道(MCCH)周期等,降低时延,提升可靠性。5G-V2X 主要是针对毫秒级时延、单车百兆速率的自动驾驶场景,基于 5G NR Uu 技术引入 5G PC5。

为满足车联网低时延、高可靠性、大带宽等需求,5G Uu 网络引入了 V2X 通信切片、边缘计算、服务质量(QoS)预测等特性。

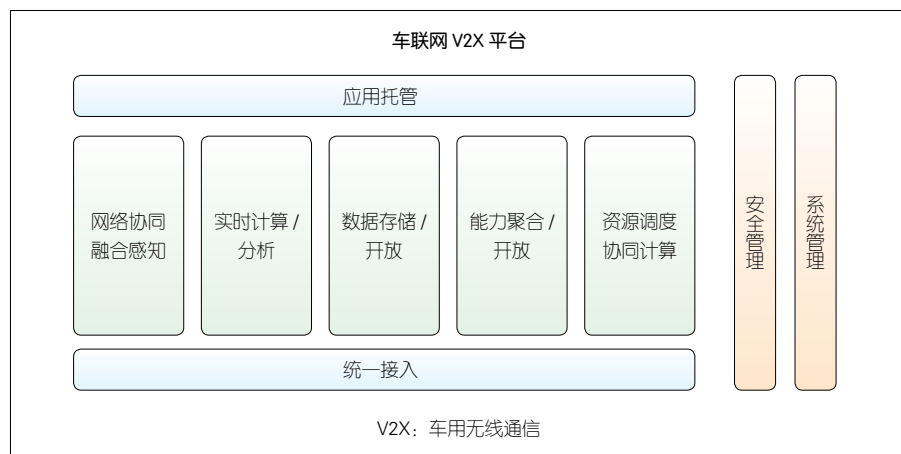
(1) 5G 切片技术。车联网的应用场景非常丰富,业务需求呈现出多样性的特征,既有大带宽、数据传输速率高的需求,又有对可靠性、时延等要求高的需求。对车联网可考虑 3 种类型切片:第 1 类为 eMBB 切片,支持车内娱乐、视频应用及在线游戏等业务需求;第 2 类是 V2X 通信切片,支持驾驶相关业务的网络需求;第 3 类是针对汽车厂商定制化的切片,可以由车厂单独运营,支持某品牌车辆特有服务,如远程问题诊断等。

(2) 边缘计算技术。移动边缘计算(MEC)技术将计算、存储、业务服务能力向靠近终端或数据源头的网络边缘迁移,具有本地化处理、分布式部署的特性。面向车联网的 MEC 一方面通过将业务部署在边缘节点,以降低 C-V2X 网络的端到端通信时延;另一方面作为本地服务托管环境,提供强大的计算、存储资源。

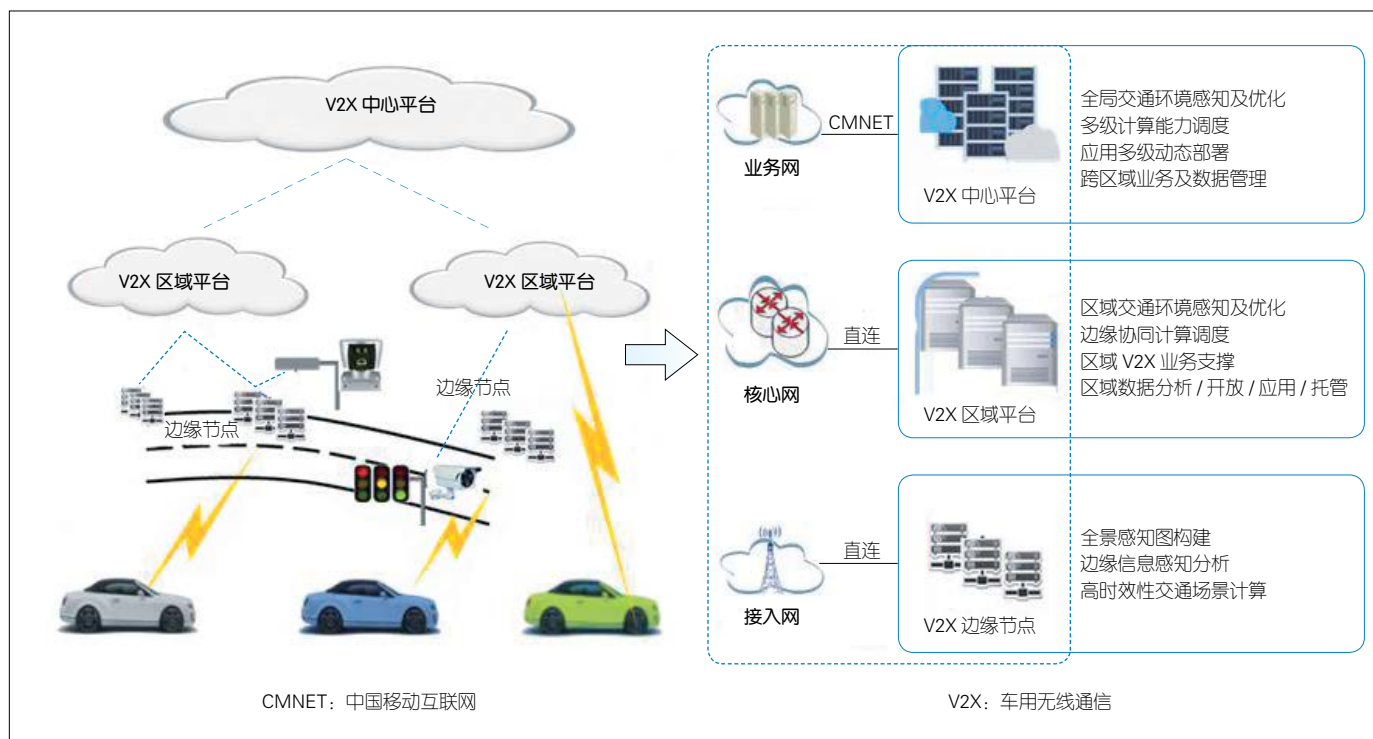
(3) QoS 预测。车联网业务有别于其他 5G 网络业务,对通信性能的改变十分敏感。面对这一需求,5G 网络引入了智能网元网络数据分析功能(NWDAF),通过采集分析数据,提前预判某车辆进入的小区是否能够满足 5G-V2X 业务的 QoS 需求,从而提前通知车辆。此外,5G-V2X 应用



▲ 图 1 基于“通信 + 计算”网络的车联网体系架构



▲ 图 2 V2X 平台参考架构



▲ 图3 V2X 多级平台部署架构

还将反馈给网络最高 QoS 需求和最低 QoS 需求，最大限度保障 5G-V2X 的业务。

（4）业务连续性。业务连续性指在终端移动状态下，通过不同网络侧会话管理机制来保障车辆快速移动状态下不同用户面功能（UPF）切换时的业务体验。目前 3GPP 标准中 R15 版本定义的保障业务连续性主要有 3 种模式。在 R16 版本中又增加了 1 种超可靠低时延的业务连续性方案，在涉及到切换的 2 个 UPF 之间建立转发通道，保障车辆在移动过程中会话不中断。

5G 在直连通信技术上也进行了增强，同 LTE-V2X 类似，NR PC5 也支持 2 种通信模式，即模式 1 和模式 2（类似于 LTE-V2X 中的模式 3 和模式 4）。3GPP 正在讨论新增资源调度 NR 模式 2 的子模式以优化通信性能。在低时延方面，NR V2X 支持 3 ms 端到端超低时延需求，引入 60 kHz 子载波间隔支持更短的子帧结构，NR

Sidelink 支持基于预配置资源的免调度传输方案。在高可靠方面，5G-V2X 支持单播及组播，并支持混合自动重传请求（HARQ）等重传技术，确保高于 99.999% 的超高可靠性。同时，5G-V2X PC5 既支持 ITS 频段，又可扩展到 IMT 频段，从而创造了更多的业务空间。

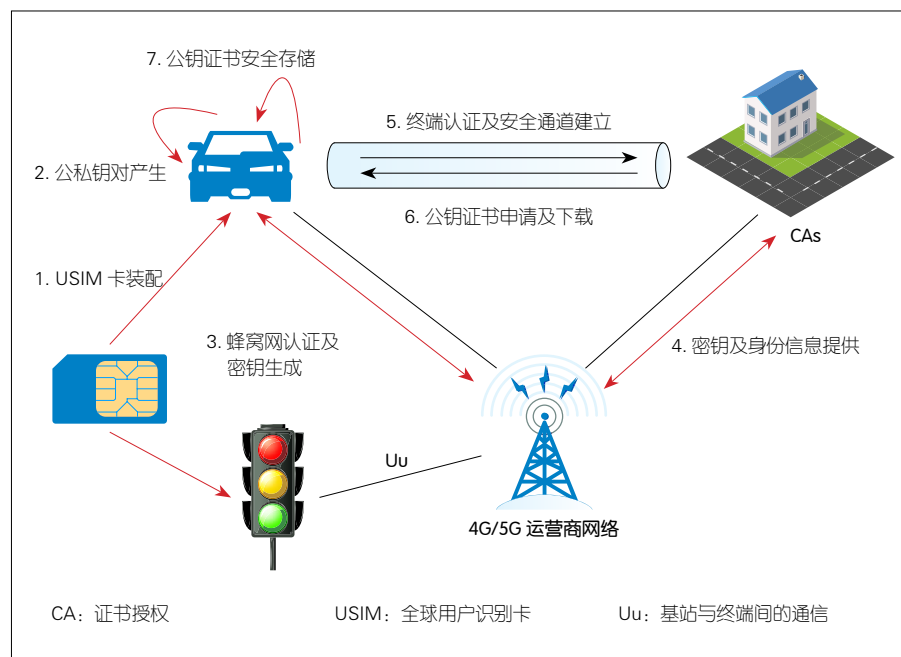
3.4 车联网安全关键技术

随着车联网的不断完善与逐步应用，产业界越来越意识到车联网信息安全问题的重要性^[6]。如何在降低系统运行效率，不增加额外开销的前提下，有效实现车路协同系统节点安全认证，确保车载终端、路侧设备、云平台等网元实体之间信息通信的安全性，是当前产业界面临的主要技术挑战；因此，在车联网安全方面需在两方面取得突破进展。

（1）安全认证技术。为了确保车联网业务中消息来源的真实性、内

容的完整性，并防止消息重放，中国 C-V2X 车联网系统采用数字证书通过数字签名/验签等密码技术对 V2X 业务消息进行保护，因此，需要车联网安全管理系统来实现证书颁发与撤销、终端安全信息收集、数据管理、异常分析等一系列功能。在此之前，车联网终端必须完成设备初始化，以安全的方式完成数字证书等敏感参数的初始配置。目前针对该问题，有 2 种解决方案：一种是车企自建证书管理体系，自己维护系统，确保系统的安全可靠；另一种方案则是基于通用认证机制（GBA）的终端认证服务，如图 4 所示。

对于安装 USIM 卡，支持 LTE-Uu 接口通信的 V2X 设备，可基于用户与运营商间的共享密钥 K 和蜂窝网基础认证及密钥协商能力简化设计，实现 CA 管理实体与 V2X 设备间的身份认证，并在两者之间建立初始信任关系，满足 ECA 证书及其他证书初始申请、



▲ 图 4 基于通用认证机制的车联网证书初始安全配置方案

安全传输的需要。该方案能够使车载单元 (OBU) 终端仅依靠自身安全硬件和网络 GBA 安全能力即可在线完成初始安全配置, 避免了工厂复杂的密钥管理, 降低了汽车企业生产线及管理系统安全改造的成本, 提高了汽车工业自动化生产水平。未来该技术的演进还可为 5G 车联网的应用提供可靠的安全保障。

(2) 车联网高性能安全芯片技术。C-V2X 车联网技术目前已确定采用通过数字签名/验签的方式对车联网消息进行保护。为了实现上述机制, 车联网终端需要以芯片/硬件/固件安全为基础, 以安全的方式生成随机数及密钥, 实现密码运算, 对密码公私钥对、数字证书等敏感参数进行安全存储。

根据 3GPP 提供业务模型估计, 车联网终端设备的验签处理能力预计至少应达到 2 000 次/秒, 这对安全芯片的处理性能提出了较高要求。除此之外, 安全芯片应当符合车规级, 满足测试标准。同时, 在中国境内使用

的安全芯片产品还应符合《密码法》规定及要求, 应支持采用商用密码 (SM) 2/SM3/SM4 算法实现密码相关处理及运算。然而, 同时满足支持国密算法以及车规级性能要求的高性能安全芯片目前在中国是没有的。因此, 研究高性能安全芯片技术是当前车联网产业面临的主要挑战。

4 结束语

车联网的发展是未来实现自动驾驶及智慧交通的关键, 近年来在中国政府及产业各方的大力推动下, 基于 C-V2X 的车联网已经在标准、核心技术和产业推进等方面取得长足的发展, 具备产业化部署的能力。但目前仍存在运营方不确定、运营模式不清晰、频谱政策不明确等问题, 导致车联网商业化应用动力不足。基于 C-V2X 的车联网需进一步探索优化政策环境, 加强跨行业合作, 推动形成深度融合、创新活跃、安全可信、竞争力强的车联网产业新生态。

致谢

本研究得到中国移动李凤高级工程师、郅雅坤工程师、张翼鹏工程师的帮助, 谨致谢意!

参考文献

- [1] 中国移动通信有限公司. 中国移动 5G 联合创新中心创新研究报告: 下一代车联网创新研究报告 [R]. 2019
- [2] 中国智能网联汽车产业创新联盟. C-V2X 产业化路径和时间表研究白皮书 [R]. 2019
- [3] 中国汽车工程学会. 合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准: T/CSAE 53-2017[S]. 中国汽车工程学会, 2019
- [4] IMT-2020 (5G) 推进组. C-V2X 业务演进白皮书 [R]. 2019
- [5] 中国移动通信有限公司. 中国移动车联网 V2X 平台白皮书 [R]. 2019
- [6] 中国移动通信有限公司. 车联网通信安全与基于 GBA 的证书配置白皮书 [R]. 2019

作者简介



Wai CHEN, 国家特聘专家, 现任中国移动通信研究院首席科学家, 曾担任美国贝尔通信研究院 (Bellcore/Telcordia) 首席科学家、总监 20 余年; 主要研究领域为机器智能、边缘计算、下一代车联网、智慧养老等物联网智能化关键技术及应用体系, 研发了一批“面向全国、惠及民生”的创新型规模化物联网应用; 发表论文 100 余篇。



李源, 中国移动通信研究院车联网研究员; 主要研究方向为车联网业务方案设计、标准化制定、无线通信技术; 先后参与国家重大专项 2 项, 参与制定多项车联网相关全球标准。



刘玮, 教授级高工, 中国移动通信研究院物联网所副所长, 北京邮电大学兼职教授、研究生导师, 中国通信标准化协会物联网技术委员会 TC10 副主席; 长期从事物联网领域的科研工作, 目前主要负责中国移动 V2X 下一代车联网的研发工作; 发表论文 50 余篇, 出版专著 1 本。

基于车辆行为分析的车联网超可靠低时延通信关键技术

Vehicle Behavior Analysis Based Ultra-Reliable and Low-Latency Communication Technologies for Internet of Vehicles

张海霞 /ZHANG Haixia, 刘文杰 /LIU Wenjie, 薛彤 /XUE Tong, 梁聪 /LIANG Cong

(山东大学, 山东 济南 250061)
(Shandong University, Jinan 250061, China)



摘要: 为解决车辆高速移动性导致的车联网超可靠低时延通信 (URLLC) 性能下降问题, 提出了大数据驱动的车辆行为分析技术, 并阐述了基于车辆行为分析的移动管理技术、资源分配技术和信息安全技术。认为车辆行为分析技术是实现 URLLC 的基础, 移动管理技术是提高通信可靠性的重要手段, 资源分配技术是降低通信时延的有效方法, 信息安全技术是实现 URLLC 的前提和保障。

关键词: 车联网; URLLC; 车辆行为分析; 移动管理; 资源分配; 信息安全

Abstract: To alleviate the performance degradation of the Internet of Vehicles caused by the high-speed mobility of vehicles in terms of ultra-reliable low-latency communication (URLLC), the mobile management technologies, resource management technologies and information security technologies based on vehicle behavior analysis are proposed. To achieve this, the data of vehicle behavior is first analyzed as the basis. Based on the analysis, mobility management technologies are analyzed to improve communication reliability, resource allocation technologies are applied to reduce transmission delay, and information security technologies are proposed to assist the realization of URLLC.

Keywords: Internet of Vehicles; URLLC; vehicle behavior analysis; mobility management; resource allocation; information security

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200219.1552.004.html>

网络出版日期: 2020-02-19

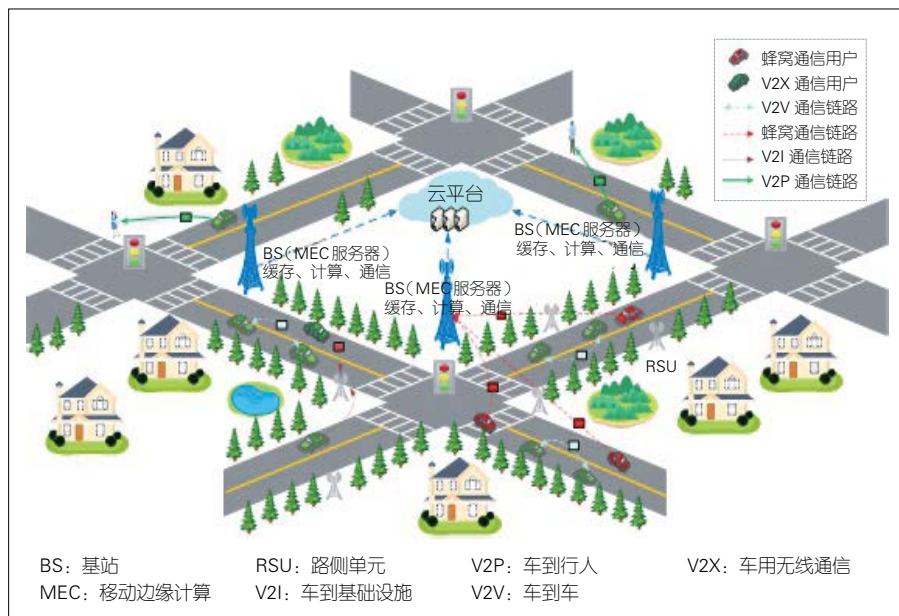
收稿日期: 2019-12-24

随着计算机技术、传感技术以及信息技术的发展, 车辆正在逐渐走向智能化和无人化。基于单个车辆的自动驾驶技术, 仅依靠自身所获取的传感数据和道路信息做出驾驶决策, 缺乏对非视距信息及整个网络动态变化的感知; 因此在车辆密集、障碍物阻挡等复杂交通环境下极易发生交通事故, 难以保证高效、安全的驾驶体验。

基金项目: 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (61860206005)

车联网为解决这一问题提供了新的思路, 按照约定的通信协议和数据交互标准, 在车与 X (X 代表车、路、人、云等) 之间, 进行无线通信和信息交换的大系统网络 (如图 1 所示)。依靠与系统网络间的信息交互, 车辆能够获得非视距信息及网络动态变化信息, 以此增大车辆感知范围, 保障车辆安全行驶。其中, 超可靠低时延通信 (URLLC) 能够为车辆提供实时通信服务, 减少车辆制动与车控反应时间, 对保障车辆安全, 尤其是紧急事件、

突发事故等情况下的行车安全具有重要意义。然而由于车辆自身的高速移动性, 一方面导致车辆通信信道变差, 车辆在网络间和小区间频繁接入和切换, 车载通信可靠性下降, 通信频繁中断; 另一方面, 车辆与核心网物理距离较远, 车辆在高速移动中请求的同一业务经由若干路边单元等基础设施转发, 导致网络资源重复配置, 引发网络拥塞等严重问题, 造成通信时延变大。此外, 在车联网开放式系统网络中, 车辆容易遭受信息窃取、恶



▲ 图1 车联网系统模型

意攻击、身份冒充等威胁，严重影响车联网通信安全。因此，选择和攻关核心技术搭建保障 URLLC 车联网通信具有重要意义。

在现有车联网 URLLC 研究中，全球学者主要进行了移动管理技术、资源分配技术和信息安全技术等方面的研究。在移动管理技术方面，文献[1]中，作者研究了车辆自组织网络（VANET）中城市及郊区道路下的路侧单元（RSU）部署问题，引入社交网络中心性的概念，以在给定部署预算约束下最大化 RSU 部署的中心性为优化目标，将该问题等价于“0-1”背包问题，提高了 RSU 部署的可靠性。文献[2]中，作者探索了车辆通信用户越区切换的问题，考虑到现有长期演进（LTE）系统无法满足车用无线通信（V2X）技术切换的要求，提出了一种基于双资源分配切换方案，为车辆提供足够大的区域进行交接，避免越区切换时链路中断。文献[3]中，为解决车辆移动性带来的频繁越区切换问题，作者将一群车辆用户分成主领导者、次领导者和追随者，提出了基于

感知的隐式资源分配算法和联合/半切换设备到设备（D2D）通信机制，同时为保持 V2X 群的稳定性，设计了次领导者选择和交换机制，提高了车辆切换时通信链路的可靠性。在资源分配技术方面，文献[4]中，作者针对车联网安全类关键信息业务的低时延需求，以在保证车到车（V2V）通信链路的时延违反概率（LVP）条件下最大化车到基础设施（V2I）通信链路的总容量为优化目标，基于有效容量理论，通过引入延时指数建立时延约束，利用分步求解方法进行资源分配和功率控制。文献[5]中，作者研究了云架构下联合车辆和 RSU 缓存的缓存放置策略，考虑到 V2V 通信、V2I 通信、车与云通信不同的内容检索时延，将缓存放置问题建模为优化问题，以满足车辆平均延迟需求，并通过凸优化和模拟退火方法有效地解决了该问题。文献[6]中，作者研究了车辆任务卸载的动态不确定导致的时延过大问题，以最小化平均卸载延时为优化目标，提出了基于多臂赌博机（MAB）理论的自适应学习任务卸载算法，进

一步降低了时延。在信息安全技术方面，文献[7]的作者研究了基于怀疑和决策的车辆贪婪行为检测策略，利用线性回归和模糊逻辑等算法制订合理的检测方案，可以有效提高检测车辆贪婪行为的准确性。文献[8]中，作者提出了一种基于社交的移动女巫攻击检测方案，首先根据攻击者能力高低划分4个不同威胁等级，然后利用移动用户异常联系人及假名更改行为区分女巫攻击者和普通用户，并利用隐马尔可夫半监督学习检测串通的移动用户，以此高精度地检测女巫攻击者。当消息发送者的位置公开时，往往会增加隐私泄露的风险，针对此问题，文献[9]的作者提出了一种在车辆社交网络中位置隐私保护的方法，其核心思想是利用消息发送区内可信赖的用户混淆原始发件人的位置，保护发件人的位置隐私，在此基础上，为鼓励自私用户加入位置混淆，进一步提出了基于车辆合作或不合作增加或减少社交联系的激励机制，有效保障了车辆隐私安全。

上述研究有效提高了车联网 URLLC 性能，却忽略了车联网中的海量异构数据及其背后的潜在价值。实际上，当前信息化手段和智能设备在城市中的应用，使得网络内积累了大量的车辆行为数据。通过分析这些数据，我们可以预测到车辆在未来时刻的行为信息，这一信息可以作为指导或者先验信息进行相应的移动管理、资源分配和安全传输，对车联网 URLLC 性能提升具有重要意义。

1 车辆行为分析技术

车辆的高移动性导致传统的被动式通信模式难以保证车联网超可靠低时延的信息传输。深入挖掘车联网内海量异构数据背后的潜在价值，可实现车辆行为空时特性的精准预测，进

而实现车辆移动性管理以及整个网络资源的预分配,保障超可靠、低时延的信息传输。对于车联网,车辆行为不仅包含车辆移动行为(如全球定位系统坐标、速度、加速度、时空交通流分布等),还须考虑车辆通信行为(如信号强度、服务类型、接入点、通信业务流量时空分布等),两者互相影响、密不可分。一方面,车辆的移动行为影响着车辆通信行为的时空分布特性,车辆多的地方通常通信行为也会增多;另一方面,车辆通信行为可以改变车辆的移动行为,如前方发生交通事故或道路拥挤,车辆间通过整个网络互传信息后,后续车辆改变行驶轨迹。因此,如何同时考虑车辆移动行为和通信行为,进而精确刻画车辆行为的时空特性,成为车联网研究最为关键的技术之一,也是其他关键技术的基础。

在车联网中,车辆行为分析包含多源异构数据获取、多源异构数据传输、多源异构数据统一表征、车辆行为建模4个主要步骤(如图2所示)。

(1) 多源异构数据获取。

车联网中车辆具有高速移动性,致使整个网络拓扑处于实时变化当中,多源异构数据间的同步获取成为难点。为解决上述问题,可采用分布式协同调度的数据获取、面向特定环境的数据接入等技术,实现整体网络同种数据在不同地域上的同步获取。同时,还通过对网络实体各特性的统一刻画,实现在物理空间、网络空间的异构数据同步获取。

(2) 多源异构数据传输。

车辆的快速移动性、业务需求的差异性导致业务空时分布不均,多源异构数据传输过程中存在并发性、

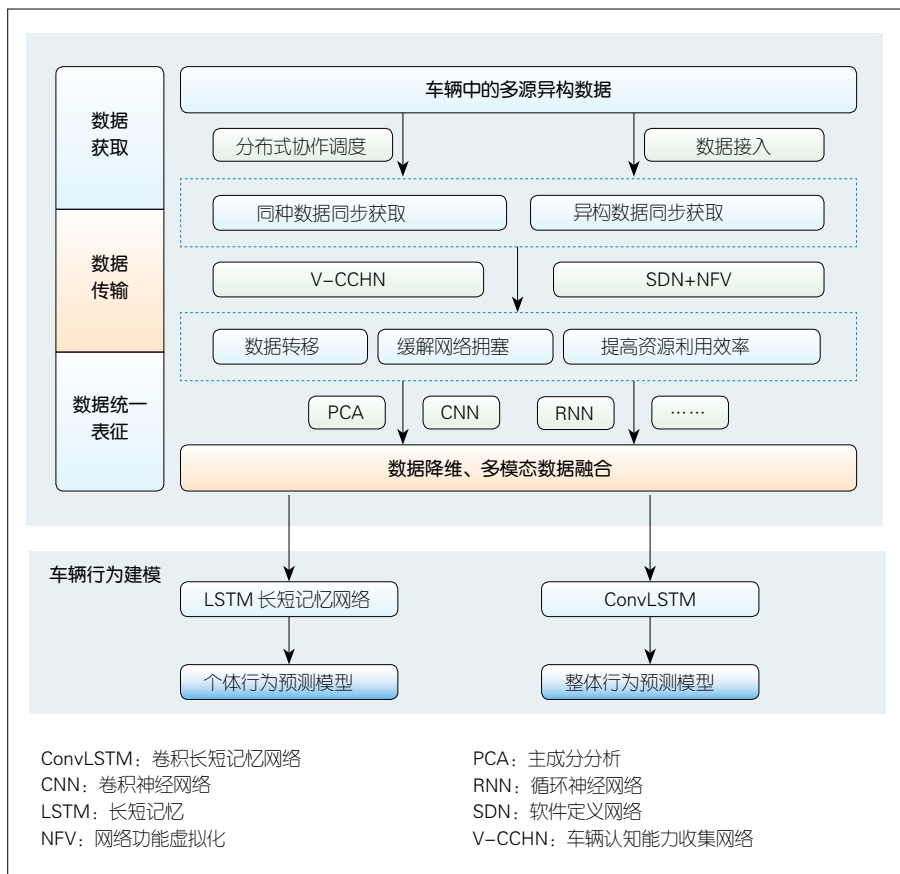
区域密集性等特征,极易引发网络拥塞甚至网络瘫痪等严重后果,造成数据传输频繁中断。为进行高效的多源异构数据传输,可利用车辆认知能力收集网络(V-CCHN)技术,将行驶的车辆作为数据载体,把数据从发送端转移到接收端,并利用认知无线电(CR)技术感知网络空闲频谱进行通信,以此缓解网络拥塞,增加频谱利用效率,提高数据成功传输率^[10]。

(3) 多源异构数据统一表征。

车联网中不仅包含数量众多的车辆,还有如基站、路边单元、传感器以及各种边缘智能设备等多种实体,这导致网络中存在大量不同格式的多源异构数据,极大增加了刻画车辆行为特征的难度。为有效处理海量异构数据,可采用主成分分析(PCA)等技术对多源异构数据进行降维,降低数据量。同时,采用不同的特征学习技术,如word2vec、卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN),对数据进行特征学习。在此基础上,考虑特征映射的非线性模型,并基于多层感知机构建栈式降噪自动编码器,对所有特征进行智能选择以及维数变化;基于实体间、数据间的关联关系,实现多源数据的本地融合,进而得到多源数据的统一特征表示,最终实现多模态数据的有效融合,减少所需处理的数据量,提高模型构建效率。

(4) 车辆行为建模。

车联网中须从整体和个体2方面对车辆行为进行同时建模。整体上,可以刻画网络车辆行为的时空特性,进而指导网络的宏观预部署;个体上,可对单个车辆行为进行精准刻画,最大地满足单个车辆的实时通信需求。为此,首先利用关联分析、刻画车辆移动行为与通信行为间的数学表达,在此基础上,针对个体,构建车辆的用户画像,包括其速度、加速度、信



▲ 图2 车辆行为分析技术路线图

号强度、业务请求等,并通过长短记忆网络(LSTM)神经网络构建个体行为时间的动态模型^[11],刻画个体车辆的空时特性;针对整体,利用历史数据,刻画车辆行为在时间上的周期性和近邻性,以及在空间上的相关性。通过将车辆行为变化映射为二维图像,采用卷积长短记忆网络(ConvLSTM)捕捉流量变化的空间相关性和时间上的周期性和近邻性^[12],构建整体车辆行为的空时动态变化模型,最终可实现对整体车辆行为、个体车辆行为精准预测。

2 移动管理技术

车联网系统中存在蜂窝网络、专用短程通信(DSRC)网络、蓝牙、无线局域网(WLAN)等多种复杂异构网络^[13]。车辆的高速移动特性会导致车辆通信在网络内和网络间频繁的接入和切换,需要进行有效的移动性管理,以免造成通信业务服务中断等严重后果。移动管理技术主要包括组网、接入和切换3个方面。图3为车联网移动管理技术路线。

(1) 组网技术。

路网的错杂交织性以及车辆集群性往往会导致车辆节点在地理空间中呈现强烈的不均匀分布特性,网络中存在大量的节点稀疏区域和少部分节点密集区域。组网技术的核心思想是:在考虑网络通信业务动态变化的基础上,合理地部署基站(BS)、RSU等基础设施,为车载终端提供无缝接入的网络布局,保证通信的服务质量^[14]。在车辆低密度区域,选择合适位置部署少量BS,即可保证网络连通性;而在车辆高密度的“热点”区域,仅依靠BS无法满足车辆用户海量业务需求,须额外部署成本较低并具备一定通信能力的RSU等基础设施,增加网络容量,增强网络覆盖以维持区域正常通信。

(2) 接入技术。

无线通信的媒体接入控制(MAC)子层向网络中的节点提供了物理寻址和信道接入控制,为上层提供快速、可靠的数据传输支持^[15]。由于车联网特殊的复杂通信环境,传统WLAN的MAC协议无法很好地应用于车联网,需要设计专门的MAC协议以保障车辆通信可靠性。其核心思想是:在车辆

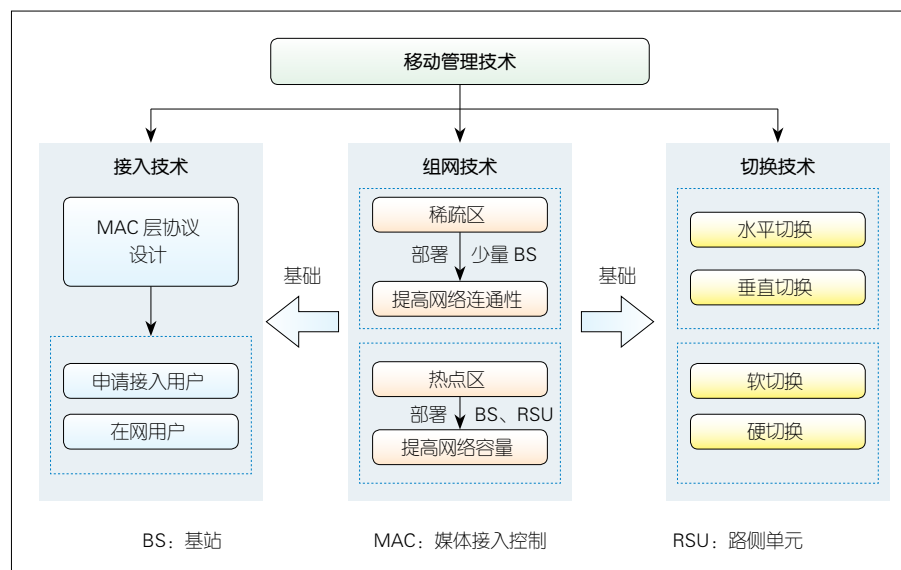
行为预测模型的基础上,预测车辆未来时刻的业务请求与接入网络。当车辆申请接入时,MAC层能够根据不同的业务特性和未来可能的网络拥塞状态,选择是否接受这一请求;对于在网用户,MAC层时刻分析每个通信节点的信道状态,并根据车辆行为变化,为其选择最佳的调制编码方案。以此有效地减少节点接入冲突,降低消息传输碰撞概率,保证通信可靠性。

(3) 切换技术。

切换技术是实现移动性管理的重要环节。切换技术要确保车载移动终端从网络中的一个连接点移动到另一个连接点时无缝且无损地与X连接^[16]。这个连接点在蜂窝网络中被称为BS,在WLAN网络中被称为接入点(AP)。产生切换的原因大致可分为3类:信号链路质量引起的切换、车辆移动终端与网络连接点距离引起的切换以及负载均衡引起的切换。车联网中,切换有多种分类方式,依据切换网络的不同,分为水平切换和垂直切换;依据链路建立和切换次序不同,分为软切换和硬切换^[17]。

水平切换是指在相同链路层技术下的不同接入点间的切换,如从一个BS到另一个BS的连接转移或从一个AP到另一个AP的连接转移;垂直切换是指在不同链路层技术下的接入网络间的切换,如从一个BS到另一个AP的连接转移。软切换即车辆从源小区转移到目的小区,会保持与源小区的连接,同时尝试与目的小区的连接;硬切换则指先断开当前连接,紧接着新建一个连接。

基于车辆行为分析的移动管理技术优势之一就是在提高通信可靠性的同时,满足用户差异化的服务请求,保证车辆在多网共存的环境下始终保持最佳连接。具体来说,首先对车辆历史行为数据进行分析,在宏观层面



▲ 图3 车联网移动管理技术路线

根据车流量密度及通信业务密度将区域划分为不同的等级,以此指导 BS 和 RSU 的部署。然后对车辆请求和网络状态进行实时分析,在综合考虑业务类型、车辆位置变化、网络拥挤状况的条件下,制定合理的信道接入策略,保障通信的可靠性。最后,在车辆移动过程中,实时监测和测量当前信道状况,若当前信道难以保障车辆需求,则进行合理的切换。

3 资源分配技术

车辆的高速移动性以及按时延的苛刻要求,给车联网中的资源管理带来巨大挑战。如何合理分配有限的无线通信资源、存储资源及计算资源以满足车辆超低时延通信需求是车联网中所要解决的关键问题之一。下面我们将重点介绍车联网中的无线通信资源分配技术(图4为车联网资源分配技术路线)、缓存技术以及边缘计算技术。

(1) 无线通信资源分配技术。

车联网中车辆通信既包括通过 Uu (基站与终端间的通信) 接口建立的远距离通信,又包括基于 PC5 (直连通信) 接口建立的车辆间近距离通信。

其中, PC5 接口可支持调度式资源分配方式(模式3)和终端自主式资源分配方式(模式4)。基于车辆行为分析的 URLLC 技术重点在于解决 V2I 通信与模式3 V2V 通信共存情况下的无线通信资源分配问题。在给定干扰(I)、车辆行为数据(D)后,系统可为车辆智能分配时间(t)、空间(s)、频率(f)、功率(p)和码域(c)等多维度无线通信资源,最大化车辆通信时延服务质量(QoS)需求,如公式(1)所示:

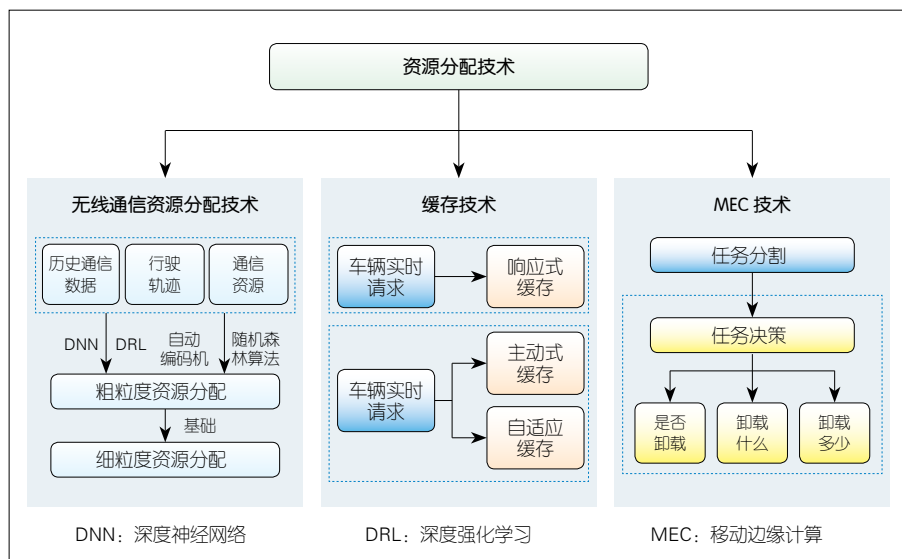
$$\begin{aligned} & P1: \text{given } I, D \\ & \max U(t, \tau, s, f, p, c) \\ & \text{subject to: } 0 < t_i \leq T_{i, \max}, \forall i \\ & 0 < \sum_i f_i \leq B_{\text{total}}, \forall i \\ & 0 < p_i \leq P_{i, \max}, \forall i \\ & 0 < \tau_i \leq \tau_{i, \max}, \forall i \end{aligned} \quad (1)$$

其中, B_{total} 表示系统总带宽, $P_{i, \max}$ 表示用户的最大功率约束, $\tau_{i, \max}$ 表示用户的最大时延约束。解决上述无线通信资源分配的核心问题通常分为无线通信资源预分配、无线通信资源实时动态分配2步。在无线通信资源预分配中,借助车辆行为相关数据,利用自动编码

机、随机森林算法以及深度神经网络等学习技术,提取车辆对业务请求的空时特征,对车联网中的用户应用业务和车辆轨迹等数据进行分析,实现对某一区域无线通信资源的精准预分配。预分配资源很难满足用户时延 QoS 需求,因此需进一步执行资源实时动态分配,利用强化学习,分析历史数据中该区域其他车辆用户所使用的频谱、功率等无线通信资源对该车辆用户以及系统效益的影响,指导无线通信资源细粒度实时动态分配。

(2) 缓存技术。

缓存技术是车联网系统实现低时延通信的重要手段。其核心思想是:在分析车辆行为的基础上,将车辆请求量高的内容从中央服务器复制到近车辆的基础设施(如基站、路边单元等)中,拉近车辆与请求内容的距离^[18]。当车辆请求文件时,只须从距离近的基础设施中获取,而不经核心网,极大减少了文件传输时延。根据缓存机制的不同,缓存可分为主动缓存、被动缓存和自适应缓存3种方式。主动缓存是指在分析车辆行为的基础上,预测车辆未来可能的路径,将车辆请求内容提前放置在概率最高路径的基础设施上,当车辆到达下一基础设施时,可直接获得请求文件,通过这一方式可实现内容实时化、定制化配置;被动缓存则指当车辆到达基础设施覆盖范围内后,基础设施根据车辆实际请求,从核心网获取文件;自适应缓存则涉及到缓存内容的更新,由于基础设施存储容量有限,为提高缓存效率,可根据内容请求的实时变化,用请求量高的文件替代请求量低的文件。主动缓存和自适应缓存对车辆行为预测有较高的要求:对于主动缓存,车辆行为预测的准确性直接决定了系统性能,如果缓存命中,则可极大地降低通信时延;反之,不仅会因请求重



▲ 图4 车联网资源分配技术路线

传而导致通信时延增加,而且造成较高的资源配置成本。对于自适应缓存,最典型的应用场景为车辆用户请求内容具有较强的周期性和规律性,路边基础设施在分析车辆请求规律的基础上,根据车辆用户现有请求内容变化,提前更新缓存内容。

(3) 移动边缘计算(MEC)技术。

MEC技术是车联网系统降低任务处理时延的重要途径。相较于传统云计算网络,MEC把具有计算、存储、通信功能的服务器部署在网络边缘,使边缘接入网络具有任务处理本地化能力^[19],拉近车辆与云平台的距离,极大减少车辆任务处理时延。对于车联网而言,MEC技术的关键在于任务分割及卸载决策。随着光学雷达、高清摄像头在车联网领域的广泛应用,车辆不仅产生的业务类型多,而且单个业务的数据量大。庞大繁多的任务加重了单个服务器的工作负荷,往往会导致任务拥塞、任务卸载中断,再加上车辆固有的高速移动性缩短了车辆在单个服务器的滞留时间,对服务器计算能力以及任务处理时间提出了更加严格的要求,进一步增加了任务卸载中断概率;因此任务分割与卸载决策在车联网中就显得尤为重要:任务分割是指根据任务属性,将任务分割成可以在不同设备上独立执行的子任务;卸载决策则包括了车辆决定是否卸载,卸载什么及卸载多少。在预测车辆行为的基础上,根据边缘服务器的实际处理能力,建立公式(2)所示的最小化时延相关优化问题。

$$\begin{aligned}
 &P2: \text{given } Q, P_{rio}, C_l, C_m, C_e, C_t \\
 &\min U(\tau, Q_1, Q_2, Q_3) \\
 &\text{subject to: } R_i \geq \gamma \\
 &\quad r_i \leq \eta \\
 &\quad r_i^e \leq r_e \leq r_c \\
 &\quad Q_1^i + Q_2^i + Q_3^i = Q^i \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, Q 是系统总任务量, Q_1, Q_2, Q_3 表示卸载时本地终端、MEC服务器以及云中心服务器需要处理的数据量,代表着本地、MEC服务器以及云中心计算能力,是系统传输能力,上述优化问题的各约束条件分别为:用户服务质量基本需求,系统单位时间内传输任务量受限于网络通信资源,本地终端、MEC服务器、云中心服务器的计算能力的差异,系统所有任务仅被执行一次。通过上述处理,易得出在所路经的每个服务器应该卸载多少任务量,可极大地提高卸载成功率,降低任务处理时延。

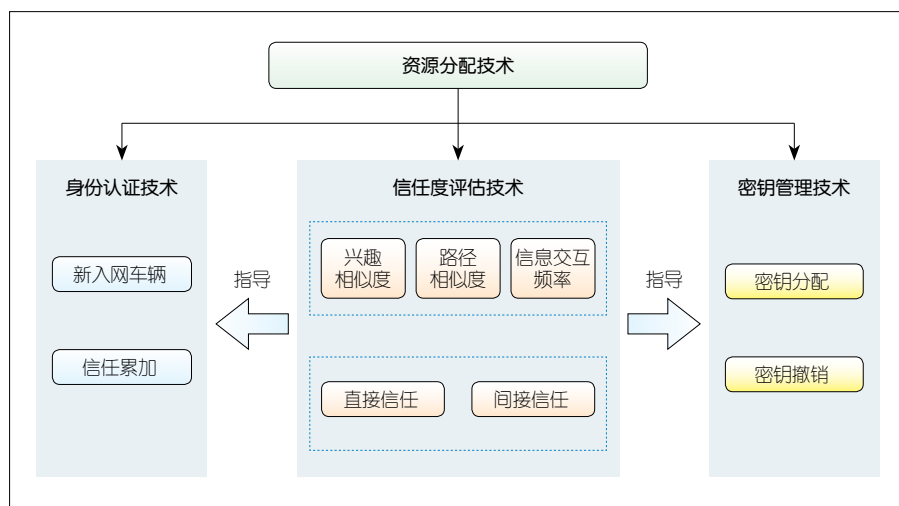
鉴于车联网中通信、缓存和计算资源的相互耦合性,在车辆行为分析的基础上,量化这3种资源的折中关系,从而联合优化通信资源、存储资源与计算资源,达到动态适配车辆用户不同时延服务质量需求,将是未来重要研究方向。

4 信息安全技术

车联网是一个开放式的通信网络,车辆的身份信息、行驶路线及安全密钥等隐私数据容易遭受非法者的恶意窃取,增加了车辆通信的安全隐患;因此,确保网络信息安全是保证

车辆超可靠低时延通信的基础和前提。信息安全技术主要包括车辆信任评估技术、密钥管理技术及身份认证技术等,具体如图5所示。

一般来说,信任是指“根据他人预期的行为而选择接受风险的意愿”,在车辆社交网络(VSN)中,信任度越高的车辆,其传输消息的可靠性越高^[20];信任度低的车辆则存在潜在的消息窃取、恶意攻击等风险。因此,信任度评估体系对信息安全传输有着至关重要的作用。为刻画VSN的车辆信任度,可在分析车辆行为的基础上,从车辆间的直接信任度和间接信任度2个方面建立车辆信任评估体系:利用图论将网络中的所有车辆映射为图的顶点,并引入大数据分析技术,挖掘车辆的兴趣相似度、移动路径相似度及信息交互频率等行为特性,以此赋予边不同的权重。车辆的直接信任度即对应顶点之间边的权重,车辆的间接信任度即顶点连线权重的乘积累加和。在信任度评估体系的基础上,可进行合理的密钥管理和身份认证等操作。密钥管理主要体现在密钥分配和密钥撤销2个方面。密钥分配将密钥优先分发给VSN中信任度高的车辆;密钥撤销则涉及到检测恶意篡改信息、



▲ 图5 车联网信息安全技术路线

伪造虚假消息、女巫攻击等降低车辆信任度的行为,然后撤销其证书。身份认证是指当新的车辆加入网络进行通信时,首先需要核实该车辆的身份,一个车辆的系统认证是已有通信网络内的车辆对它信任的结果,只有当该车辆的系统认证高于某一阈值时才能加入通信。

5 结束语

在互联网信息的背景下,实现智能驾驶与网络互联的“车联网”应运而生。本文中,我们着重分析了保障车联网超可靠低时延通信的车辆行为分析技术、移动管理技术、资源分配技术与信息安全技术,为车联网的部署提供了理论借鉴。

参考文献

- [1] WANG Z Y, ZHENG J, WU Y Y, et al. A Central-ity-based RSU Deployment Approach for Vehicular Ad Hoc Networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris, France: IEEE, 2017: 1–5. DOI:10.1109/icc.2017.7996986
- [2] YE C L, WANG P, WANG C, et al. Mobility Management for LTE-Based Heterogeneous Vehicular Network in V2X Scenario[C]//2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China: IEEE, 2016: 2203–2207. DOI:10.1109/compcomm.2016.7925091
- [3] CHANG Y H, LIU H H, WEI H Y. Group-Based Sidelink Communication for Seamless Vehicular Handover[J]. IEEE Access, 2019, (7): 56431–56442. DOI:10.1109/access.2019.2913462
- [4] GUO C T, LIANG L, LI G Y. Resource Allocation for Low-Latency Vehicular Communications: an Effective Capacity Perspective[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 905–917. DOI:10.1109/jsac.2019.2898743
- [5] MA J C, WANG J H, LIU G, et al. Low Latency Caching Placement Policy for Cloud-Based VANET with both Vehicle Caches and RSU Caches[C]//2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Singapore, Singapore: IEEE, 2017: 1–6. DOI:10.1109/glo-comw.2017.8269203
- [6] SUN Y X, GUO X Y, SONG J H, et al. Adaptive Learning-Based Task Offloading for Vehicular Edge Computing Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3061–3074. DOI:10.1109/tvt.2019.2895593
- [7] MEJRI M N, BEN-OTHMAN J. GDVAN: A New Greedy Behavior Attack Detection Algorithm for VANETs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(3): 759–771. DOI:10.1109/tmc.2016.2577035
- [8] ZHANG K, LIANG X H, LU R X, et al. Exploiting Mobile Social Behaviors for Sybil Detection[C]//2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Hong Kong, China: IEEE, 2015: 271–279. DOI:10.1109/infocom.2015.7218391
- [9] YING B D, NAYAK A. A Distributed Social-Aware Location Protection Method in Untrusted Vehicular Social Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 6114–6124. DOI:10.1109/tvt.2019.2906819
- [10] DING H C, LI X H, CAI Y, et al. Intelligent Data Transportation in Smart Cities: A Spectrum-Aware Approach[J]. ACM Transactions on Networking, 2018, 26(6): 2598–2611. DOI:10.1109/tnet.2018.2871667
- [11] HOU L, LEI, ZHENG K, et al. A Q-Learning-Based Proactive Caching Strategy for Non-Safety Related Services in Vehicular Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4512–4520. DOI:10.1109/iot.2018.2883762
- [12] ZHANG C T, ZHANG H X, QIAO J P, et al. Deep Transfer Learning for Intelligent Cellular Traffic Prediction Based on Cross-Domain Big Data[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(6): 1389–1401. DOI:10.1109/jsac.2019.2904363
- [13] MACHARDY Z, KHAN A, OBANA K, et al. V2X Access Technologies: Regulation, Research, and Remaining Challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1858–1877. DOI:10.1109/comst.2018.2808444
- [14] YANG Q, ZHU B H, WU S E. An Architecture of Cloud-Assisted Information Dissemination in Vehicular Networks[J]. IEEE Access, 2016, (4): 2764–2770. DOI:10.1109/access.2016.2572206
- [15] LIANG L, PENG H X, LI G Y, et al. Vehicular Communications: A Physical Layer Perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 10647–10659. DOI:10.1109/tvt.2017.2750903
- [16] ZHENG K, ZHENG Q, CHATZIMISIOS P, et al. Heterogeneous Vehicular Networking: a Survey on Architecture, Challenges, and Solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2377–2396. DOI:10.1109/comst.2015.2440103
- [17] ABBOD K, OMAR H A, ZHUANG W H. Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9457–9470. DOI:10.1109/tvt.2016.2591558
- [18] LIU T, ZHOU S, NIU Z S. Joint Optimization of Cache Allocation and Content Placement in Urban Vehicular Networks[C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2018: 1–6. DOI:10.1109/glo-com.2018.8647913
- [19] ABBAS N, ZHANG Y, TAHERKORDI A, et al. Mobile Edge Computing: A Survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 450–465. DOI:10.1109/iot.2017.2750180
- [20] WANG X J, NING Z L, ZHOU M C, et al. Privacy-Preserving Content Dissemination for Vehicular Social Networks: Challenges and Solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(2): 1314–1345. DOI:10.1109/comst.2018.2882064

作者简介



张海霞, 山东大学控制科学与工程学院教授、博士生导师; 主要研究方向为智能通信与网络、资源管理、空时处理技术、移动边缘计算、智能通信技术; 先后主持国家及省部级项目 10 余项, 获得省部级科学技术奖 5 项; 发表论文 80 余篇。



刘文杰, 山东大学控制科学与工程学院在读博士研究生; 主要研究方向为车辆移动建模、边缘缓存; 发表论文 2 篇。



薛彤, 山东大学控制科学与工程学院在读博士研究生; 主要研究方向为资源管理、网络切片。



梁聪, 山东大学信息科学与工程学院在读博士研究生; 主要研究领域为图像分类、卷积神经网络训练策略及损失函数研究、基于深度学习的时序数据建模、深度学习可解释性研究; 参与多项国家重点研发计划及国家自然科学基金项目; 发表论文 4 篇。

C-V2X 与智能车路协同技术的深度融合

Deep Integration of C-V2X and Intelligent Vehicle-Infrastructure Cooperative Systems

张杰 /ZHANG Jie

(大唐高鸿数据网络技术股份有限公司, 北京 100083)
(Gohigh Data Networks Technology CO., LTD., Beijing 100083, China)



摘要: 智慧交通已经发展到智能车路协同(i-VICS)阶段, 车用无线通信(V2X)是i-VICS的重要支撑技术, 可以支撑车路间的实时信息交互。介绍了蜂窝-V2X(C-V2X)采用的关键技术及其后续演进方向, 描述了通信技术发展如何推动i-VICS架构演进, 展望了i-VICS下一步的演进方向并分析了对通信技术的演进要求, 最后给出了高速、城市、园区等典型场景下的车路协同部署建议。

关键词: C-V2X; i-VICS; 智能网联汽车

Abstract: Intelligent transportation has developed to the stage of intelligent Vehicle-Infrastructure Cooperative Systems (i-VICS). Vehicle to Everything (V2X) is an important supporting technology of i-VICS, which can support real-time information interaction between vehicles and infrastructures. The key technologies adopted by cellular-V2X (C-V2X) and its evolution are introduced in this paper, and how the development of communication technology promotes the evolution of i-VICS is described. Meanwhile the possible evolution of i-VICS is concluded, and the requirements of communication technology are analyzed. Finally, some suggestions on the deployment of i-VICS in the typical scenarios such as highway, city and park are proposed.

Keywords: C-V2X; i-VICS; intelligent connected vehicle

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200213.0812.004.html>

网络出版日期: 2020-02-13

收稿日期: 2019-12-22

1 智能车路协同关键技术

交通是人类经济和社会发展的命脉, 一套高效的出行和货物运输系统将极大地促进一个地区的经济发展。20世纪50年代以来, 人们在不断探索交通的智能化, 希望通过利用检测、计算、通信、控制等一系列先进技术来构建一个实时、准确、高效、与运输需求高度匹配的综合交通运输系统。

智能交通系统发展分为4个阶

段^[1]: 第1个阶段是通过基础设施、公共交通建设提升道路等级和路网容量; 第2个阶段是利用行政管控手段提高效率, 减少拥堵; 第3个阶段是利用新能源技术发展绿色交通; 第4个阶段是利用智能车路协同(i-VICS)技术(简称为车路协同技术), 提高交通容量和出行效率, 构建按需出行系统, 挖掘和预测交通出行系统的时空规律, 优化交通网络及车辆的部署和运行。

车路协同技术将交通系统中的人

(出行者)、车(运载工具)、路(道路基础设施)、云(交通管控中心)有机地结合起来, 保障通行安全, 提升通行效率。在车路协同系统中, 所有的交通要素的状态信息都实施了数字化采集, 同时通过移动通信技术进行快速交换。交通参与者可以根据交互的信息进行协同, 交通管控中心则对收集到的海量信息进行大数据分析提取, 从而进行全局交通管控。车路协同技术还改变了传统的道路运营商的服务模式, 从简单的交通基础设施

提供商向道路出行服务提供商转变,通过基于场景的信息采集和分析,实现服务的个性化、柔性化。

车路协同系统包括4个关键技术:车用无线通信(V2X)技术、路侧全域感知技术、高精度定位技术、分级云控技术。

(1) V2X 技术。

协同的前提是交通要素间快速、准确的信息交换,因此一个超可靠低时延的车路间泛在通信系统是车路协同的基础。车辆的实时状态信息(如工作状态、运行参数、告警信息、行驶意图)要通过车路通信网络传输到路侧,并经过脱敏、抽象等处理后传送给云控中心。同样,道路基础设施的信息(如电子标牌、信号灯状态、地图)、路侧感知到的交通参与者信息、交通事件(如拥堵、遗洒、施工)、交通管理部门的管控指令(如限速、禁行、交通管制)也要通过车路通信网络传输到车侧,供车辆的驾驶行为决策使用。

V2X 是将车辆与一切事物相连接的新一代信息通信技术。V2X 技术可以保障 100 ms 以内的传输时延,不依赖基站覆盖进行直连通信,提供高效的广播机制,是一种非常适合车路间通信的技术。

在 V2X 通信技术的支持下,车辆可以快速获得周边车辆和道路的状态信息,从而支持车辆行驶路径的动态规划,达到避免碰撞、快速通行的目的,实现交通的局部协同。云控中心则可以实时获得全时空动态交通信息,进而支持交通的全局管控。

目前,国际上主流的 V2X 技术有电气和电子工程师协会标准(IEEE 802.11p)和蜂窝车用无线通信(C-V2X)2条技术路线。和 IEEE 802.11p 相比,C-V2X 有2方面的优势^[2]:用户间干扰小,支持并发用户

数更多;有效通信距离大,可以给驾驶员提供更长的刹车反应时间。

(2) 路侧全域感知技术。

随着传感技术的发展,传统的交通系统检测方法和手段也得到了很大提升。除了可以继续利用图像处理技术进行交通事件识别,利用气象传感技术进行气象事件识别,利用线圈、雷达技术进行交通流量统计外,还可以利用激光雷达、雷视一体机等先进的感知手段进行交通参与者的目标识别与跟踪。

在 V2X 技术的支持下,浮动车技术将成为路侧传感的有效补充。公共车辆(如公交车、出租车、交警车辆、道路养护车辆)上可加装感知设备,对交通状态信息进行采集,并通过 V2X 技术实时汇聚到路侧,与路侧直接感知到的信息进行融合。此外,随着 V2X 车载设备渗透率的不断提高,已安装车载设备车辆的状态信息也可以通过 V2X 准确获得,与传感器采集的信息相互印证。

随着多种感知设备的使用,不同设备感知结果之间的同步和去重成为新的研究课题,这催生了基于边缘计算的全域感知融合技术,最终将实现交通物理系统的数字孪生,并为局部交通协同和全局交通管控提供支撑。

(3) 高精度定位技术。

高精度定位技术是实现车路协同的基础,在获取车辆准确位置的基础上,才能提供各种安全预警应用和个性化的交通信息服务。为了获得全时空连续的高精度定位,往往需要对多种定位技术进行组合,如开阔地带使用基于差分信息增强的全球导航卫星系统(GNSS)定位,GNSS 短暂丢失时使用惯性导航定位,道路标志标线条件较好时使用即时定位与地图构建(SLAM)定位,隧道和地下空间内使用基于无线通信的定位等。

对于交通的局部协同,高精度定位可以更精准地描述周边交通参与者和道路的具体位置,帮助车辆规划行驶路径。对于交通的全局控制,高精度定位可以更精细地刻画交通流特性,实现交通的实时监控和车流的实时诱导。

除了对车辆的高精度定位外,我们还可以对道路基础设施进行高精度定位监测控制,以预测重点基础设施的形变、移动,及时采取养护措施,保证道路的通行能力。

(4) 分级云控技术。

车路协同的目标是实现局部交通的快速协同和全局交通的综合管控,这就要求部分信息在本地快速处理,并快速通知到周边车辆,也就是边缘云控;部分信息要汇聚到云控中心进行全局数据分析和全局的交通流管控,也就是中心云控。

边缘云控利用移动边缘计算(MEC)技术将计算、决策能力向网络边缘进行迁移,实现局部交通协同的分布式、本地化部署,进而可以通过 V2X 技术为区域内行驶的车辆提供低时延车路协同服务。采用 MEC 技术,可以将敏感数据或隐私信息控制在区域内部,同时降低回传网络的负载压力。通过边缘计算和 V2X 技术的联合部署,可以实现安全预警、车速引导、信号协同、动态高精度地图制作与播发、车辆感知能力补充、危险驾驶行为提醒、多车行驶路径协同等边缘云控应用。

中心云控则对 V2X 网络收集汇总得到的交通数据进行大数据分析,通过云控平台强大的计算和存储能力,洞察交通数据间的潜在因果关系,为交通管控决策和流程优化提供数据支撑。同时,利用大数据技术的加工能力,挖掘车辆在具体交通场景下的个性化信息需求,结合 V2X 的快速通信能力为车辆实现场景化的增值服务。通过

中心计算和 V2X 技术的联合部署,可以实现交通事故的分析与预测、交通流量的动态预测、出行需求的预测与运力匹配、道路管理策略的远程配置、个性化信息服务等中心云控应用。

2 C-V2X 关键技术及后续演进

C-V2X 技术最早被称为长期演进 (LTE)-V2X 技术,由第三代合作伙伴计划 (3GPP) 制订,在蜂窝技术基础上优化而来,后续将演进到新空口 (NR)-V2X 技术。业界将 LTE-V2X 和 NR-V2X 统称为 C-V2X。C-V2X 提供了 2 种通信接口,分别称为 Uu (基站与终端间的通信) 接口和 PC5 (直连通信) 接口,2 种接口相互结合,彼此支撑,共同用于 V2X 业务传输。无论是否有基站覆盖,2 种接口都可提供相应的通信服务。

(1) R14: LTE-V2X。

在 R14 的标准中,PC5 接口的设计以 LTE-设备到设备 (D2D) 技术为基础。在物理层设计上,C-V2X 采用了增加导频密度的方法来增强信道估计性能,以应对车辆高速移动带来的多普勒频移和 5.9 GHz 频率带来的频偏;改进了控制信息和数据信息传输方式来提升半双工模式下的系统容量。在媒体接入控制 (MAC) 层设计上,C-V2X 提供了 2 种选择:基于基站调度的模式 3 和终端自主感知分配资源的模式 4。由于 V2X 消息具有周期性发送的特点,基站调度时可以使用半静态调度 (SPS) 的方式来节省调度开销,周边车辆还可以根据调度信息来预测未来资源的使用状况,从而更加准确地选取传输资源。此外,针对事件触发消息,基站还支持动态资源调度,以提供快速资源分配。车辆很可能在没有基站覆盖的地方行驶,因此不依赖基站的增强用户感知资源分配方法也是必不可少的一项技术。

该技术通过测量估计信道使用状况;通过读取资源调度信息,利用 SPS 特性对未来的资源使用做出预测并进行避让;结合不同数据的优先级,保证优先级较高的数据优先发送。在后续的演进中,C-V2X 还将引入单播通信机制,支持更多的频谱资源,采用反馈机制增加传输可靠性,采用高阶调制、多输入多输出 (MIMO)、polar 码等技术获得更好的物理层性能。

Uu 接口的设计在现有 LTE 技术上进行了功能增强。上行传输支持基于业务特性的多路 SPS,在保证业务传输高可靠性的前提下大幅缩减上行调度时延。下行传输针对 V2X 的广播机制支持低时延的单小区点到多点传输和多播/组播单频网络。C-V2X 还引入了核心网元本地化部署、多接入边缘计算技术,以缩短端到端网络时延。

(2) R15: LTE-eV2X。

C-V2X 的 R15 版本是个小版本,引入了 2 项关键技术,64 正交振幅调制 (QAM) 和载波聚合 (CA),其设计目标都是提升传输速率。

64 QAM 要求比较理想的空口传输环境,在实际应用中的使用情况较少。此外,64 QAM 特性的引入对速率匹配进行了修改,无法保持对 R14 的后向兼容。

在中国,目前工业和信息化部为 LTE-V2X 分配了 20 MHz 频段,因此无法支持 CA 的实施。

综上所述,LTE-eV2X 在中国没有使用场景,目前该版本并未被商业化落地。

(3) R16—R17: NR-V2X。

C-V2X 将演进至 NR V2X,以支持更先进的 V2X 应用,提供更严格的服务质量 (QoS) 保障。LTE-V2X 可以提供面向车辆主动安全的短消息广播服务,NR-V2X 则是通过单播、组播机制和新的无线通信技术的引入来

支持更丰富的车路协同应用。此外,NR V2X 还将使用更高的通信频点,以提供更大的通信带宽,进而支持大吞吐量的数据交换。NR V2X 和 LTE-V2X 将彼此配合,共同支撑面向完全自动驾驶的车路协同。

R16 主要包括以下关键技术^[3]:

- Sidelink 增强。NR V2X 提出了更高的时延和可靠性指标,特定场景下,时延不超过 3 ms,可靠性达到 99.999%。为了满足这些要求,NR V2X 采用了一系列新的物理层设计,包括更大的子载波间隔、更短的传输时间间隔 (TTI),支持扩展循环前缀 (CP) 正交频分复用 (OFDM)、新的物理 Sidelink 控制信道 (PSCCH) 和物理 Sidelink 共享信道 (PSSCH) 映射关系、新的反馈信道等。此外,为了支持更高的传输速率,NR V2X 还采用了毫米波、LDPC 编码、64 QAM 等技术。

- 支持单播、组播。车路协同下一步将演进至车车行驶意图协同、传感器共享、编队行驶、路侧驾驶决策等应用,因此需要设计单播、组播的通信机制,以获得相对广播的更高传输效率。

R17 则计划从以下几个方面开展研究^[4]:

- 为降低终端功耗,定义新的资源分配方式。

- 通过定义终端间的协作机制提升模式 2 的可靠性,降低时延。

- 为广播、组播和单播定义非连续接收 (DRX) 模式,进一步降低终端功耗。

- 支持新的频谱。

3 通信技术发展推动车路协同架构演进

3.1 车路协同 1.0

车路协同 1.0 时代,道路数字化

程度很低，车和路之间的信息交互很少。少数重点管控的车辆会通过 2G/3G/4G 技术向管控平台上报自身的位置和状态以便接受监管。由于缺少信息通知手段，道路信息只能通过可变情报板或运营商短信的方式向车辆告知，只能提供准静态信息。图 1 为车路协同 1.0 架构图。

在这一阶段，车路协同系统只能进行低精度感知和初级预测，数据之间缺乏融合，信息采集、处理和传输的时延明显。

3.2 车路协同 2.0

随着感知、计算、通信技术的发展，车路协同已经进入 2.0 时代。随着摄像头、雷达、线圈等传感器的大范围部署和图像识别、交通流量统计技术的发展，越来越多的交通事件可以在路侧实时感知。而 C-V2X 技术为车辆和路侧基础设施提供了一种信息交互的快速通道，其通信时延可以控制在几十毫秒以内，道路状态通知的实时性大大增加，因此可以用来指导车辆的短时决策。随着 C-V2X 技术的引入，道路信息对于车辆的价值逐渐增加。图 2 为车路协同 2.0 架构图。

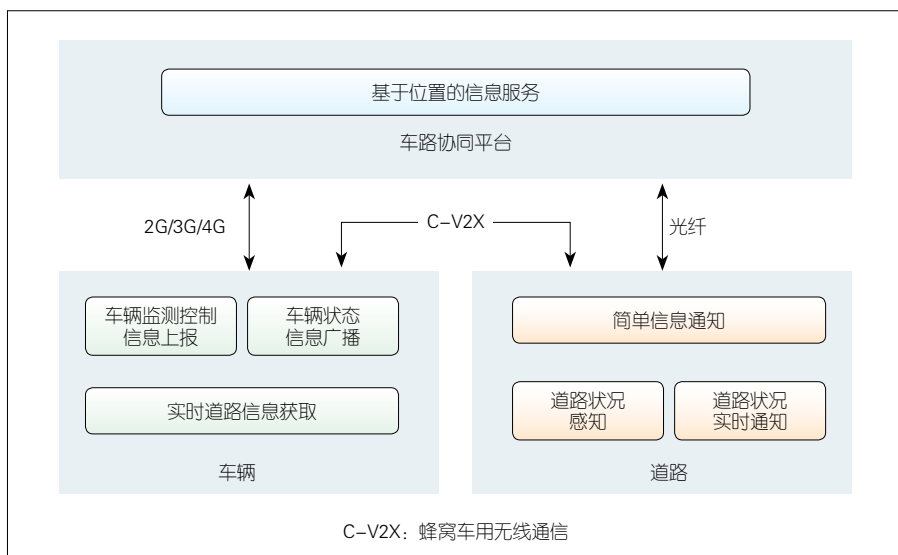
在这一阶段，车路协同系统具备复杂传感和深度预测功能，通过与车辆系统之间的双向数据实时共享，可以支持较高时间和空间解析度的驾驶辅助和交通管理功能。

3.3 车路协同 3.0

未来，随着路侧融合感知、边缘计算、C-V2X 技术的进一步发展，车路协同将进入 3.0 时代。随着 C-V2X 引入更大的传输带宽，车辆和路侧设施之间可以进行感知协同。车辆可以把自车传感器的原始数据发送到路侧，利用边缘计算能力进行更为精准的计算。随着 C-V2X 引入单播传输机制，



▲图 1 车路协同 1.0 架构图



▲图 2 车路协同 2.0 架构图

路侧设备可以向车辆提供有针对性的道路全息感知结果，甚至可以利用强大的边缘计算能力为车辆直接规划行驶路径。

在 C-V2X 通信技术的支持下，感知能力和计算能力可以在车辆和道路之间进行动态分配，实现综合成本、效率的优化；在边缘计算技术的帮助下，各微观交通节点可以实现局部通行效率的优化。图 3 为车路协同 3.0 架构图。

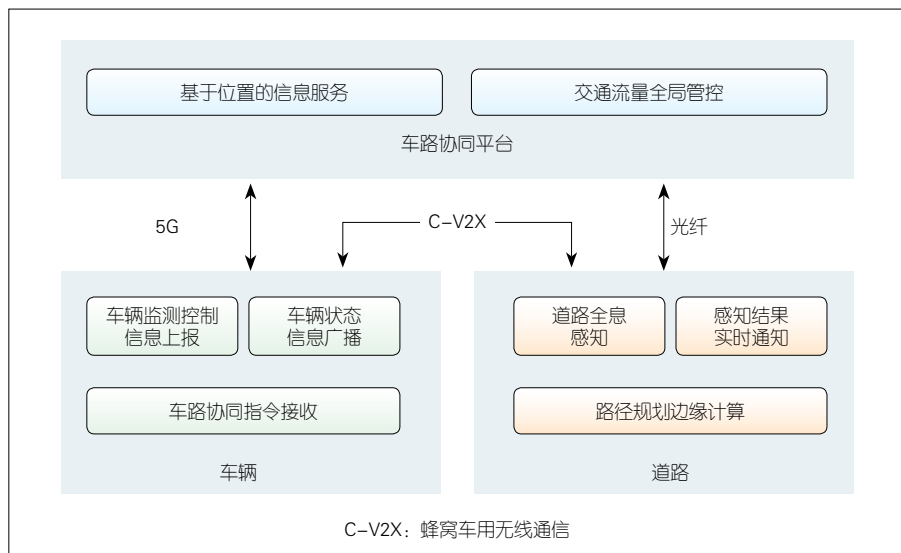
在这一阶段，车路协同系统可以为自动驾驶车辆提供全场景下的感知、预测、决策、控制、通信服务，并优化整个交通基础设施网络及车辆的部

署和运行。

4 车路协同下一步演进方向及对通信技术的要求

(1) 路侧感知时延与 V2X 通信时延需要同步优化。

目前车路协同正处于 2.0 向 3.0 过渡的阶段，路侧已经部署了一定的传感器，可以进行一定的事件分析和流量分析，进而可以为司机提供驾驶建议，为交通管控提供参考数据。但是现有传感器在处理时延和检测精度上还有较大提升空间，主要用于有人驾驶车辆的驾驶辅助，对车路间通信技术的时延也就没有那么敏感。



▲图3 车路协同 3.0 架构图

随着基于车路协同的自动驾驶技术成为热点，研究人员开始研发低时延摄像机、77 GHz 毫米波雷达、雷视一体机、激光雷达等处理时延更低、检测精度更高、分类能力更强的传感器。这些传感器的处理时延可以达到几十毫秒量级，检测精度可以达到分米级。为了保证信息的有效性，车路间通信技术的时延要求相应升高，保证从目标出现到通知到车内的综合时延在 100 ms 以内，与目前自动驾驶车辆自身传感器的检测时延相当。目前 LTE-V2X 的平均时延在几十毫秒，刚刚可以满足要求。考虑到错过已分配的 SPS 资源以及信道质量较差导致需要重传等极端情况，综合时延可能超过 100 ms；因此还需要研究可进一步降低 V2X 通信时延的技术，例如 R16 的短传输时间间隔（TTI）技术、R17 的终端协作技术等。

从另一个维度看，面向自动驾驶的车路协同部署不能采用传统交通摄像头和雷达，否则即使采用 5G 的极限时延 1 ms 的通信技术也无法满足自动驾驶要求。

（2）目标跟踪范围、路径规划

算法、V2X 通信技术、算力分布需要联合优化。

交叉口俯视感知是公认的车路协同重点应用。城市大型交叉口人流、车流密集，需要跟踪的运动目标众多，对 V2X 承载能力和车侧的路径规划算力带来巨大挑战。

一种解决思路是路侧感知从全部跟踪目标中圈定特定车辆周边限定区域内的物体。这就要求路侧边缘计算能够对目标车辆的运动轨迹进行预测，进而筛选出前进方向上的感知结果。这一方案还要求路侧单元（RSU）具有 R16 将引入的单播能力。

还有一种解决思路是将交叉口的车辆路径规划全部汇集到路侧边缘计算处理，这就要求车辆能够将感知到的近场环境数据上传到边缘计算设备；因此要求 V2X 的上行传输速率大大提升，同时也要求边缘计算设备具有较高的算力。

（3）交通优化需要车云信息快速交换和云控快速仿真推演作为支撑。

交通优化需要交通起止点（OD）调查信息。过去的 OD 调查往往需要结合问卷调查、公交线网乘客分布统

计、运营商数据、导航软件数据获得，数据获取周期长，无法体现动态信息和局部微观信息。随着 C-V2X 的推广，云端获取每台车辆的动态信息成为可能。有了全局的动态数据，再辅以云控平台的强大计算能力，可以实现交通调度的全局决策，并可以通过仿真推演的方法对决策方案进行快速验证。

随着导航软件的普及，越来越多的司机会遵循导航软件的路径规划建议；但是导航软件对道路的动态信息掌握的很不充分，而且在做路径规划建议时并没有充分考虑到大量车辆按建议出行对未来交通状况的影响。这就导致当使用导航软件的司机数量变多时，交通状况会恶化^[5]。采用 C-V2X 技术后，云端可以统筹进行全局性的最优策略决策，并直接为每个交通个体分配路径规划，从而避免交通无政府状态的出现。

5 不同场景下 C-V2X 车路协同的部署建议

不同交通场景下车路协同需要解决的问题不同，因此采用的设备配置和部署方案也有差异。目前车路协同研究主要集中在高速公路、城市街道和自动驾驶园区 3 大场景。

（1）高速公路。

对于高速公路场景，车辆行驶速度较高，紧急情况下要求的反应时间较长；因此对车辆的异常行为监测控制、对紧急事件的远程通知都有较高要求。

C-V2X 车载设备（OBU）可以实时获取车辆的运行状态、驾驶意图，从而很好地发现车辆故障、异常减速/停车/变道、不按限速行驶、占用应急车道等多种异常行为。在异常行为发生时，需要对司机进行驾驶行为纠正，因故未能实施纠正的，要及时通知高速公路交通管理部门采取相应处置措

施,达到事故主动预防的目的。为了支持这一应用,OBUE需要和车身总线进行连接,需要有提示司机的人机接口(HMI)或者直接对车辆进行控制的接口,需要能够通过Uu口与交管平台进行通信。

一旦危险状况已经发生,如道路遗洒、事故、异常停车、路面积水/结冰/团雾等,则需要对上游车辆进行及时预警,必要时甚至要启动交通疏导机制。这就要求RSU之间有快速信息交换机制,而且针对具体事件有相应的消息推送方案。

(2) 城市街道。

城市街道场景车速相对较低,但是交通环境异常复杂,要充分考虑控制信号复杂、人车混行、机非混行、道路连接关系复杂等影响。车路协同重点解决控制信号车内通知、非视距碰撞风险预警的问题。

城市场景的RSU部署要和信控装置充分结合,实现信控装置的网联化。一方面,可以将信控信息及时通知给周边车辆,另一方面,也可以通过C-V2X汇集周边交通流数据,反哺信控装置的控制决策。

此外,在重点区域,例如道路交叉口,可以部署多角度的感知设备,通过多源传感器的感知融合解决感知精度的问题,通过多角度传感器的感知融合解决感知盲区的问题。C-V2X设备一方面可以作为多源传感器的时钟同步源,另一方面也可以将感知结果快速通知到区域内车辆。

(3) 自动驾驶园区。

自动驾驶将率先在物流园区、港口、办公区域等相对封闭的场地、相

对固定的路线内实施。在园区内建设完善的数字化基础设施,为园区内的自动驾驶车辆提供感知、计算服务,可以极大地降低这些车辆的成本和功耗,同时使得这些车辆的轻量化、小型化成为可能。

园区可以在自动驾驶车辆行驶路线上部署完备的传感器,对所有交通参与者的状态进行上帝视角的感知,这将极大降低单车传感器的投入。同时,园区还可以在道路边缘设置计算单元,利用边缘计算技术对于区域内自动驾驶车辆的行驶路径进行协同规划,一方面降低单车计算成本,另一方面可以实现有效协同,解决“驾驶相遇”的联合决策问题。此外,当自动驾驶车辆进入交叉口等复杂交通场景时,还可以使用5G技术进行远程人工接管。

从另一个角度看,在自动驾驶运营早期,园区需要对所有自动驾驶车辆和园区内的道路基础设施进行全程全时监管。C-V2X技术可以构造园区的数字神经网络,不仅能快速感知园区内所有交通事件,而且能为园区的应急处置、远程动态控制提供可能。

6 结束语

智慧交通已发展到基于车路协同的第4阶段。在车路协同技术的帮助下,人、车、路、云将有机结合,保障通行安全,提升通行效率。作为车路协同4大关键技术之一,V2X通信技术将伴随车路协同技术不断发展。

在通信技术发展的推动下,车路协同技术已经从1.0进入2.0,并正在向3.0演进。接下来,路侧感知方案

将进一步向低时延、高精度方向演进,交叉口俯视感知将能同时处理更大范围的运动目标,交通优化将向精细化发展,这些都要求通信技术同步演进。

不同交通场景下车路协同需要解决的问题不同,因此采用的部署方案也有差异。本文中,我们给出了高速公路、城市街道、自动驾驶园区3种典型场景下C-V2X车路协同方案的部署建议,为车路协同的落地实施提供了建设性的参考方案。

参考文献

- [1] 郭戈,许阳光,徐涛,等.网联共享车路协同智能交通系统综述[J].控制与决策,2019,34(11):2375-2389
- [2] 李俨,曹一卿,陈书平,等.5G与车联网——基于移动通信的车联网技术与智能网联汽车[IM].北京:电子工业出版社,2019
- [3] 黄陈横.V2X无线接入技术演进及组网方案研究[C]//2019广东通信青年论坛.广东:广东通信协会,2019:8
- [4] LG Electronics. New WID on NR Sidelink Enhancement: RP-193231[S]. 3GPP, 2019
- [5] CABANNES T, FIGHIERA V, SUNDT A, et al. The Impact of GPS-Enabled Shortest Path Routing on Mobility: A Game Theoretic Approach[C]//Transportation Research Board 97th Annual Meeting. USA, 2018:1

作者简介



张杰,大唐高鸿数据网络技术股份有限公司车联网事业部总监;拥有17年的移动通信领域从业经验,先后从事3G/4G/5G/C-V2X的算法设计、标准制订、产品研发等工作,目前主要负责C-V2X相关技术、产品和解决方案的规划工作;参与了全球通信标准的制订,先后参与和负责多项国家重大专项课题;获得几十项发明专利授权。



基于数字孪生的网联 自动驾驶测试方法研究

Test Method of Connected and Automated Vehicles Based on Digital Twin

葛雨明 /GE Yuming¹, 汪洋 /WANG Yang², 韩庆文 /HAN Qingwen²

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

2. 重庆大学, 重庆 400030)

(1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;

2. Chongqing University, Chongqing 400030, China)

摘要: 数字孪生 (DT) 可以虚拟化地呈现出系统的整个生命周期, 非常适合在自动驾驶测试中使用。提出了在有限环境下利用 DT 进行网联自动驾驶测试的方法, 即在自动驾驶的仿真测试环境中, 利用 DT 的映射实现虚拟复杂道路场景下真实的网联自动驾驶车辆测试。相关实验说明, 该方法能够有效地支持开展网联自动驾驶测试。

关键词: 自动驾驶; DT; 虚拟仿真

Abstract: The Digital Twin (DT) provides virtual representations of systems along their lifecycle, and should be used in autonomous driving test. In this paper, a method of using DT to carry out networked couplet autonomous driving test in a finite environment is proposed: In the simulation test environment of automatic driving, the test of real automatic driving vehicles under the virtual complex road scene can be realized by using the DT mapping. The experimental results show that this method can effectively support the development of the autonomous driving test.

Keywords: autonomous driving; DT; virtual simulation

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200220.2219.002.html>

网络出版日期: 2020-02-21

收稿日期: 2019-12-22

数字孪生 (DT) 是物理系统 (物理孪生) 的数字化表示, 能够模拟运行系统的整个生命周期并与物理孪生进行同步的映射^[1]。DT 的概念始于 2002 年, 最初被用于航空航天领域。最近, 其他一些工业部门如制造业、工业工程, 以及机器人领域也逐步开始了解和尝试这项技术^[2]。

随着自动驾驶的发展, 对 DT 功能的测试和验证成为自动驾驶汽车研发的重大挑战之一^[3]。一些研究人员认为

为使用仿真测试可以很好地解决这一难题^[4], 例如在虚拟仿真中, 进行的软件测试 (SIL)、硬件在环测试 (HIL)、车辆在环测试 (VEHIL) 以及混合仿真测试^[5]。它可以快速模拟任何场景, 但不能验证真实的情况。相比仿真测试, 传统汽车行业更依赖现场测试。然而, 真正的道路测试在极端情况下是昂贵且费时的, 有一些场景甚至无法进行测试^[6-7]。2017 年, M-City 发布了一份研究报告^[8], 提出了一种数据驱动的方法来评估自动驾驶汽车。与纯虚拟仿真不同的是, 它使用真实世界的驾驶数据来构建测试场景。这是一种面向

DT 的方法, 但这种方法是从主动安全的角度发展起来的, 没有引入车用无线通信 (V2X) 技术。

V2X 技术不仅可以为道路车辆提供非视距的感知信息, 还可以在车辆和云数据中心之间建立通信链路; 因此, 我们认为 V2X 技术可以作为连接物理空间和网络空间的纽带, 在基于 DT 的自动驾驶测试中发挥重要作用。V2X 技术可以将场景信息发送到道路的被测车辆上, 并提供道路虚拟测试功能。尽管 DT 被认为是一项颠覆性的技术, 但它仍处于概念阶段, 只有少数研究专门讨论了其在制造领域的

基金项目:

国家重点研发计划资助 (2018YFB0105200)

构建和实现方法。所以,目前还没有成熟的基于DT的自动驾驶测试方案。

近几年,中国信息通信研究院发布布局了基于DT的网联自动驾驶测试原型系统,利用V2X技术实现传感器数据上传和虚拟场景信息发布的全过程,并进行了道路车辆测试。相应的测试结果表明,该系统能够支持低延迟的网联自动驾驶测试。

1 基于DT的网联自动驾驶测试框架

在实践中,不同行业对于DT的定义和理解可能不同。自动驾驶开发人员将其视为一套增强现实方案。在某种意义上,面向DT的测试系统是指通过通信网络在现实世界(物理空间)收集数据,利用网络空间的大规模数据处理技术对数据进行分析,并将结果反馈到物理空间来解决现实世界问题的信息物理系统(CPS)。每个CPS包括智能机器、存储系统和生产设施,

它们可以自主和智能地交换信息,做出决策并触发动作,能够互相控制^[9]。

基于DT的网联自动驾驶测试方法包括2个关键步骤:一是采集真实的驾驶数据,二是生成复杂场景。道路车辆通过传感器和V2X采集和发布行驶信息,并完成数据融合处理,然后将相应的信息上传到仿真平台。仿真平台根据实时驾驶信息选择测试场景,并将相应的信息反馈给道路车辆。道路车辆控制系统对场景信息进行响应,并将响应输出并上传到仿真平台。仿真平台对测试结果进行判断,生成测试报告。如图1所示,该测试方案包括3层,即实地测试层、网络传输层和实验测试层。

(1)实地测试层。实地测试层包括3部分:被测车辆、虚拟汽车与平视显示器(HUD)、真实的测试场地等。

车辆行驶信息由车内传感器采集,真实驾驶环境信息由周围车辆和

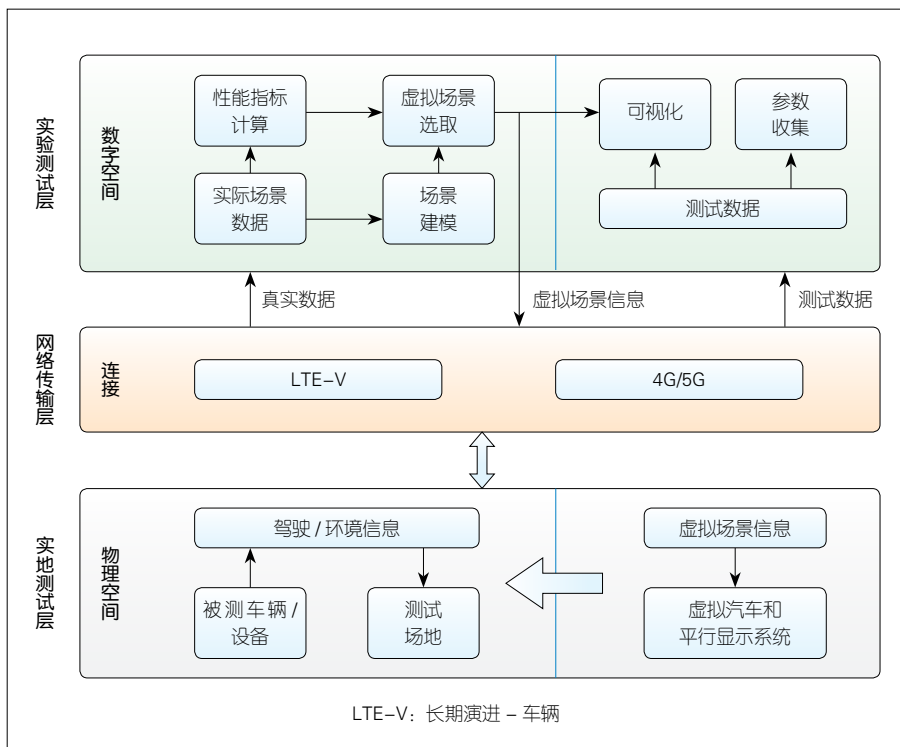
雷达、摄像头等路侧设备采集,虚拟场景信息由云数据库提供,并在HUD上显示。这里假设所有车辆都配备了LTE-V2X和4G/5G模块。

(2)网络传输层。网络传输层包括2种通信方式:一种是LTE-V2X的直连通信链路,另一种是4G/5G蜂窝通信链路。LTE-V2X用于采集环境信息,如道路信息、周围车辆行驶状态、行人状态等,4G/5G用于建立物理空间和虚拟空间之间的连接。显然,网络传输层的性能会对自动驾驶测试的实时性产生致命的影响,可以通过车辆控制器的响应延迟来体现。这里我们将基本性能参数做了如下的定义。

- 被测车辆速度: 0~130 km/h;
- 通信覆盖半径: >300 m;
- 车辆状态信息更新频率: 10~20 Hz;
- 数据速率(下行) >100 Mbit/s, 数据速率(上行) >20 Mbit/s;
- 传输延迟 <20 ms。

此外,表1列出了需要通过V2X发送的参考消息内容,以用于开展网联自动驾驶测试。

(3)实验测试层。实验测试层包括通道建模、性能指标计算、虚拟化和性能采集3个部分。在场景生成过程中,要考虑道路环境(车道、车道线、路面、天气和光照、场景要素)、交通状况(车流、行人拥挤、自适应巡航控制)、交通参与者(车辆、行人、障碍物)和环境传感器(雷达、摄像机、全球定位系统/地图、无线通信)等影响因素,构建1:1的数字场景模型。模拟器应支持复杂的道路场景建模,如图2所示。测试过程中,测试人员会选择测试场景,并将相应的场景信息通过4G/5G网络发送到被测车辆。



▲图1 基于数字孪生的网联自动驾驶测试框架

2 测试场景设计

该测试方案包括纯虚拟测试、传

传感器数据测试和实车测试 3 个阶段，如图 3 所示。

2.1 纯虚拟测试

DT 测试方案的第 1 阶段是纯虚拟测试。这种测试与传统的虚拟仿真类似，主要步骤如下：

- 第 1 步，根据测试要求和数据构建道路场景；
- 第 2 步，设置车辆参数（行驶参数和传感器参数）；
- 第 3 步，增加混合交通干扰；
- 第 4 步，添加控制算法；
- 第 5 步，启动实验仿真。

2.2 传感器数据测试

测试的第 2 阶段是基于真实传感器数据的测试，如图 4 所示。在此过程中，真实世界的传感器数据被收集并通过蜂窝网络发送到数据中心。远程的驾驶系统根据传感器数据进行决策，并将决策信息反馈给测试系统。

2.3 实车测试

在这个阶段，使用真实车辆作为被测装置。车辆信息通过 4G/5G 网络发送到虚拟仿真器。图 5 中显示了 2 个典型的仿真场景。在虚拟仿真测试的基础上，加入交通流和自动驾驶算法来模拟真实场景，并及时回传给真实的自动驾驶车辆。控制器的决策结果将送回中央控制仿真器，测试将在自动驾驶算法的控制下完成。

3 测试结果演示及分析

3.1 测试结果演示

为了验证测试架构的有效性，我们在中国信息通信研究院办公地进行了基于 DT 的网联自动驾驶测试原型系统的搭建，相关测试的具体情况如图 6 所示。

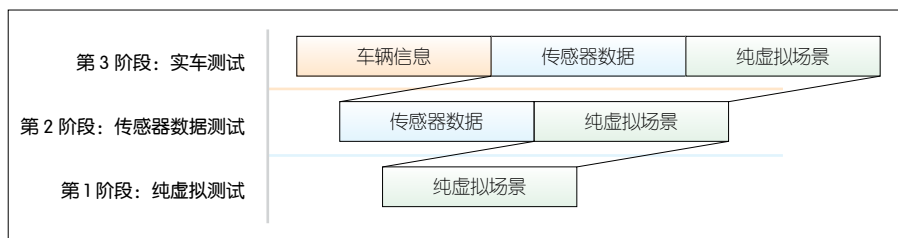
▼ 表 1 基于数字孪生的网联自动驾驶测试的参考消息内容

消息传输方向	信息	说明
虚拟空间至物理空间	交通参与者列表	由虚拟仿真生成
虚拟空间至物理空间	交通参与者 ID	唯一 ID，由虚拟仿真器分配
虚拟空间至物理空间	时间	时间戳
虚拟空间至物理空间	位置（经度和纬度）	交通参与者的水平位置信息
虚拟空间至物理空间	位置（海拔）	交通参与者的垂直位置信息
虚拟空间至物理空间	交通参与者信息	交通参与者的定制信息
虚拟空间至物理空间	车辆 ID	唯一 ID，由虚拟仿真器分配
虚拟空间至物理空间	车辆控制器	测试开始：模拟器生成测试场景，通知被测车辆开始测试； 测试中断：检测到异常事件，模拟器通知测试车停车； 车辆行驶到指定位置：模拟器通知被测车辆移动到指定位置并停止
虚拟空间至物理空间	时间	时间戳
虚拟空间至物理空间	目标位置（经度和纬度）	目标水平位置信息
虚拟空间至物理空间	目标位置（海拔）	目标垂直位置信息
物理空间至虚拟空间	车辆 ID	被测车辆的唯一 ID，由虚拟仿真器分配
物理空间至虚拟空间	时间	时间戳
物理空间至虚拟空间	位置（经度和纬度）	被测车辆的水平位置信息
物理空间至虚拟空间	位置（海拔）	被测车辆的垂直位置信息
物理空间至虚拟空间	车辆状态信息	被测车辆的定制信息

ID：身份标识号



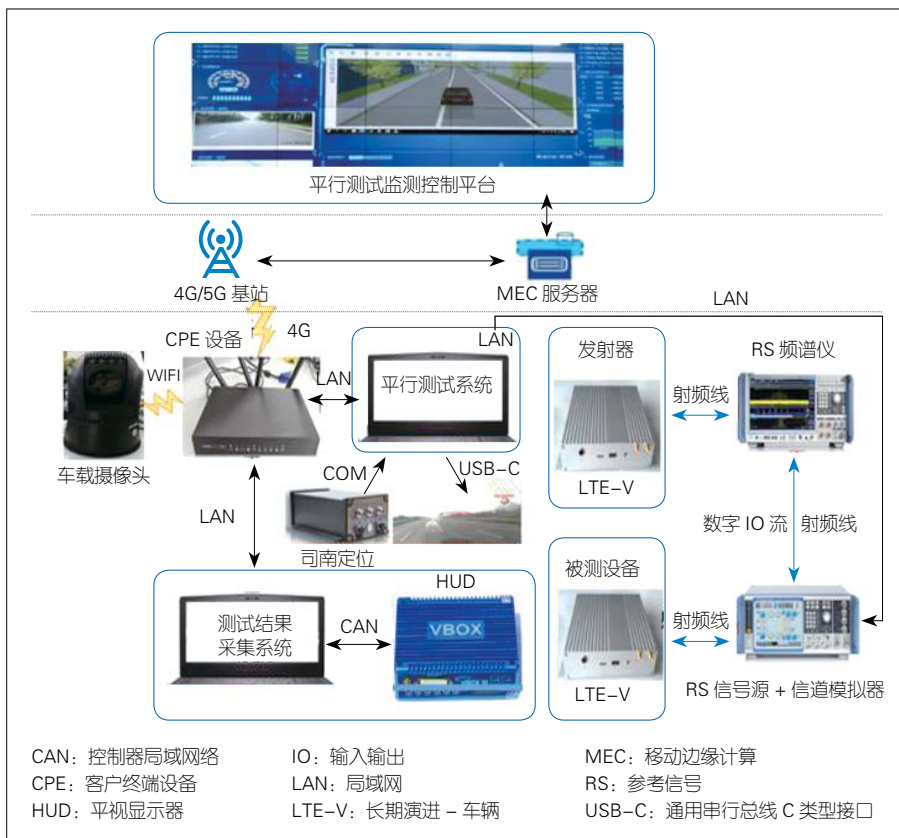
▲ 图 2 道路场景仿真模拟模拟器



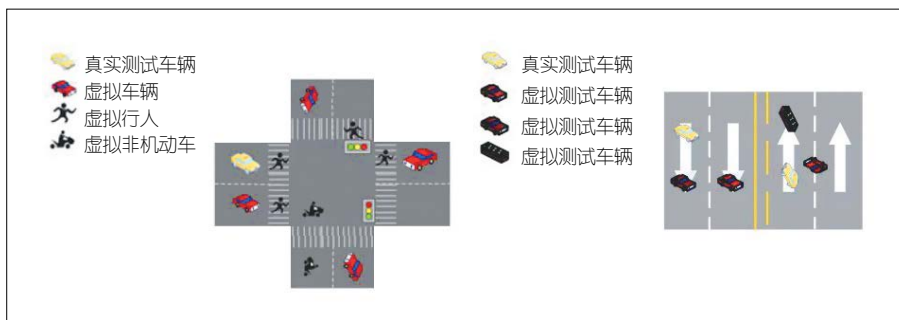
▲ 图 3 测试阶段

由车载传感器和路侧单元收集被测车辆周围环境的信息。每台设备根据其配置捕获周围信息，然后将收集

到的同一时间戳标签下的数据与网络上的其他设备同步。物理系统的信息上载到运行 DT 应用程序的服务器。



▲图4 传感器数据测试



▲图 5 2 种典型的实车测试评估场景

图 6 c) 中显示的是前向碰撞警告应用验证过程。虚拟物体显示在中控模拟器中, 真实的车辆行为会通过摄像头反馈到中控台。

3.2 测试结果分析

通过基于 DT 的网联自动驾驶测试原型系统的试验,我们认为 V2X 技术不仅可以支撑车辆行驶安全、效率提升等应用功能,还可以用于网联自动驾驶测试。此外,自动驾驶测试也

可以被认为是 V2X 技术的重要应用场景之一。

虽然该测试方案已经被证明是有效的,但它只是一个基本的原型系统,还有很大的改进空间。

(1) 汽车产业界对自动驾驶的响应延迟判断尚未达成一致。也就是说, 我们不确定所提出的方案是否能满足自动驾驶的响应延迟要求。随着自动驾驶的发展, 相应的通信性能要求需要被定义。基于 DT 的网联自动

驾驶测试也将被认为是 4G/5G 通信网络的一种应用。应在此基础上对测试流程继续改进。

(2) 在该方案中, 车内测试人员看不到在网络空间生成的虚拟场景, 用户体验不佳, 因此, 虚拟现实 (VR) / 现实增强 (AR) 的结合可以是之后的研究方向。

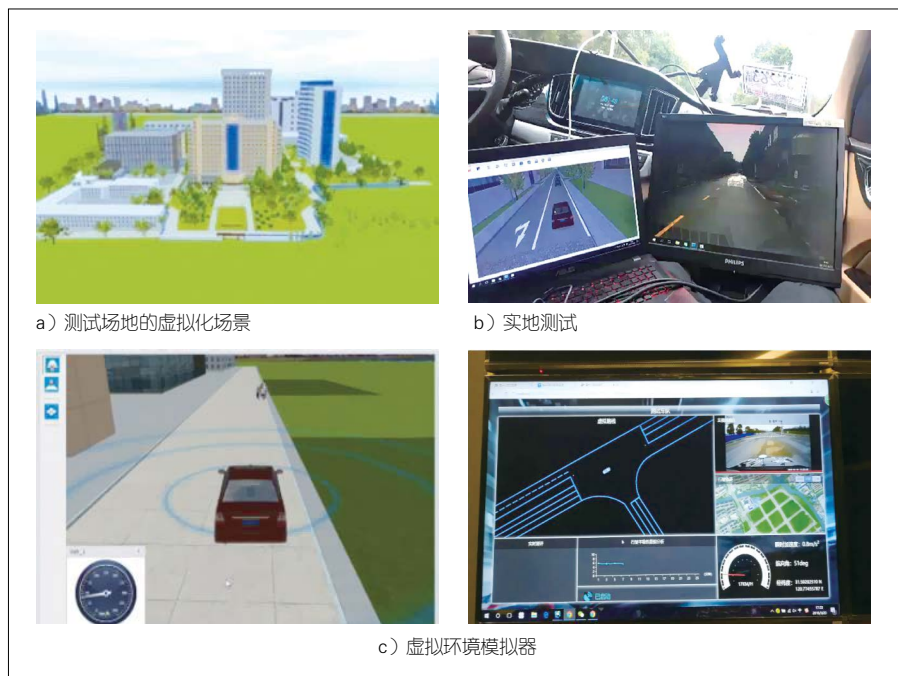
(3) 需要保证生成的虚拟场景与真实的交通场景相吻合。到目前为止, 交通数据库并不完备。也就是说, 当前不能确保测试场景能够覆盖和表现真实的交通场景。随着交通数据库的完善, 测试场景库也将不断完善。

(4) 作为通信场景的一种应用，基于 DT 的网联自动驾驶测试必须基于统一的通信协议来实现，且需要定义数据集和数据交换格式；因此，我们需要制订相应的消息层协议，以保证在不同的测试示范区能够对不同厂商的产品进行测试。

(5) 如何选择与真实场景相匹配的测试场景。自动驾驶测试的关键点之一是场景的选择。显然，所有虚拟测试场景都是从真实的交通场景衍生出来的。为了识别自主控制算法的弱点，我们总是选择最坏的场景来构建虚拟场景库，因此，虚拟测试不能准确评估真实情况下的风险或概率。然而到目前为止，我们还不能提供真实道路场景测试与虚拟场景测试之间可信的映射关系。换言之，我们应该建立一种基于 DT 的网联自动驾驶性能评估体系，用于政府标准化的测试，或是推断自动驾驶车辆的预期安全性等。

4 结束语

随着 V2X 技术的发展，汽车行业正在考虑将 V2X 相关应用功能嵌入到产品中。V2X 并不局限于车辆行驶安全、交通效率提升等应用，它是一项



▲图 6 测试结果演示

在其他应用领域也很有前景的技术。在基于 DT 的网联自动驾驶测试方案中，V2X 技术起到了连接虚拟空间和物理空间的重要作用。

文章中我们介绍了一种基于 DT 的网联自动驾驶测试框架；使用 4G/5G 网络在虚拟和物理空间之间建立通信链路，使用 V2X 技术采集车辆信息和道路信息。相关实验结果表明，该架构能够有效地支撑自动驾驶测试。之后，我们还将完善场景库，优化控制机制。上述相关研究工作对加快自动驾驶技术成熟和商业化推广应用也有着重要意义。

致谢

本论文所涉及项目的研究过程中，中国信息通信研究院于润东工程师、王妙琼工程师、李璐工程师承担了其中大量试验工作，对他们谨致谢意！

参考文献

- [1] SOUZA V. A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies[C]// 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). USA: IEEE, 2019
- [2] NEGRI E, FUMAGALLI L, MACCHI M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 1(11):939-948
- [3] TAO J, LI Y, WOTAWA F, et al. On the Industrial Application of Combinatorial Testing for Autonomous Driving Functions[C]//2019 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW). China: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICSTW.2019.00058
- [4] IVANOV A M, SHADRIN S. Development of Autonomous Vehicles' Testing System[EB/OL]. [2020-12-22] https://www.researchgate.net/publication/323350483_Development_of_autonomous_vehicles'_testing_system
- [5] HUANG W, WANG K, LV Y, et al. Autonomous Vehicles Testing Methods Review[C]//IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Brazil: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795548
- [6] HUANG W, WEN D, GENG J, et al. Task-Specific Performance Evaluation of UGVs: Case Studies at the IVFC[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 1969-1979. DOI: 10.1109/TITS.2014.2308540
- [7] WANG F, WANG X, LI L, et al. Digital and Construction of A Digital Vehicle Proving Ground[C]//IEEE Intelligent Vehicles Sym-

posium. USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/IVS.2003.1212968

- [8] ZHAO D, PENG H. From the Lab to the Street: Solving the Challenge of Accelerating Automated Vehicle Testing[EB/OL]. (2017-01-15)[2019-12-22]. <https://arxiv.org/abs/1707.04792>
- [9] TAN Y, YANG W, YOSHIDA K, et al. Application of IoT-Aided Simulation to Manufacturing Systems in Cyber-Physical System[J]. Machines, 2019, 7(1): 2. DOI: 10.3390/machines7010002

作者简介



葛雨明，高级工程师，中国信息通信研究院主任工程师、IMT-2020（5G）推进组 C-V2X 工作组组长、工业互联网联盟（IIC）汽车特设组联执主席、工业互联网产业联盟（AII）国际合作与对外交流组主席等；主要从事车联网、自动驾驶、工业互联网领域的相关政策、产业、标准和前沿技术研究工作；发表论文 20 余篇、中英文行业白皮书 10 余篇，参与出版中文专著 7 本、英文专著 1 本。



汪洋，重庆大学在读硕士研究生；研究方向为车辆信息处理、车网信息交互。



韩庆文，重庆大学微电子与通信工程学院副教授、博士；主要从事车联网相关研究，包括车网信息交互、智能网联汽车测试、车辆信息处理；发表论文 20 余篇，拥有发明专利 10 余项。

基于 C-V2X 直连通信的车辆编队行驶性能优化

Driving Performance Optimization of Vehicle Platooning Based on C-V2X Sidelink

付思雨 /FU Siyu, 姜之源 /JIANG Zhiyuan, 张舜卿 /ZHANG Shunqing

(上海大学, 上海 200000)

(Shanghai University, Shanghai 200000, China)



摘要: 研究了蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术使能的车辆编队行驶。针对直连通信 (PC5) 模式 4 通信协议可靠性低的特性, 以权衡包可靠性和最终编队串稳定性能的关系为出发点, 提出了传输间隔优化与平行驾驶 2 种性能优化方案, 并通过城市交通仿真器 (SUMO) 进行了仿真验证。结果证明所提方案均能在基于模式 4 的低可靠性传输下实现编队性能的优化。

关键词: 车辆编队; 模式 4; 包可靠性; 最大间距误差

Abstract: The vehicle platooning technology using cellular vehicle-to-everything (C-V2X) is studied in this paper. For the low reliability of PC5 Mode 4 communication protocol, two performance optimization schemes of transmission interval optimization and parallel driving are proposed based on the relationship between packet reliability and final formation performance. Subsequently, the two schemes are simulated by the traffic simulator—simulation of urban mobility (SUMO). The results show that the proposed schemes can optimize the platooning performance under the low reliability transmission based on Mode 4.

Keywords: vehicle platooning; Mode 4; packet reliability; maximum spacing error

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20200222.1522.006.html>

网络出版日期: 2020-02-23

收稿日期: 2019-12-20

1 智能网联自动驾驶

车辆已经成为人类社会生产、生活的重要工具。近些年, 车辆自动驾驶技术成为学术界、工业界研究的热点: 首先, 自动驾驶技术可以大幅提高交通安全性, 仅考虑现已大规模商用的、采用低等级辅助驾驶的车辆即可将事故发生率降低 60% 以上, 而采用更高等级的自动驾驶将有望进一步大幅提高交通安全性。其次, 自动驾驶可以提高社会效率。这一点可以从 2 个角度理解: 自动驾驶可以提高交通效率; 可以替代人工驾驶员, 提

高社会生产率。

现有的自动驾驶解决方案大部分聚焦在基于单车智能的感知和决策上, 其主要限制因素包括感知能力的局限, 例如雷达探测距离、建筑物和其他车辆遮挡的限制, 摄像头视频、图像认知能力的局限, 以及单车处理非结构化数据 (原始多源异构感知数据) 时计算、通信能力受限等。而车联网技术可以实现智能网联辅助的自动驾驶, 通过车联网在路口的汽车之间建立快速、可靠的通信连接, 形成结构化数据在车辆之间有效交互, 大大降低了车辆自身的感知和处理需求, 同时通

过全局决策可以有效地提高交通效率、降低事故发生率。该技术的一个典型应用场景即高速公路的车辆编队场景。

2 车辆编队控制模型

车辆编队, 即多辆车以一定的车间间距形成稳定的队列行驶。通过减小车辆与车辆之间的距离, 车辆编队技术可以提高道路容量, 同时使每辆车受益于其前车而减少受到的空气阻力, 进而降低燃油消耗^[1]。此前, 瑞典皇家理工学院的学者 A. A. ALAM 等已经通过高速公路实车实验证明, 当 2 辆相同的标准载货车以 80 km/h 的速

度和 25 m 的间距行驶时, 后方跟随车辆所受空气阻力将下降 30 %, 整体的燃油经济将提升 7 %^[2]。而未来提出的车辆编队性能要求队列内车辆能在 100 km/h 的速度下仍然维持 8~25 m 的间距, 同时节省 7%~15 % 的油耗。更大的速度和更小的间距意味着更大的碰撞风险, 由此需要对车辆编队技术进一步提升。

目前对车辆编队的研究主要集中在研究如何确保车队的串稳定性。所谓串稳定性, 即队列内车辆之间的距离误差不会沿着队列传播而放大, 并且所有的误差保持相同的符号以避免碰撞^[3]。确保串稳定性的方法根据对距离误差的定义不同可被分为 2 类: 恒定车头时距法和恒定间距法。在基于恒定时距的方法中, 距离误差被定义为车辆与前车的实际车头时距和目标时距的差值; 为使其逐渐收敛为零且不沿队列传播, 车辆往往只需实时探测与前车的间距即可。这种方法通常不需要来自其他车辆的大量数据, 但其车间间距会随速度变化而变化, 可能会达到一个非常大的值; 因此只能实现较低的道路容量。为了实现更高的容量和更低的燃油消耗, 我们通常选择第 2 种方法, 即以频繁进行车间通信为代价使车辆之间的距离保持恒定。

在恒定间距方法中, 可以根据空间位置和功能, 将队列中的车辆分为头车和成员车。其中成员车的行驶由头车控制, 控制公式 (1)^[4] 所示, 头车通过该公式计算每个成员车应执行的加速度。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{i_des} = & (1 - C_1)\ddot{x}_{i-1} + C_1\ddot{x}_1 - \\ & (2\xi - C_1(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}))\omega_n\dot{\varepsilon}_i - \\ & (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n C_1(V_i - V_1) - \omega_n^2 \varepsilon_i \quad (1) \end{aligned}$$

在公式 (1) 中, $\ddot{x}_{i_des}$ 为第 i 辆车应执行的加速度, $\ddot{x}_{i-1}$ 为第 $i-1$ 辆车的

当前加速度, $\ddot{x}_1$ 为头车的当前加速度, V_i 为第 i 辆车的当前速度, V_1 为头车的当前速度, ε_i 为第 i 辆车与前车 (第 $i-1$ 辆车) 之间的间距误差, 等于当前间距减去 i 车应与其前车保持的目标间距, $\dot{\varepsilon}_i$ 为间距误差的倒数。以上参量均为变量, 以下还有 3 个可调常量, 它们影响等式右边每个参量对 i 车应执行加速度的作用大小, 但不影响最终队列的形成。其中, C_1 表示头车相较于前车对跟随车辆的影响占比, ξ 为阻尼系数, 其临界值为 1, ω_n 表示控制器的带宽。该方法的核心思想即通过让队列中的车辆执行上述公式计算的理想加速度, 使间距误差逐渐收敛为零, 最终确保串稳定性。在公式 (1) 中, 车辆的理想加速度取决于头车和前车的加速度和速度, 这些信息不能直接通过传感器测量, 而需要车辆之间的信息交互; 因此, 在这种恒定间距的方法中, 通信是必不可少的。

3 蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术直连通信

3.1 C-V2X

车用无线通信技术 (V2X) 意为车辆到一切, 其包含 4 种类型的通信: 车到车 (V2V)、车到基础设施 (V2I)、车到网络 (V2N)、车到行人 (V2P), 代表车辆与周围环境中不同实体之间的信息交互。其中, 有关车辆编队的车辆控制方面, 涉及的主要通信类型是 V2V, 用于在成员车和头车之间交互状态信息和控制信息。

用于 V2X 的通信技术主要有 2 种, 一种是专用短程通信 (DSRC) 技术, 一种是 C-V2X 技术。其中 DSRC 采用了电气和电子工程师协会 (IEEE 802.11p 和 IEEE 1609) 等系列标准, C-V2X 目前采用了第三代合作伙伴计划 (3GPP) R14 提出的长

期演进 (LTE) -V2X 标准^[5]。相对于 DSRC, C-V2X 主要有以下几点优势:

(1) 标准可演进。DSRC 所采用的 IEEE 802.11p 标准早在 2010 年已经停止更新了, 而 C-V2X 的系列标准仍在不断演进, 从 LTE 移动宽带业务 (MBB) 到 LTE-V2X, 再到未来的新空口 (NR) -V2X。

(2) 技术领先。C-V2X 目前已实现了 DSRC 的 2 倍覆盖范围, 1.4 倍交通容量, 0.8 倍延迟和 1.6 倍可靠性。

(3) 商业更优。C-V2X 可实现更低的芯片成本 (例如, 芯片同时支持 MBB 和 D2D) 和更丰富的应用生态 (借助于蜂窝网络)。

在 LTE-V2X 中, 有 2 种通信接口: 一种是短距离直连通信接口——PC5, 适用于待通信设备间距较近的情况; 另一种是终端和基站之间的通信接口——Uu, 主要适用于网络通信, 即设备间距较远的情况。PC5 接口又提供了 2 种资源分配方法: 模式 3 为集中式资源分配, 用户设备 (UE) 从基站 (eNodeB) 请求传输资源, 随后 eNodeB 采用半持续、动态的调度方法分配资源; 模式 4 为分布式资源分配, 不涉及蜂窝基础设施, 用户设备 (UE) 自主进行资源选择^[6]。在实际的车辆直接通信中, 从延迟和开销的角度来看, 分布式资源分配通常比集中式资源分配更有利。与分布式资源分配相比, 集中式资源分配除了覆盖范围有限外, 还需要额外的基站与车辆之间的交互, 这可能会导致更多的延迟和开销。此外, 如果连接到基站的车辆速度较大, 则可能需要频繁的切换。基于这些原因, 在车辆编队的 V2V 通信中, 采用了与基站无关的 PC5 模式 4 技术。

3.2 直连通信模式 4

模式 4 采用了半持续传输 (SPT)

机制进行资源选择,该机制定义了一种资源重选计数器,当每个 UE 开始发送数据时均会被分配一个计数器,计数器的初始值根据 3GPP 规定应从 [5, 15] 中随机抽取。随着 UE 每发送一次数据,计数器的值会逐渐递减。在此期间 UE 会保持选择同一个资源进行发送,直到该值减为零,则触发重选,即 UE 可以重新选择一个资源并重置计数器。因为模式 4 不具有 IEEE 802.11p 中的冲突避免机制,为减少资源冲突,模式 4 中定义了一个 1 000 ms 的感知窗口。每当 UE 要选择资源时,都会打开如图 1 所示的资源选择窗口。此时,感知窗口会为其提供前 1 000 ms 的资源选择历史,结合 SPT 机制,可以帮助 UE 判断哪些资源可能会被其他 UE 占用。从图 1 还可以看出,模式 4 中信道可以被划分成多个子信道并行传输数据。这也是其相对于 IEEE 802.11p 的优势,而具体子信道的划分数目取决于数据的大小和物理层采用的调制编码方式。除了对信道进行划分外,资源选择窗口的时间长度也可以划分成多个传输时间间隔 (TTI)。根据协议规定,划分数目应取值于 [20, 100] 之间,每个 TTI 长度应取值 1 ms^[7]。

基于传输特性,模式 4 的可靠性将远远低于集中式分配方案,其原因有 2 个:(1) 模式 4 仅基于感知并且是半持续的,一旦发生数据包冲突,相关车辆由于半双工效应将无法意识

到冲突,直到进入重新选择之前半持续特性将会导致连续的冲突,并且发送端将一直无法意识。(2) 尽管在半持续调度方案中的重选过程可以避免持续性数据包冲突,但其也可能以一定的概率导致额外的冲突。

显然,模式 4 的这种低可靠性很难满足超可靠低时延通信 (URLLC) 的要求——时延低至 2 ms,可靠性高达 99.999 %。目前实现的 URLLC 通常以牺牲宝贵的时间/频率/空间资源为代价来降低延迟,提高可靠性,其实现往往基于总资源数高度理想化的假设。对于实际的车辆编队场景,多辆车共享一段有限的时、频资源,URLLC 几乎难以实现。由此,基于模式 4 传输的车辆编队似乎永远达不到 URLLC,这是否等价于车辆编队的性能会长时间难以提升呢?另外,假设实现了 URLLC,是否就意味着性能达到最优了呢?

4 传输优化设计方案

本文中,我们设计的优化机制的实现目标分为 2 个层次:第 1 层通过对传输机制的优化实现最终编队性能的提升;第 2 层通过观察优化前后数据包可靠性的变化,得出包可靠性与实际性能的关系。

4.1 传输间隔优化

本文中,我们设计的传输间隔优化方案主要针对的优化目标是合作感

知信息 (CAM) 的传输周期。车辆编队过程中产生的合作信息主要有 2 种:一种是成员车的状态信息,包含其当前的速度以及与前车的间距信息;一种是头车的控制信息,包含每辆车应执行的理想加速度。我们对这 2 种信息的传输周期取值进行了优化,预得出了性能最优时的对应值。

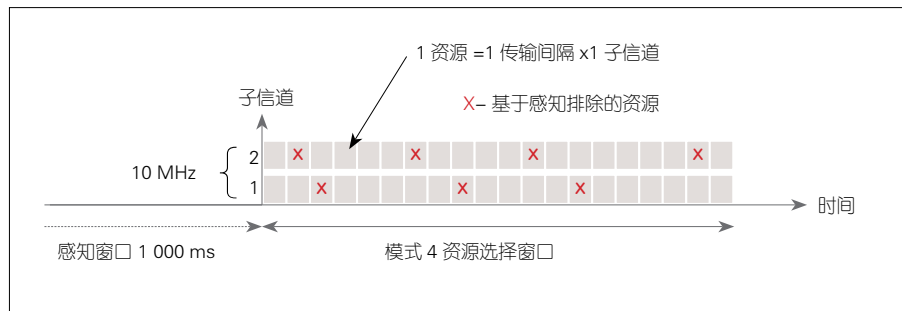
4.2 平行驾驶

每辆成员车均需要定期广播状态信息,状态数据包占了编队过程中总数据包的很大比重;因此,我们提出了一种平行驾驶机制来减少该类包的数量。该机制的核心思想即把成员车的运动模型同步到头车,以便头车预测成员车的运动状态,从而减少成员车需要广播的状态包。通过以下人类交流的示例,我们可以简单地理解该机制。

假设爱丽丝和鲍勃住在不同的城市,鲍勃每天都给爱丽丝写一封信,告诉她那天鲍勃所在的城市是否下雨(这是典型的状态更新设置,采用了固定的更新间隔——一天)。进一步假设鲍勃所在的城市很少下雨,并且他很快发现这一特点,然后与爱丽丝交流并定义了一个模型,该模型规定只要没有信,就没有雨,这样使得状态更新更加地有效(从发送更少的信的角度出发)。显然,这个模型是一个基于时间序列的预测模型,模型输出为“不下雨”,状态为“是否下雨”。将其映射到平行驾驶机制中,对应的状态即为当前车辆状态,对应的模型输出即如公式 (2) 所示。

$$\begin{bmatrix} model_{11} & model_{12} & model_{13} \\ model_{21} & model_{22} & model_{23} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_l \\ v_l \\ a_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,模型矩阵 Model 是车辆的运动模型, s_l , v_l 是车辆的上一时刻状态(与前车的间距、速度), a_{des} 是车辆从上



▲图 1 蜂窝车用无线通信技术模式 4 资源选择窗口

一时刻到当前时刻执行的加速度（假设车辆在短时间内匀速）， s_2 和 v_2 为模型的输出结果，也即车辆的当前状态的预测值。该机制的具体运行过程主要如下：

（1）成员车定期（ T_1 ）将自身的前一段时间内的驾驶数据代入上述模型中，迭代训练出运动模型矩阵 Model，然后广播给头车；

（2）成员车定期（ T_2 ）检测模型的预测结果与实测值的差值，若高于给定阈值则发送状态更正信息（该阈值可根据信道状态和编队性能实时调整）；

（3）头车定期（ T_3 ）利用模型进行状态信息预测（若收到状态更正信息，则用更正值代替预测值，并且下一次预测取此更正值作为输入），并据此计算每辆成员车的理想加速度，然后广播给成员车。

5 仿真实验

5.1 场景与参数设置

我们模拟了一条双向四车道的高速公路，长度为 1 500 m，并在其上放置了 6 个队列，它们在稳态下（即队列形成后）在高速公路上彼此靠近行驶。其中每个队列包含 8 辆车（7 辆为成员车），车身长度均为 5 m。我们仅考虑纵向驱动控制，即车辆沿直线行驶。队列内车辆间的目标间距是预先设定的，我们取实际间距与目标间距的最大偏离值（最大间距误差）作为性能指标，以评估队列的串稳定性。

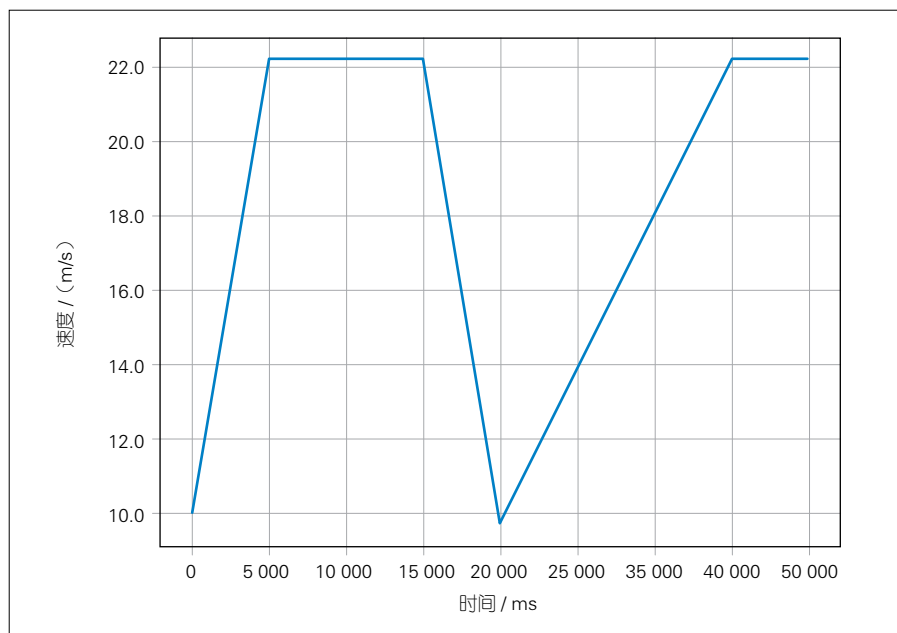
在每个队列中，头车均自由驾驶，而成员车均由头车根据控制算法和无线信号进行控制，以和前车保持目标间距。头车的速度配置如图 2，在第 0 s，头车以 10 m/s 的速度进入路网，然后在 5 s 内加速到 22.2 m/s；从第 15 s 开始，头车在 5 s 内减速至 9.7 m/s，然后在 15 s 内加速至 22.2 m/s；此后，

头车一直保持匀速直到仿真结束（第 40 s）。仿真步长为 1 ms。

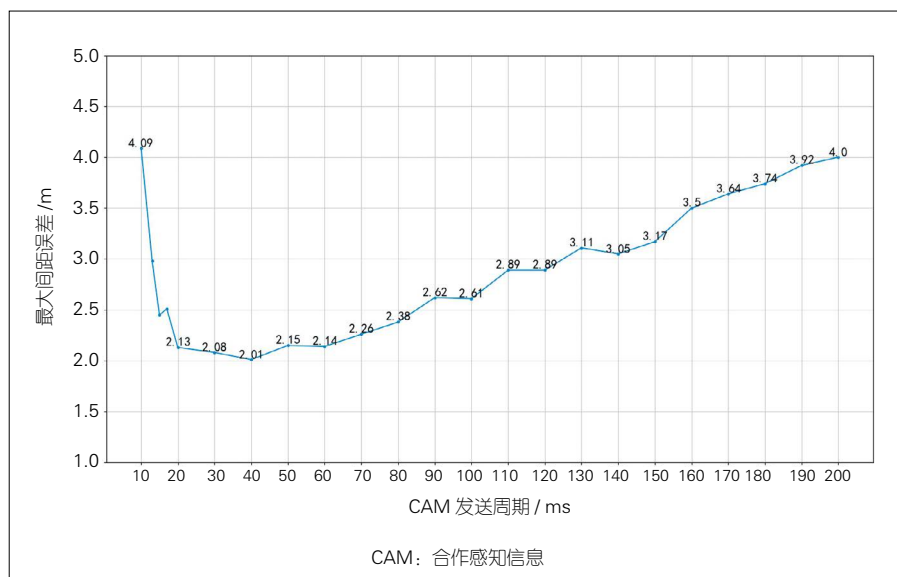
5.2 仿真结果

方案 1 的仿真结果如图 3 所示，其纵坐标为最大间距误差，该值越大说明车辆在行驶过程中的间距偏离目标值越远，队列越不稳定，即编队的性能越差。其横坐标为 CAM 的传输周期，该值越大说明状态和控制信息的

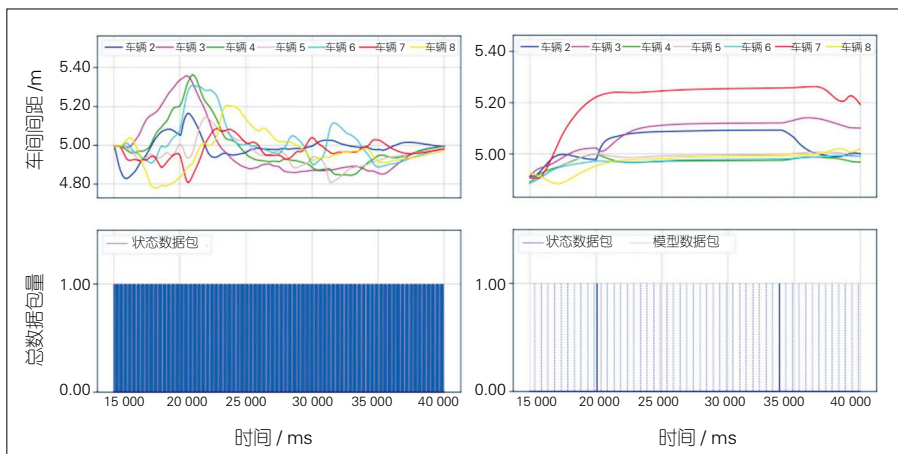
传输间隔越长，即头车和成员车获取的信息是更早以前产生的（在没有收到新的信息前它们只能利用上一次接收到的信息进行计算和控制），即信息延迟越大；反之其值越小，则说明数据包传输越频繁，即数据包的总量越多，冲突也随之增加，从而可靠性降低。从结果图 3 来看，当 CAM 周期取值 40 ms 时，最大间距误差取最小值 2.01 m，对应编队性能最佳。而从



▲ 图 2 头车的速度配置



▲ 图 3 最大间距误差随 CAM 周期的变化图



▲图4引入平行驾驶机制前后的数据包数量和编队性能对比

URLLC 的角度来看,对应的最佳点应该在 CAM 周期取值 200 ms 时,即数据包可靠性最高时。由此可见,在考虑信息延迟的情况下,实际车辆编队的性能与包可靠性并不成正相关,在选取传输间隔时应在可靠和延迟两者之间进行权衡。

方案 2 的仿真结果如图 4 所示,该图截取了第 15 s 到第 40 s 的数据包数量和车间间距随时间的相应变化,其中预设的目标间距为 5 m。数据包的类型包括状态更新/更正数据包和模型更新数据包,其中模型数据包的更新周期设置为 500 ms(实验测得该取值对应性能较佳)。从图 4 中可以看出,加入平行驾驶机制后,状态数据包的发送频率大幅降低,总的包可靠性也随之提升,对应的最大间距误差也从 0.24 m 下降到了 0.07 m,即性能也大幅提升。此时,由于减少包的数量只影响了包的可靠性(通过模型预测弥补了包减少带来的信息延迟增加),编队的性能与包可靠性成正相关。

6 结束语

针对车辆编队所采用的 PC5 模式 4 通信协议的可靠性低的特点,本文中我们提出了 2 种方案来弥补可靠性的不足,进而对车辆编队性能进行优

化。传输间隔优化方案验证了一味提高可靠性并不一定能得到最优性能的观点,通过权衡信息延迟和可靠之间的关系,获得了最佳的编队性能和对应的传输间隔取值。同时,该方案也减轻了对包可靠性的要求。平行驾驶方案减少了数据包的总数量,通过模型预测避免了信息延迟的增加,获得了性能的提升。

对基于 C-V2X 的车联网系统的提升,未来可以多从应用系统性能出发,而不局限于某一通信过程或单一参数的优化。在考虑通过增加可靠性来优化性能时,可以附加一些包含时延在内的其他约束。

参考文献

- [1] VALERIO T, BART B, KARL H. Cooperative Look-Ahead Control for Fuel-Efficient and Safe Heavy-Duty Vehicle Platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 12–28. DOI: 10.1109/TCST.2016.2542044
- [2] ALAM A A, GATTAMIA, JOHANSSON K H. An Experimental Study on the Fuel Reduction Potential of Heavy Duty Vehicle Platooning[C]//13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. USA: IEEE, 2010:306–311. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625054
- [3] ALAN A, GAETAN G, PHILIPPE M. The Flatbed Platoon Towing Model for Safe and Dense

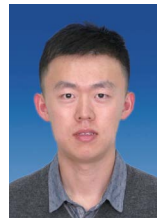
Platooning on Highways[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2015, 15(1): 58–68. DOI: 10.1109/MITS.2014.2328670

- [4] PEDRO F, URBANO N. Platooning of Autonomous Vehicles with Inter vehicle Communications in SUMO Traffic Simulator[C]// International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems. USA: IEEE, 2010: 1313–1318. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625277
- [5] 王小村,裴斌,孙靖. C-V2X 技术现状与性能对比[J]. 信息通信技术与政策, 2019, (5): 55–58. DOI: 10.3969/j.issn.1008–9217.2019.05.016
- [6] 魏珏,王庆扬. C-V2X 蜂窝车联网标准分析与发展现状[J]. 移动通信, 2018, 42(10): 9–12. DOI: 10.3969/j.issn.1006–1010.2018.10.002
- [7] VLADIMIR V, KRZYSZTOF B, PATRICK M. 3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle Communications in Highway Platooning Scenarios[J]. Ad Hoc Network, 2018, 74(5): 17–29. DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.03.004

作者简介



付思雨, 上海大学在读硕士研究生; 主要研究领域为车联网通信技术。



姜之源, 上海大学教授; 主要研究领域为车联网、实时控制系统和大规模多天线系统; 先后主持和参与国家自然科学基金、国家重点研发计划项目 10 余项; 已发表论文 60 余篇, 其中 IEEE 顶级期刊论文 20 余篇。



张舜卿, 上海大学教授; 拥有 10 余年的无线通信前沿研究经验, 主要研究领域为 5G/5G+ 移动通信系统、绿色无线通信、下一代 WiFi 网络、异构计算技术等; 曾主持或参与国家“863”计划和“973”计划 A 类项目等国家级研究项目, 并担任过多项校企联合研究项目的负责人和骨干成员; 发表论文 60 余篇, 拥有美国及中国授权专利 50 余项, 其中拥有第一发明人身份的专利超过 20 项。

车联网高层协议关键技术

Main Technologies Adopted in High Layer Protocol for Internet of Vehicles



罗薇 /LUO Wei, 汪梦珍 /WANG Mengzhen, 许玲 /XU Ling

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

摘要: 为了进一步提高车用无线通信 (V2X) 技术的资源效率, 对于网络侧调度式资源分配的方式, 提出了用户设备 (UE) 上报辅助信息、配置 / 激活多个半静态调度 (SPS) 资源的方案; 对于 UE 自主资源选择方式, 提出了资源重选和预留的策略。另外, 还提出了拥塞控制技术和支持 Sidelink 载波聚合技术, 以分别用来降低资源冲突的概率, 达到更高效的车联网资源利用效率。

关键词: V2X; UE 自主资源选择; 拥塞控制; 载波聚合

Abstract: To improve the resource efficiency in vehicle to everything (V2X) communication, the scheme of reporting user equipment (UE) assistant information and configuring/activating multiple semi-persistent scheduling (SPS) resources for network side scheduling resource allocation is proposed in this paper. A strategy of resource reselection and reservation for the UE autonomous resource selection is also proposed. In addition, congestion control technology is proposed to reduce the probability of resource conflict, and Sidelink carrier aggregation technology is supported to achieve more resource utilization efficiency of the V2X communication.

Keywords: V2X; UE autonomous resource selection; congestion control; carrier aggregation

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200213.0735.002.html>

网络出版日期: 2020-02-13

收稿日期: 2019-12-22

随着通信技术的发展及需求的丰富, 无线通信的应用场景日益广泛, 其中比较典型的是车联网^[1]。车联网指车辆可以参与到无线通信中, 通过利用先进的无线蜂窝通信技术, 实现车到车 (V2V)、车到基础设施 (V2I) 的实时信息交互, 告知彼此的当前状态 (包括车辆的位置、速度、加速度、行驶路径) 及获知的道路环境信息, 协作感知道路危险状况, 及时提供多种碰撞预警信息, 防止道路交通安全事故的发生。车联网通信根据车辆对端通信节点类型具体分为 4 种通信模式: V2V、V2I、车到网络

(V2N) 和车到人 (V2P), 如图 1 所示, 这 4 种统称为车用无线通信 (V2X) 技术通信^[2-4]。

在基于移动通信系统的 V2X, 为了区别于传统的用户设备 (UE) 终端与基站之间的上行链路和下行链路, 车辆终端与其他节点 (除基站) 之间的通信链路被称为 Sidelink。本文中, 我们主要针对 V2X 通信中的 Sidelink 资源分配进行分析。

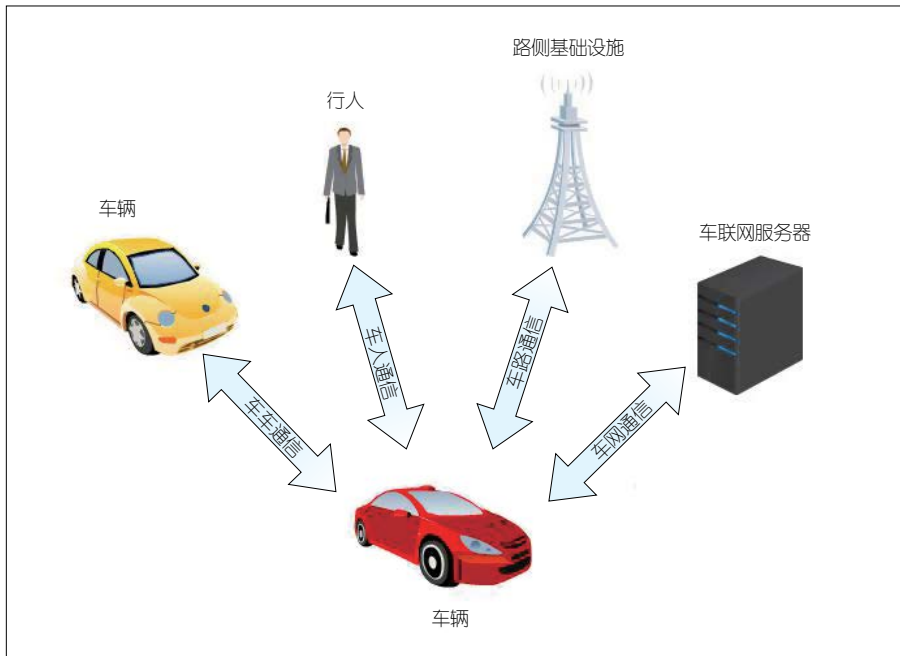
1 车联网资源分配方案

在 V2X 标准中, 支持网络侧集中式调度 Sidelink 资源以及竞争式 UE 自

主选择 Sidelink 资源 2 种资源分配方案。其中, 基于竞争的 Sidelink 资源方案可以更广泛地应用于没有移动通信系统覆盖的地区, 从而保障了基于移动通信系统的 V2X 通信方案具有扩展性, 适用于所有车联网通信场景^[5]。

1.1 基于网络侧调度的资源分配

对于基于网络侧调度的资源分配, UE 须进入无线资源控制 (RRC) 连接状态向基站请求 Sidelink 传输资源^[6]。UE 通过向基站发送 Sidelink UE 信息来请求资源, 基站接收到该消息后得知该 UE 为车联网 UE, 则为该 UE



▲图1 车联网通信

执行相关授权，授权通过后为 UE 分配用于车联网通信的 Sidelink 资源。考虑到 V2X 消息在很多情况下具有周期发送的特点，为了节省信令开销并缩短延时，半静态调度（SPS）成为一种较为合适的调度方式。UE 可能同时需要发送多种 V2X 消息且各种消息的周期、大小不同。如果网络侧可以根据 UE 业务的产生情况，为其分配合适的周期、子帧偏置以及包大小，那么就可以最合理地分配资源且产生最小的延时。为达到这个目的，文章中我们提出 UE 上报辅助信息的方案，告知网络侧其期望的资源周期、大小等，用于帮助网络侧配置以及激活一个或多个合适的 SPS 进程，同时网络侧也可以为 UE 配置并且同时激活一个或多个 SPS 进程以满足多业务的需求。

1.2 UE 自主资源选择

UE 进行自主资源选择时，会基于一定的资源选择规则自主地从资源池中选择资源以传输 Sidelink 控制消息以及数据^[7]。对于 RRC 空闲态

UE，可以通过系统消息获取 V2X 通信配置信息，具体包含 V2X 发送资源池信息、接收资源池信息及 V2X Sidelink 通信其他必要信息；对于 RRC 连接态 UE，如果被基站配置为使用 UE 自主选择资源的模式，则 UE 传输 Sidelink 控制消息以及数据的发送资源池通过基站的 RRC 专有信令获得。为了让相邻区域的 UE 之间不会产生干扰同时减缓远近效应带来的问题，第三代合作伙伴计划（3GPP）将全世界范围的区域划分为一个个矩形区域，称之为 zone。若资源池被配置有相关联的 zone，则 UE 还需要通过网络侧获取 zone 配置信息计算当前所处 zone，并选择当前所处 zone 对应的 V2X 发送资源池。通过这种方式来实现邻近的 UE 使用相同的资源池而相邻区域的 UE 使用不同的资源池。

为了避免不同 UE 选择的资源产生冲突，在 V2X UE 选择确定所使用的资源之前，UE 需要在资源检测窗口内对 Sidelink 可用资源进行检测，判断出其中已被其他 UE 使用的资源

以及可能空闲的资源。然后，在满足 Sidelink 数据发送需求的资源选择窗口中选择合适的资源进行发送。Sidelink 业务具有一定的周期性，其资源控制指示信息中包含对后续资源使用的预留指示；因此，发送 UE 能够通过对检测窗口内检测到的 Sidelink 信号及信息情况来预测后续资源选择窗口中的资源使用情况，并基于此选择资源，从而达到尽可能避免资源选择冲突的目的。如果 UE 预留多个资源，那么 UE 可以根据业务到达规律选择合适的传输间隔。如果 UE 无法预估数据到达的准确时间，也可以根据时延需求来预留资源。对于时延敏感型业务，即使数据还未到达，也可以通过一个单独的资源控制指示信息提前预留资源，并在该资源控制指示信息中携带预留资源将承载的业务优先级信息。当其他 UE 检测到该资源控制信息时，则根据彼此待传业务之间的优先级高低来选择是否避让该预留。

当 UE 处于异常情况时，例如 UE 检测发生了无线链路失败、UE 正在执行 RRC 连接重建、UE 在切换过程中或 UE 发现资源检测的结果不可用时，如果网络侧配置了异常资源池，UE 可以使用异常资源池中的资源进行 V2X 通信。为了减少异常情况下 V2X 通信中断时间，满足 V2X 业务时延需求，异常资源池使用随机选择方式选择资源，对异常资源池进行监听。

1.3 拥塞控制

在车辆高密度场景下，如出行高峰期、交通路口或发生交通事故的地方，较多车辆会产生较多的 V2X 消息且有些 V2X 消息的发送频率较高，那么就会有大量 V2X 消息需要传输。而 V2X 资源是有限的，那么就可能出现拥塞。为了缓解并控制拥塞，车联网为 Sidelink 拥塞测量定义了信道繁

忙度 (CBR) 参数, 即 Sidelink 在其资源池中一段时间内的接收信号强度 (S-RSSI) 超过 (预) 配置门限值的子信道的比例。UE 可通过基站配置或预配置的方式获得 CBR 测量配置信息, 具体包括 S-RSSI 门限值、要执行 CBR 测量的资源池信息、用于发送参数自适应调整的映射表等。空闲态以及连接态的 UE 都可进行 CBR 测量, 并根据 CBR 的测量结果和业务的优先级来自适应调整发送参数。其中, 发送参数包括最大发送功率、重传次数范围、资源块数量范围、调制编码方式范围等。此外, 连接态 UE 可根据基站配置进行 CBR 测量结果上报, 以使基站可获得 Sidelink 资源池的使用情况并调整资源池配置。通过这种方式, UE 能够基于 Sidelink 资源池的拥塞情况来调整 Sidelink 发送参数配置, 从而达到拥塞控制的目的。

2 Sidelink 载波聚合

随着第 1 阶段支持 V2X 通信基本功能的标准制订完成, V2X 应用场景进一步扩展以支持更高的业务性能需求, 如更低时延、更高可靠性、更高数据率需求。为了满足高级 V2X 业务的更高性能需求, V2X 标准提出支持 Sidelink 载波聚合的目标。

V2X Sidelink 通信支持至多 8 个载波的载波聚合。Sidelink 载波聚合中没有主载波单元与辅载波单元的概念。Sidelink 载波聚合包括 Sidelink 数据分流和 Sidelink 数据复制 2 种应用场景。如果支持 Sidelink 载波聚合的 UE 使用竞争式资源选择, UE 须首先选择用于 V2X Sidelink 通信的一个或多个载波。

2.1 载波选择及重选

V2X 业务类型与 V2X 频点之间的映射关系由上层配置。UE 基于高层提供的 V2X 业务类型与 V2X 频点之间的

映射关系, 确定待传输 V2X 数据所在 Sidelink 逻辑信道的可用载波集合。媒体接入控制 (MAC) 子层基于可用载波上的 CBR 及待传输 V2X 数据所在 Sidelink 逻辑信道的优先级进行载波选择, 确定 Sidelink 逻辑信道所使用的一个或多个载波。具体来看, UE 分别测量 Sidelink 逻辑信道的可用载波集合中各个可用载波上的 CBR, 并与基站配置或预配置的载波选择 CBR 阈值进行比较。其中, 该载波选择 CBR 阈值是与当前 Sidelink 逻辑信道优先级相关联的。若可用载波上的 CBR 测量值小于载波选择 CBR 阈值, 则将当前载波作为一个候选载波; 若有多个候选载波, 则按照候选载波 CBR 测量值升序 (由小到大) 选择一个或多个最终所使用的载波, 具体选择多少个载波由 UE 基于自身能力决定。

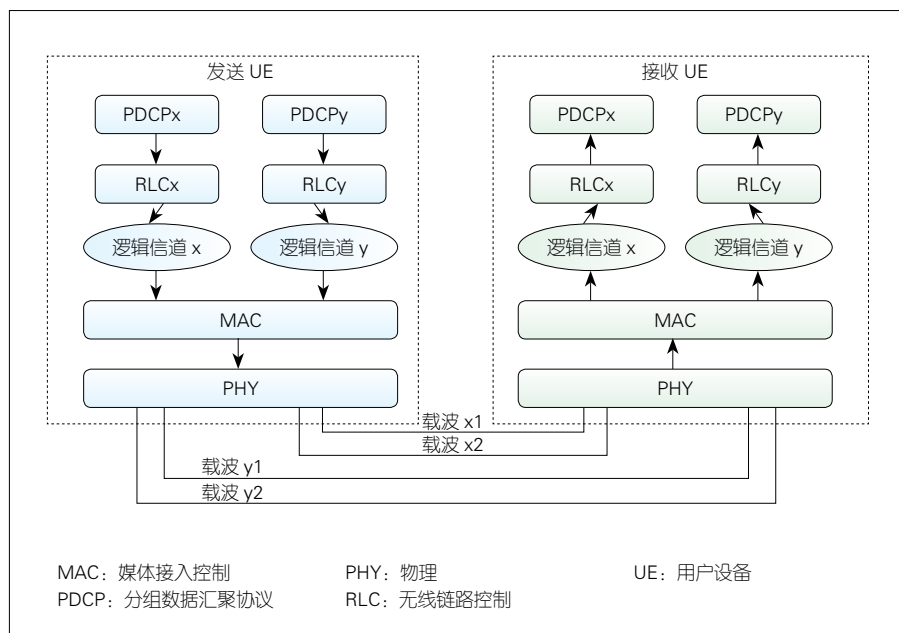
Sidelink 资源重选触发时会触发载波重选。为了避免因频繁地在不同载波间切换而导致的转换时间及资源浪费, UE 应尽可能继续使用当前所使用的载波即重选当前载波, 在当前载波上进行 Sidelink 资源重选。具体来看,

当载波重选触发时, UE 首先检测是否可继续使用当前所使用的载波, 并将当前载波 CBR 测量值与基站配置或预配置的载波保持 CBR 阈值进行比较。其中, 该载波保持 CBR 阈值是与当前 Sidelink 逻辑信道优先级相关联的。若当前载波 CBR 测量值小于载波保持 CBR 阈值, 则 UE 可继续使用当前载波, 否则, 当前载波处于拥塞状态不适宜继续被使用, UE 会按照上述载波选择机制重选新的载波。

2.2 Sidelink 数据分流

高级 V2X 业务具有更高的端到端数据传输速率需求。通过载波聚合方式, 将 V2X 数据包分流到多个载波传输, 可以实现更大的传输带宽, 有效提高 Sidelink 数据传输速率。Sidelink 数据分流具体如图 2 所示。

如果支持 Sidelink 载波聚合的 UE 使用竞争式资源选择, UE 则按照载波选择及重选机制确定 Sidelink 逻辑信道所使用的一个或多个载波。若选择了多个可使用的载波, 则 UE 可将该 Sidelink 逻辑信道的 V2X 数据分流到



▲图 2 Sidelink 数据分流示例图

这多个载波上进行传输。

如果支持 Sidelink 载波聚合的 UE 被配置基站调度资源, 基站基于 UE 上报的感兴趣的发送频点和 V2X 业务标识信息, 以及 Sidelink 缓存状态报告 (BSR) 中的 V2X 业务标识索引信息、逻辑信道组和缓存数据量, 自主确定 Sidelink 逻辑信道对应的可用频点, 并在可用频点上为 UE 分配 Sidelink 资源, 具体在哪些可用载波上各分配多少资源属于基站决策。

2.3 Sidelink 数据复制

对于具有超可靠低时延需求的高级 V2X 业务, 数据复制可以利用频域分集增益在多个载波上传输相同的 V2X 数据包提高可靠性。

Sidelink 数据复制在分组数据汇聚协议 (PDCP) 层执行^[8]。1 个 PDCP 实体对应 2 个 RLC 实体并关联 2 个逻辑信道。对于数据复制传输, 每个 PDCP 协议数据单元 (PDU) 在 PDCP 实体中被复制, 原 PDCP PDU 和复制

的 PDCP PDU 分别递交到关联的 2 个 RLC 实体及逻辑信道进行传输, 并且只能通过不同的载波传输^[9]。图 3 给出了 Sidelink 数据复制示例。

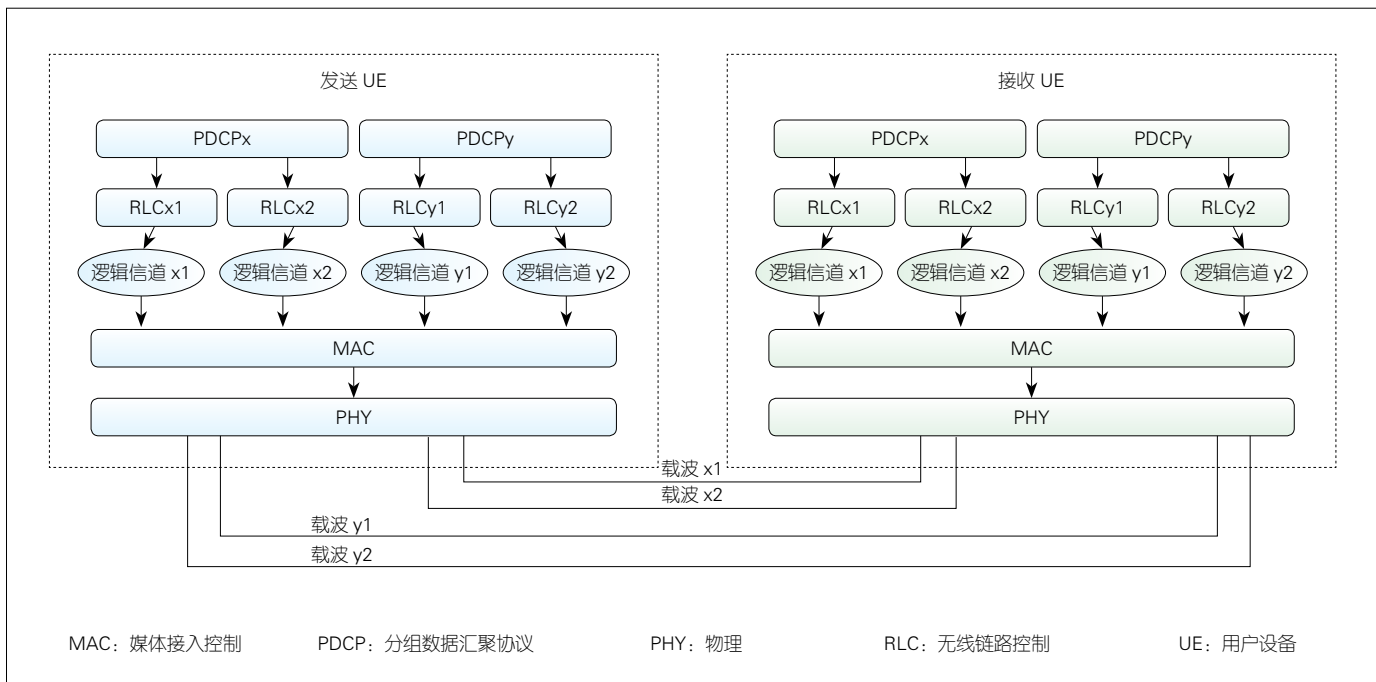
UE 根据基站配置或预配置的可靠性阈值决定激活或去激活 Sidelink 数据复制。当 V2X 数据关联的可靠性级别高于基站配置或预配置的可靠性阈值时, 则激活 Sidelink 数据复制; 对于之前正在进行数据复制传输的 V2X 数据, 如果其关联的可靠性级别低于当前配置的可靠性阈值, 则去激活 Sidelink 数据复制。

对于基站调度资源模式, 基站基于 UE 上报的 V2X 业务对应的可靠性级别列表、感兴趣的发送频点和 V2X 业务标识信息^[10], 配置可靠性级别与逻辑信道组的映射关系, 并配置允许进行 Sidelink 数据复制的可靠性阈值, 并为每个 V2X 业务标识配置 2 组互不重叠的载波集合用于 Sidelink 数据复制传输。UE 将对应同一 PDCP 实体的 2 个逻辑信道分别关联到这 2 组载波

集合, 这 2 个逻辑信道分别关联到哪个载波集合由 UE 自主实现。

UE 通过 Sidelink BSR 上报一个或多个可靠性级别的缓存数据量及数据所属 V2X 业务标识。基站通过 Sidelink BSR 中的逻辑信道组标识获知对应的可靠性级别, 并根据配置的可靠性阈值, 知道逻辑信道组中的逻辑信道是否要进行数据复制传输。如果逻辑信道组关联的可靠性级别高于可靠性阈值则要进行数据复制传输, 基站在对应的 2 组互不重叠的载波集合上分别配置所请求的资源量, 具体各个载波上分配多少 Sidelink 资源由基站决策。

用于原 PDCP PDU 和复制的 PDCP PDU 传输的 2 个逻辑信道是一一对应的, 接收端 UE 根据逻辑信道标识可识别哪 2 个逻辑信道用于同一数据复制传输, 从而将关联的 2 个逻辑信道的数据递交到对应的同一 PDCP 实体。接收端 UE PDCP 实体进行重复包检测, 丢弃重复的数据包, 并进行



▲ 图 3 Sidelink 数据复制示例图

重排序, 将数据包按序递交给上层协议实体。

3 结束语

本文中, 我们阐述了基于移动通信网络的车联网通信中的 Sidelink 资源分配方案, 包括移动通信网络中传统的基站调度式资源分配方案以及基于竞争的 UE 自主资源选择方案。

为了提高车联网通信的资源效率, 对于网络侧调度式资源分配的方式, 提出了上报 UE 辅助信息, 同时配置和激活多个半静态调度资源的方案; 对于 UE 自主选择资源方式, 提出了降低资源冲突概率的资源选择策略。另外, 我们还提出了拥塞控制方案和支持 Sidelink 载波聚合方案以进一步提高车联网资源利用效率和可靠性等性能。

在长期演进 (LTE) -V2X Sidelink 广播通信的基础上, 5G 新空口 (NR) -V2X 针对 5G NR Sidelink 单播和组播通信进行了设计, 以进一步增强资源分配方案性能。我们建议下一步工作可以重点研究支持 Sidelink 单播和组播的反馈机制以提高传输的可靠

性, 支持更加精细化的服务质量 (QoS) 管理机制以优化资源分配方案, 支持 UE 之间的协调调度方案, 以及包括非连续接收在内的车联网节能方案。

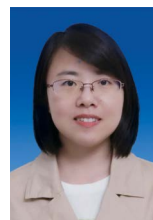
参考文献

- [1] 基于 LTE 的车联网无线通信技术 [R]. 中国通信标准化协会, 2018
- [2] 陆平, 李建华, 赵维铎. 5G 在垂直行业中的应用 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67-74. DOI:10.12142/ZTETJ.201901011
- [3] 3GPP. Study on LTE support for Vehicle to Everything (V2X) Services: TS 22.885[S]. 2018
- [4] 3GPP. Study on Architecture Enhancements for LTE Support of V2X Services: TS 23.285[S]. 2018
- [5] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description: TS 36.300[S]. 2018
- [6] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC) Protocol Specification: TS 36.331[S]. 2018
- [7] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification: TS 36.321[S]. 2018
- [8] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) Specification: TS 36.323[S]. 2018
- [9] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) Protocol Specification: TS 36.322[S]. 2018
- [10] Sidelink 数据复制方案分析 [R]. 中兴通讯, 2017

作者简介



罗薇, 中兴通讯股份有限公司技术预研高级工程师; 主要研究领域为 LTE 系统及 5G 系统中的车联网通信技术; 申请专利 10 余项。



汪梦珍, 中兴通讯股份有限公司技术预研高级工程师; 主要研究领域为 LTE 系统及 5G 系统中的车联网通信技术; 申请专利 10 余项。



许玲, 中兴通讯股份有限公司无线标准总监, 担任 CCSA-TC5-WG3 副组长、CCSA-TC10 车联网子组副组长; 负责中兴通讯 5G 行业应用、车联网相关的 3GPP、5GAA、C-ITS、CCSA、CSAE 等标准工作; 牵头 IMT-2020(5G)推进组 C-V2X 工作组多个课题的研究, 长期参与 3GPP、CCSA、5GAA、CSAE、CITS 等全球标准组织活动; 作为主要人员参与的“基于 LTE 的宽带集群总体技术要求系列标准”获得 CCSA 2017 年度科学技术一等奖; 发表多篇文章, 申请 20 余项发明专利, 提交标准 10 余项。

5G NR-V2X 直连通信频率需求研究

5G NR-V2X Sidelink Spectrum Requirement

李伊 /LI Yan, 高路 /GAO Lu

(高通无线通信技术(中国)有限公司, 北京 100013)
(QUALCOMM Wireless Communication Technologies (China) Limited, Beijing 100013, China)



摘要: 针对 5G 新空口 - 车用无线通信 (NR-V2X) 技术中的直连通信应用于自动驾驶场景的频谱需求进行研究, 给出频谱需求研究方法、假设参数和评估结果。在 NR-V2X 系统中, 使用广播模式发送承载状态信息和环境信息的信息, 这部分消息需要至少 30~40 MHz 的频率。NR-V2X 的组播模式可以支持自动驾驶群组间协商和决策。尽管组播模式对于支持高级应用更为关键, 但由于群组通信基本上是事件触发, 通过组播模式传输的总业务量远远少于广播消息的总业务量, 在进行 NR-V2X 频率研究的初期可以暂不考虑组播模式的频率需求。

关键词: 5G NR-V2X; 广播模式; 组播模式; 传感器共享应用; 频率

Abstract: In this paper, the spectrum requirements of 5G new radio (NR)-vehicle to everything (V2X) Sidelink communications for autonomous driving is studied. The methodology, assumptions, and evaluation results are provided. In a NR-V2X system, the broadcast mode is used to send messages that carry status information and environmental information. The frequency requirement for broadcast mode is predicted to be at least 30~40 MHz. NR-V2X supports the use of groupcast mode to send negotiation and decision messages in autonomous driving group communication. However, since group communication is basically event-triggered, even the groupcast mode is critical to support the advanced automotive applications, the total traffic transmitted through groupcast mode is much less than the total traffic of broadcast messages. Therefore, the frequency requirements of the groupcast mode can be neglected in the early stage of NR-V2X frequency study.

Keywords: 5G NR-V2X; broadcast mode; groupcast mode; sensor sharing; frequency

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200222.1132.002.html>

网络出版时间: 2020-02-23

收稿日期: 2019-12-22

自动驾驶是目前汽车产业乃至整个科技行业中最受关注的技术之一, 将会在不久的将来出现在我们的生活中。车车直连通信对于支持安全可靠的自动驾驶业务至关重要, 自动驾驶的感知、决策和执行 3 个层面都将受益于车联网技术而得到增强。基于蜂窝网车用无线通信 (C-V2X) 技术作为车辆中其他车载传感器的补充

而在全球范围内被广泛接受, 并将成为 5G 的先导性应用得到部署。C-V2X 通过提供 360° 非视距 (NLOS) 感知, 大大扩展车辆检测道路参与者的能力。尤其在盲点交叉路口或恶劣天气状况下, 更能体现其相对传统车载传感器的优势。

2017 年 6 月, 第三代合作伙伴计划 (3GPP) 完成并发布了长期演进

(LTE)-V2X R14 标准。R14 LTE-V2X 可以支撑汽车基础安全应用。对于车辆来说, 具备这些通信要求, 就能可靠地与其他附近车辆、基础设施节点 (路边单元) 以及行人交换状态信息, 例如位置、速度和航向, 并且还能够及时向邻近实体传播告警消息。LTE-V2X 的频谱需求在中国通信标准化协会 (CCSA) 以及 5G 汽车协会 (5GAA) 等全球标

准化组织已得到充分研究,得出的共识是需要为 LTE-V2X 分配 20~30 MHz 以支持基础安全应用,包括车到车(V2V)、车到基础设施(V2I)和车到行人(V2P)应用^[1-2]。

3GPP R16 开展了 C-V2X 演讲技术的研究,并且在 5G 新空口(NR)的框架上制订 5G NR-V2X 标准,其灵活的设计可以支持需要低时延和高可靠性的高级车联网应用。NR-V2X PC5(直连通信)框架的灵活性允许轻松扩展 NR 系统,支持未来进一步发展更先进的 V2X 业务和其他业务^[3]。3GPP 计划在 2020 年 3 月完成 5G NR-V2X 核心标准化工作。5G NR-V2X 技术可以进一步实现和增强多维度自动化,例如感知、规划、定位、意图共享(ADAS)和传感器信息共享等。5G NR-V2X PC5 有不同的通信模式,包括广播模式和组播模式。组播通信模式用于支持群组内的特定互动消息,通常有较高可靠性要求,如群组协商、群组决策、反馈消息等。5G NR-V2X 将与 LTE-V2X 共存,并针对不同的用例。LTE-V2X 将提供基础安全服务,而 5G NR-V2X 将用于支撑自动驾驶等高级汽车应用。本文中,我们主要针对自动驾驶 5G NR-V2X 直连通信频谱需求进行研究。

1 频率需求研究方法

利用系统负载和系统吞吐量之间的关系,将预期提供的分组业务量映射到所需的系统容量,称为业务负载映射方法。该方法在 V2X 直连通信系统容量和频谱分析中广为采纳^{[1-2][4-7]}。

针对 5G NR-V2X 中的先进应用,一个新的参数激活因子需要被引入,它将反映发送传感器共享信息等先进应用消息的车辆在所有交通参与车辆中所占的比例。5G NR-V2X 对频谱需求估计 S 可以用公式(1)表示:

$$S = \frac{\sum_n (PS_n \times Ft_{x_n}) \times AF_{AdvApp}}{SE \times CU} = \frac{\sum_n DR_n \times AF_{AdvApp}}{SE \times CU} \quad (1)$$

其中,

● $n = 1, \dots, \text{NbVehiclesInRange}$ 。

NbVehiclesInRange 是有效通信范围内的车辆数量,它取决于车辆的平均速度和有效的通信范围。

● PS_n 是在有效通信范围内第 n 辆车发送的数据包大小,由应用的业务量模型确定,单位是比特。

● Ft_{x_n} 是在有效通信范围内第 n 辆车的消息发送频率,由应用的业务量模型确定,单位为赫兹。

● SE 是无线技术的频谱效率,单位为 bit/(s · Hz)。它在发射机侧进行测量,并由 NR-V2X 所采用的调制和信道编码方案确定。

● CU 是无线信道的最大资源利用率,反映了由于信号衰减、同道干扰等因素造成的接收端的频谱效率的下降。

● DR_n 是有效通信范围内第 n 辆车的速率,可以通过 $PS_n \times Ft_{x_n}$ 进行计算。

● AF_{AdvApp} 是发送先进应用消息的用户在所有交通参与车辆中所占的比例,称之为激活因子。

3GPP 尚未完成 5G NR-V2X PC5 的无线接入部分的标准化,因此需要对 NR PC5 的频谱效率和信道利用率进行估算。可以基于 1 s 周期内并在 40 MHz 信道带宽内的总信息比特数来估计 NR-V2X 的频谱效率^[8],频谱效率约为 0.712 bit/(s · Hz)。

信道利用率可以给定一个假设范围,例如,下界可以与 LTE-V2X 频谱需求率采用的下界相同,即 0.336^[9]。对于上界,我们可以假设为 80%,这对于可以实现更好的调度协调的单播或多播通信是可能的。随着 3GPP 标

准化发展,可以根据系统设计估计更为准确的数值。

2 通信需求和业务建模

3GPP 于 2016 年完成了针对 5G NR-V2X 的通信需求研究^[10-12],其中一些通信需求考虑得比较理想,主要面向较长期的自动驾驶系统设计。从 2016 年之后,自动驾驶技术发展迅速,针对近期和中期的通信需求又提出了更为实际的通信需求,5GAA 等组织与汽车厂商密切合作,针对通信需求进行了细化和总结^[13-14]。

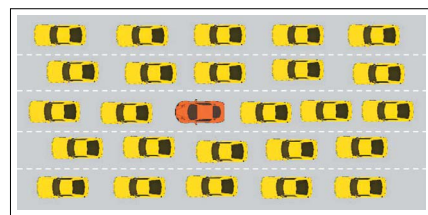
5G NR-V2X PC5 有不同的通信模式,包括广播模式和组播模式。例如,编队行驶可以使用组播模式,而传感器共享更依赖广播模式。

2.1 广播模式

传感器共享也称为合作式环境感知,是最早支持自动驾驶的应用,它使用了 NR-V2X 直连通信的广播模式。

根据丰田汽车公司的研究^[15],传感器共享消息大小被建模为 $350 B + x * 50 B$,其中 350 B 被假定为基础安全消息的平均有效载荷大小, x 表示车辆从本地传感器观察到的其他对象的数量。50 个字节表示描述单个对象的信息量。如果假设 x 为 25,那么如图 1 所示中央红色汽车将感知周围的 25 辆黄色汽车。自动驾驶消息大小为 1 250 B,发送频率为 10 Hz^[16]。

对于传感器共享信息,如果每辆车都发送所检测到的周围物体对象的



▲ 图 1 自动驾驶中本地传感器观测到的周围物体对象

信息,则从系统角度看,会有很多冗余信息被发送出来。为了减少冗余信息的发送,只须一部分车辆发送传感器共享信息,与周围的车辆共享这些数据。发送传感器共享信息的车辆比率应该是频谱需求研究中需要考虑的重要假设。

欧洲电信标准化协会(ETSI)制订了集体感知服务^[17-18]的技术报告和规范。对于ETSI协作感知消息(CPM)流量模型进行建模,由于周围感知对象数量不同,CPM数据包大小约为550~1 900 B^[16]。

以下是由3GPP技术规范给出的采用信息共享应用的部分自动驾驶的另一示例。用于部分自动驾驶的3GPP流量模型的有效载荷大小是6 500 B,对应于3GPP TS22.186^[12]中V2V高级驾驶用例[R 5.3-002]的消息大小。根据文献[11—12],该消息大小假设60 B,并且有效载荷包括100个对象的信息。感知100个对象需要非常强大的传感器能力,且空口将存在大量信息冗余。此时,传感器共享的有效载荷大小为6 000 B,另外500 B将用于粗略驾驶意图分享。

2.2 组播模式

组播通信是5G NR-V2X最重要的功能之一,该模式用于支持群组内的特定交互消息,通常要求很高可靠性,如群组协商、群组决策、反馈消息等;因此NR-V2X的组播模式引入了混合自动重传请求(H-ARQ)^[19],保证群组通信所要求的高可靠和低时延。5GAA针对包括部分群组通信在内的用例和需求进行了研究^[13-14]。参考5GAA对群组通信用例及其消息流的研究^[13],我们提出了组播的一般消息流,如图2所示。图2反映了组播过程和群组通信中交互的一般流程,其中通用的消息流建模是业务建模和

频谱需求研究的基础。

3 评估结果

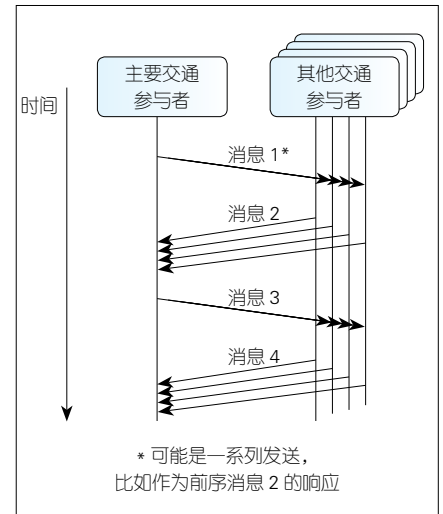
3.1 广播模式

在2.1节中,我们总结了广播模式下协作感知应用3种业务建模方案,分别为丰田研究方案(以下编号为S1)、ETSI研究方案(以下编号为S2)和3GPP研究方案(以下编号为S3)。表1总结了协作感知(传感器共享)的业务模型参数。

我们以70 km/h的车速为例来计算传感器共享的频谱需求,表2给出了用于计算的关键参数的摘要。

针对不同的业务量模型S1, S2和S3,我们计算了频谱需求与激活因子,频谱需求的计算结果如图3所示。

在自动驾驶的开始阶段,能够传输检测到的物体的车辆比例可能会很低,协作感知不会消耗太多频谱,例如可以采用10 MHz频谱提供协作感知



▲图2 常规组播消息流的示意图

▼表1 广播模式传感器共享(协作感知)的业务模型参数

方案	模拟参数	注释
S1	$X \times 50 \text{ B} \Rightarrow 1\,250$ 个字节/消息 信息发送频率: 10 Hz	丰田研究 ^[11]
S2-C1	消息发送频率: 5 Hz 25个周围的对象, 大约550 B	ETSI CPM 假设75%的车辆对象, 25%的非车辆对象; LTE-V2X渗透率达到70%
S2-C2	信息发送频率: 5 Hz 80个周围的对象, 大约1 900 B	ETSI CPM 假设75%的车辆对象, 25%的非车辆对象; LTE-V2X渗透率达到70%
S3	协作感知: 60 B $\times$ 100 / 消息 协作运动*: 500 B / 消息 信息发送频率: 10 Hz	3GPP 22.886 第5.10节

3GPP: 第三代合作伙伴计划

CPM: 协作感知消息

ETSI: 欧洲电信标准化协会

LTE-V2X: 长期演进车用无线通信

S1: 丰田研究方案

S2: ETSI研究方案

S3: 3GPP研究方案

* 协作运动消息中含有粗略的驾驶意图(轨迹规划)信息。

▼表2 广播模式传感器共享的关键参数

关键参数	值	注释
车道号	12	双向总计
TTC/s	2.5	
车速/(km/h)	70	相对速度 140 km/h
信息共享有效时间/s	10	3GPP TR22.886
有效通信范围/m	388.9	信息共享的要求见 3GPP TR22.886 第5.9节
在有效通信范围内发送定期数据包的车辆数	204	信息共享的要求见 3GPP TR22.886 第5.9节
NR的频谱效率/(b/(s·Hz))	0.712	
NR的信道利用率	0.8	

3GPP: 第三代合作伙伴计划

NR: 新空口

TTC: 距碰撞方式的时间

服务。随着 V2X 车辆提高其检测物体（即其他道路参与者、障碍物）的能力，消息载荷大小将变大并且无法通过 LTE-V2X PC5 接口传输。根据上述研究，需为 NR-V2X 分配 30~40 MHz 的新频谱来承载传感器共享消息。

3.2 组播模式

基于组播用例的频谱需求研究方法是首先估算每辆车在组播用例上产生的总业务量，然后计算容纳指定范围内的所有车辆所需的频谱量。鉴于组播的基本原理也是一种物理层广播，并且消息像广播一样以最大发送功率进行传输，我们可以利用 2.1 节的频谱需求研究方法。但是，针对每种用例类型的频谱需求重复进行分析和计算很耗时，我们因此提出了一种新颖的

方法来研究基于组播用例的频谱需求。鉴于组播和广播的通用性，即每辆车以最大发送功率向所有近端车辆发送消息，并且具有相似或相同的发射频谱效率，我们可以比较组播消息产生的所有业务量与基础安全消息（BSM）消息负载的比率（Ratio_G2B）。组播的频谱需求与在文献 [2] 中获得的 BSM 频谱数量的比例也是 Ratio_G2B。通过这种方式，我们可以快速获得基于组播用例所需的频谱数量^{[5][8]}。

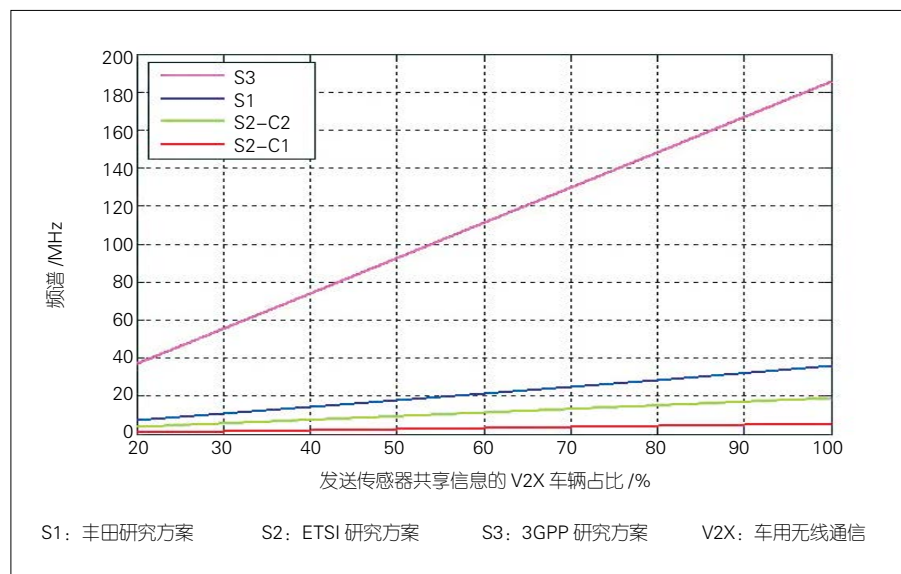
参加群组通信的车辆位于如图 4 所示的虚拟组中。在一个组中，有一个主要的交通参与者来领导组播事件的群组通信。

文献 [8] 研究了一个组播用例“车道变更事件”的总组播业务量，每个组群的平均业务速率是一次事件内所

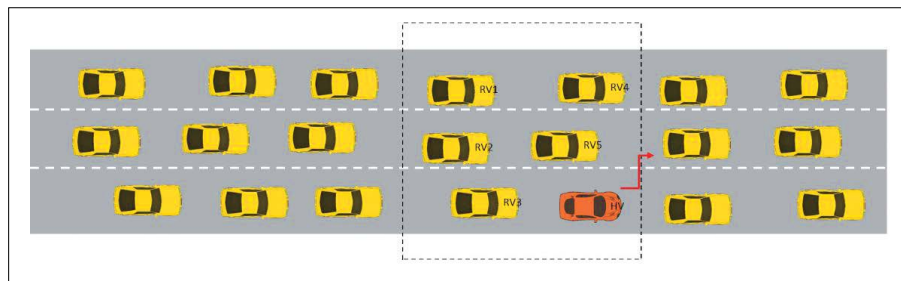
有发送消息的字节数的总和与平均车道变更间隔时间 T_{event} 之比，具体见图 5 所示。我们假设 T_{event} 为 60 s，则该业务量与 BSM 业务量之比约为 1.5%。随着协作驾驶策略的广泛采用，我们期望可以进一步减少变道以提高道路效率。如果 T_{event} 延长为 300 s，则总组播业务量与 BSM 业务量之比为 0.3%。同样，我们可以评估车道变更事件的总组播业务量与传感器共享总业务量的比率，如图 6 所示。假设根据丰田汽车研究的流量模型，传感器共享消息的大小为 1 250 B，发送频率为 10 Hz。我们同样可以发现实际道路环境中与共享传感器业务量相比，车道变更组播业务量是微不足道的。综上所述，与真实道路环境中的广播业务量相比，车道变更的组播业务量可以忽略不计。

4 结束语

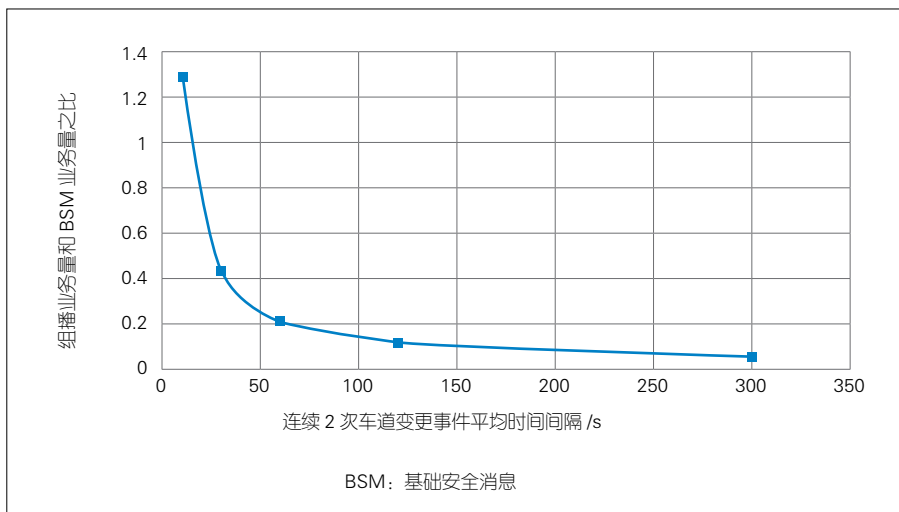
在 NR-V2X 系统中，可以用广播模式发送承载状态信息和环境信息的消息（如传感器共享消息）。这些消息将消耗主要的频谱资源，研究表明需要至少约 30~40 MHz 的频谱。NR-V2X 采用组播模式发送群组通信中的协商和决策消息。根据对某些基于组播的用例研究，我们注意到这些组播应用始终是事件触发的，并且事件发生概率通常较低；因此，尽管组播模式对于支持高级应用更为关键，但通过组播模式传输的总业务量远远少于广播消息的总业务量。如果与广播消息相比，组播的业务量微不足道，组播所需的频谱相对于 BSM 和协作感知等广播类消息所需的频谱而言可以忽略。在进行 NR-V2X 频率研究的初期可以暂不考虑组播模式的频率需求。根据目前研究，我们可以得出以下结论：至少需要 40 MHz 频谱来支持不同传感器融合、路径规划算法以及群组



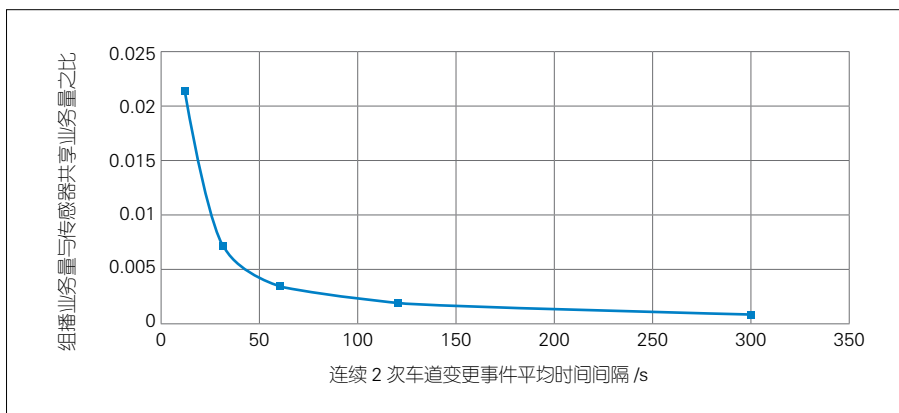
▲图 3 广播模式传感器共享的频谱需求



▲图 4 组播通信的通信范围图



▲ 图 5 车道变更的业务量与 BSM 业务量之比



▲ 图 6 车道变更的业务量与传感器共享业务量之比

通信,用以支持即将到来的自动驾驶。

5.9 GHz 作为国际电信联盟无线电通信部门 (ITU-R) 全球范围以及区域性融合的智能交通系统 (ITS) 频谱^[20],可以为 C-V2X 和相关 ITS 业务发展带来规模经济效益。在 5.9 GHz 中除了分配用于 LTE-V2X 提供基础安全业务的 20 MHz 频率,应额外至少预留 40 MHz 用于 5G NR-V2X 直连通信 (广播模式、组播模式以及单播模式),以支持近期部署的自动驾驶技术。

致谢

本研究得到 FuTURE&TIAA 车联网联合工作组成员单位的支持,对他们谨致谢意!

参考文献

- [1] 智能交通车 / 车路主动安全应用的频率需求和相关干扰共存研究: CCSA SR 239-2018 [S]. CCSA, 2018
- [2] Study of Spectrum Needs for Safety Related Intelligent Transportation Systems-Day 1 and advanced Use Cases: 5GAA S-190179 [S]. 5GAA, 2019
- [3] New SID: Study on NR-V2X: 3GPP RP-181429[S]. 3GPP, 2018
- [4] GAO L, LI Y, MISENER J, et al. C-V2X Based Basic Safety/Related ITS Spectrum Requirement Analysis[C]//2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). USA: IEEE, 2017
- [5] 自动驾驶 5G NR-V2X 直连通信频谱需求 V2.0[R]. 未来移动通信论坛, 2019
- [6] 李俨. 5G 与车联网 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019
- [7] 5GAA. Study of Spectrum Needs for Safety Related Intelligent Transportation Systems: 5GAA_S-180026[S]. 5GAA, 2018
- [8] 5G NR-V2X PC5 Spectrum Needs Study: Methodology for Groupcast: 5GAA S-190215 [S]. 5GAA, 2019
- [9] Study of Spectrum Needs for Safety Related Intelligent Transportation Systems: 5GAA_S-180026[S]. 5GAA, 2018

- [10] Service Requirements for V2X Services: 3GPP TS 22.185v14.0.0[S]. 3GPP, 2015
- [11] Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services: 3GPP TR22.886V15.0.0[S]. 3GPP, 2016
- [12] Enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services; Stage 1: 3GPP TS22.186V15.2.0[S]. 3GPP, 2017
- [13] 5G Use Cases and Requirements-Wave 2.1:5GAA TR T-190028[S]. 5GAA, 2019
- [14] 5G Use Cases and Requirements-Wave 2.2::5GAA TR T-19099[S]. 5GAA, 2019
- [15] BANSAL G. The Role and Design of V2X Communications for Automated Driving[R]. Toyota, 2016
- [16] 5G NR-V2X PC5 Spectrum Needs Study: 5GAA S-190017 [S]. 5GAA, 2019
- [17] Intelligent Transport Service; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Informative Report for the Collective Perception Service: ETSI TR 103 562 V0.0.14[S]. ETSI, 2018
- [18] Intelligent Transport Service; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Specification of the Collective Perception Service: ETSI TS 103 324 V<0.0.12>[S]. ETSI, 2017
- [19] Physical Layer Procedures for Sidelink: 3GPP R1-1907274 [S]. 3GPP, 2019
- [20] Harmonization of Frequency Bands for Intelligent Transport Systems in the Mobile Service [EB/OL]. [2020-12-22]. <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0120>

作者简介



李俨, 高通无线通信技术 (中国) 有限公司高级技术标准总监; 负责高通公司在中国的全部标准事务, 研究领域包括 CDMA 移动通信系统、调制和编码、同步技术、安全、移动应用和车联网等方面; 发表论文 10 余篇, 拥有 13 项已授权的美国专利, 并另有多项 PCT 专利申请, 著有《5G 与车联网》。



高路, 高通无线通信技术 (中国) 有限公司技术标准总监; 长期负责频谱工程、法规以及认证等相关标准化工作, 研究领域包括频谱需求、共存干扰分析和相关射频指标研究, 涉及公众移动通信、工业互联网、车联网、毫米波、频谱共享和 MIMO 空时编码等方面; 已发表论文 10 余篇, 拥有数项已授权专利。



感知 - 通信 - 计算融合的智能车联网挑战与趋势

Challenge and Trend of Sensing, Communication and Computing Integrated Intelligent Internet of Vehicles

尉志青 /WEI Zhiqing, 马昊 /MA Hao, 张奇勋 /ZHANG Qixun, 冯志勇 /FENG Zhiyong

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)
(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

摘要: 针对单车感知无法满足未来自动驾驶安全需求的现状, 面向多车传感器信息融合与时效性共享问题, 提出了基于感知 - 通信 - 计算融合的智能车联网方法与解决思路。该方法有助于提高自动驾驶车辆的协同环境感知能力, 并通过移动边缘计算 (MEC) 技术降低车间感知信息传输负载, 提高多车协同的信息融合与处理效率, 最终实现基于多车智能协同的安全自动驾驶。

关键词: 感知 - 通信 - 计算融合; 智能车联网; 自动驾驶; MEC

Abstract: The sensing function of single vehicle can not satisfy the safety requirements of future automatic driving. Facing the problem of multi-vehicle sensing information fusion and timely sharing, the sensing, communication and computing integration technology is proposed in this paper to improve the cooperative environment sensing capability of autonomous vehicles. The mobile edge computing (MEC) is introduced to reduce the inter-vehicle information transmission load and improve the efficiency of information fusion and processing. Finally, the secure autonomous driving can be realized via multi-vehicle intelligent cooperation.

Keywords: sensing-communication-computing integration; intelligent Internet of vehicles; autonomous driving; MEC

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200217.1753.006.html>

网络出版日期: 2020-02-18

收稿日期: 2019-12-26

自动驾驶是提高出行效率、提升驾乘体验的主流技术。当前产业界, 如特斯拉、UBER、谷歌 WAYMO 和百度等^[1]争相开展自动驾驶技术的研究与测试工作, 致力于将自动驾驶技术商业化。但是, 现有自动驾驶技术主要依靠本地车辆的多种传感器。单车传感器在探测范围、精度、结果质量等方面受观察视角遮挡等因素的影响, 感知能力有限, 而且目前车辆传

感器主要采用独立工作的方式, 如利用摄像头进行图像识别, 雷达进行速度和距离探测, 车辆尚缺乏多种传感器数据有效深度融合的能力。在雨雪等复杂天气条件下, 如果摄像头等某类传感器失效, 本地车辆独立自动驾驶的安全性将受到严重威胁。这种现状限制了自动驾驶的发展, 使之停留在 L2、L3 级别, 即需要驾驶员高度参与控制的自动驾驶系统^[2]。这种级别很难处理突发情况, 驾驶员会因为过分信赖自动驾驶系统而引发交通事故^[3]。

为了满足 L4 和 L5 级别自动驾驶

的需求, 必须解决现有单车感知能力不足的问题^[4]。同时我们可以预见, 未来将有越来越多的自动驾驶车辆投入使用。自动驾驶车辆组网的需求也会变得日益紧迫^[5], 车间信息共享能力不足将严重制约自动驾驶技术的发展; 因此, 迫切需要研究自动驾驶单车多传感器信息融合新方法, 以及基于感知 - 通信 - 计算融合的多车信息高效共享新技术, 通过多车协同提升自动驾驶的安全性。

为此, 本文中我们从 L4/L5 级别自动驾驶需求出发, 面对多车感知数

基金项目:

国家自然科学基金项目 (61631003, 61525101)

据融合与协同处理对多车协同组网以及分布式协同计算提出的需求与挑战,提出基于感知 - 通信 - 计算融合的智能车联网构建方法与设计思路。

1 多车感知数据融合与协同处理

1.1 多车协同组网需求与问题分析

通过车间通信来实现紧急事件预警的方法很早就被提出^[6],然而利用车间通信来预警的方案迟迟没有获得广泛实施。由于缺乏通信和预警信息,当前自动驾驶汽车的安全性面临严峻挑战,在测试中事故频发。如2018年发生在美国亚利桑那州的UBER测试车事故^[4],由于有限的探测能力以及通信协同能力的缺失,造成横穿公路的行人死亡。如果采用基于车间协同通信的预警方法,将有助于车辆提早获知危险信息,并有望避免此类事故的发生。

然而,现有车联网通信技术在一定程度上还无法满足面向大规模自动驾驶场景的大带宽、低时延、高可靠通信的要求。目前,全球车联网通信技术标准主要包括专用短程通信(DSRC)和蜂窝车用无线通信(C-V2X)2大主流技术标准。DSRC技术基于电气电子工程师学会标准(IEEE 802.11p)底层通信协议与IEEE 1609系列标准,仅支持3~27 Mbit/s传输速率,且在非视距环境下时延将急剧增大^[7]。C-V2X在抗干扰能力、吞吐量以及非视距环境下的通信性能均优于DSRC技术。比起4G空口的长期演进(LTE)-V2X,基于5G新空口(NR)的5G-V2X性能将有大幅度增强,传输时延将降至毫秒级,单车上行传输速率为50 Mbit/s^[8-9]。进一步,5G NR Rel16、Rel17将于2020年完成^[10]。

但是,面向自动驾驶车辆的多种传感器产生的数据量是海量的。据测

算,仅通过图像识别方式获取的单车数据速率将超过40 Gbit/s^[11]。目前部署的5G移动通信系统的上行空口时延最低为4 ms^[12],仍无法满足面向L4级别自动驾驶的需求——数据端到端传输和处理时延小于1 ms^[13]。考虑到智能车联网节点数量多、环境高动态变化、车载传感器数据量大的特点,目前部署的5G移动通信系统性能较难满足面向自动驾驶的车联网的要求^[12]。因此,当前移动通信技术在车联网系统中的部署与应用仍面临较大挑战,亟须研究面向自动驾驶的车联网通信的新方法与新技术。

1.2 传感器数据融合与共享利用的难题分析

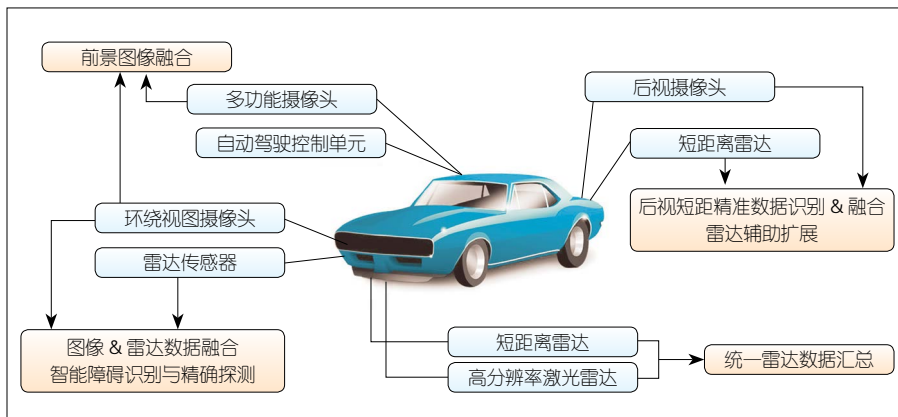
尽管当前自动驾驶车辆已经搭载了多种传感器,如图1所示,包括激光雷达、毫米波雷达和摄像头等,产生大量感知数据,有效扩展了车辆的视野^[14];但是当前缺乏对多种传感器感知数据的融合处理方法。我们亟须设计多种传感器数据的有效融合与联合处理方案,如摄像头和毫米波雷达感知信息的融合,可以综合利用目标形状、距离、速度等感知信息,实现对物体的精准定位与识别。在某些传感器工作受限的情况下,采用多种传感信息融合的方式可以极大地提高传

感器综合性能,为特殊天气和时间条件下的行车安全提供进一步的保障。

现有车载传感器信息融合主要在空间域和频率域上实现,通过多尺度变换(MST)融合熵的方法^[15]实现信息融合。该方法有4点不足:不同源数据在同一区域的特性不同,导致融合数据对比度下降;层次分解和类型的选择繁琐;MST方法计算复杂度高,不适合车联网实时信息处理的要求;伪吉布斯现象带来的误差或伪影问题严重^[16]。为解决上述融合算法的诸多缺点,如何设计多传感器数据的有效融合方法,仍然是一个亟待解决的难题。

1.3 移动边缘计算与数据处理的需求分析

相比在路边固定部署的路侧单元(RSU)和基站等设备,车辆计算能力受限的问题更突出。然而,随着传感器的大量部署和传感器数据融合的需要,计算处理的数据量也十分庞大。且数据融合的算法(如MST算法)对车辆计算能力提出了更高的要求。因此,在当前环境下,车辆往往需要更强大的计算单元协作,才能有效完成数据处理。随着车联网规模和数据量的急剧增长,传统集中式运算和处理的方式已无法满足车联网的要求,面临诸多新挑战。虽然云端集中式处理



▲图1 自动驾驶车辆的多种传感器信息融合示意图

和计算能力强,但是多节点间的通信传输性能与其计算性能并不匹配,极易出现数据拥塞的问题。此外,由于云端服务器的位置往往远离采集数据的车辆,数据传输必然会带来更大时延。当前部署的 5G 网络性能还未达到 L4 级别自动驾驶系统的要求,因此集中式计算和处理方式所造成的时延将会对车联网性能产生影响。

针对车联网感知信息共享的需求,移动边缘计算(MEC)技术有望解决车辆间传感数据分布式本地计算和处理的需求^[17]。MEC 使用位于 RSU 中的计算单元协助车辆进行计算,对于地理位置更靠近传感器数据源的 RSU,车辆到边缘节点的通信时延相对可控。通过 RSU 协助计算,车辆间紧急数据的传输和处理时延有望满足 L4 级别自动驾驶的要求。结合云计算技术,通过将时延可容忍的数据上传到云端进行计算,实现云端、边缘与本地协同计算,提高车联网数据计算和处理的效率。

不过,当前 MEC 主要研究边缘节点计算能力提升的问题,通过提升算法性能来达到 L4 级别自动驾驶对计算能力的要求。然而,受边缘节点计算能力的限制,边缘节点计算资源调度和选择也是需要考虑的问题。节点的通信时延和计算时延将最终影响数据处理速度,因此需要研究最优边缘节点选择方案与多节点分布式协同计算方法,以提高多车协同的车联网整体计算效率,提升多车协同感知的信息融合性能。

如图 2 所示,图中蓝色车辆为参考节点,白色车辆为中继节点。RSU 可以提供边缘计算功能,属于边缘节点。基站作为具备强大计算能力的中心,属于云端节点。每个节点都具备计算负载和通信负载 2 个负载属性。红、黄、绿 3 种颜色分别表示负载属性的拥塞、忙碌和空闲状态。车辆将数据传输至 RSU 进行边缘计算,基站、其他车辆等节点可以辅助车辆进行计算。边缘计算的结果回传至车辆,实

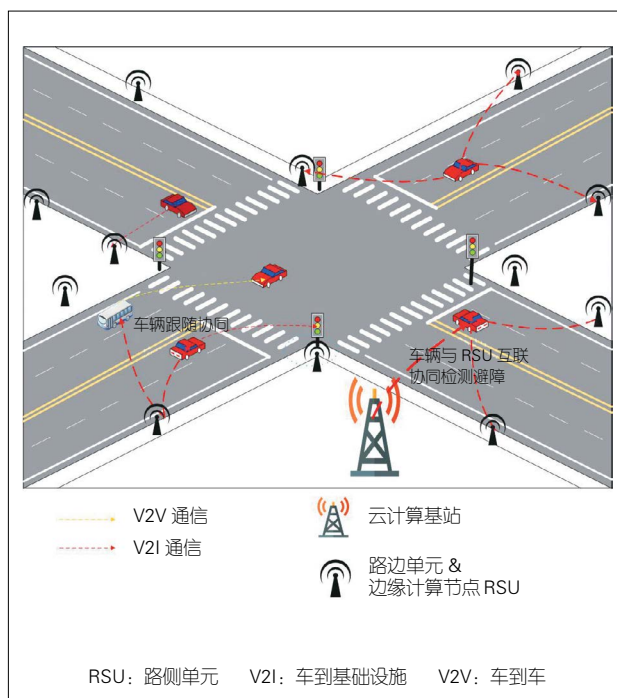
现数据的高效处理。为了提高数据处理的效率,车辆应选择通信负载和计算负载较小的边缘节点进行辅助运算。如图中蓝色车辆因感知数据量过大,亟须其他车辆和 RSU 协助进行计算。通过对通信资源、计算资源及网络整体时延的评估,蓝色车辆的数据通过多跳转发给多个 RSU 进行并行协同计算。与此同时,蓝色车辆将时延容忍的数据上传给通信负载较小的云端基站进行计算。车辆对周边设备的负载状态信息进行测算,并选取最优转发目标。每个边缘节点在协同计算的同时,也会选择并行处理性能最优的设备协同进行数据处理,从而降低计算和通信时延。

2 基于感知 - 通信 - 计算融合的智能车联网构建方法与难题

为了实现 L4 级别的自动驾驶,我们提出如图 3 所示的基于感知 - 通信 - 计算融合的车联网系统。在感知 - 通信 - 计算融合的车联网中,车辆需



▲图 2 车联网边缘节点协同计算模型



▲图 3 基于感知 - 通信 - 计算融合的智能车联网系统

要具备车到车 (V2V)、车到基础设施 (V2I)、车到行人 (V2P) 等多种通信链路, 实现车辆动态高效组网, 以更好地提升自动驾驶车辆的安全性。

2.1 基于感知-通信融合的车联网

通过将部分车辆传感器 (如毫米波雷达) 与通信系统一体化设计, 可以实现感知-通信技术的融合, 优势具体如下:

(1) 感知通信一体化实现高谱效、低时延信息共享。通信系统的时延加上单独的传感器感知时延, 将进一步增大信息共享的时延, 不利于保障信息传输的时效性。同时, 为了消除传感器与通信设备间的相互干扰, 传感器需要在时域或频域上与通信设备进行有效的信号隔离, 这将导致信息传输的时效性和频谱利用效率受到影响。针对上述问题, 我们提出了基于感知-通信融合的智能车联网系统。

(2) 感知通信一体化提升无线网络容量。感知-通信融合的车联网传输方式, 区别于传统移动通信网络广播通信方式, 通过采用定向天线可以实现点到点的信息传输。随着车辆数目的增多, 5G 车联网的带宽资源不足, 面临严峻挑战。通过采用点到点的定向通信方式, 利用空间复用新维度, 可以在空域波束正交且不产生干扰的情况下, 进一步复用频资源, 提升无线网络容量^[18-20]。

然而, 车联网中应用定向通信也具有很大挑战。首先, 定向通信要求发射机获得接收机准确的方位信息^[21], 这就要求发射机具备不断跟踪接收机方位的能力^[22-23]。对于高动态智能车联网来说, 这需要很强的波束控制能力。其次, 定向通信需要符合空间正交分布特性的波束成形方案, 或者为非正交波束成形方案提供干扰消除策略。此外, 感知-通信融合的一体化

设备天线设计、一体化信号设计等也是技术难题。

2.2 基于感知-通信-计算融合的车联网

随着车联网规模的扩大, 车辆传感器采集的数据量也会随之增大, 传感器采集的数据量将超过 40 Gbit/s 量级^[11]。这个量级的数据如果直接通过通信系统传输将造成严重的拥塞。此外, 计算单元, 如中央处理器 (CPU)、图形处理器 (GPU) 等的发展相对于传感器数据量的增长速度而言较为缓慢, 仅靠单车的计算单元进行数据融合处理的难度将越来越大。传感功能将必然与利用 RSU、基站等设备的协同计算进行一体化设计, 以应对海量数据处理的需求^[15]。

(1) 数据融合降维: 传感器数据可以进行融合, 如将图片或视频数据通过识别算法后转化为目标的运动信息 (如方向、位置和速度) 及身份信息 (如车型、车牌号等), 减少了冗余信息, 仅保留感知结果, 从而极大降低传感器数据量的维度。

(2) 数据融合扩展: 多种传感器数据的融合可以扩展传感器的有效信息量。摄像头可以得到较大范围内的目标信息, 包括目标的类型和大致位置, 这将有效解决雷达的探测盲区问题。摄像头具有动目标检测能力, 可对突发情况做出更快的处理, 配合雷达精准探测的距离信息, 可以更好地获取车辆周围的信息, 保障行车安全。

(3) 数据融合匹配: 融合的数据可以为数据匹配提供依据。通常雷达通过反射信号进行测距, 仅具备对目标位置、速度等信息的感知能力。摄像头作为成像设备, 搭配识别算法可以做到对目标类型和身份等信息的感知。

此外, 边缘计算技术可以为车辆

间通信、波束分配方案、干扰和信号碰撞避免方案提供重要参考。通过计算, 预先进行通信资源分配, 将有效提升通信系统的效率, 降低通信时延, 从而为车辆快速高效动态组网提供有效保障。

感知-通信-计算融合的核心思想是将传感、通信和计算深度融合, 实现 3 个功能间的相互协作、资源共享, 提高多系统运行的智能化和自动化水平。车联网的感知-通信-计算一体化面临着诸多理论难题与技术挑战。首先, 需要解决感知-通信-计算三者相互耦合与制约的理论难题。其次, 需要研究感知-通信-计算一体化方式。考虑到车辆的移动性、车联网复杂的干扰特性、不同业务服务质量 (QoS) 的强差异性、车辆及 RSU 计算能力的差异性和计算单元的异构性等特点, 如何在多车间实现云端、边缘端的通信、计算、感知资源与多样化业务的自主适配, 如何在多维资源受限下实现车联网信息高效传递与低时延响应都是面临的技术难题。因此, 我们亟须研究感知-通信-计算融合的智能车联网体系, 设计支持多传感器数据融合、高速计算、智能决策、协同控制的智能车联网技术, 解决自动驾驶车辆间多源海量异构数据高速处理、协同高效传输、低时延决策与控制等难题。

3 结束语

面向 L4 和 L5 级别高级自动驾驶的需求, 本文中我们提出基于感知-通信-计算融合的智能车联网方案。该方案在单车上进行多传感器数据初步融合, 并传输给周边车辆进行感知信息共享, 实现多车数据融合。随着人工智能、自动控制与信息技术的深度融合发展, 基于感知-通信-计算融合的智能车联网技术将向感知-通

信 - 计算 - 控制融合演进。在车辆自感知和自学习能力的基础上, 实现网络协同决策, 最终实现具有高度安全性的 L5 级别的自动驾驶。

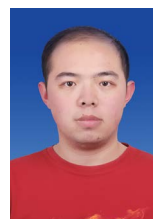
参考文献

- [1] Pilot Program for Collaborative Research on Motor Vehicles With High or Full Driving Automation; Extension of Comment Period[Z]. USA: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2018
- [2] Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles: SAE J3016-2018[S]. SAE International, 2016
- [3] Automated Vehicles for Safety Overview[Z]. USA: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2019
- [4] NTSB. HIGHWAY HWY18MH010[R]. The USA: National Transportation Safety Board (NTSB), 2018
- [5] CHEN H B, ZHANG R Q, ZHAI W J, et al. Interference-free Pilot Design and Channel Estimation Using ZCZ Sequences for MIMO-OFDM-based C-V2X Communications[J]. China Communications, 2018, 15(7): 47-54. DOI:10.1109/cc.2018.8424582
- [6] CHENG F X, ZHU D Y, XU Z J. The Study of Vehicle's Anti-Collision Early Warning System Based on Fuzzy Control[C]//2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. China: IEEE, 2010: 275-277. DOI:10.1109/cmce.2010.5610325
- [7] NAIK G, CHOUDHURY B, PARK J M. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications [J]. IEEE Access, 2019, (7): 70169-70184. DOI:10.1109/access.2019.2919489
- [8] Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s) [R]. ITU, 2017
- [9] Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (v15.0.0, Release 15): 3GPP TR 38.910[S]. 3GPP, 2018
- [10] IMT-2020 (5G) 推进组. C-V2X 白皮书 [R/OL]. (2018-06-22)[2020-12-26]. <https://max.book118.com/html/2018/0918/8116021041001124.shtm>
- [11] ZHANG J, LETAIEF K B. Mobile Edge Intelligence and Computing for the Internet of Vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2019: 1-16. DOI:10.1109/jproc.2019.2947490
- [12] WANG X, LIU G, DING H, et al. 5G New Radio Technology and Standards[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019
- [13] 华为. 5G 技术发展及车联网应用展望 [EB/OL]. (2019-12-22) [2019-12-26]. <http://www.bocicchina.com/boci/pagestatic/index/index.html>
- [14] CHOI J, VA V, GONZALEZ-PRELCIC N, et al. Millimeter-Wave Vehicular Communication to Support Massive Automotive Sensing[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12): 160-167. DOI:10.1109/mcom.2016.1600071cm
- [15] BHATNAGAR G, LIU Z. Multi-Sensor Fusion Based on Local Activity Measure[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(22): 7487-7496. DOI:10.1109/jsen.2017.2759195
- [16] DA CUNHA A L, ZHOU J, DO M N. The Non-subsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101. DOI:10.1109/tip.2006.877507
- [17] FENG J Y, LIU Z, WU C, et al. Mobile Edge Computing for the Internet of Vehicles: Offloading Framework and Job Scheduling [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(1): 28-36. DOI:10.1109/mvt.2018.2879647
- [18] MA H, WEI Z Q, CHEN X, et al. Performance Analysis of Joint Radar and Communication Enabled Vehicular Ad Hoc Network[C]//2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). China: IEEE, 2019: 887-892. DOI:10.1109/icccchina.2019.8855937
- [19] MA H, WEI Z, ZHANG J, et al. Three-Dimensional Multiple Access Method for Joint Radar and Communication Enabled V2X Network[C]//2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). China: IEEE, 2019
- [20] ABDALLA G M, ABU-RGHEFF M A, SENOU-CI S M. Space-Orthogonal Frequency-Time Medium Access Control (SOFT MAC) for VANET[C]//2009 Global Information Infrastructure Symposium. Tunisia: IEEE, 1-8. DOI:10.1109/giis.2009.5307071
- [21] 冯志勇, 尉志青, 马昊, 等. 一种基于多雷达协同探测的雷达探测方法及装置: 201910703507.6[S]. 2019
- [22] 冯志勇, 尉志青, 陈旭, 等. 一种阵列天线、波束成形方法及感知和通信一体化系统: 201910874924.7[S]. 2019
- [23] 冯志勇, 方子希, 尉志青, 等. 基于波束功率分配的雷达通信一体化协同探测方法及装置: 201910676137.1[S]. 2019

作者简介



尉志青, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师; 主要研究方向为感知 - 通信一体化的机器网络。



马昊, 北京邮电大学信息与通信工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为机器学习、车辆自组织网络等。



张奇勋, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、博士生导师; 主要研究方向为异构网络融合与组网方法、感知通信计算融合的智能车联网、毫米波宽带通信技术。



冯志勇, 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室主任、教授、博士生导师, 北斗系统频率组专家; 主要研究方向为认知无线网络频谱感知与动态频谱资源管理、异构网络融合及跨层设计、无线网络虚拟化网络架构与关键技术、感知通信计算融合的智能车联网等; 已提交国际标准化提案 30 余篇, 已发表学术论文 100 余篇 (其中 30 余篇被 SCI 检索), 出版著作 2 部。

中欧 V2X 联合试验 关键场景及技术

Key Scenarios and Technologies in EU-China V2X Trial Cooperation

陈涛 /CHEN Tao¹, Matti KUTILA¹, 郑银香 /ZHENG Yinxiang², 邓伟 /DENG Wei²,
王江舟 /WANG Jiangzhou³

(1. 芬兰国家技术研究中心, 芬兰 埃斯波 02150;

2. 中国移动通信研究院, 北京 100056;

3. 肯特大学, 英国 坎特伯雷 CT2 7NZ)

(1.VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., Espoo 02150, Finland;

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100056, China;

3. University of Kent, Canterbury CT2 7NZ, UK)



摘要: 中国和欧洲在车用无线通信 (V2X) 技术领域开展联合试验以验证关键场景及技术。以蜂窝-V2X (C-V2X) 通信在中国和欧洲的发展为背景, 重点探讨了中欧 V2X 联合试验方案、相关性能评价指标, 以及已有的测试结果。探讨了支持车辆速度适配、智能交通路口、自动驾驶这 3 大关键测试场景所需要应用层面的消息实现。认为车路网间有效信息交互是实现这些场景的关键因素。联合试验中将在系统层面进一步验证、比较测试场景内信息交互性能指标。

关键词: V2X; 协作式智慧交通系统; C-V2X; 长期演进 (LTE)-V2X; 协作互联及自动驾驶

Abstract: China and Europe have initialized the trial cooperation on Vehicle-to-Everything (V2X) key scenarios and technologies. Using the current progress of Cellular-V2X (C-V2X) development in both regions as the background, the selected joint test scenarios, related key performance indicators, and the current test results are described in this paper. The key test scenarios are green light optimal speed advisory, intelligent intersection, and automated driving. The implementation of the messages at the application layer to support the test scenarios is discussed. The effective information exchange among the vehicle, road infrastructure, and mobile network are the key to realize these key scenarios. The joint V2X trials between China and Europe will further evaluate and compare at the system level the information exchange performance in test scenarios.

Keywords: V2X; cooperative-intelligent transport system; C-V2X; Long Term Evolution (LTE)-V2X; cooperative, connected and automated mobility

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200217.1407.002.html>

网络出版日期: 2020-02-17

收稿日期: 2019-12-28

车 用无线通信 (V2X) 技术是实现未来智能交通系统 (ITS) 的关键技术^[1]。ITS 通过将车辆、行人、道路基础设施及互联网紧密连接, 在安全性、运输效率、服务创新、车载信

息娱乐等方面获得极大提升, 并最终实现自动驾驶。预计到 2022 年, 将有超过 1.25 亿辆汽车支持 V2X 技术^[2]。

近年来世界上不同的地区都在进行密集的车联网试验。预计从 2020 开始, 车企将在新车上大规模安装车联网模块。据 5G 汽车联盟 (5GAA) 预测, 车联网将首先在中国和欧洲部署, 美国和

亚洲等其他地区紧随其后。目前行业遵循 2 条车联网技术路线。中国已选定由第三代合作伙伴计划 (3GPP) 主导的蜂窝-V2X (C-V2X) 技术作为发展方向, 目前版本为长期演进 (LTE)-V2X。而欧洲仍在考虑如何兼容 2 种技术标准。考虑到道路基础设施的生命周期通常为 30 年, 车辆的生命周期为 10~15 年,

基金项目:

欧盟地平线计划 (814956)、国家科技重大专项 (2018ZX030114004)

全球车联网应用格局对未来 ITS 发展将有非常深远的影响。

中国和欧洲在车联网方面有深入合作，特别在 C-V2X 研究试验上，有多个研发项目由双方汽车制造商、车联网设备供应商、移动运营商及道路运营方参与，联合评估车联网典型服务性能及服务互操作性问题。随着中国和欧洲 5G 网络的商业化，已可通过 5G 网络实现车辆到网络（V2N）的服务。5G 提供的高可靠低时延非常适合与安全相关的车联网应用需求。5G V2N 服务也是这些合作的重要评估项目。这些合作有助于双方技术融合。

1 中欧 C-V2X 发展现状

欧盟由 28 个成员国组成，各成员国的车联网标准和政策由欧盟统一协调制订。2016 年 11 月，欧盟通过了协作式智能交通系统（C-ITS）发展战略。该战略描述了欧盟未来交通系统的发展方向：在欧盟成员国建立统一的 C-ITS 平台，通过人车路互联，实现有效信息共享与车路协同，极大提高交通安全、交通效率，以及驾驶舒适性。

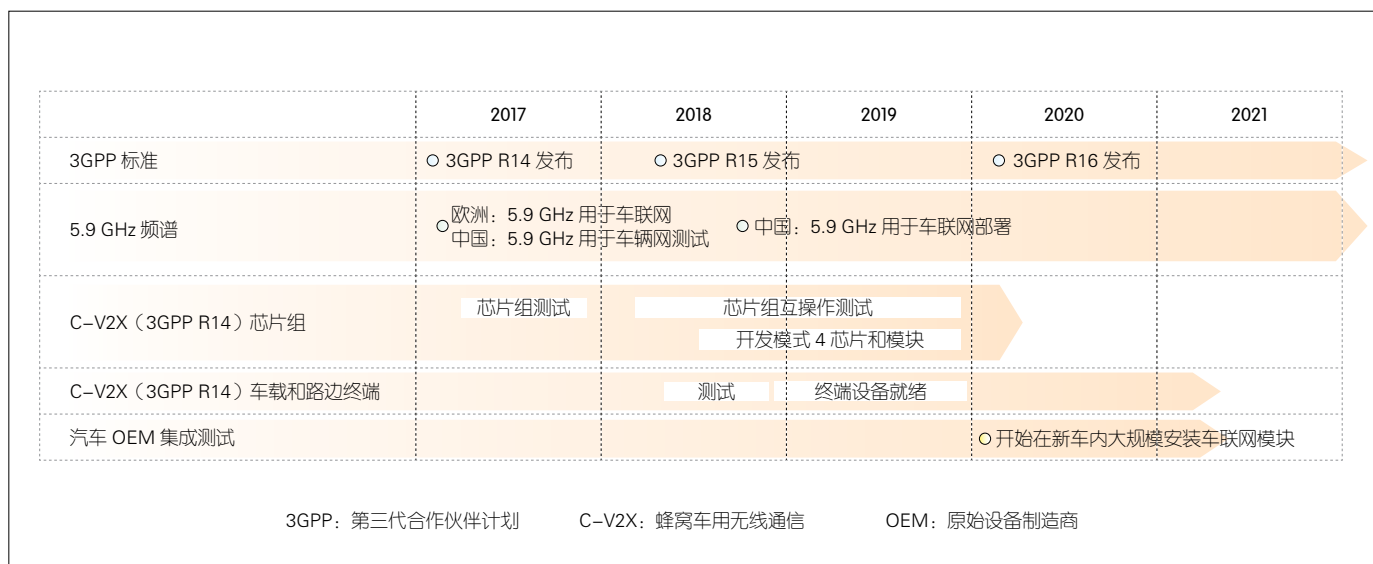
为此，欧盟制订了一系列 C-ITS 服务^[4]，并将根据优先级分阶段实施。现阶段我们把服务分为 Day-1 和 Day-1.5 2 个优先级。Day-1 服务计划从 2019 年开始部署，该服务分为 2 类：一类用于危险路况通知，另一类为交通信号服务。前者包括道路施工警告、天气状况、紧急停车通告、绿灯最佳速度建议（GLOSA）等；后者包括车内交通信号通告、交通信号灯优先请求等。Day-1.5 的规范和标准仍在制订中，具体包括行人保护（VRU）、街道停车信息、交通信息等。目前测试的服务集中在前一类。关于 C-ITS 进展可参考文献[5]。

为大规模测试车联网服务，欧盟建立了 C-Roads 平台^[6]。该平台由欧洲成员国和道路运营方共同建立，旨在推动测试和实施 C-ITS 服务，解决跨国境的互操作性问题。欧盟计划在 2019 年底将 C-Roads 平台覆盖 43 个欧洲城市，道路总长度 6 000 km。目前有 3 个大型欧洲项目正在进行跨境 C-ITS 走廊试验^[7-9]。

中国政府已将车联网提升到国家战略高度，国务院及相关部委对车联

网产业升级和业务创新进行了顶层设计、战略布局和规划，并形成系统的组织保障和工作体系。工业和信息化部、交通运输部、科学技术部、发展改革委、公安部等部委出台一系列规划及政策推动中国车联网产业发展。汽车行业、交通行业、通信行业以及跨行业产业联盟各组织之间正纷纷开展跨领域、跨行业、跨部门分工合作，共同推动车联网技术标准体系及测试验证体系的制订和完善。目前 LTE-V2X 试验及应用示范已在无锡、上海、北京、重庆、武汉等地进行。

欧洲和中国的 C-V2X 技术路线图如图 1 所示，其他国家和地区也遵循类似的路线图。目前，C-V2X 已由 3GPP 在其第 14 版（R14）中进行了标准化。中国和欧洲都采用 5.9 GHz 频谱支持车到车（V2V）和车到路（V2I）服务。高通、华为和大唐已经发布了 LTE-V2X 芯片模组，并已完成不同芯片组平台之间的互操作性测试。LTE-V2X 在技术上已经成熟，3GPP R15 又对其进行了进一步完善。3GPP R16 正将 5G 新空口（NR）和超可靠低延时特性引入车联网标准，实现车



▲图 1 中欧 C-V2X 技术路线图

联网的 5G 化。

C-ITS 的一个重要目标是保证服务在车辆、道路设施和交通信号系统间互操作性以最大程度地提升交通安全,保障服务,这意味着国家之间要解决平台的互联互通问题。在欧洲这是一个至关重要的问题,需要不同国家汽车制造商、车联网设备提供商、车联网服务提供商、道路运营部门和道路监管部门通力合作。中欧 C-V2X 系统虽通信硬件支持互通,但采用了不同格式来传递消息。中方将基本安全消息(BSM)用于状态信息和事件通知,而欧洲将其分为合作感知消息(CAM)和分散环境通知消息(DENM)。双方系统互通需要进一步研究。

2 中欧 V2X 合作

中欧通过车联网联合试验共同评估智能交通关键应用场景、研究互操作性问题,并在标准方面进行合作。目前欧盟有 2 个大型研究项目参与中欧 C-V2X 联合试验。其中 5G-DRIVE 由欧盟地平线计划支持,根据中欧签订的双边合作协议,与中国移动牵头的 5G 大规模试验项目合作,展开 5G 增强移动宽带(eMBB)及 C-V2X 测试和研究工作^[4]。该项目通过联合试验和研究促进中欧之间在 5G 和车联网方面创新和技术合作。其项目成员来自 10 个欧洲国家及 18 个合作伙伴。车联网课题由 ERTICO、宝马、芬兰国家技术研究中心、欧盟联合研究中心(JRC)、Dyngniq、法国电信、卢森堡大学和 Vedia 参与。该项目测试车联网中 V2N、V2V 及车到基础设施(V2I)中的关键场景。车与网场景将测试 5G 连接下的车与网服务性能,并重点评估 DENM、车辆信息消息(IVI)、信号相位与时间消息(SPAT)和地图数据消息(MAP)在 5G 网络中的性能。移动边缘计算(MEC)服务器将部署

在 5G 网络中,处理大容量车辆感应数据。V2V 和车与路方案将使用 LTE-V2X 模块实现。该项目将定义并测试新的车与车消息集用于车辆间进行协同感知和操纵。

5G-DRIVE 将与中国项目一起测试关键车联网场景并比较其性能。该项目有 2 个车联网试验场:位于芬兰的 Espoo 试验场配备了 3.5 GHz 的 5G 基站、LTE-V2X 设备和移动通信信号灯,可用的道路长度约为 2.6 km(包括十字路口和停车场),测试场景包括 GLOSA 和智能路口;位于意大利 Ispra 试验场由欧盟联合研究中心提供,具有 36 km 内部试驾道路、9 个用于测量电磁兼容性和干扰测试的汽车排放实验室,该试验场将用于评估 GLOSA 并测试 V2X 技术共存性问题。

5G-MOBIX 是另一个与中国进行 C-V2X 联合试验的欧盟项目,也是欧洲 3 大跨国 C-ITS 走廊试验的项目之一^[8]。5G-MOBIX 在欧洲、中国和韩国等多地测试智能交通和自动驾驶应用,重点评估协作互联及自动驾驶(CCAM)技术。其试验场景包括合作超车、高速公路车道合并、智能车队、道路用户检测、车辆远程控制、高清地图更新等。在中国,5G-MOBIX 将在济南试验场评估 CCAM 方案。该试验站点有 2 条主要道路,测试用例包括:自动驾驶(自动超车和协作式避碰)、道路安全和交通效率服务、在网络覆盖范围之外车联网支持等。

3 欧洲 C-V2X 研究试验

中欧车联网试验中的测试包括 GLOSA 场景、智能路口场景、自动驾驶场景。GLOSA 场景测试利用交通信号来优化交通流量,智能路口场景测试通过合作感知实现了碰撞避免,自动驾驶场景测试通过协作感知和机动协调提高自动驾驶安全性。

3.1 GLOSA 场景

GLOSA 将实时交通和信号灯信息通过道路基础设施反馈给车辆,为驾驶员提供最佳速度建议,以减少或避免等待信号灯时间。图 2 显示的是 5G-DRIVE 中 GLOSA 测试场景。当车辆接近信号灯时,速度建议将显示在汽车的仪表板上,指示驾驶员调整车辆速度。当车辆停在信号灯处,GLOSA 还可以提供绿灯等待时长。GLOSA 可以减少燃油消耗和排放,同时改善市区的交通流量。GLOSA 性能跟车辆获取信号灯信息的方式、路边终端与车辆的连接质量,以及路口交通流量等有关。GLOSA 信息可以直接由路边终端或通过 V2N 的方式发送。这不仅对车辆定位精度提出要求,还要求接受信息的时延在规定范围内(在 300~600 ms)。车辆接受信号灯信息的时延及可靠性是评估 GLOSA 性能的重要指标。

GLOSA 场景的技术评估指标具体包括:

- (1) 丢包率,车载单元(OBU)中未成功接收到的数据包与路边单元(RSU)发送的数据包总数的百分比;
- (2) 延迟,从路边单元发送数据包的时间到车载单元收到数据包的时间(以毫秒为单位)。

3.2 智能路口场景

智能路口场景用于提升交叉路口安全性。车辆通过车联网技术与道路设施和其他车辆交互,获得自身难以感知交通情况,以做出及时判断。图 3 显示的是如何利用车联网技术在交叉路口实现行人保护。图中路口的右转车辆需要避开人行横道上的行人(VRU)。当在人行横道上检测到行人时,RSU 广播 DENM 消息,而后台服务器将此消息广播到附近的所有车辆,警告可能发生的碰撞,避免车

辆启动紧急刹车。该场景将测试各种 DENM 警告消息。在路况复杂的路口，有较多车辆参与信息共享。这对消息传达的及时性和准确性提出要求。且又因消息的长度不一，需要评估通信设备支持不同消息的性能。

此场景的技术评估指标为：

- (1) 丢包率；
- (2) 延迟；
- (3) 总活跃车联网设备，此指标对在测试对象的通信范围内有多少其他活跃车联网设备进行跟踪；
- (4) 以 Mbit/s 为单位的总信道负载，信道的总负载可用于确定预期数据冲突量；
- (5) 通道上的总消息数 / 秒，同样的数据量使用 1 Mbit/s 负载的客户端比 100 个 10 kbit/s 负载的客户端发生数据冲突可能要小很多。

3.3 自动驾驶场景

自动驾驶场景测试协作感知消息（CPM）和机动协调消息（MCM），用于改善车辆自动驾驶功能。支持自动驾驶的车联网架构如图 4 所示。CPM 消息用于在车辆和基础设施之间共享感知信息^[10]，该消息可以让自动驾驶车辆和基础设施及其他车辆共享环境信息，以从不同角度进行对象检测。CPM 不仅包含检测到的对象，还包含其传感器性能。这使消息接收者能够评估检测质量并获知哪些区域尚未检测。通过协作感知，车辆可以避免单一传感器探测区域有限或者因物体阻挡未能探测等问题；通过大规模消息共享，获得周围环境的完整情况。MCM 用于协商车辆通行优先权。协调车辆通行可导致传送大量小型消息，对通信模块提出了相关性能要求。除了车辆间协商，道路基础设施也可以通过 MCM 消息指示车辆通行，例如提供换道建议，这些都需要在测试中评

估通信模块性能。

自动驾驶场景的技术评估指标包括：丢包率、延迟、总活跃车联网设备数、带宽和通道上的总消息数 / 秒。CPM 技术难点集中在带宽保证上，而 MCM 集中在活跃设备数和消息 / 秒上。

表 1 列出了车联网各场景试验涉

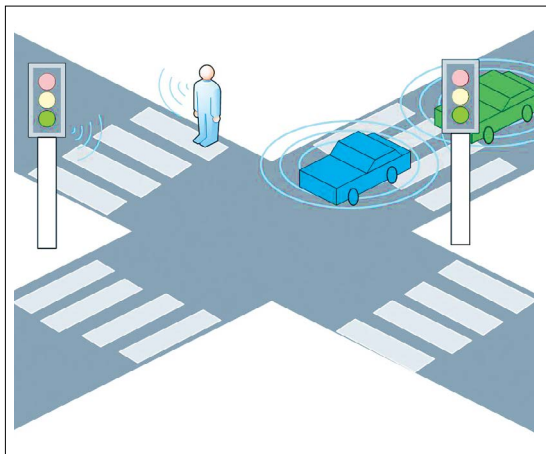
及的技术评估指标。

4 中国 C-V2X 的规模试验

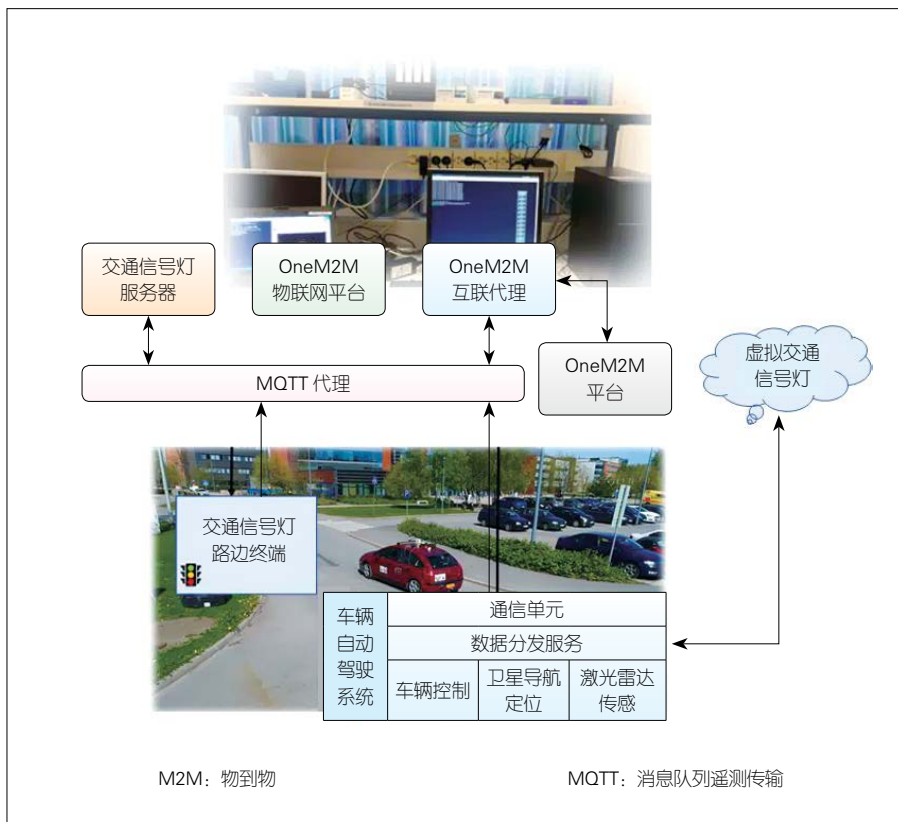
中国已启动了大规模 LTE-V2X 试验，场地包括开放道路和封闭道路。其中无锡已实现了覆盖 170 平方千米、240 个十字路口和万级终端的城市级



▲图 2 GLOSA 测试场景



▲图 3 车联网技术支持智能路口防撞检测



▲图 4 车联网试验中支持自动驾驶的系统构架

开放道路应用示范。这些应用服务包括 GLOSA、限速告警、交通拥堵告警、道路施工告警、紧急车辆优先通行、前方碰撞告警、紧急情况电子刹车灯和紧急车辆优先等。

中国移动参与了多地车联网技术试验及应用示范。根据前期试验反馈，中国移动在 5G 产品规模试验项目中使用最新的 LTE-V2X 产品进行 C-V2X 端到端测试。待评估的 C-V2X 系统是基于 LTE-V2X 设计的，并可升级到 5G V2X 技术架构。前者基于 4G 蜂窝网，后者基于 5G 新空口（NR）蜂窝网。由于网络容量不同，LTE-V2X 和 5G V2X 将支持不同的 V2X 应用。

待测试的 LTE-V2X 系统具有 2 个无线通信接口：LTE Uu（基站与终端间的通信）接口和 PC5（直连通信）接口。LTE 采用 2.6 GHz 频率、20 MHz 带宽、5 ms 的帧传输周期为，每个基站均配备 8Tx 和 2Rx 路径天线。PC5 接口采用 5.905~5.925 GHz 频段，提供 OBU 和 RSU 间通信。测试将评估 LTE Uu 和 PC5 的组网性能以及 V2X 业务端到端性能。

中国移动 5G 规模试验项目定义了一系列测试场景，其中联合测试场景将与欧盟合作项目共同完成。

5 自动驾驶试验结果

目前芬兰国家技术研究中心已在芬兰测试场地做了部分自动驾驶试验，先期采用基于 LTE 网络的车对网连接。自动驾驶车辆利用本身传感器探测路面，同时通过移动网络连接边缘和云端服务器共享部分数据。测试评估了与网络相关的技术指标，主要分析了时延对自动驾驶的影响。

图 5 a) 显示了测试路径中商用 LTE 网络信号覆盖强度，其中底部道路信号微弱，造成的高网络时延及时抖动难以满足自动驾驶要求。图 5 b)

显示了 LTE 测试网络的覆盖范围。由于天线方向待调，覆盖范围需要优化；但由于测试网络只用于自动驾驶测试，测试中网络时延等技术指标明显优于商用 LTE 网络。

测试网络的平均时延为 372 ms、方差为 92 ms，当车辆驾驶速度低于 20 km/h 时，100 ms 左右的网络时延可以满足自动驾驶需求。车辆在市区的驾驶速度一般为 50 km/h，这时需要网络时延小于 50 ms。在 5G 网络中，可通过网络切片满足时延需求，以确保自动驾驶的安全性，这也是 5G 一个重要的研究方向。此外，现有 LTE 网络上行通道速率明显低于下行通道速率。通常，下行速率是上行速率的 4 倍；

而在车辆遥控操作场景中，下行速率要求高于上行速率（具体见图 6）。如何动态适配上下行速率也是 5G 网络需要解决的问题。

6 C-V2X 的未来方向

基于 3GPP 的 5G V2X 仍在标准化中，5G NR-V2X 芯片及平台尚在研发中。当前，中欧车联网试验将主要集中于 LTE-V2X 技术和 ITS Day-1 及 Day-1.5 服务，对 5G 的评估主要在 V2N 功能方面。

LTE-V2X 在带宽、延迟和可靠性方面具有局限性，无法支持车联网新应用，例如自动及遥控驾驶。车辆间大传感数据共享要求通信模块能够

▼ 表 1 车联网试验技术评估指标

试验	测试环境	技术评估指标
DENM V2I	DENM 设备数: 5/10/15/20 CAM 设备数: 50/100/150/200	丢包率 < 1% 延迟 < 10 ms
GLOSA V2N	CAM 设备数: 100/200/300/400/500	丢包率 < 10% 延迟: MAP < 5 s, SPAT < 2 s
CPM V2X	CAM 和 CPM 设备数: 80/100/120/140	丢包率 < 10% 延迟 < 100 ms 速率 > 1.6 Mbit/s
MCM V2X	活跃 CAM and MCM 设备数: 100/200/300/400/500	丢包率 < 10% 延迟 < 100 ms 活跃设备数 ≥ 300

CAM: 合作感知消息

CPM: 协作感知消息

DENM: 分散环境通知消息

GLOSA: 绿灯最佳速度建议

MAP: 地图数据消息

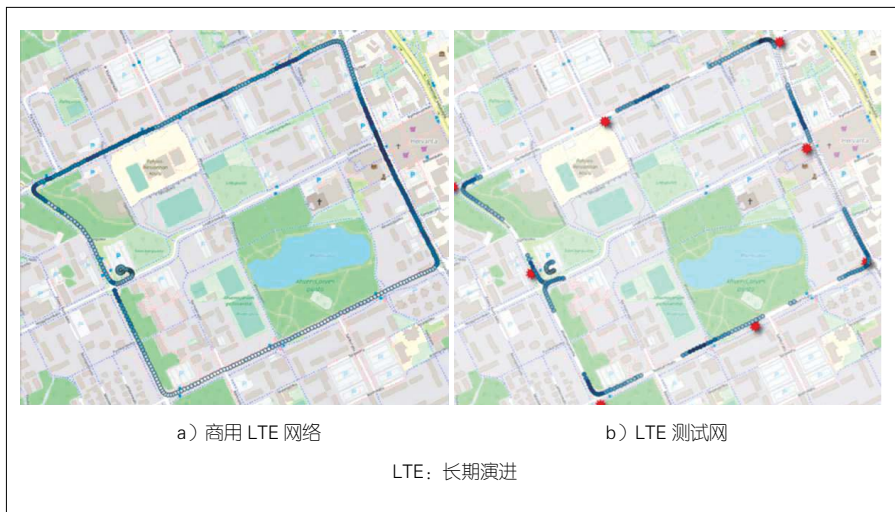
MCM: 机动协调消息

SPAT: 信号相位与时间消息

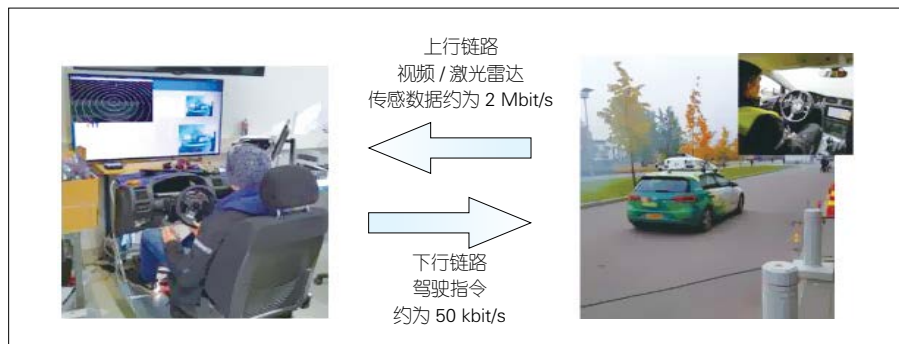
V2I: 车到基础设施

V2N: 车到网络

V2X: 车用无线通信



▲ 图 5 自动驾驶网络覆盖测试



▲图 6 5G-DRIVE 中远程遥控驾驶

支持高达 1 Gbit/s 的传输速率、低至 3~10 ms 的时延和高可靠通信。为了克服 LTE-V2X 的局限性, 3GPP R15 将载波聚合、高调制方案、延迟降低以及多样性传输等引入了 LTE-V2X 中, 进一步提升 PC5 性能。

全功能的 5G V2X 将在 3GPP R16 中推出, 并将使用基于 5G 的空口技术。通过新的无线接入技术, 5G V2X 将会实现更小的时隙结构、高级信道编码和多天线技术等实现高速、低延迟和可靠性通信, 以满足自动驾驶新业务的要求。5G V2X 支持的新场景将包括高吞吐量传感器共享、协同驾驶、远程驾驶和动态地图共享等, 同时它将与 LTE-V2X 共存互补。支持 NR-V2X 芯片组将在 3GPP 版本 16 发布后一年半左右发布。

7 结束语

中欧车联网合作聚焦于 C-ITS 重要用例, 其试验结果对两地车联网技术协同有重要价值, 大规模部署 C-V2X 已提上日程。考虑到众多车联网应用对可靠性和延迟的要求, 5G C-ITS 将

有重大进展。期待中欧在 5G C-V2X 展开更深入的合作。

参考文献

- [1] Connecting Vehicles – Today and In the 5G Era with C-V2X[R]. GSMA, 2019
- [2] Counterpoint. Global Connected Car Tracker 2018[EB/OL].(2019-11-20)[2020-01-10]. <https://www.counterpointresearch.com/125-million-connected-cars-shipments-2022-5g-cars-2020>
- [3] ALEXANDROS K, IOANNIS D, ATHANASSIOS D, et al. 5G Trial Cooperation Between EU and China[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshop on 5G-Trials. IEEE: China, 2019
- [4] European Commission. C-ITS Platform[R]. 2016
- [5] ASSELIN-MILLER N, BIEDKA M, GIBSON G, et al. Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report [EB/OL].(2019-12-29) [2020-01-10]. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2016-c-its-deployment-study-final-report.pdf>
- [6] C-Roads Platform[EB/OL].(2019-12-29) [2020-01-10]. <https://www.c-roads.eu>
- [7] 5G-MOBIDX Project[EB/OL]. [2020-01-10]. <https://www.5g-mobix.com>
- [8] 5GCroCo Project[EB/OL]. [2020-01-10]. <http://5gcroco.eu>
- [9] SHINDLER J, BLOKPOEL R, RONDINONE M, et al. MAVEN D5.1, V2X Communications for Infrastructure-assisted Automated Driving[EB/OL].(2019-12-29)[2020-01-10]. <http://adas.cvc.uab.es/maven/enigma-portfolio/deliverable-5-1-v2x-communications-for-infrastructure-assisted-automated-driving>
- [10] RONDINONE M, CORREA A, BLOKPOEL R, et al. TransAID D5.1, Definition of V2X Message Sets [EB/OL].(2019-12-29)[2020-01-10]. <https://www.transaid.eu/deliverables>

作者简介



陈涛, 芬兰国家技术研究中心高级研究员、英国肯特大学荣誉教授、芬兰于韦斯屈莱大学兼职教授; 主要研究领域为新一代移动通信网络新构架、新业务、网络资源优化; 主持欧盟 5G PPP 项目 2 项, 参与欧盟及芬兰国家研究项目 10 余项; 已发表论文 70 余篇, 其中被 SCI 收录 46 篇。



Matti KUTILA, 芬兰国际技术研究中心高级研究员; 主要研究领域为自动驾驶、光传感器、车联网技术; 主持参与多项自动驾驶研发项目; 目前已发表论文 35 篇。



郑银香, 中国移动通信研究院车联网技术试验团队负责人; 目前从事车联网领域的科研工作, 承担车联网领域的标准研究、顶层设计、技术试验及规模试验等多项内容。



邓伟, 中国移动通信研究院无线与终端所副所长; 研究方向为蜂窝移动通信, 目前主要从事 5G 商用运营技术攻关工作。



王江舟, 英国肯特大学教授、英国皇家工程院院士、IEEE Fellow, 曾任多个国际权威学术期刊编委或客座编委; 获 IEEE Globecom2012 最佳论文奖; 发表论文 300 余篇, 出版学术著作 3 部。



车联网产业发展分析

Development of the Internet of Vehicles Industry

汤立波 /TANG Libo

(中国信息通信研究院, 北京 100191)
(China Academy of Information and Communications Technology,
Beijing 100191, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20200214.1027.002.html>

网络出版日期: 2020-02-14

收稿日期: 2019-12-20

摘要: 从车联网概念内涵和关键要素入手, 分析车联网产业涉及的技术要点和技术发展路线。认为车联网关键技术向着智能化、网联化的方向发展。通过对汽车电子、车联网新型通信技术、车联网服务等产业的发展形势和中国车联网产业政策环境的研究, 认为车联网产业处于加速发展战略机遇期。

关键词: 车联网; 汽车电子; 通信; 服务; 蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术; 5G

Abstract: Starting from the concept and key elements of the Internet of Vehicles (IoV), the key technical points and technology development routes of the IoV industry are analyzed. It is considered that the key technologies of the IoV are developing towards the direction of intelligent and networking. Based on the research on the development situation of automotive electronics, new communication technologies of IoV, IoV services and the policy environment of China's IoV industry, this paper gives a judgment that the Internet of vehicles industry is in a period of strategic opportunity for accelerated development.

Keywords: IoV; automotive electronics; communication; services; Cellular Vehicle to X (C-V2X); 5G

车联网产业是汽车、信息通信、道路交通等行业深度融合的新型产业形态, 被认为是物联网体系中最有产业潜力、市场需求最明确的方向之一, 对促进汽车和信息通信产业创新发展、提升汽车和交通服务能力具有重要意义, 已经成为全球新一轮科技创新和产业发展的必争之地。本文中, 我们研究车联网的内涵和关键技术发展路线, 分析车联网产业总体发展态势, 对中国车联网产业状况和政策环境进行剖析, 并对车联网产业未来发展形势进行研判。

1 车联网内涵及技术路线分析

利用新一代信息通信技术, 车联网实现车内、车与车、车与路、车与人、车与服务平台的全方位网络连接,

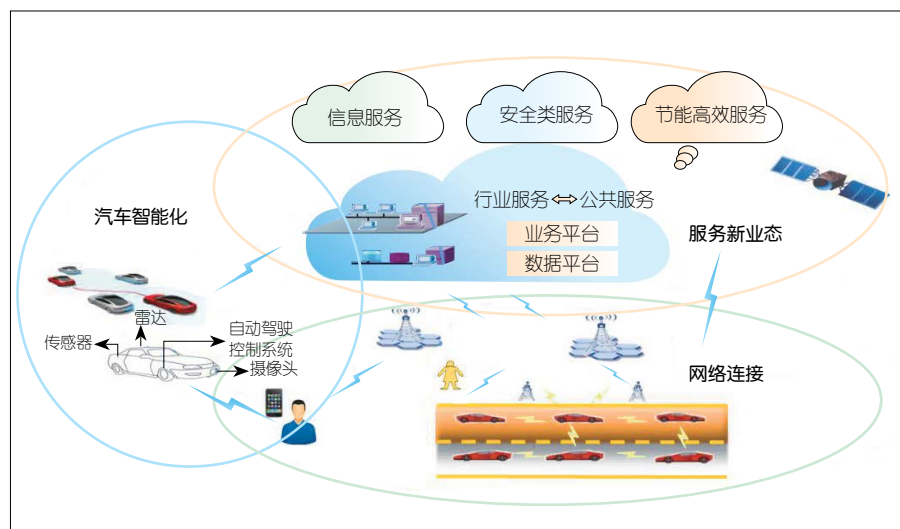
提升汽车智能化水平和自动驾驶能力, 构建汽车和交通服务新业态。其中, “网络连接” “汽车智能化” “服务新业态” 是车联网的 3 个核心要素。中华人民共和国工业和信息化部 (简称 “中国工信部”) 发布的《车联网 (智能网联汽车) 产业发展行动计划》《国家车联网标准体系建设指南》等政策文件都体现了这个思路。中国工信部在顶层设计上将智能网联汽车、汽车和交通联网通信、新型服务纳入车联网产业统筹考虑, 在车联网产业整体架构下推动相关技术、标准和产业发展, 在实践中取得了良好的效果。图 1 为车联网内涵示意图^[1]。

车联网涉及的关键技术多, 技术创新活跃, 覆盖 “端-管-云” 3 个层面。重点关键技术包括: “端” 层面关键

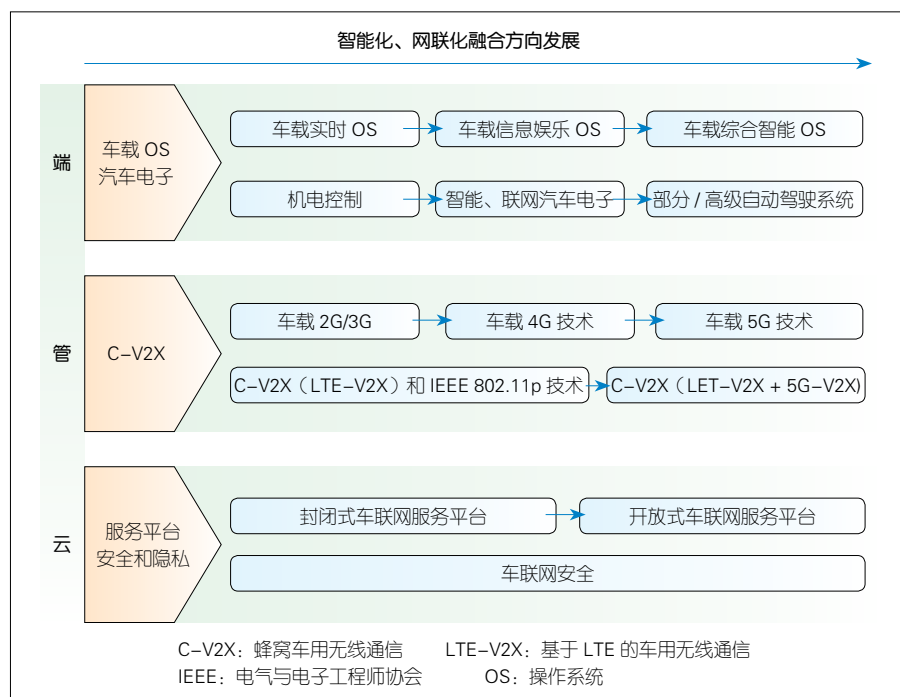
技术涉及新型汽车电子、车载操作系统等; “管” 层面关键技术涉及 4G 和 5G 车载蜂窝通信技术、蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术 (含基于 LTE 的车用无线通信 (LTE-V2X) 技术、基于 5G 的车用无线通信 (5G-V2X) 技术以及电气与电子工程师协会标准 (IEEE 802.11p) 无线通信技术等; 在 “云” 层面上, 车联网平台开放、数据挖掘等技术是核心。另外, 车联网安全技术也是当前研究的重点, 车联网安全如果做不好, 可直接导致财产损失和人身伤害。

图 2 给出了车联网关键技术及技术发展路线。总体上看, 车联网技术向着智能化、网联化融合方向发展, 业务生态逐步走向开放^[1]。

在汽车电子和软件技术方面, 高



▲图1 车联网内涵示意



▲图2 车联网关键技术及技术发展路线示意

性能新型汽车电子技术创新活跃，向支持辅助驾驶、部分/高级自动驾驶方向发展。其中，传感融合、高性能计算芯片、新型人机交互是汽车电子技术研究热点。在软件方面，车载操作系统功能逐步丰富，从单一功能的实时操作系统向信息娱乐操作系统以及综合智能操作系统方向发展。操作系统软件结构呈现层次化、模块化、

平台化的趋势。

在汽车和交通新型通信技术方面，LTE-V2X 技术逐渐成熟，与 IEEE 802.11p 技术路线形成竞争并逐步取得优势。下一步 LTE-V2X 将向 5G-V2X 演进并与之形成互补。同时，面向汽车和交通的 5G 产品研发速度加快，汽车和交通环境下的通信能力和质量也将越来越高。

在车联网应用技术方面，车联网服务和平台技术由功能简单、封闭体系向支持综合业务、开放服务转变，并逐步支持新型业务生态和自动驾驶应用。车联网服务生态逐步升级，同时，车联网安全技术整体还处于研究初期，汽车控制安全保护技术亟待突破。

2 车联网产业发展形势分析

车联网产业处于爆发前的战略机遇期。汽车电子保持高速增长，新型通信技术快速成熟，车联网应用蓬勃发展，政策环境不断完善，这些都表明车联网产业已进入发展快车道。

2.1 汽车电子保持强劲发展势头

当前，汽车电子产业创新活跃，同时电子产品在整车成本中所占比重也越来越高。特别是在中高端车型、混合动力车型、纯电动汽车中，电子产品的成本占比已经接近甚至超过 50%。在全球汽车销量整体放缓的情况下，汽车电子总销售额仍保持较高增长水平。从全球范围看，博世、大陆、电装等跨国零部件企业占据了绝大多数中高端汽车电子产品市场，涵盖动力控制、底盘电子、车身电子、安全系统、车载信息娱乐系统、驾驶辅助系统（ADAS）等大部分关键产品。汽车电子产业中，ADAS、信息娱乐系统是创新活跃地带，其市场增长远高于传统零部件，这体现了汽车在智能化、网联化方面的强烈市场需求。据 IHS 咨询公司统计，博世、法雷奥、大陆占据全球 ADAS 系统市场 TOP3；大陆、松下、现代摩比斯占据全球信息娱乐系统市场 TOP3。另外，在 ADAS 和信息娱乐相关产业中，车载信息采集、车载运算处理、人机交互是当前新型产品研发和竞争的热点。从总体看，中国在中高端汽车电子产品领域基础薄弱，市场占有率很低。目前的产品

以中低附加值汽车电子产品为主,存在汽车电子产业核心竞争力明显不足的问题。

2.2 新型通信产品快速成熟

目前,汽车和交通行业已经将联网功能作为未来发展的重要技术特性。中国在联网通信方面具有良好的产业基础,能与国际保持同步,并在LTE-V2X、5G等领域处于国际领先地位。新型通信产品快速成熟,将为车联网服务和汽车智能化提供更高质量、更强通信能力支持。

中国LTE-V2X产业快速发展,在技术标准、产品研发、试验验证方面取得显著成效^[2]。

(1) 中国LTE-V2X基础技术标准基本完成。中国通信标准化协会完成了LTE-V2X通信和安全相关的核心技术标准以及关键设备标准的制订;中国汽车、信息、通信、交通4个行业标委会建立了定期沟通机制,正在联合推动车联网行业应用标准的制订和完善。

(2) 中国LTE-V2X产品研发进展迅速,已具备支持大规模应用试验和产业化的条件,初步形成覆盖LTE-V2X芯片、终端和系统的完整产业链。大唐、华为等公司在全球首次发布LTE-V2X通信芯片后,涌现出大唐电信、华为、星云互联、东软集团、金溢科技、万集科技、华励智行、千方科技、中国移动等一批LTE-V2X车载终端、路侧设备提供商。同时,全球大量整车企业对C-V2X的接受程度越来越高。汽车产业具备了较好的产业推广环境。

(3) 试验验证较充分。中国工信部自2015年起陆续建立了10个车联网相关示范区和测试区,开展了大量关键技术测试试验。无锡建立了全球首个城市级车联网(LTE-V2X)

示范应用项目,开展规模应用试验和业务模式探索。国际移动通信-2020(IMT-2020,即5G)推进组C-V2X工作组、中国信息通信研究院等联合跨行业企业,于2018—2019年连续开展了C-V2X“三跨”“四跨”互联互通应用示范,验证了中国技术标准及相关产品的有效性,证明了LTE-V2X相关模组、终端以及整车、安全等企业已经做好规模化试验和产业化应用准备。另外,从国际发展看,近年来美国致力于推动基于IEEE 802.11p的V2X技术发展;但在2019年11月20日,美国联邦通信委员会(FCC)主席AJIT PAI提议FCC为C-V2X技术在5.9 GHz频段分配专用频谱。2019年12月12日举行的FCC公开会议,正式投票通过该提议,确定对5.9 GHz频段分配机制重新研究。这一消息也显示美国政府和产业界正在逐步接受LTE-V2X技术。从总体看,LTE-V2X产业发展迅速,基本具备规模化试验和应用条件,将成为下一步汽车联网市场的爆发点。

中国的5G研发和商用步伐处于国际前列。2019年6月6日,中国工信部正式向中国电信、中国移动、中国联通、中国广电发放5G商用牌照,这标志着中国正式进入5G商用时代。5G在设计之初就特别强调与行业应用结合。中国提出的5G 4大场景中的低延时、高可靠、大带宽等特征非常适用于汽车和交通行业应用。中国相关企业也在大力推动5G与车联网融合发展,积极开展相关试验和测试。例如,2018年6月,中国移动联合上汽、华为在上海世界移动通信大会(MWC)上展示基于5G远程遥控编队驾驶与V2X车路协同应用;2018年9月,大唐电信与厦门市公交集团合作开展LTE-V2X与5G融合的快速公交系统(BRT)智能网联车路协同系

统;2019年3月,华为联合相关单位将LTE-V2X技术与5G应用结合,建设海南博鳌乐城智能网联示范区项目;中国电信也在雄安新区开展5G智能车联网示范区自动驾驶外场测试项目。从总体看,产业各界都在积极探索车联网与5G融合应用创新模式。5G与汽车和交通结合越来越紧密,这将为车联网发展提供 stronger 通信支持和更多选择。

2.3 车联网服务蓬勃发展

虽然车联网服务用户规模不断扩大,但车联网服务总体仍还处于发展初期。车联网服务将随着技术演进分阶段实现服务能力的提升。当前阶段以基础信息服务为主要业务形态,通过2G、3G、4G技术实现汽车、交通联网,打通汽车与交通和外部环境的信息沟通,实现定位导航、移动出行、车载娱乐、车辆管理和紧急救援等服务。目前,中国车联网市场规模增长迅速。据中国信息通信研究院统计,截止到2019年3月,中国移动、中国电信、中国联通3大运营商车联网终端连接数突破1.4亿。其中,中国移动车联网终端连接数约6100万、中国电信车联网终端连接数2000余万、中国联通车联网终端连接数接近6000万。另外,中国互联网企业也在积极发展车联网移动出行业务。截至2019年3月,移动出行用户数约5亿。滴滴出行科技有限公司是目前中国最大的移动出行平台,在中国400余座城市提供出租车、专车、快车、顺风车、豪华车、公交、小巴、代驾、租车、企业级等出行服务,其用户规模超过4亿。

下一阶段,随着新技术、新应用逐渐成熟,车联网服务能力将持续提升。LTE-V2X、5G等通信技术即将商用,智能化的汽车电子系统应用也越

来越广泛。智能化、网联化程度提升将推动汽车从代步工具向信息平台和娱乐平台转化,使业务形态更加丰富。以实现安全预警、高带宽业务和部分自动驾驶服务为目标的新型车联网应用,将成为下一步发展的重点。

面向未来,高级自动驾驶和完全自动驾驶发展逐步实现。汽车和交通环境全部联网,将解放驾驶者的双手和大脑,使汽车空间真正开放给业务开发者。车联网服务会进入快速迭代和极大丰富阶段,形成汽车和交通环境下的车联网服务新生态。

2.4 中国政策环境逐步完善

近几年,中国车联网产业政策环境快速完善:中国建立了1个跨部协调机制,发布了2个顶层设计文件,实现了3个重大政策突破,并在国家和地方陆续出台一大批车联网相关政策^[2]。

(1) 1个协调机制,是指2017年9月,经中国国务院批准由中国工信部牵头,联合交通部、公安部等20部委成立了“国家制造强国建设领导小组车联网产业发展专项委员会”,先后在北京、河北雄安新区、无锡市召开了3次全体会议,形成跨部门协调机制。跨部门、跨行业协同推动解决车联网产业发展中的一系列重大问题,为中国车联网产业的发展提供了机制保障。

(2) 2个顶层设计文件,是指2018年1月中国国家发展和改革委员会(简称“中国发改委”)发布的《智能汽车创新发展战略》(征求意见稿),

和2018年12月中国工信部发布的《车联网(智能网联汽车)产业发展行动计划》。2个文件提出中国智能汽车发展的战略思路,和车联网产业的阶段性发展目标以及关键技术、标准、基础设施、综合应用、安全保障等重点任务。2个顶层设计文件明确了中国车联网产业发展的战略方向和具体举措。

(3) 3个重大政策突破,是指《国家车联网产业标准体系建设指南》《智能网联汽车道路测试管理规范(试行)》《车联网(智能网联汽车)直连通信使用5 905 ~ 5 925 MHz频段的管理规定(暂行)》3个重要文件。国家车联网产业标准体系的发布有效地指导了中国车联网产业的标准化工作,在标准制订、跨行业标准协调方面发挥着越来越重要的作用;道路测试政策突破为中国车联网产业测试、应用示范创造了政策条件;专用频率的分配为LTE-V2X应用提供了必要的资源保障。这3大政策突破为车联网产业发展扫清了3大障碍,成为车联网产业发展历程中具有里程碑意义的重要事件。另外,中国国务院发布了《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》,工信部、国家发改委、科技部联合发布了《汽车产业中长期发展规划》,交通运输部发布《关于加快推进新一代国家交通控制网和智慧公路试点的通知》等政策文件也对车联网产业相关工作进行了规划部署。

总体上,在短短几年时间里,中国在车联网产业跨行业协调机制建设、国家顶层设计、重大问题突破等方面

取得一系列成果,这为车联网产业发展构建了良好的外部环境和政策条件。车联网产业进入快速发展通道。

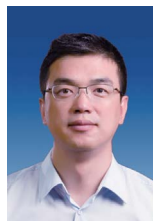
3 结束语

本文中,我们对车联网内涵进行分析,提出车联网关键技术向着智能化、网联化方向发展的观点,分析汽车电子产业强劲发展势头以及中国产业核心竞争力不足的现状,并研究了中国车联网新型通信技术的产业成熟度及国际竞争优势,给出中国车联网服务现状和未来阶段性发展重点的分析。中国逐步完善的产业政策环境,为车联网产业发展创造了良好条件。车联网产业处于爆发前的战略机遇期,已进入发展快车道。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院,华为技术有限公司,电信科学技术研究院. 车联网白皮书(2017年)[R]. 2017
- [2] 汤立波,康陈. 车联网产业融合发展趋势[J]. 电信科学, 2019, 35(11): 96-100. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019277

作者简介



汤立波, 中国信息通信研究院产业互联网研究部主任、高级工程师; 长期从事车联网、物联网技术研究, 承担大量产业规划、标准制定和科研专项任务; 曾获得中国通信标准化协会科学技术二等奖、三等奖等奖项。



C-V2X 技术 在智能网联行业中应用探讨

Application of C-V2X Technology in Intelligent Connected Industry

宋蒙 /SONG Meng, 刘琪 /LIU Qi, 许幸荣 /XU Xingrong,
王题 /WANG Ti

(中国联通智能城市研究院, 北京 100048)

(China Unicom Smart City Research Institute, Beijing 100048, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001013

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200222.1446.004.html>

网络出版日期: 2020-02-23

收稿日期: 2019-12-26

摘要: 智能网联汽车可以实现安全、舒适和高效的行驶。蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术是实现智能网联业务的重要技术手段之一。全球多个标准组织都开展了包括 C-V2X 关键技术、网络架构和业务应用场景的研究。C-V2X 与感知技术、移动边缘计算 (MEC) 和 5G 相融合, 能够为实现智能网联业务提供强大的助力。C-V2X 网络的部署采用“终端-网络-平台”的一体化架构。通过开展规模试验、试点部署积累经验, 逐步实现大规模商用落地。C-V2X 也面临着产品商用化推广、建设投资成本较高以及商业模式不清晰等挑战。

关键词: 智能网联汽车; C-V2X 技术; 商用部署

Abstract: Intelligent Connected Vehicle is able to achieve safe, comfortable and efficient driving and Cellular Vehicle to X (C-V2X) is one of the key enabling technologies. At present, many standards organizations around the world have carried out research on key technologies, network architecture and application scenarios of C-V2X. Combining with sensor technology, Mobile Edge Computing (MEC) and 5G, C-V2X provides powerful assistance for the realization of intelligent connected business. C-V2X network deployment will adopt an integrated architecture consisting of terminal, network and platform. The large-scale commercial implementation will be realized on the basis of experience from scale tests and demonstration deployment. C-V2X is faced with the challenges of product commercial promotion, high cost of construction investment and unclear business model.

Keywords: Intelligent Connected Vehicle; C-V2X Technology; commercial deployment

智能网联汽车是按照约定的通信协议和数据交互标准, 实现车与车、车与路以及车与云平台等智能信息交换共享, 实现安全、舒适、节能、高效行驶的新一代汽车。智能网联产业具有技术整合、信息共享、产业融合的特点。感知技术、通信技术、定位技术等多种先进技术的融合, 可实现高效的信息交互和智慧交通。

目前中国的政策大力扶持智能网联行业发展, 将推动智能网联相关的技术研发和落地应用作为发展目标。中国目前有全球规模最大的移动通信网络以及第一的汽车保有量, 对智

能网联行业的发展有强大的市场驱动力。蜂窝车用无线通信 (C-V2X) 技术使车与车、路、云能够通信, 从而获得实时路况、道路信息、行人信息等一系列交通信息, 是未来智能网联行业的关键使能技术。对运营商来说, C-V2X 也是探索业务转型、拓展新市场的重点领域。

1 C-V2X 技术研究现状

目前, 第三代合作伙伴计划 (3GPP) 已经分别发布了对基于长期演进的车用无线通信 (LTE-V2X) 技术以及基于 5G 的车用无线通信 (5G-V2X)

技术定义的 27 种^[1] 和 25 种^[2] 应用场景。其中, 3GPP TR 22.885 定义的应用场景主要实现辅助驾驶功能, 包括主动安全 (例如碰撞预警、紧急刹车等)、交通效率 (例如车速引导)、信息服务 3 个方面。3GPP TR 22.886 主要实现自动驾驶功能, 包括高级驾驶、车辆编队行驶、离线驾驶、扩展传感器传输等。

3GPP V2X 研究可分为 3 个阶段:

(1) 第 1 阶段在 R14 中完成, 包括 Uu (基站与终端间的通信) 接口以及 PC5 (直接通信) 接口 2 种通信方式, 车对车 (V2V)、车对基础设施 (V2I)、车对人 (V2P) 和车对网络 (V2N) 4

类业务模式和 TR 22.885 中的业务场景。同时,在业务需求方面,标准也针对 LTE-V2X 支持的最大移动速度、时延、消息发送频率、数据包大小等参数进行了定义^[3-4]。

(2) 第 2 阶段是在 R15 中完成对 LTE-V2X 技术增强,进一步提升 V2X 的时延、速率以及可靠性等性能,以进一步满足更高级的 V2X 业务需求,即 TR 22.886。其相关技术主要针对 PC5 的增强,采用与 LTE-V2X 相同的资源池设计理念和相同的资源分配格式;因此可以与 LTE-V2X 用户共存且不产生资源碰撞干扰影响。

(3) 第 3 阶段是基于新空口的蜂窝车用无线通信(NR-V2X)技术标准技术研究。主要是在 R15 中完成对 NR-V2X 技术研究(SI 阶段),并在 R16 中完成对 NR-V2X 的标准化(WI 阶段)。该阶段预计在 2020 年 3 月份完成。

2016 年 9 月,奥迪、宝马、戴姆勒、爱立信、华为、英特尔、诺基亚及高通发起成立的会员式组织 5G 汽车联盟(5GAA),着眼于开发、测试、推动用于自动驾驶、业务泛在接入、智慧城市整合及智能交通等应用的通信解决方案,助推标准,促进产品的商用化发展与全球市场渗透。此外,中国通信标准化协会(CCSA)、中国智能交通产业联盟(C-ITS)、未来移动通信论坛(FuTURE)等多个标准组织与产业联盟目前也正在积极推动 V2X 方面的标准研发和场景测试。

2 C-V2X 助力智能网联业务

2.1 C-V2X 与感知结合是智能网联汽车未来的发展方向

面向未来高级智能驾驶的技术路线主要分为 2 个:一个是单车智能化,另一个是基于 C-V2X 技术的网联化。

单车智能化主要通过雷达、摄像

头等传感器来感知周围环境状态信息,并对数据进行收集处理、分析判定,最终下达行车指令。基于感知手段获取路况信息较为精准,并且实时性高;但是,单车感知存在一定的弊端。这些弊端体现在:首先,信息探测范围有限(一般在 100~200 m 之内),并且容易受到如光照、天气等环境因素的影响,传感器灵敏度和精度会大幅下降;其次,目前市面上的高精度感知设备成本非常高,具有高级别自动驾驶能力的智能化成本甚至可能高于车辆本身。因此,单车智能化无法大规模推广应用。

基于 C-V2X 网联化使车辆可以与周围的车辆、行人、路侧设备等任何具备通信能力的对象相连,以获取周围的环境信息。C-V2X 网络采集路侧的基础设施以及摄像头、雷达等道路监测传感器的数据,使所有交通信息和交通元素更全面、更准确、更广阔地为智能网联汽车的感知系统提供决策和服务。网联化的探测范围比智能化的更大,但是它只能在网络覆盖的区域中才能发挥作用,并且受限于网络的容量和传输速率;因此,网联与智能相辅相成,二者结合是未来安全驾驶技术发展的方向^[5]。

2.2 C-V2X 与移动边缘计算(MEC)融合为用户提供区域化智能网联业务

典型的 C-V2X 场景中包括如车载终端、道路基础设施、移动网络等,对应路侧的路况感知与协同调度,多媒体视频或高精度地图分发等多种业务需求。业务平台需要将车侧、路侧获取的数据进行存储和计算,为 C-V2X 设备提供所需要的各类应用服务;因此,大量终端接入及数据传输对网络的带宽和时延有很高的要求。

MEC 是一种具有高带宽、低延

时、本地化等特点的技术,将计算存储能力与业务服务能力向网络边缘迁移,使应用、服务和内容实现本地化,一定程度上满足网络热点高容量、低功耗大连接、低时延高可靠等技术场景的业务需求。将 C-V2X 与 MEC 融合可以提升 C-V2X 端到端通信能力。MEC 能够提供强大的本地计算能力和存储资源,支持部署更具本地区域特色、更高吞吐量的 C-V2X 服务^[6]。

C-V2X 的 V2V 通信大多可以通过 PC5 直接完成,也可以利用 MEC 实现信息传输的桥梁;而 V2I 与 V2N 场景则可以更多地与移动无线通信网络发生关系,从而更充分利用 MEC 的能力。MEC 在网络的边缘提供信息技术(IT)基础资源以及虚拟化应用托管环境时,C-V2X 应用可以部署在其中。这可以显著降低 C-V2X 业务的端到端时延,改善用户体验。例如安全辅助驾驶、自动驾驶业务属于对通信时延高敏感的业务场景。如果将此类业务部署在 MEC 上,就可以降低业务时延,实现快速的数据处理和反馈。另外,MEC 的本地属性可以提供区域化、个性化的本地服务。

2.3 C-V2X 与 5G 构建智能网联新生态

5G 网络拥有高速率、低时延的特性。5G 车联网业务主要以智慧道路监测、自动驾驶、远程驾驶、编队行驶等业务为主。C-V2X 与 5G 联合组网构建广覆盖与直连通信协同的融合网络,保障智慧交通业务连续性。

5G 的低时延和 C-V2X 的道路环境感知能力,将会给交通的安全和效率带来极大提升。例如,5G+C-V2X 网络构建的智能路况监测业务场景,可以通过 5G 网络和 C-V2X 网络对路面积水、结冰、施工维护、车道异物、事故提醒、车速管控等交通路况实施采集,通过 5G 网络将信息上传至云

平台实时分析决策后,再通过 5G 和 C-V2X 将信息下发给车辆和行人,用于异常路况提醒、施工提醒、限速预警、闯红灯预警、拥堵提醒等;信息下发给交通管理部门时,可用于道路精准监控、智能交通流量分析、基础设施故障监控、智慧执法等。5G+C-V2X 实现有效规避、减少交通拥堵和事故,保障出行安全、提高通行效率。

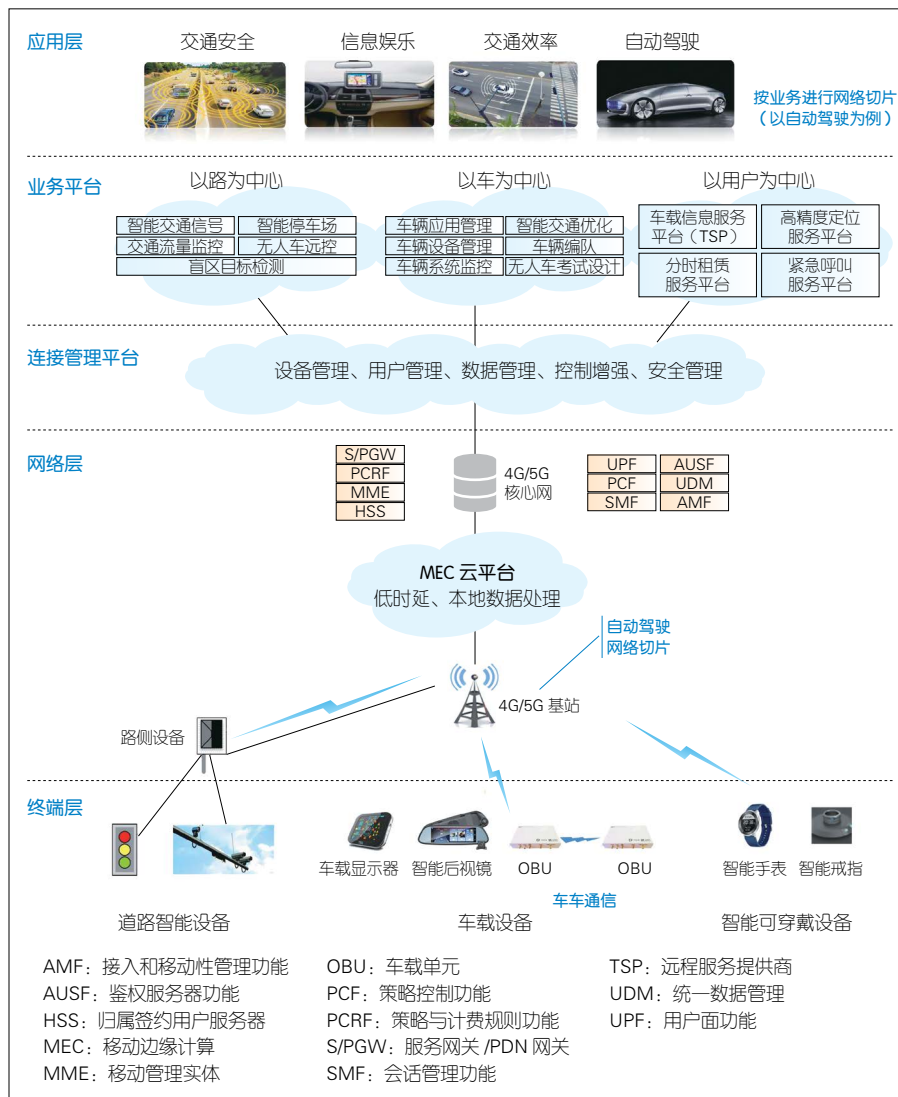
5G+C-V2X 能够提升交通效率,降低社会成本。例如,在高速公路编队行驶业务中,领队车辆为有人驾驶或一定条件下的无人驾驶,跟随车队为基于实时信息交互的无人驾驶车。领队车辆的车载摄像头、雷达采集车辆周边环境。5G 终端将采集的感知信息及车辆状态信息实时上传。平台基于上报的信息做出决策,并将决策指令下发,帮助车辆识别路况、变换行驶速度和方向。而车载 V2X 终端则实现车队车辆之间及车路之间信息交互。编队行驶可以提升整体道路的通行效率,降低人力和时间成本,带来可观的经济效益。

3 基于 C-V2X 的系统架构与发展建议

3.1 C-V2X 总体架构

基于 C-V2X 的车联网将采用“终端-网络-平台”的统一架构,如图 1 所示^[7]。路端实现基础设施的全面信息化,构建全方位数字化镜像映射交通系统;车端实现交通工具智能化,建立智能驾驶系统、智能物流系统;云端实现智能交通的一体化管控,包括大数据的收集、共享、分析,以及全局交通动态的智能管控等。

● 综合业务平台——打造车联网协同互联云平台,实现互联互通。在功能上,车联网云平台一方面具有网络管理能力(包括业务管理、连接管



▲ 图 1 智能网联体系总体架构

理), 含有车联网通用业务分析组件, 能够实现车车协同和车云协同; 另一方面具有网络开放能力, 例如进行大数据分析、拓展新的业务渠道, 或者向第三方企业开放网络接入功能。

● 一体化的交通网络——纵向通过 C-V2X, 包括 LTE-V2X 以及 NR-V2X, 实现车车、车路的直连通信, 为实现智慧交通提供更可靠、高效的网络服务。横向实现 4G/5G 网络共存, 依据不同的业务需求选用不同的网络及技术, 实现多模通信。C-V2X 与蜂窝网络相结合, 可实现网络的无缝覆盖和“车-路-云”之间的多维高速

信息传输。

● 基础设施信息化——终端即基础设施层, 是智慧交通的神经末梢, 能实现道路的全面感知与检测, 同时实现感知数据的结构化处理。雷达、摄像头、车载单元 (OBU) / 路侧设备 (RSU) 以及交通基础设施等, 通过传感器或 C-V2X 通信实现周围环境的信息收集。

3.2 C-V2X 发展建议

随着 C-V2X 技术的发展成熟, 未来的 C-V2X 网络部署落地大体上可以分为以下 3 个阶段:

(1) 组织运营商、设备商、车企、交通部门等开展规模试验, 深入挖掘智能网联服务的范围, 探索组网与运营模式的解决方案, 提升终端设备、网络设备和平台开发的成熟度, 建立起覆盖 C-V2X 功能、性能、安全性等全方位的试验体系。

(2) 针对特定场景的试运营, 在试点区域内部署路侧设备和 5G 基站, 打造示范先导示范区。例如, 在城市公交车专用道进行部署, 即在公交车上部署车联网车载终端, 可以实现交通安全、高效行驶、节能减排等各类业务应用; 在高速公路规划专用车道, 可以实现物流卡车在这些路段的车辆编队行驶, 实现智慧物流。

(3) 随着 C-V2X 技术和相关产品的进一步成熟和渗透率的提升, 以及前 2 个阶段的积累, 建立包含智能网联汽车、智慧道路和一体化管控平台的智慧交通体系, 进一步探索新的运营管理模式, 并推广到全国各重点城市和智慧新城中。

4 C-V2X 应用面临的挑战

(1) C-V2X 产品未规模商用化及推广。

与单车感知、专用短程通信技术 (DSRC) 等技术相比, C-V2X 技术的研究起步较晚。虽然 C-V2X 的关键产品 (包括芯片、车载终端、路侧基础设施等) 在近 2 年已经取得了很大进展, 但产品本身离商业部署还仍然有差距, 尚没有较大规模的商用化, 市场渗透率也较低。仍需要加大研发力度, 才能尽早实现产品规模商用。

(2) C-V2X 建设成本较高。

C-V2X 技术旨在实现车路协同, 需要路侧基础设施部署的覆盖率和车载终端部署的渗透率共同实现。路侧基础设施的部署包括 RSU、路侧感知设

备 (摄像头、雷达、环境感知设备) 以及智能信号灯、智能化标志标识等; 此外, 网络能力的增强还需要 MEC、LTE 或者 5G 蜂窝基站的部署等。目前, 中国城市道路超过 4×10^5 km, 高速公路里程也超过 1.4×10^5 km。如果实现全部覆盖, 建设成本预计在数千亿元; 因此, 未来 C-V2X 网络的建设规模、资金来源都是考验产业发展的关键因素。

(3) 尚未有成型的商业模式。

与以往传统车联网的商业模式不同, C-V2X 产业牵涉的主体众多, 还未形成强有力的主导方, 未有统一的 C-V2X 网络部署方案。整个 C-V2X 产业没有形成核心的凝聚力, 导致产业推动力量发散; 因此, 非常有必要基于示范项目逐步探索合适的商业模式, 并在推动产品成熟与跨行业协作融合的同时, 明确 C-V2X 关键的建设者和运营者。

5 结束语

智能网联业务是未来智能交通的发展方向, 而 C-V2X 是将车辆、道路与网络平台连接的桥梁。目前, LTE 的网络性能可以满足部分车联网业务。随着 5G 的到来, 网络能力会进一步加强, 这更有利于驾驶信息的获取与传输, 有助于在未来实现更加丰富的车联网服务。一方面, 运营商作为传统的通信管道提供商, 需要通过网络演进及升级来支持低时延、高可靠业务; 另一方面, 运营商也正在积极探索在新形成的车联网产业链中的角色转变, 即从传统的管道服务向全面服务运营演进。

参考文献

- [1] 3GPP. Study on LTE Support for Vehicle to Everything (V2X) Services: 3GPP TS 22.885 [EB/OL]. (2015-12)[2020-01-03]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.885
- [2] 3GPP. Study on LTE-Based V2X Services: 3GPP TS 22.886 [EB/OL]. (2017-03)[2020-01-03]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.886
- [3] 3GPP. Study on LTE-Based V2X Services: 3GPP TS 36.885 [EB/OL]. (2016-06)[2020-01-03]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.885
- [4] 3GPP. Service Requirements for V2X Services: 3GPP TS 22.185 [EB/OL]. (2017-03)[2020-01-03]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.185
- [5] 中国联通. 中国联通车联网白皮书 (2017) [EB/OL]. (2017-10)[2020-01-03]. <https://download.csdn.net/download/fishin-house/10031915?web=web>
- [6] IMT-2020 (5G) 推进组 C-V2X 工作组. MEC 与 C-V2X 融合应用场景白皮书 [EB/OL]. (2019-01-23)[2020-01-03]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201901/P020190123572024553363.pdf>
- [7] 中国联通. 5G+ 智慧交通白皮书 [EB/OL]. (2019-07)[2020-01-03]. http://www.360doc.com/content/19/0708/15/224530_847446664.shtml

作者简介



宋蒙, 中国联通智能城市研究院高级工程师; 主要从事 5G 技术、V2X 技术研究和测试验证; 已发表论文 6 篇, 拥有专利 20 项。



刘琪, 中国联通智能城市研究院教授级高级工程师; 主要从事 5G、车联网、高精度定位等方向的研究; 曾获中国通信学会科学技术奖、广东省科技进步奖等多项省部级奖项; 已发表论文 30 余篇, 出版专著 2 本, 申请发明专利 40 余项。



许幸荣, 中国联通智能城市研究院工程师; 主要从事车联网、5G、V2X 相关方向研究。



王题, 中国联通智能城市研究院教授级高级工程师, 国务院政府特殊津贴专家; 主要研究方向为 5G、智慧城市、大数据、车联网等; 曾获全国优秀工程勘察设计金奖、省部级科技进步一等奖等 40 余项。



5G：期待中发展 质疑中生长

5G: Striving for Sustainable Growth amid Expectations

王喜瑜 /WANG Xiyu

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001014

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200214.1247.005.html>

网络出版日期: 2020-02-14

收稿日期: 2019-12-16

摘要: 5G 处于发展的第一阶段, 目前仍面临诸多挑战。技术进步促进 5G 规模商用。产品的性能、集成度和功耗等核心指标, 由芯片决定。7 nm 工艺与芯片将促进 5G 的批量规模商用。异厂家集成是 5G 核心网 (5GC) 商用的最大挑战。网络切片可实现跨无线接入网 (RAN)、传输网 (TN) 和核心网 (CN) 的同厂家端到端自动部署; 异厂家端到端切片自动部署还需要运营商完善管理域规范。具备 5G 端到端能力的厂商, 在 4G 向 5G 切换的时间窗, 拥有集成调试和频谱利用的优势。5G 带动真实世界的数字化转型, 使运营商再次迎来分享新基建红利的机遇。行业应用的数字化转型要求构建多厂商共同开放的繁荣生态。

关键词: 5G; 芯片; 5GC; 高分复用; 视频云时代; 操作系统; 数据库; 数字化转型

Abstract: 5G is in the first stage of development, and is still facing many challenges. Technological progress promotes the large-scale commercial use of 5G. The core indicators such as product performance, integration and power consumption are determined by the chip. The 7 nm process and chip will promote the large-scale commercial use of 5G in batches. However, integration of different manufacturers is the biggest challenge for 5G Core (5GC) commercial use. The end-to-end automatic deployment across Radio Access Network (RAN), Transmission Network (TN) and Core Network (CN) from the same manufacturer can be realized by network slices. Automatic deployment of end-to-end slices from different manufacturers also requires carriers to improve management domain specifications. The manufacturers with 5G end-to-end capability have the advantages of integrated debugging and spectrum utilization in the time window of 4G to 5G switching. 5G drives the digitalization of the real world, which brings opportunities for carriers once again to share the new infrastructure dividends. The digital transformation of industry application requires the construction of an open and prosperous ecosystem for multiple manufacturers.

Keywords: 5G; chip; 5GC; high division multiplexing; video cloud era; operating system; database; digital transformation

2019 年, 全球超过 50 家运营商宣称 5G 正式商用, 新部署 Sub-6G 频段的 5G 基站累计超过 20 万个; 但规模建设的仅有中国、韩国、美国以及欧洲、中东地区的少数国家, 5G 仍处于建设的第一阶段。2020 年, 预计中国将建设超过 50 万个 5G 基站, 这将进一步加速全球 5G 的部署; 然而, 5G 仍然存在诸多的挑战, 例如基站密

度、设备功耗等存在问题, 可盈利的商业模式尚未形成, 运营商和相关产业的市场回报与成本投入仍然不清晰, 各种 5G 垂直应用还需要传统行业、通信产业等整个生态圈的相互合作、协同创新。

一如 10 年前全球 4G 伊始: 期待中发展, 质疑中成长; 但技术进步和应用创新实践的结合促进了 4G 的商用

部署, 移动互联网改变了社会。

1 技术进步促进 5G 规模商用

1.1 芯片技术

相对于 4G, 虽然 5G 的每比特功耗已有数量级的降低, 但为了实现数十倍于 4G 的速率、远大于 4G 的带宽和功率, 5G 设备功耗仍是一个重要议

题。产品的性能、集成度和功耗等核心指标由芯片决定。可以说,“一代工艺、一代芯片、一代产品”。如果说在 28 nm 工艺和芯片的 4G 时代,系统设备和终端都达到了可大规模商用状态,那么 7 nm 工艺与芯片将促进 5G 的规模商用。以中兴通讯为代表的中国主流通信厂商研制基于 7 nm 工艺的 5G 基带芯片与中频芯片具有突出的技术优势:集成度提升超 40%,射频全链路效率相较于 2018 提升超 20%,整机功耗与重量都有约 30% 的降低。5G 基带芯片与中频芯片技术将于 2020 年广泛部署在 5G 网络中,并随着技术的不断进步,在今后几年中带来功耗与重量的持续降低。7 nm/5 nm 芯片领跑,将为主流厂家的 5G 产品带来强大的市场竞争力。

1.2 高分复用技术

空分复用等大量新技术可以克服 5G 在较高频段部署时带来的覆盖问题,使 5G 和 4G 在城区的站点密度可以基本持平。远离基站时,中兴通讯做过极端环境下的测试:把 10 余部手机背靠背叠在一起,如果采用传统的几何波束(波束宽度为几米),将完全无法区分厘米级的不同手机;而通过大规模多输入多输出(Massive MIMO)技术,却可以成功区分出它们,并达到平均 4 ~ 5 倍的增益。根据在多个国家的商用经验,中兴通讯总结出 3 种典型复杂场景模式,即高楼场景、老城区密集场景和体育馆场景,并在这 3 种复杂场景下观察到成倍的频谱效率增益。

1.3 5G 核心网技术

异厂家集成是 5G 核心网(5GC)商用的最大挑战。目前云化和虚拟化已可实现软硬二层解耦的商用。网络切片可实现跨无线接入网(RAN)、

传输网(TN)和核心网(CN)的同厂家端到端自动部署。运营商也正在完善异厂家端到端切片自动部署管理规范。5G 语音、消息、计费、跨无线接入技术(RAT)切换、不换卡不换号的用户数据迁移等 5GC 商用业务特性已经过物联网(IoT)验证,可以满足增强移动宽带(eMBB)业务商用。而 5G 高精度定位、增强型控制分离拓扑(ETSUN)、非公共网络(NPN)、时间敏感网络(TSN)和 5G 局域网(LAN)等面向行业用户的特性标准也正在趋于完善。中兴通讯在 5GC 版本成熟度、外场验证进度、虚拟化性能等方面均处于前列,是推动 5GC 商用进程的主力军。

1.4 5G 终端技术

在 5G 发展初期,标准还在演进,这涉及到终端和系统协同推进;因此,具备 5G 端到端能力的厂商,在 4G 向 5G 切换的时间窗方面,拥有集成调试和频谱利用的优势。2019 年 2 月,中兴通讯发布了中国第一部 5G 商用手机 Axon10 Pro。截至 2019 年年底,全球 5G 手机销量约为 500 万台,占智能手机出货量的 0.15%。2020 年第 1 季度,Axon11 等新一代 5G 多模多频手机将批量上市^[1]。预计 2020 年,5G 手机将覆盖 2 000 元及以上的价格段。独立组网(SA)工业应用模块的价格也将快速下降。随着网络覆盖的逐渐完善和终端的普及,全球运营商普遍预测 2020 年全球 5G 终端规模将达到 1.6 亿台。

2 5G 商用推动行业数字化转型

2.1 5G 在垂直行业得到广泛应用

在与行业伙伴探索 5G 应用的合作过程中,中兴通讯聚焦行业愿景,以终为始挖掘应用价值^[2]。例如,与

新华社的新媒体合作,希望让每个人随时随地成为主播;与鞍钢集团有限责任公司的合作,希望能够助力传统制造行业进行现代化升级;与山西省体育局合作进行中国第二届青年运动会直播时,希望观看直播的观众可以做自己的导播;和东软医疗进行医疗合作时,致力于让大家在需要的时候都能获得最好的医生;与江西环保股份有限公司的合作,希望处处都是青山绿水;与天津港进行合作,希望打造极致、高效的港口生产体系;与新东方集团进行教育合作时,旨在打造身临其境的沉浸式教育和最好的体验;与苏宁易购集团股份有限公司进行新零售合作时,愿景是“心想物达”;与三一重工股份有限公司进行合作,希望通过数字孪生打造数字工厂,实现效益最大化。

2.2 5G 催生视频云时代到来

在 5G 垂直行业的实践和探索过程中,我们发现,无论行业需求如何多样化,都是真实与虚拟场景的结合;而视频又是真实世界得以数字化表达的基础。4G 足以传送文本、数据、图片及简单的视频;而 5G 可以让交互的、实时的、确定时延的视频与控制信号可靠传送,也因此将真实世界的数字化表达与数字化控制成为现实。5G 会带动真实世界的数字化转型。

回顾 2G 时代,运营商建设基础设施,并享受基建带来的全部红利。语音时代是运营商的钻石时代。3G、4G 时代,由于传送的内容与管道的异步与解耦属性,诸多通过互联网向用户提供服务(OTT)的厂商享受到了基建带来的红利,谁能够把握移动互联网和云计算谁就是时代的王者。而在 5G 时代,高带宽、强交互、确定时延的内容属性更依赖于网络的支持,甚至内容、计算、存储也将成为网络

的一部分。4G 催生了云计算的爆发, 5G 也将催生分布式、实时、同步的视频云计算时代的到来。电信运营商将有可能得以利用网络优势参与基建带来的红利分享。

中兴通讯致力于与行业龙头合作, 一起发现 5G 为行业带来的价值提升, 帮助合作伙伴提供最核心的基础能力: 云扩展现实 (XR) 视频行业应用能力、人工智能 (AI) 能力、智能互联能力、高精度定位能力、行业应用安全能力。

3 基础软件是建立 5G 多厂商开放生态的纽带

不同于传统消费者领域, 行业应用的数字化转型对生态的发展更为迫切, 对可靠性的要求也从 99.9% 提到 99.999%, 甚至更高。操作系统与数据库等基础软件是连接硬件与应用软件最关键的纽带。

3.1 操作系统

操作系统作为衔接硬件、软件的核心组件, 应当具备良好的封装能力, 向上能够提供主流的编程接口库, 向下能够适配主流芯片, 支持多种硬件的终端, 包括独立的安全芯片。操作系统的能力直接影响产品的性能、可靠性和安全性。高性能要求操作系统在时延和实时性等方面进行多项优化;

高可靠要求操作系统具备故障隔离、异常恢复和故障容错 3 大能力; 高安全要求操作系统从传统被动防御向动态主动防御转变, 提供全方位的安全保障, 实现深层次的安全加固。5G 时代对操作系统的底层支撑能力提出了更高的要求, 即灵活云化、实时可靠。操作系统的能力实现需要上游的硬件和下游的软件支持, 同时操作系统发展也将推动芯片及其应用发展, 有利于生态建设。

中兴新支点工业操作系统应用于关系国计民生的通信、高铁、电力等基础设施, 也应用于汽车、工业控制等关键领域。该系统在全球已有 2 亿多套的超大规模应用, 成为当今社会可靠运行的“技术底座”之一。

3.2 数据库

5G 时代产生更大规模的数据和交易。专用服务器加集中数据库的传统架构在系统性能、扩展性、架构灵活性上, 已无法满足业务长期发展的需要。通过分布式技术的应用, 构建整体性能更强、可靠性更高的分布式数据库, 可以使开放生态中各项新技术快速落地使用, 并规避传统专用服务器面临的生态萎缩、人才培养困难、造价高昂等潜在风险。在业务要求最为严苛的大型银行核心信用卡业务系统中得以应用的分布式数据

库 GoldenDB, 轻松通过了中国“双十一”购物狂欢节、“双十二”购物狂欢节等最高负荷场景的考验, 为后续更多行业的数据库创新应用, 提供了最有益的参照依据。

4 结束语

“一枝独秀不是春, 百花齐放春满园”。5G 的顺利商用, 信息高速公路的持续建设, 一网万业的真实世界数字化转型, 是中兴通讯的责任与使命; 贡献久经考验的中兴新支点操作系统与 GoldenDB 分布式数据库, 繁荣数字生态, 更是中兴通讯的情怀。

参考文献

- [1] HYERS K, UKONAH V, KERR D. 5G Smartphone Sales: China Will Drive Rapid Growth in 2020[R]. Newton: Strategy Analytics, 2019
- [2] 陆平, 李建华, 赵维铎. 5G 在垂直行业中的应用[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1):71-78. DOI: 10.12142/ZTETJ.201901011

作者简介



王喜瑜, 中兴通讯股份有限公司执行副总裁、CTO、移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室学术委员会主任, 教授级高工; 先后担任中兴通讯无线研究院院长、技术规划部部长, 现全面负责中兴通讯系统产品规划及研发; 获国家科学技术进步二等奖、广东省科学技术进步一等奖、中国通信协会科技进步一等奖等奖项。



5G 核心网演进需求及关键技术

Evolution Requirements and Key Technologies of 5G Core Network

王卫斌 /WANG Weibin

朱进国 /ZHU Jinguo

王全 /WANG Quan

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001015

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200219.1147.002.html>

网络出版日期: 2020-02-19

收稿日期: 2019-12-20

摘要: 5G 商用进程已开启, 5G 核心网架构和关键技术也已基本确定; 然而, 为了更好地使能垂直行业、更快地实现 5G 业务部署和更高效地运维, 5G 核心网还需要持续优化和演进。5G 核心网的持续演进将围绕确定网络、智能网络和灵动网络 3 方面实现。网络切片、边缘计算和应用的服务化架构也在持续优化。垂直行业引入非公开网络 (NPN)、5G 行业局域网 (LAN) 和 5G 时间敏感网络 (TSN), 以及网络数据分析功能 (NWDAF)、网络人工智能 (AI) 等关键技术。这些技术将进一步促进 5G 核心网的发展。

关键词: 网络切片; 多接入边缘计算 (MEC); 云原生; NPN; 5G LAN; TSN; NWDAF

Abstract: 5G commercial process has been started. The 5G core network architecture and key technologies have been basically determined. However, in order to better enable vertical industries, achieve faster service deployment and more efficient operation and maintenance, 5G core network still needs to be continuously optimized and evolved. The continuous evolution of the 5G core network will be realized in three aspects: deterministic network, intelligent network and agile network. The network slicing, edge computing and service-oriented architecture are also continuously optimized. For vertical industries, key technologies such as Non-Public Network (NPN), 5G Vertical Local Area Network (5G LAN), Time Sensitive Network (TSN), Network Data Analysis Function (NWDAF), and Network AI are introduced. These technologies will further promote the development of 5G core networks.

Keywords: network slices; Multi-Access Edge Computing (MEC); cloud native; NPN; 5G LAN; TSN; NWDAF

1 5G 核心网的演进需求

1.1 5G 核心网现状

5G 开启了全连接、全业务的时代。不同于 4G 核心网的单纯增强移动宽带 (eMBB) 服务能力, 独立组网的 5G 核心网能够同时提供 eMBB、超可靠低时延通信 (URLLC) 和海量机器类通信 (mMTC) 服务, 实现一网多用、使能行业数字化转型。一方面, 屏蔽接入方式的差异, 实现以用户体验为中心的接入网络; 另一方面, 网络切片和边缘计算为各行各业提供按需服务^[1]。

当前, 独立组网的 5G 核心网商

用部署已经逐步开始。5G 核心网关键技术已取得如下进展:

(1) 云化部署。

云化部署是 5G 核心网的基础。目前, 大区集中全云化核心网技术已经成熟。云化部署可构建基于业务感知的弹性网络, 使业务容量不受单一硬件物理限制, 可实现资源按需分配, 网络功能按需生成, 使 5G 网络建设更平稳、更高效^[2]。当前, 5G 核心网云化部署处于中心云部署初级阶段, 还有待引入边缘云, 中心云技术架构也需要持续演进。

(2) 服务化架构。

5G 核心网以服务代替传统网元,

以服务之间的操作来代替传统的网元间接口^[3]。服务的引入有利于组件化重用。基于超文本传输协议 (HTTP) 的服务化接口让网络和业务设计更加灵活。目前, 5G 核心网控制面已经完全采用服务化架构; 但是服务化架构仍然不够灵活、用户面功能 (UPF) 网元还未能服务化。

(3) 网络切片。

网络切片同时支持多种业务场景和用户定制网络服务, 对运营商商业模式有深远影响。目前 5G 核心网和无线接入网已经支持网络切片, 传输网也可通过虚拟局域网 (VLAN)、灵活以太网 (FlexE) 等技术实现逻辑隔离;

但是,切片标准定义涉及6个行业组织:第三代合作伙伴计划(3GPP)、国际电信联盟(ITU)、国际互联网工程任务组(IETF)、全球移动通信系统联盟(GSMA)、欧洲电信标准化协会(ETSI)和电信管理论坛(TM Forum)。其中,3GPP负责无线接入、核心网和端到端管理标准的制定,ITU/IETF负责传输标准制定,GSMA定义应用场景和切片模板,ETSI/TM Forum负责管理框架架构定义。各组织相互协同进展缓慢,制约了端到端切片的商用步伐,导致网络切片目前仍以示范、演示和技术验证为主,端到端切片自动部署还限于相同厂家设备。

(4) 分布式网络和边缘计算。

5G核心网采用控制面和用户面分离(CUPS)分布式架构,使转发功能下沉到用户侧边缘,降低了转发时延。数据本地处理保证企业用户的数据安全。网络边缘引入多接入边缘计算(MEC),并结合网络动态分流技术如业务会话连续性(SSC)模式2/3、上行分类器(UL-CL)和分支点(BP)保证最佳的用户体验和商业实践^[4];然而,边缘服务有区域限制。诸如如何保证用户移动时业务连续性,如何发现新的本地MEC服务等实际商用部署问题,仍然有待解决。

1.2 业务发展需要 5G 核心网持续增强

随着5G商用不断深入,5G应用热点将从消费互联网走向产业互联网。不同于消费互联网服务,产业互联网应用向用户提供可定制、差异化的“确定性的服务”。这些服务在工业、能源、视频、交通等行业有非常广泛的需求^[5]。5G核心网当前以3GPP Rel15为基础,主要还是面对虚拟现实(VR)/扩展现实(XR)、高清视频、实时游戏等eMBB业务场景。要支持URLLC(端到端时延<5ms,安全性

和可靠性>99.999%)和mMTC(连接密度>1×10⁶/km²)服务^[6],除了接入网要增强外,核心网也需增强。

2 5G 核心网演进的关键技术

5G核心网演进聚焦在网络架构、垂直行业应用使能和网络智能化3个方面。

2.1 网络架构

(1) 网络切片演进。

切片是5G核心网的核心特性。不同于传统的服务质量(QoS)、接入点名称(APN)/数据网络名称(DNN)技术,切片可以提供端到端的专用网络,满足行业用户差异化的网络需求;而QoS只能提供单类用户的性能保障,APN/DNN只能选择服务接入点,无法区分无线能力。

4G/5G互通切片选择。4G并不支持网络切片。在4G演进分组核心网(EPC)和5G网络互通的时候,如何选择合适的5G网络切片以避免或减少对4G网络产生影响是需要解决的问题。为此,现有网络切片技术需要进行增强:4G EPC选择一个通用的接入和移动性管理功能(AMF),随后AMF从会话管理功能(SMF)获知当前会话的单一网络切片选择辅助信息(S-NSSAI),然后再进行5G切片选择。

切片内认证鉴权。在接入网络切片时,除了运营商需要对终端进行认证外,切片所有者也需要对终端进行认证,以增强5G网络安全性。为此,现有网络切片技术需要进行增强:在注册过程中,增加终端和切片的认证、鉴权和计费(AAA)交互,实现终端和切片的相互认证。切片AAA也允许随时取消对终端的认证,或者要求终端重新认证。

切片管理增强。这包括5G切片性能定义及测量,5G切片信息模型及

切片模板定义,服务化切片管理接口,切片管理服务的发现,切片故障监测等增强功能。根据GSMA定义的通用切片模板,3GPP将增强现有切片模板中的相关参数、网络功能和接口,如对切片中小区选择、快速接入、业务连续性和集中单元(CU)/分布单元(DU)分离进行增强。

(2) 边缘计算增强。

边缘计算增强包括新加入边缘服务的自动发现、边缘应用移动性管理、网络信息能力开放效率、本地分流重定向和多接入边缘计算选择。

边缘服务自动发现。这包括:终端新接入网络时,如何自动发现部署在边缘的服务;终端移动时,如何发现位置更优的边缘服务;当边缘服务因为需要维护等原因迁移时,如何及时通知终端新的地址。

边缘应用移动性管理。当终端移动到新位置需要迁移边缘服务器,或者边缘服务器因自身原因发生迁移的时候,服务器在迁移过程中的业务连续性需要得到保证,数据丢失也要减少。

网络信息能力开放效率。网络负荷、QoS检测结果等实时信息需要通过SMF、PCF、NEF等控制面网元通知到边缘应用。路径较长,实时性难以保证,需要在边缘部署本地NEF以提高传递效率。

本地分流重定向。如果用户接入的SMF因某种原因不支持本地分流,本地分流路径就需要被激活,以通知AMF重选选择SMF,或者通知终端重新建立边缘网络会话。

多接入边缘计算。边缘计算能允许通过无线局域网(WLAN)接入、固定接入、4G接入、5G接入等多种接入技术接入,并根据应用需求实现接入方式选择和切换控制。

此外,3GPP R16正在定义URLLC业务;但是垂直行业对于SLA保障、

安全和隔离的要求可能超过现有设备的能力。边缘算力应随着边缘应用的不断丰富而提升。基于现场可编程门阵列（FPGA）、图形处理单元（GPU）的硬件加速技术以及异构加速资源的统一管理、能力开放、一体化设备集成将成为边缘计算的新趋势。

（3）云原生。

5G 核心网云化将进一步向云原生方向演进，以满足电信服务特有的性能和稳定性需求以及行业定制要求。如图 1 所示，云原生演进将从基础设施、应用层的服务化以及管理系统自动化 3 个方面展开。

● 基础设施轻量化。传统的虚拟机需要在 Host 操作系统（OS）之上再叠加 Guest OS 系统，导致资源占用相对较大。相对于传统虚拟机，容器只有 Host OS，具备更轻量、快速弹缩、部署高密度、性能强等优势。由于边缘机房占地、供电以及其他环境条件的限制，计算资源不像核心数据中心（DC）那样充裕。边缘基础设施需要轻量化，并支持应用的容器化部署。同时，为了实现云边协同，应用应与底层虚拟化技术解耦，以支持容器及虚拟机的混合部署。将来，随着容器隔离和安全能力的增强，基础设施最终

统一到容器架构，实现应用以及管理系统的统一容器化部署，以提升资源利用率、业务弹缩和发布速度。

● 应用层服务化优化。应用层服务化架构需要增强无状态设计，并进一步抽取出可共享的公共服务。这可以采用无状态的微服务架构和共享数据层来构建。微服务采用“高内聚，低耦合”的设计。微服务之间通过应用程序接口（API）或统一的消息总线进行通信。用户的接入和会话信息统一存放在数据共享层。分布在不同位置的微服务实例，通过数据共享层同步用户的最新状态。具体包括：独立的信令连接协议（SCP）服务支持非直接通信和代理网络功能的发现功能。引入网络功能组（NF Set）和网络功能服务组（NFS Set）的概念以更好地支持无状态网络架构。增加了 Set 之间的用户上下文直接传递等过程。以上设计实现微服务实例的独立运行和弹缩、灰度升级，提升应用的高可靠性。

● 编排部署自动化。结合 Kubernetes 容器集群管理平台，从蓝图设计、资源调度编排和生命周期管理、应用状态监控、控制策略更新等多个环节实现 5G 核心网高度自动化。规划、建设、维护、优化和运营各个

环节有效衔接，并形成 DevOps 闭环，实现业务的一键部署安装、全面自治和高效管理。应用和切片能力可以通过 API/ 软件开发工具包（SDK）服务化接口开放给用户，进行二次开发和业务创新，在网络能力可编程的基础上实现业务创新和构建丰富生态圈。虚拟化运营平台提供持续集成（CI）/ 持续部署（CD）环境工具，协助开发者进行业务开发、发布和升级。

（4）其他架构增强。

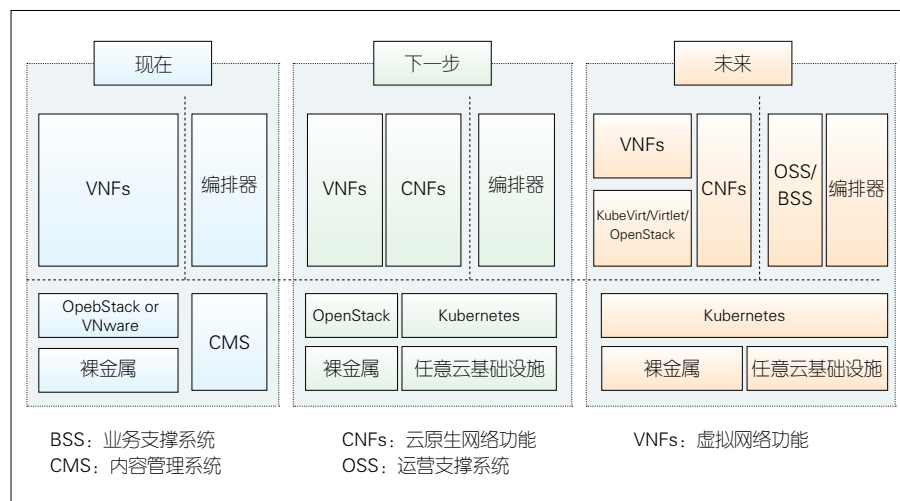
● 业务连续性。中间会话管理功能（I-SMF）确保用户移动出当前 SMF 服务区时的业务连续性。例如，集中的企业接入 VPN 就是这种典型业务场景之一。增加 5G 到 3G 的单待模式的语音业务连续性（SRVCC），确保在没有 4G 覆盖情况下，用户移出 5G 覆盖时话音业务的连续性。

● 定位业务。新增网关移动位置中心（GMLC）等网络功能以支持商业定位业务，与现有 EPC 定位功能对齐的同时，新增位置信息能力开放等 5G 特有功能。

2.2 垂直行业使能技术

（1）5G 时间敏感网络（TSN）。

电气和电子工程师协会标准（IEEE 802.1）于 2007 年创建了音视频频桥接（AVB）任务组，用以太网取代家庭中的高清多媒体接口（HDMI）和同轴电缆。AVB 是 L2 桥接网络。2012 年，AVB 任务组更名为 TSN 任务组，扩展了时间同步、延时保证等确保实时性的功能；但 TSN 仍然只支持 L2 桥接网络，不支持 L3 数据流^[7]。2015 年，国际互联网工程任务组（IETF）成立了确定性网络（DetNet）工作组，致力于将 TSN 从从局域网扩展到广域网中，实现 L2/L3 网络中的确定传输路径，以提供延迟、丢包和抖动的最坏情况界限或确定的时延^[8]。



▲图 1 5G 核心网向云原生的演进

对于工业控制领域，传统的“尽力而为”机制已经不能满足需求。工业控制需要网络支持有界的时延和抖动、极其严苛的丢包率和可靠性保证。为了支持工业控制领域应用，5G 核心网在 URLLC 通信服务基础上增加了时间同步、时延和时延抖动有界性，增强了可靠性指标^[9]，并将 TSN 网络无线化，实现了 5G TSN。5G TSN 由 5G 网络充当 TSN 桥，确保 UPF 和用户终端（UE）之间的确定性延迟，具有精准的流量调度能力，可以保证多种业务流量的共网高质量传输^[10-11]。5G TSN 架构如图 2 所示。5G TSN 技术包括：与 TSN 系统互通架构、5G 高精度时钟同步技术、Bridge 端口和协议数据单元（PDU）会话的映射、QoS 映射、针对确定周期性传输的 QoS 控制、针对 TSN 数据流的缓存技术、同一 UPF 下的 UE-UE 直连通信以及确定性通讯的能力开放等。

（2）5G 行业局域网（LAN）。

5G LAN 为垂直行业客户提供定制化专属广域“局域网”，使得企业终端与企业云随时随地处于一个虚拟化局域网（或虚拟组）中，无缝接入企业专网和企业私有云^[12]。如图 3 所示，无人机和机器人编组后各自组成一个虚拟局域网。5G LAN 面向企业云接入、智能制造等领域，实现终端的灵活组管理和组内直接通信。企业可以通过开放接口来定制互联网协议（IP）地址分配策略、流量路由策略等。5G LAN 包括：5G 用户虚拟组管理技术，以支持对虚拟组成员的动态加入、删除和修改，实现对虚拟组内终端通信的会话控制；增强策略控制技术，以控制 UPF 内和 UPF 之间直接包交换，实现虚拟组内终端点对点、点对多点直接通信；虚拟组内路由快速收敛和隧道调度控制优化技术，自适应感知网络拓扑结构变化，实现

路由快速收敛，避免路由震荡、提升传输效率。

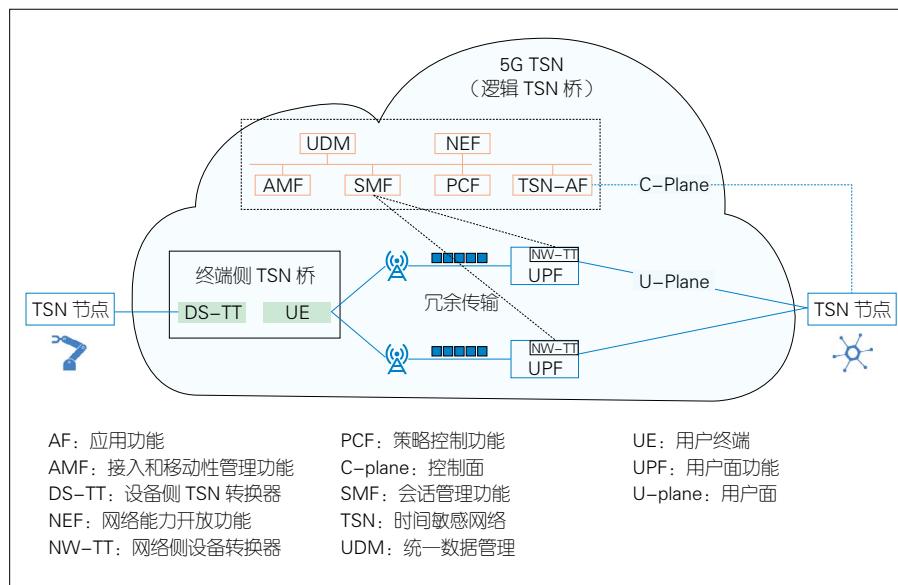
（3）5G 非公开网络（NPN）。

专有网络有 2 种部署方式：一种是完全独立的网络，由网络所有者维护和控制；另外一种是和公共网络集成部署，由公共网络运营商进行控制和维护。对于后者，5G 核心网采用增强的 NPN 技术实现。如图 4 所示，5G NPN 基于闭合接入组（CAG）和网络切片的结合，实现端到端资源隔离，限制非垂直行业终端尝试接入专属基

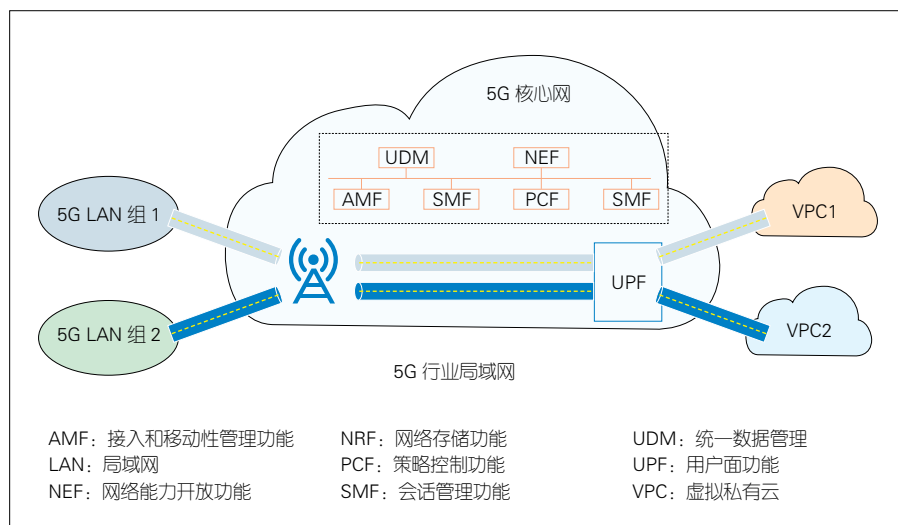
站和频段，保障行业客户网络安全和资源独享，提供为工业领域特定用户组服务的专有网络，例如在工厂内专门为机器人控制服务的网络。为了和公网进行区分，NPN 网络具有独立的网络标识（NID），可以实现终端接入公网或者私网的网络选择，以及公网和专属网络的互访控制。

（4）URLLC 相关核心网技术。

URLLC 主要依赖空口的优化技术。为实现端到端 URLLC，核心网也需要做如下增强：



▲图 2 5G TSN 网络架构



▲图 3 5G 行业局域网的通信机制

针对不同业务需求使用不同的 5G QoS 标识 (5QI), 以指示基站根据 5QI 进行资源预留, 支持低时延和高可靠业务传输。

终端可以通过双连接建立冗余会话, 业务层数据复制到 2 个会话连接同时进行传输, 从系统角度提高数据传输可靠性。

核心网支持 QoS 监控, 向应用上报当前传输路径真实 QoS 信息, 让应用感知当前网络的服务等级协议 (SLA) 能力, 从而根据当前情况调整数据传输策略或需求。

(5) mMTC 相关核心网技术。

3GPP R16 定义了 5G 核心网需支持窄带物联网 (NB-IoT) 和演进机器类通信 (eMTC) 接入, 提供物联网终端接入。基于新空口 (NR) 的物联网终端的 mMTC 接入预计将在 R17 定义。

2.3 网络智能化

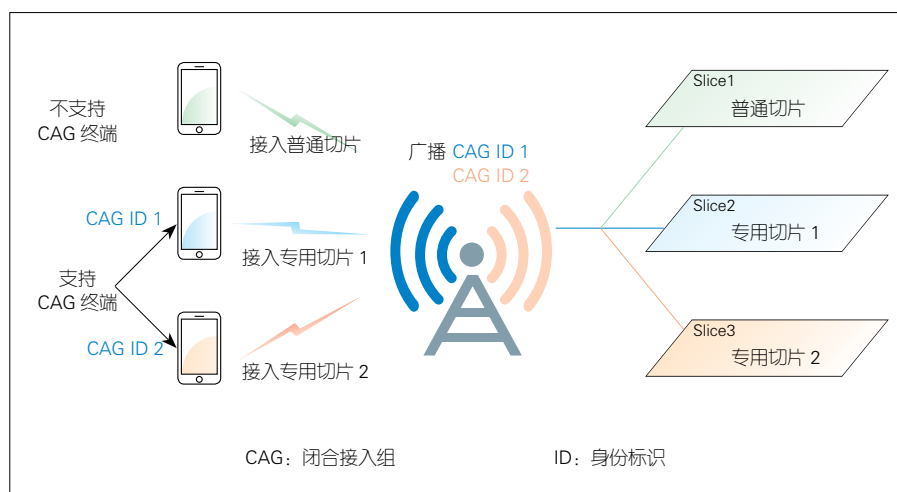
5G 支持万物互联, 使用高频段使基站数量大量增加, 控制面云化部署, 用户面下沉到基站和用户实现分布式部署。随着网络组网和拓扑变得越来越复杂, 5G 核心网需要充分利用人工智能 (AI)、大数据等新技术, 实现网络智能化, 以降低运维成本和提升效率。如图 5 所示, 网络智能化体现在 3 个层面: 网元层、管控层和运营层。通过在各层引入 AI 引擎以及多层次闭环优化和数据协同, 实现自动网络优化和运维运营。

● 数据收集和智能化网元闭环控制。为了增强网络数据采集能力, 5G 核心网引入专门的数据采集和分析网元 NWDAF。NWDAF 利用标准接口从设备收集用户信息, 从操作维护管理 (OAM) 收集网元信息。根据不同场景采用特定 AI 算法进行智能数据分析, 包括切片负荷分析、网络功能 (NF) 负荷分析、业务体验分析、网络性能

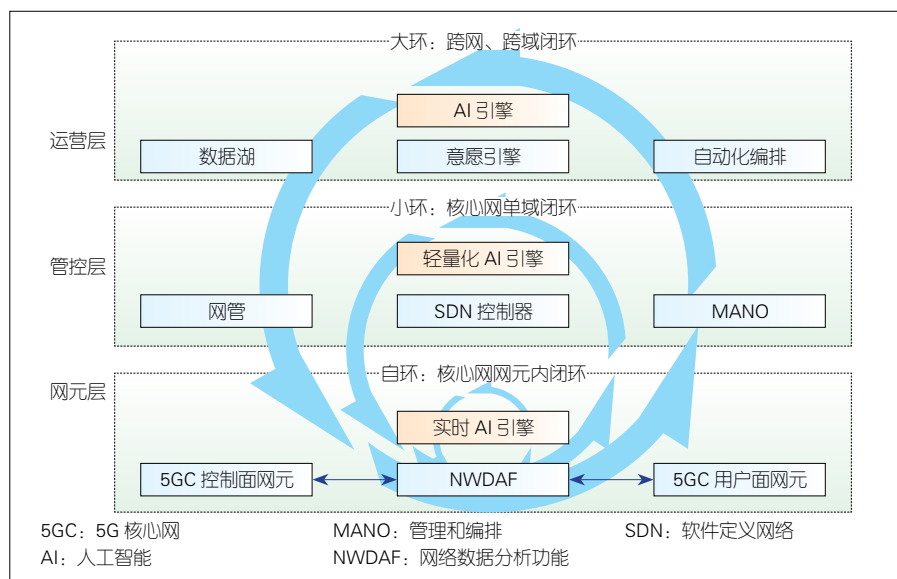
分析等。核心网利用这些分析结果反向闭环控制网元, 从而对网络稳定运行、网络性能、功耗控制、资源分配等进行优化和控制; 另一方面, 这些信息可向授权用户开放, 便于用户定制和管理自己的网络与业务。NWDAF 有别于大数据采集系统, 主要用于实时网络数据采集、分析和控制, 并不存储海量数据做后分析。NWDAF 可以作为一个数据源接入大数据采集和分析系统。

● 智能化网管和运维。在 5G 的网络管理运维中, AI 技术的精准预测

和智能保障将是实现智能运维的利器。5G 智能保障系统可以通过采集网络运行数据建立预测模型, 即根据历史数据和实时数据结合 AI 技术对用户行为、网络业务和相应的资源需求进行预测, 包括用户移动性预测、用户通讯模式预测以及异常用户检测等。预定义策略给出相应的措施 (如网络切片的扩缩容、异常终端检测), 从而保障网络在业务变化时能够及时提供相应的资源。同时, 面对复杂网络产生的大量告警, 通过机器学习实现告警关联, 根因定位, 并结合故障自动



▲ 图 4 5G 非公开网络 (NPN) 接入控制机制



▲ 图 5 5G 网络智能化的 3 个层次

诊断和恢复程序,消除潜在的故障,实现网络自愈,减少工单数量。实验表明,内置人工智能引擎和专家经验的智能根本原因分析(RCA)系统,通过机器学习建立告警关联规则,持续优化排障规则库,实现故障精准定位,可有效降低75%的人工运维成本,运维效率提升2倍以上^[13]。

●智能化网络运营。智能运营是5G网络新特性,通过能力开放平台支撑,可以向用户提供切片或服务的能力封装,实现用户自助定制、开通、运维网络切片。意图引擎^[14]将用户对业务的需求意图自动转译为具体的网络语言和配置策略,指导网络的规划、设计、构建和激活,实现网络运营所想即所得。针对具体垂直行业的切片,对于同类切片的海量数据进行分析 and 挖掘,建立行业专用切片画像,指导个性化的优化设置和行业应用拓展。引入切片自助服务门户和切片服务智能客服,提供智能化的交互、咨询、切片套装推荐和个性化切片自助定制等服务。

3 结束语

伴随着产业互联网应用的不断深入和边缘计算、网络切片、人工智能、垂直行业使能等5G核心网新技术的

引入,5G网络将更好地使能垂直行业,更快地实现业务部署和更高效地运维,从而推动5G的全面发展。中兴通讯创新性地提出基于Common Core + Common Edge技术架构的5G融合核心网解决方案,围绕确定网络、智能网络和灵动网络实现5G核心网的持续演进。

参考文献

- [1] 中兴通讯. 5G Core Network 技术白皮书[R]. 2019
- [2] 王卫斌. 5G商用将推动NFV进入新阶段[J]. 邮电设计技术, 2018, 513(11): 35-40. DOI: CNKI:SUN:YDSJ.0.2018-11-009
- [3] 3GPP. System Architecture for the 5G System: 3GPP TS 23.501[S]. 2019
- [4] 中兴通讯. Common Edge 边缘计算白皮书[EB/OL]. (2019-10-31) [2020-01-03]. <https://www.useit.com.cn/thread-25213-1-1.html>
- [5] 陆平, 李建华, 赵维铎. 5G在垂直行业中的应用[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.201901011
- [6] 3GPP. Service Requirements for the 5G System: 3GPP TS 22.261[S]. 2018
- [7] IEEE. IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group[EB/OL]. [2020-01-03]. <https://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [8] IETF. IETF Deterministic Networking(DetNet) Working Group[EB/OL]. [2020-01-03]. <https://datatracker.ietf.org/wg/detnet/>
- [9] 3GPP. Service Requirements for Cyber-Physical-Control Applications in Vertical Domain: 3GPP TS 22.104[S]. 2019
- [10] 工业互联网产业联盟. 时间敏感网络(TSN)产业白皮书(征求意见稿)[EB/OL]. (2019-10-31)[2020-01-03]. <http://www.aii-alliance.org/index.php?m=content&c=index&a=show&-catid=23&id=800>
- [11] 赵福川, 刘爱华, 周华东. 5G确定性网络的应用和传送技术[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 62-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.201905010

- [12] 中国移动. 基于切片的运营高级专网技术探讨[R]. 2019
- [13] 张嗣宏, 左罗. 基于人工智能的网络智能化发展探讨[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(2): 45-48. DOI: 10.12142/ZTETJ.201902009

作者简介



王卫斌, 中兴通讯股份有限公司网络领域首席科学家; 从事SDN/NFV、电信云研究, 以及核心网产品规划, 相关产品和解决方案荣获5G论坛、SDN/NFV全球大会、世界边缘计算论坛、中国通信学会等多项大奖; 发表核心期刊论文10余篇, 获国家发明和实用新型专利20多项。



朱进国, 中兴通讯股份有限公司核心网标准总监, 高级工程师; 从事移动核心网产品研发和标准化工作多年, 研究领域为移动网络架构和核心网相关技术, 主要研究方向是网络架构、网络切片、边缘计算等。



王全, 中兴通讯股份有限公司电信云核心网产品副总经理; 负责产品解决方案和市场; 发表核心期刊论文多篇。



NR 中集中式网元和分布式网元架构现状与进展

Current Status and Process of CU-DU Architecture in NR

摘要: 在新空口 (NR) 接入技术中, 无线接入网络架构被分割成 2 种实体: 集中式网元 (CU) 和分布式网元 (DU)。认为在这种分离的架构中, 通过一个 CU 控制多个 DU 的方式, 可以同时实现基带集中控制功能和针对用户的远端服务功能。介绍了 CU-DU 分离架构的基本特性, 包括分割方式、接口功能 (控制面功能和用户面功能)、移动性场景以及其他 CU-DU 相关特性和最新进展, 为下一代无线接入网络技术研究提供参考。

关键词: 新空口 (NR); 集中式网元 (CU); 分布式网元 (DU); F1 接口

Abstract: In New Radio (NR) access technology, the wireless access network architecture is divided into two entities, including Central Unit (CU) and Distributed Unit (DU). In this divided architecture, the baseband centralized control function and the remote users service can be realized simultaneously by controlling multiple DUs through one CU. In this paper, the basic characteristics of the CU-DU architecture, including segmentation methods, interface functions (control plane functions and user plane functions), mobility scenarios, and other related features, as well as their latest progress are introduced, which can be the reference of next generation radio access network.

Keywords: NR; CU; DU; F1 interface

高音 /GAO Yin, 韩济任 /HAN Jiren,
刘壮 /LIU Zhuang

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001016

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20191209.1539.004.html>

网络出版日期: 2019-12-09

收稿日期: 2019-11-05

为了应对未来剧烈的移动数据流量增长、海量的通信设备连接和不断涌现的新业务新场景, 下一代通信技术新空口 (NR) 应运而生。无线接入网不仅是通信网络的重要组成部分, 还是用户设备 (UE) 和核心网之间的重要纽带。基站系统是无线接入网的最主要部分, 可谓是重中之重。在传统的长期演进 (LTE) 网络架构中, 基站被分成了室内基带处理单元 (BBU)、射频拉远单元 (RRU) 和天线共 3 个模块。其中, BBU 主要负责基带处理, RRU 主要负责射频处理。每个基站都有一套 BBU, 并通过 BBU 与核心网相连。在 NR 网络架构中, 基站进行了重构, 其中, BBU 的一部分物理层处理功能下沉到了 RRU, 而 RRU 和天线一起做成了新的实体, 即动态天线单元

(AAU)^[1]。剩余的 BBU 则被拆分成了 2 种实体, 即集中式网元 (CU) 和分布式网元 (DU)。本文中, 我们将要重点讨论 CU-DU 分离的特性和场景。

1 高层分割方案

1.1 高层分割方案选择

在实际部署中, 存在着多种从高通传输时延到低传输时延的传输网络。为了兼顾这些不同的传输网络已经实现多供应商之间的协同操作, 时延敏感度低的网络功能被放在了 CU 侧, 时延敏感度高的功能则被放在 DU 侧。对于时延敏感度高的网络来说, 高层分割方案是比较适合的; 而对于时延敏感度低的网络来说, 底层分割方案则更加合适。图 1 展示了 CU-DU 分离

的几种方案, 其中, 方案 1—5 是高层分割方案的场景, 方案 6—8 是底层分割方案的场景。

在 5G 无线接入网架构中, 如何进行功能分割取决于能否为用户服务提供良好的性能。第三代合作伙伴计划 (3GPP) 决议针对高层分割方案 (方案 2 或方案 3) 制订一套独立的标准。其中, 方案 2 被选为最终方案, 原因是方案 2 比方案 3 有更大的吞吐量和更低的时延限制。在此种方案中, 把对实时性要求较高的物理层 (PHY)、媒体接入控制 (MAC) 和无线链路控制 (RLC) 放在 DU 上处理, 有利于信息的及时处理和传输; 而把对实时性要求较低的分组数据汇聚协议 (PDCP) 和无线资源控制 (RRC) 放在 CU 上处理, 便于 CU 发挥统一

调度的功能。

1.2 高层分割方案评估

为了评估不同的高层分割方案（方案2或方案3），针对数据传输的传输控制协议（TCP）吞吐量效率，我们仿真并对比了高层分割方案2和方案3的性能。

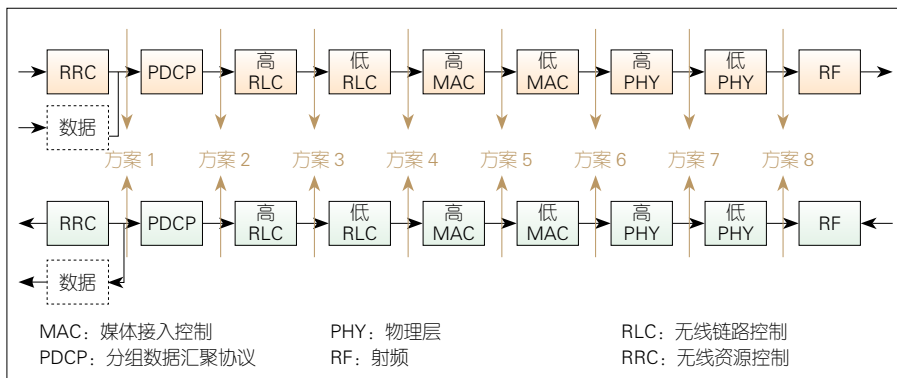
对于方案2，RRC和PDCP位于

CU；DU包括RLC、MAC、PHY和射频单元。对于方案3，底层RLC（RLC的部分功能，主要包括分段相关的功能）、MAC、PHY和射频单元在DU中；RRC、PDCP和高层RLC（RLC的另一个部分功能，主要包括自动重发请求（ARQ）相关功能）位于CU。

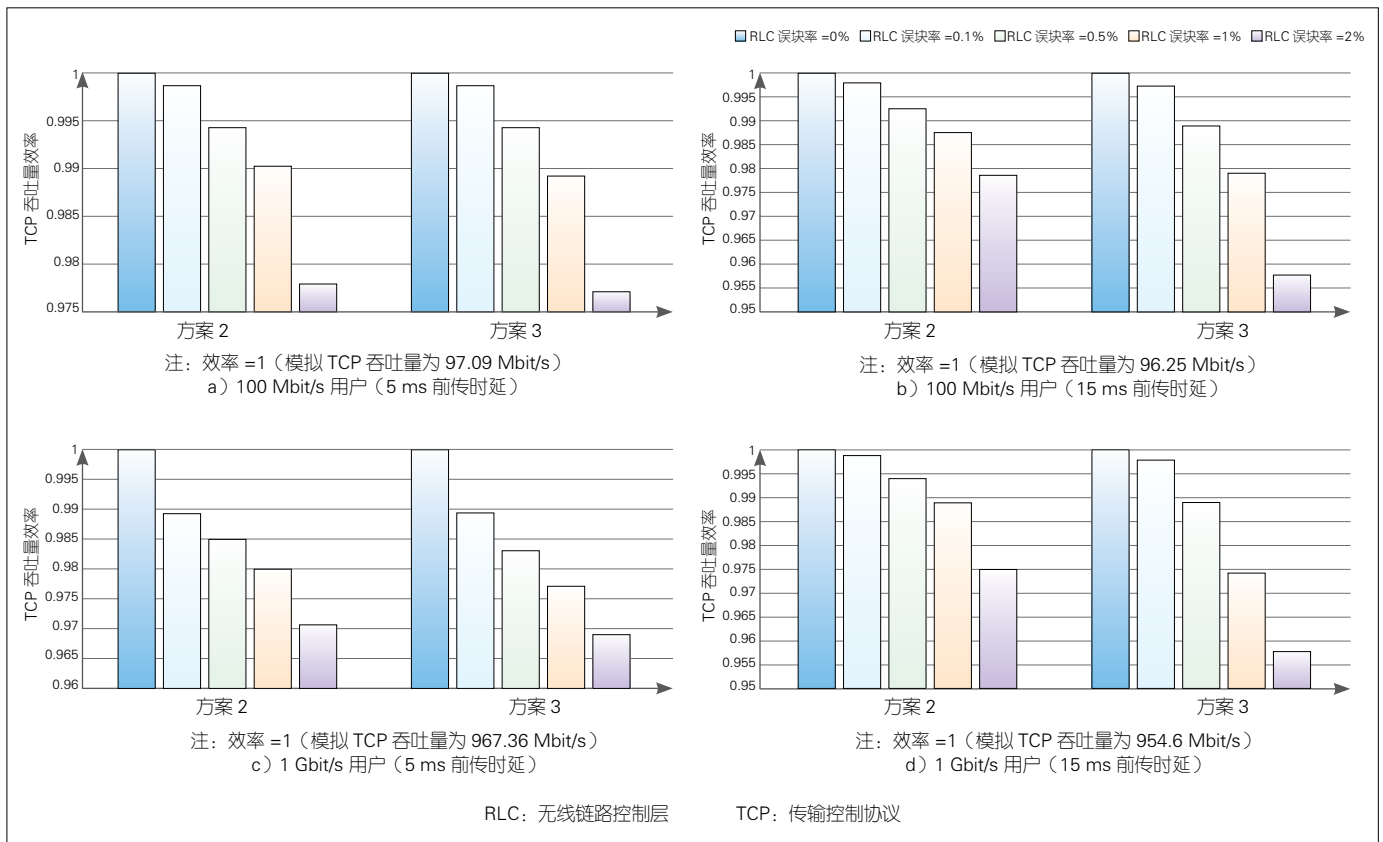
对于方案3，由于ARQ功能位于CU中，RLC重传会引入更多的CU和

DU接口上的时延，包括接口上RLC状态报告的时延和RLC数据重传的时延。相关时延的增加会对TCP吞吐量产生一定的负面影响。

不考虑TCP慢启动阶段，针对高层分割方案2和方案3，在考虑不同空口质量对应的RLC误块率（BLER）条件下，TCP吞吐量效率仿真结果如图2所示。导致TCP吞吐量差异的主要原因是RLC ARQ在方案2和方案3中位于不同的位置（方案2中位于DU，方案3中位于CU）。对于方案2和方案3，当RLC BLER为0%时，空口数据不会丢失，RLC数据不需要重传，RLC ARQ位于不同的位置对TCP吞吐量没有影响。我们对不同CU和DU之间接口时延进行设置，当RLC BLER为0%时，对应的TCP吞吐量的效率设置为1，然后仿真并给出其他RLC BLER条件下的TCP吞吐量效率。根据仿真结



▲图1 集中式网元和分布式网元之间的功能划分^[2]



▲图2 方案2和方案3中TCP吞吐量效率的仿真结果（不考虑TCP慢启动）

果可以看出,随着 CU 和 DU 之间接口时延的增加,TCP 吞吐量效率会降低。而方案 3 中由于 ARQ 位于 CU,重传数据增加了额外的 CU 和 DU 之间的时延(包括接口上 RLC 状态报告的时延和 RLC 数据重传的时延),从而导致 TCP 吞吐量效率比方案 2 更低。

慢启动是 TCP 拥塞控制策略的一部分。在慢启动阶段,TCP 发送窗口首先是按照指数增长,一旦达到慢启动阈值,TCP 发送窗口大小就会从指数增长变为线性增长(拥塞避免)。如果 TCP 服务时间很短的话,那么慢启动阶段对于整个传输时间的占比则不能忽略。例如,如果使用 100 MB 文件大小和 1 GB 文件大小这样的文件传输协议(FTP)流量模型,TCP 慢启动对 100 MB 文件下载的性能影响更大,这是因为其所需下载时间更短。图 3 中的仿真结果表明,考虑到 TCP 慢启

动效应(初始 TCP 慢启动阈值设置为 65 535),对于短时间 TCP 服务,方案 2 的性能明显优于方案 3。

从以上仿真可以看出,高层分割方案 3 引入了额外的 RLC 重传时延。这种额外的时延可能会对 TCP 吞吐量产生负面影响,特别是当考虑到 TCP 慢启动效应的短时 TCP 服务时,这种负面影响更加明显。与高层分割方案 3 相比,高层分割方案 2 提供了更好的性能。

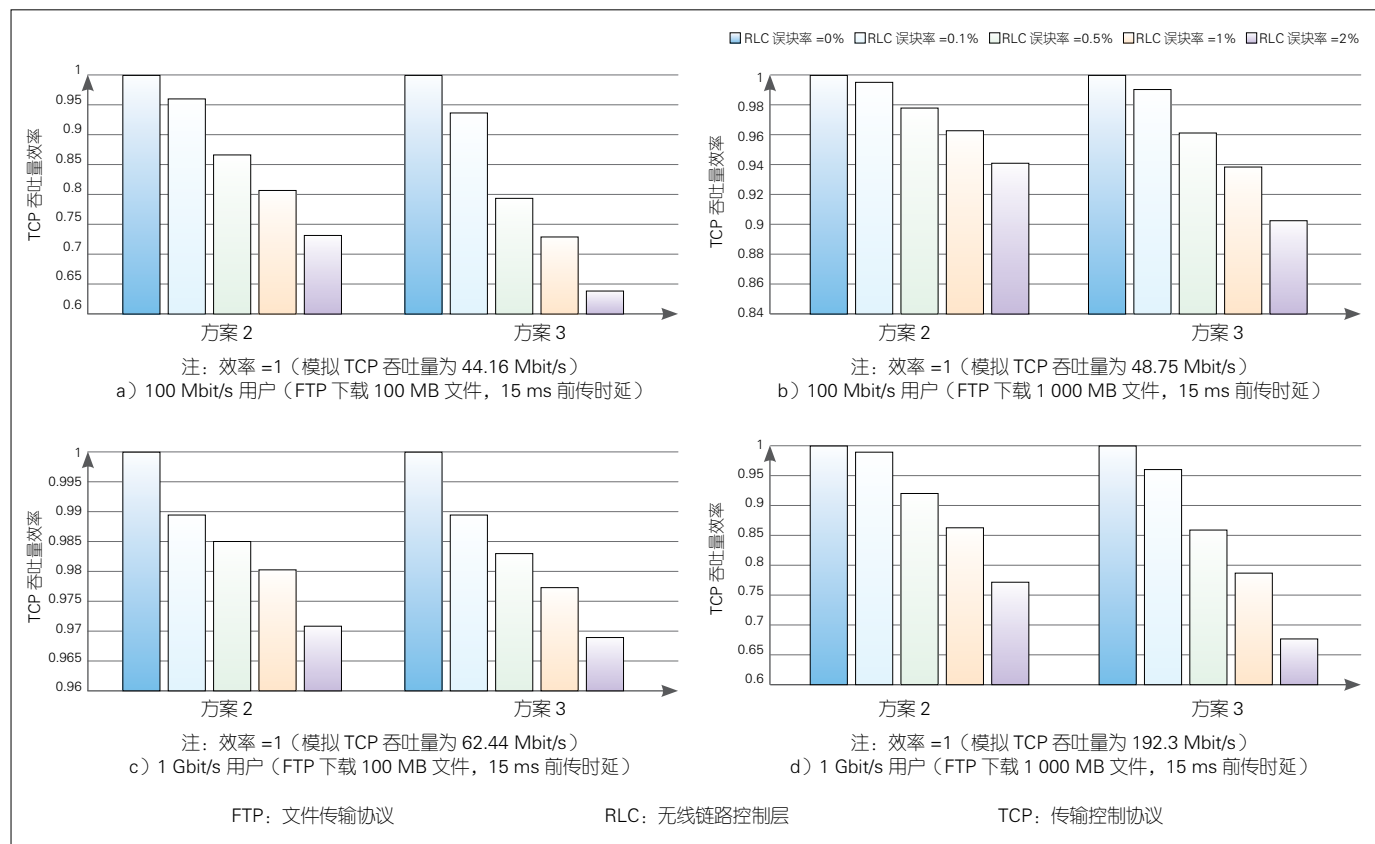
2 CU-DU 分离整体架构

如图 4 所示^[3],下一代无线接入网(NG-RAN),会采用 5G 基站(gNB)作为主要节点。gNB 通过 NG 接口连接到 5G 核心网,同时 gNB 之间通过 Xn 接口相连。在分离的场景下,一个 gNB 可以包含一个 gNB-CU 和一个或多个 gNB-DU。gNB-CU 和 gNB-DU

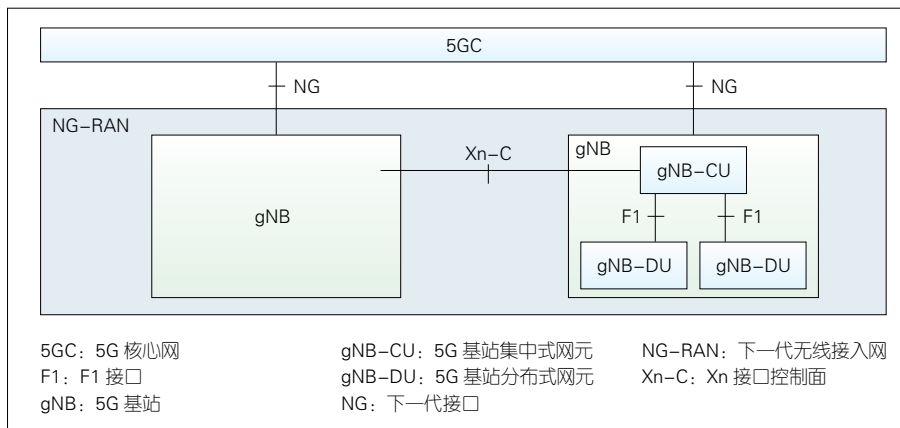
之间的接口被命名为 F1 接口。与 gNB 相关的 NG 接口和 Xn 接口都终结于 gNB-CU。一个 gNB-CU 可以同时连接多个 gNB-DU(所连接 gNB-DU 的最大数量取决于具体实现情况)。

在 3GPP 标准中,同一个 gNB-DU 原则上只能连接一个 gNB-CU;然而通过恰当的方法,一个 gNB-DU 也可以连接多个 gNB-CU。同时,一个 gNB-DU 可以支持一个或多个小区。gNB 的内部结构对核心网和其他无线接入网节点是不可见的。对于核心网和其他 gNB 来说,gNB-CU 和它所连接的 gNB-DU 被视为一个整体,即一个单独的 gNB。通过以上分析,可以得到 gNB-CU 和 gNB-DU 的如下定义:

gNB-CU 是一个包含 RRC、服务数据适应协议层(SDAP)和 PDCP,并控制一个或多个 gNB-DU 行为的逻辑节点。gNB-CU 通过 F1 接口和



▲图 3 方案 2 和方案 3 中 TCP 吞吐量效率的仿真结果(考虑 TCP 慢启动)



▲图4 下一代无线接入网的整体架构

gNB-DU 相连。

gNB-DU 是一个包含 RLC、MAC 和 PHY，并被 gNB-CU 控制的逻辑节点。一个 gNB-DU 支持一个或多个小区，但一个小区只能从属于一个 gNB-DU。gNB-DU 通过 F1 接口和 gNB-CU 相连^[9]。

3 F1 接口准则

gNB-CU 和 gNB-DU 之间的接口称为 F1 接口。与 5G 核心网中的 NG 接口或者 Xn 接口相似，F1 接口支持端点之间信令交换和数据传输。此外，F1 接口将无线网络层和网络传输层分开，不仅支持 UE 相关信令和非 UE 相关信令的交换，还支持控制面和用户面的功能分离；因此，F1 接口功能可以分为 F1 控制面功能和 F1 用户面功能。

3.1 F1 接口控制面功能

F1 接口控制面功能主要包括：

(1) F1 接口管理功能。F1 接口管理功能主要包括 F1 接口建立、gNB-CU 配置更新、gNB-DU 配置更新、错误指示、重启、F1 接口资源协调和 gNB-DU 状态指示功能。F1 接口建立功能负责 gNB-CU 和 gNB-DU 之间应用级别数据的交换，并激活 gNB-DU 下的小区。F1 接口建立流程由 gNB-DU 发起。gNB-CU 配置更新和 gNB-DU 配置更新负责 gNB-CU 和 gNB-DU

之间应用级别数据的配置更新。gNB-DU 配置更新也可以激活或者去激活 gNB-DU 下的小区。此外，F1 接口建立和 gNB-DU 配置更新功能可以报告 gNB-DU 支持的切片功能。错误指示功能负责指示已经发生的错误。重启功能负责在节点建立和失败事件发生之后，对对端实体进行初始化。F1 接口资源协调功能用于在 gNB-CU 和 gNB-DU 之间传递频率资源进行信息共享。gNB-DU 状态指示功能则是允许 gNB-DU 向 gNB-CU 指示负载状态。

(2) 系统消息管理功能。在系统信息管理中，gNB-DU 负责系统广播信息的调度和系统信息的传输。针对系统信息广播，gNB-DU 负责对 NR 主信息模块（MIB）和系统信息模块 1（SIB1）的编码。而其他系统信息模块的编码则由 gNB-CU 执行。由于缺少 UE 节能功能，F1 接口需要引入按需式的系统信息发送功能。在这种情况下，CU 负责处理来自 UE 的按需式系统信息请求，并发送系统信息和命令消息来通知 gNB-DU 广播所需的系统信息。由此可见，UE 可以在需要的时候从 gNB-DU 获取所需的系统信息，而不是自始至终监测着广播信道。

(3) UE 文本管理功能。F1 接口的 UE 文本管理功能负责对必要的 UE 文本进行建立和修改。F1 接口的 UE

文本建立由 gNB-CU 触发。gNB-DU 可以根据准入控制标准接受或者拒绝 UE 文本的建立。F1 接口的 UE 文本修改可以由 gNB-CU 或 gNB-DU 触发。同样地，对应的接收节点可以选择接受或者拒绝 UE 文本修改。同时，F1 接口的 UE 文本管理功能还支持 gNB-DU 侧的 UE 文本释放。文本的释放可以由 gNB-CU 侧直接触发，也可以通过 gNB-DU 侧请求来触发。当 UE 进入 RRC 空闲态（RRC_IDLE）或者 RRC 非激活态（RRC_INACTIVE）时，gNB-CU 会请求 gNB-DU 释放 UE 文本。此外，F1 接口的 UE 文本管理功能还可以用于管理数据无线承载（DRB）和信令无线承载（SRB），即建立、修改和释放 DRB 和 SRB 资源。DRB 资源的建立和修改由 gNB-CU 触发，而 gNB-DU 会根据资源预留信息和服务质量（QoS）信息，来决定接受或拒绝 DRB 的建立或修改。对于每一个即将被建立或修改的 DRB，gNB-CU 可以通过 UE 文本建立或修改流程，将网络切片选择辅助信息传递给 gNB-DU。QoS 流和无线承载之间的承载由 gNB-CU 来执行，而 F1 接口上的承载管理粒度也是承载级别的。为了支持 DU 内部载波聚合的 PDCP 复制功能，需要在 gNB-CU 和 gNB-DU 之间的 2 条通用分组无线业务隧道协议（GTP）用户面隧道上配置 DRB。通过 UE 文本管理功能，gNB-CU 可以请求 gNB-DU 建立或者修改 UE 服务的主小区和主辅小区，也可以请求 gNB-DU 建立或者删除 UE 服务的辅小区。当然，gNB-DU 可以接受或者拒绝这些请求。此外，gNB-CU 还可以通过 UE 文本管理功能，将上行 UE 的聚合最大比特速率限制通知给 gNB-DU，让其执行该限制。

(4) RRC 消息传递功能。RRC 消息传递功能用于 gNB-CU 和 gNB-

DU 之间的 RRC 消息传递。普通的 RRC 消息通过 F1 接口的控制面传递，而 UE 相关的 RRC 消息则在空口 (Uu) 上传递。

(5) 寻呼功能。gNB-DU 根据所提供的调度参数来传输寻呼信息。gNB-CU 可以为 gNB-DU 提供寻呼信息，并为其计算准确的寻呼时机和寻呼帧。gNB-CU 负责决定寻呼区域；gNB-DU 会针对特定的寻呼时机、寻呼帧和寻呼区域合并所有的寻呼记录，并针对寻呼区域中对应的寻呼时机和寻呼帧，进行最终 RRC 消息的编码和广播。

(6) 告警信息传递功能。告警消息信息传递功能和 NG 接口上的告警消息传输流程相互协同。gNB-CU 负责告警相关系统信息的编码，连同其他告警相关信息一起发送给 gNB-DU，并进一步在空口上进行广播。

F1 接口也支持 multiple 流控制传输协议 (SCTP) 功能。在配置更新流程中，CU 将需要添加或者删除的 SCTP 连接的自身 IP 地址发送给 DU。如果某个传输网络层 (TNL) 地址对应的用途 (用于 UE 信令还是公共信令传输) 发生变更，也可以在配置更新流程中通知给 DU。在 DU 侧，也允许一个或多个 DU 自身的 IP 地址来建立对应的 SCTP 连接。当 DU 触发 SCTP 连接需要迁移的时候，DU 会发送一条 DU 配置更新消息给 CU，并携带自身的 DU 身份标识 (ID)，用于通知 CU 当前 SCTP 连接发生了迁移^[4]。

网络共享对 F1 接口产生一定影响。在网络共享的场景下，DU 可能被多个不同公用陆用移动网 (PLMN) 下的 CU 共享，这种共享模式有多种：一种是 CU 和 DU 间的传输通道针对 PLMN 是独立的，在每个传输通道上进行各自 PLMN 下的信令传输；一种是 CU 和 DU 之间的传输通道是共享的，

在这个共享的传输通道里各自 PLMN 下的信令独立传输；最后一种是 CU 和 DU 之间的传输通道是共享的，在这个共享的传输通道里只有一套信令传输，包含所有 PLMN 下的信息^[5]。

根据 TS38.401，在独立 PLMN 信令情况下，UE 初始接入流程如图 5 所示^[3]。

步骤 1：UE 发起 RRC 连接建立请求 (消息 3 (MSG3))。

步骤 2：gNB-DU_{A/B} 收到 UE 的 RRC 请求消息，通过 F1 接口的初始上行 RRC 直传消息随机发给 gNB-DU_{A/B} 所连接的任一一个 CU，图示中标记为 gNB-CU_A。

步骤 3—4：gNB-CU_A 收到消息后建立 UE 文本信息、生成 RRC 建立消息 (MSG4) 并发送给 gNB-DU_{A/B}。gNB-DU_{A/B} 随后通过空口将消息发送给 UE。

步骤 5：UE 发送 RRC 连接建立完成消息 (MSG5)，其中携带 UE 选

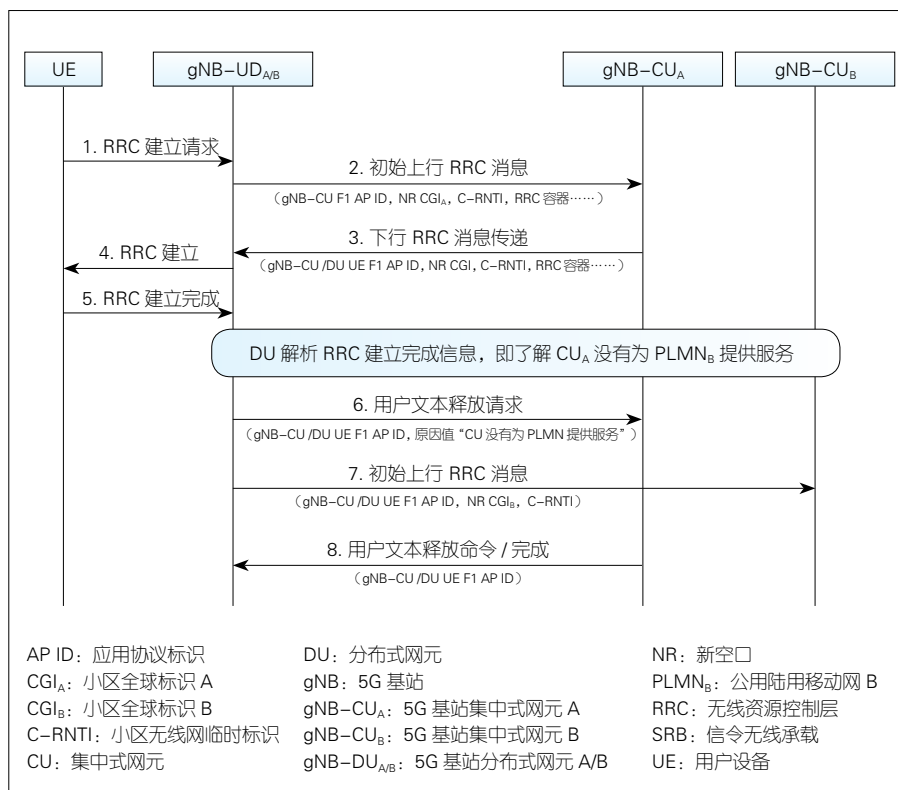
择的 PLMN 信息。

步骤 6：gNB-DU_A 解析 MSG5 消息，发现 UE 上报选择的 PLMN (PLMN_B)，便通过 F1 接口发送 UE 文本释放请求消息给 gNB-CU_A，其中包含释放原因为“非该 CU 服务的 PLMN”。

步骤 7：同时，gNB-DU_B 会发送初始上行 RRC 消息给 gNB-CU_B，其中包含和 PLMN_B 关联的 NR CGI、在步骤 2 中 gNB-DU_A 为 UE 分配的 C-RNTI 和步骤 5 中收到的空口 RRC 消息。

步骤 8：gNB-CU_A 通过 F1 接口流程释放 UE 文本。

需要注意的是，由于 PLMN 只能由 MSG5 携带上来 (即图 5 中的步骤 5)，因此当 DU 收到 UE 的 RRC 请求消息时，DU 会随机发给 DU 所连接的任一一个 CU。当 DU 收到 MSG5 之后，会根据 UE 携带的 PLMN 信息找到对应的 CU，并向旧的 CU 触发 UE 文本释放消息。并且，在 DU 收到 MSG3



▲图 5 UE 初始接入流程图

的时候,也可以并发向不同的 CU 发起初始上行 RRC 直传流程。

根据 TS 38.401,在独立 PLMN 信令情况下,UE 的 RRC 重建流程如图 6 所示^[3]。

步骤 1: UE 发送 RRC 重建请求消息。

步骤 2A—5A: 描述了新 gNB-CU_A 没有找到 UE 文本的情况。在步骤 2A 中,和 PLMN_A 关联的 NR CGI_A 上报给新 gNB-CU_A。在步骤 5A 中, gNB-CU_A 在 UE 文本没有找到的情况下,会将当前的 RRC 重建流程回退到 RRC 建立流程。在 F1 接口的下行 RRC 直传消息中,会指示 UE 文本没有找到,并包含步骤 1 中收到的 RRC 消息以要求重定向发给新的 gNB-CU,并且可选携带建议的下次尝试的 PLMN 信息。随后触发步骤 2B,同时 gNB-CU_A 释放

UE 文本(图 6 中未显示)。

步骤 2B—5B: 描述了新 gNB-CU_B 找到了 UE 文本。在步骤 2B 中,和 PLMN_B 关联的 NR CGI_B 上报给新 gNB-CU_B,同时包含了步骤 1 中 gNB-DU_A 为 UE 分配的 C-RNTI。

步骤 6—8: 后续的 RRC 重建流程在 UE、gNB-DU_B 和 gNB-CU_B 之间进行。

与 UE 初始接入类似,当 DU 收到 RRC 重建请求消息后, DU 串行或者并行向不同的 CU 发起初始上行 RRC 流程。得到其中一个 CU 反馈找到该 UE 文本的指示后, DU 空口回复 RRC 重建消息。在串行发起的情况下, CU 在没有找到相应 UE 文本的时候,会向 DU 指示 UE 文本未找到,将收到的 UE RRC 重建请求消息重新传递给 DU,并且可选携带建议的下次尝试的

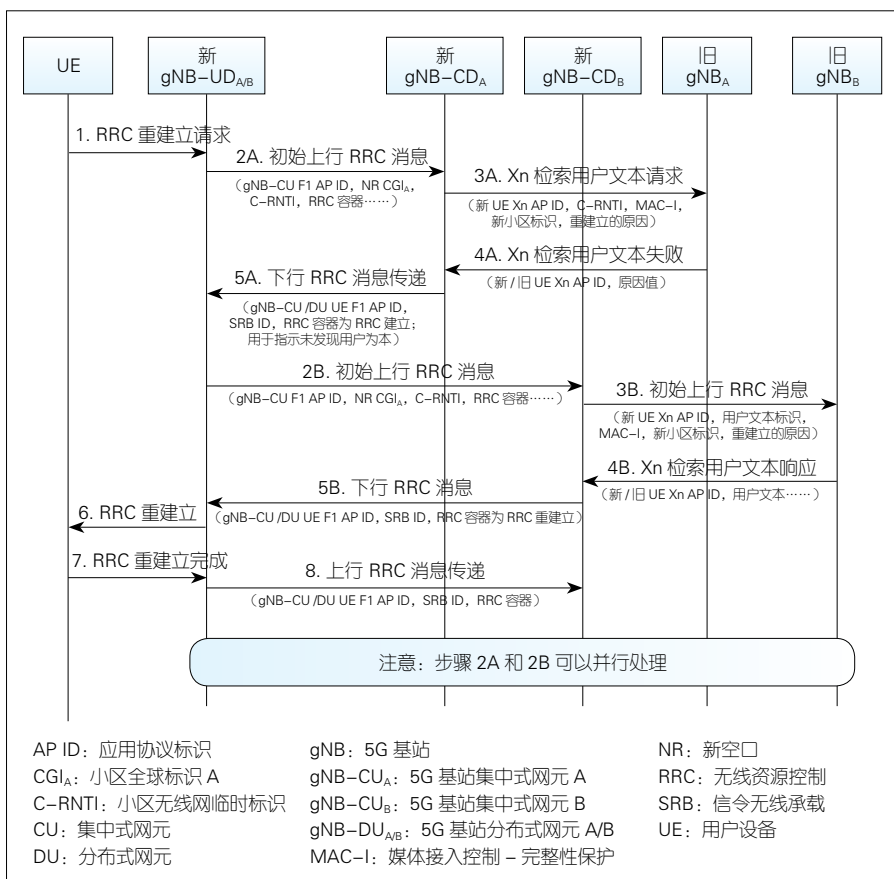
PLMN 信息。

如果 DU 所连接的所有 CU 都无法找到 UE 文本, RRC 连接重建会回退到 RRC 建立流程。

3.2 F1 接口用户面功能

F1 接口的用户面功能包括用户数据传递和流控功能。其中,用户数据传递是指 gNB-CU 和 gNB-DU 之间的用户数据传递。F1 接口用户面协议使用 GTP 用户面(GTP-U)传输网络层的服务,将用户数据即 PDCP 协议数据单元(PDU)封装在 GTP-U 报文中,并在 gNB-CU 和 gNB-DU 之间传递。而流控功能则是针对传递到 gNB-DU 的下行用户数据的流量控制,该功能包含下行用户数据扩展信息的传递、辅助扩展信息的传递和下行数据发送状态扩展信息的传递流程。其中,下行用户数据扩展信息(DL USER DATA PDU)、辅助扩展信息(ASSISTANCE INFORMATION DATA PDU)和下行数据发送状态扩展信息(DL DATA DELIVERY STATUS PDU)都封装在 GTP-U 报文的扩展头中,可以在用户数据封装成 GTP-U 报文传输时携带传输。

下行用户数据扩展信息传递流程的目的,在于当从 gNB-CU 通过 F1 接口的用户面携带用户下行 PDCP PDU 的 GTP-U 报文传递到 gNB-DU 时,可以在下行 GTP-U 报文扩展头中携带 DL USER DATA PDU,用以提供扩展信息以完成 F1 接口的丢包检测和其他功能。由于 DL USER DATA PDU 中提供了 F1 接口用户面当前报文的序列号, gNB-DU 可以通过接收到的报文序列号的连续性来判断在 F1 接口上是否丢包。此外,当下行 PDCP duplication 功能开启, gNB-CU 可以传输相同的 PDCP PDU 数据并拷贝到 2 条预先配置的 F1 用户面通道上。其中某条路径上的数据已经成功递交给



▲图 6 UE RRC 重建流程图

UE 后, 其他路径上的对应数据就可以丢弃以避免传输资源浪费。为了丢弃由于 PDCP 复制产生的冗余 PDU, gNB-CU 可以在 DL USER DATA PDU 中加入丢弃标记以及起始和终止范围内丢弃的 PDCP PDU 信息。对于重传的 PDCP 数据包, gNB-CU 可以在 DL USER DATA PDU 中设置“重传标记”, 用于指示 gNB-DU 识别和处理重传数据包。gNB-CU 还可以在 DL USER DATA PDU 中设置对应的上报轮询标记, 来请求 gNB-DU 侧的下行数据发送状态扩展信息和辅助扩展信息。当 gNB-CU 存在后续数据传输时, gNB-CU 可以在 DL USER DATA PDU 中设置“数据存在标识”, 以用于避免 gNB-DU 在后续有数据传输的时候不恰当地进入非连续性发送(DTX)状态。

在收到来自 gNB-CU 侧的用户数据之后, gNB-DU 需要根据其中携带的 DL USER DATA PDU 中的报文序列号信息是否连续, 来检测 F1 接口上的用户面数据包是否丢失。在确认用户面数据包在接口上丢失之后, 记录其对应的序列号。同时, gNB-DU 需要将接收到的 PDCP PDU 发送给 UE, 并记录成功按序递交给 UE (针对确认模式 (AM) RLC) 的 NR PDCP PDU 的最高序列号以及传输给底层 NR PDCP PDU 的最高序列号。此外, gNB-DU 需要根据 DL USER DATA PDU 中的丢弃信息, 删除对应的 PDCP PDU、识别重传数据, 并以高优先级调度同时识别 gNB-CU 侧是否还有后续数据传输以用于 DTX 状态判决。

下行数据发送状态扩展信息传递流程的目的在于, 通过 gNB-DU 侧反馈的下行数据发送状态, gNB-CU 可以针对特定的 DRB, 完成下行用户数据流量控制和其他功能。gNB-DU 通过 F1 接口的用户面发送上行 GTP-U 报文到 gNB-CU 时, 可以在上行

GTP-U 报文扩展头中携带 DL DATA DELIVERY STATUS PDU, 用以提供下行数据发送状态扩展信息。gNB-DU 需要在 DL DATA DELIVERY STATUS PDU 反馈针对 DRB 的期待缓存数据大小和期待速率; gNB-CU 根据其反馈进行流量控制。此外, DL DATA DELIVERY STATUS PDU 需要携带成功按序递交给 UE (针对 AM RLC) PDCP PDU 的最高序列号以及传输给底层 PDCP PDU 的最高序列号, 用于帮助 gNB-CU 获取在 gNB-DU 侧更准确的数据发送状态, 以移除 gNB-CU 缓存的已经成功发送的 PDCP PDU。用于快速重传功能时, gNB-CU 可以将未成功递交 (传输) 的 PDCP PDU 在另一条传输路径上 (如果有的话) 向 UE 快速重传。如果 gNB-DU 检测到当前 F1 接口存在下行用户数据包丢失, DL USER DATA PDU 要上报对应的丢包信息, 同时 gNB-CU 可以在当前 F1 接口上重传在接口上丢失的下行数据包。高频部署链路质量波动较大, 容易因障碍物遮挡导致无线链路传输短中断。如果无线链路中断, DL DELIVERY STATUS PDU 应该设置链路网络中断 (OUTAGE) 标识, 从而避免 gNB-CU 继续发送数据到一个 OUTAGE 的链路上, 这还可以用于 gNB-CU 的快速重传功能的触发。当无线链路恢复后, DL DELIVERY STATUS PDU 中需要包含无线链路恢复指示, gNB-CU 从而可以恢复该链路上的数据传输。

辅助扩展信息传递流程的主要目的在于进行下行 PDCP 重复数据传输控制。如果 PDCP 配置了重复功能, gNB-DU 需要在上行 GTP-U 报文扩展头中携带 ASSISTANCE INFORMATION DATA PDU, 以提供辅助扩展信息给 gNB-CU 用于 PDCP 重复功能的激活和去激活。当 gNB-DU 根据下行数据传递给 UE、空口链路传输质量判断是

否激活或者去激活下行 PDCP 重复功能后, gNB-DU 可以在 ASSISTANCE INFORMATION DATA PDU 携带 PDCP 重复激活或者去激活的建议。gNB-CU 根据建议信息判断是否激活或者去激活 PDCP 重复功能。此外, ASSISTANCE INFORMATION DATA PDU 还可以携带链路质量辅助信息, 包括信道质量指示 (CQI) 信息、混合自动重传请求 (HARQ) 失败次数信息、HARQ 重传信息、下行链路质量等级信息和上行链路质量等级信息等。

gNB-DU 基于事件来触发或者周期触发 DL DATA DELIVERY STATUS PDU 和 ASSISTANCE INFORMATION DATA PDU 的反馈。如果 gNB-DU 接收到的 DL USER DATA PDU 中设置了针对下行数据发送状态扩展信息上报轮询标记, gNB-DU 应该立即触发 DL DELIVERY STATUS PDU 的反馈; 如果 gNB-DU 接收到的 DL USER DATA PDU 中设置了针对辅助扩展信息上报轮询标记, gNB-DU 应该立即触发 ASSISTANCE INFORMATION DATA PDU 的反馈^[6]。

4 移动性场景

该部分会考虑在独立情况和多连接情况下的 gNB-CU 内的移动性。

4.1 相同 gNB-CU 下 gNB-DU 之间的移动性

在本场景中, 源小区和目标小区属于相同 gNB-CU 下不同的 gNB-DU。

gNB-CU 根据 UE 测量报告, 选择合适的目标 gNB-DU 用于切换。之后, gNB-CU 触发 UE 文本建立流程来为一个或多个无限承载安排空口和 F1 接口上的资源, 并为目标 gNB-DU 上的指定 UE 建立相应文本。目标 gNB-DU 会执行所请求的无线承载配置, 同时如果可能的话, 会存储 UE 文本。接下来,

gNB-CU 发送至少包括目标 gNB-DU 上小区群组配置信息的 RRC 重配置消息给 UE。此后, UE 建立与目标 gNB-DU 的 RRC 连接, 并回复 RRC 重配置完成消息。在 UE 接入到目标 gNB-DU 之后, gNB-CU 触发 UE 文本释放流程来释放源 gNB-DU 上的 UE 文本。具体的信令流程如图 7 所示^[3]。

4.2 演进型全球陆地无线接入网 (E-UTRAN) 和 NR 的双连接移动性

在本场景中, 源小区和目标小区属于辅节点下不同的 gNB-DU。

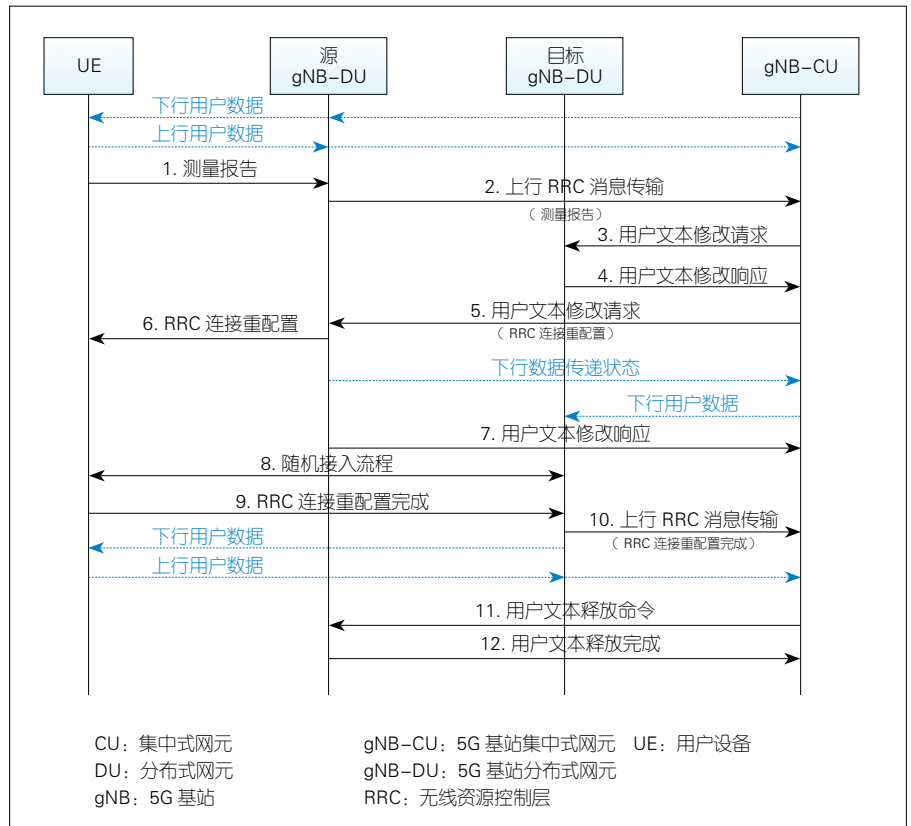
主节点 (MeNB) 根据 UE 测量报告, 选择合适的目标 gNB-DU 用于切换。在接收来自主节点的含有辅小区群组配置的辅节点修改请求消息之后, gNB-CU 触发 UE 文本建立流程来为一个或多个无限承载安排空口和 F1 接口上的资源, 并为目标 gNB-DU 上的指定 UE 建立相应的文本。目标 gNB-DU 会执行所请求的无线承载配置, 同时如果可能的话, 会存储 UE 文本。此后, gNB-CU 发送确认后的辅小区群组配置消息给主节点, 并由主节点转发给 UE。UE 和与目标 gNB-DU 建立 RRC 连接。在目标 gNB-DU 上的 UE 文本建立完成之后, gNB-CU 触发 UE 文本释放流程来释放源 gNB-DU 上的 UE 文本。具体的信令流程如图 8 所示^[3]。

5 其他 CU-DU 的相关课题

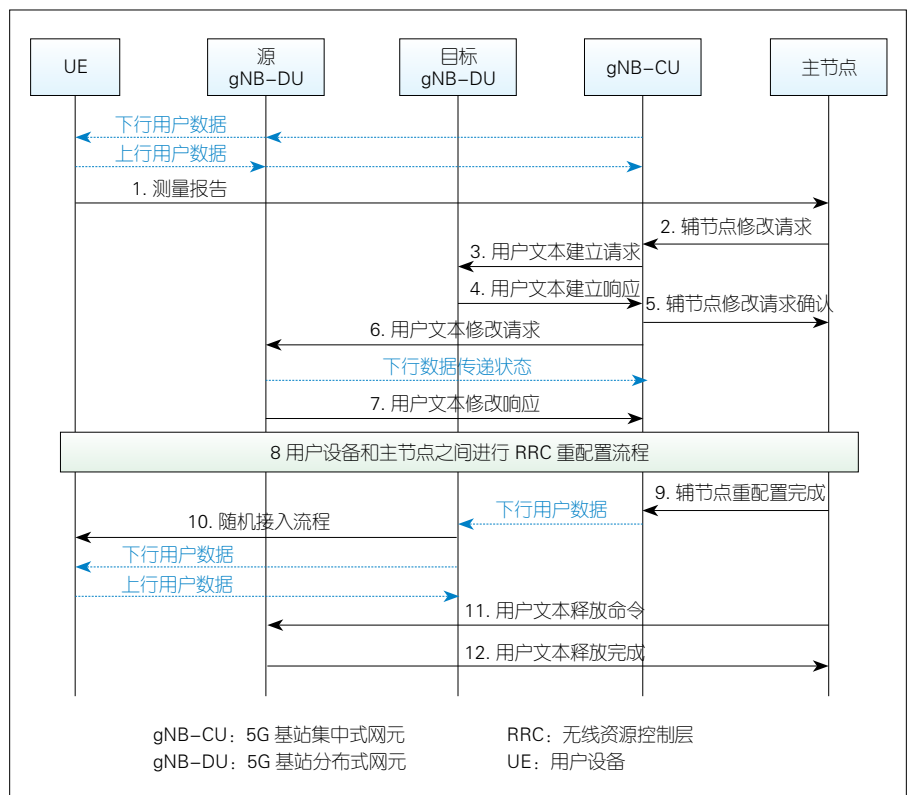
5.1 CU-DU 底层分割 (LLS)

除了 CU-DU 高层分割方案之外, 底层分割方案也可以用于增强低延时传输网络的网络性能。在本方案中, 物理层被分割为 LLS-CU 和 LLS-DU。图 9 展示了几种可能的底层分割方案^[7-8]。

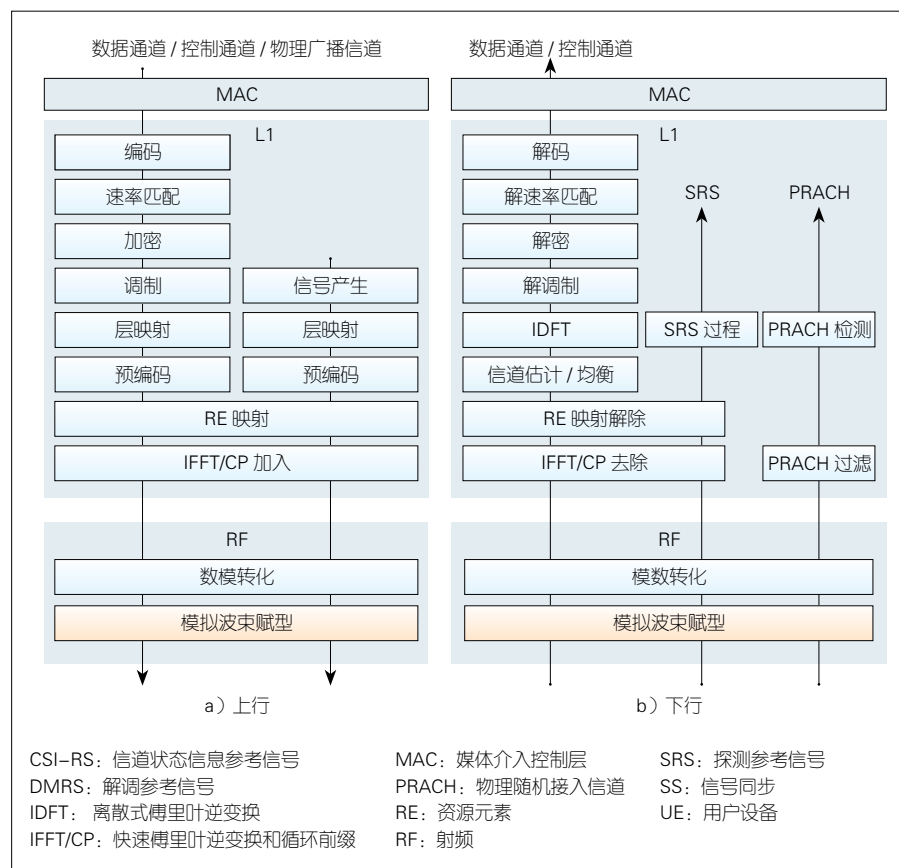
对于上行和下行的功能分割方案如下:



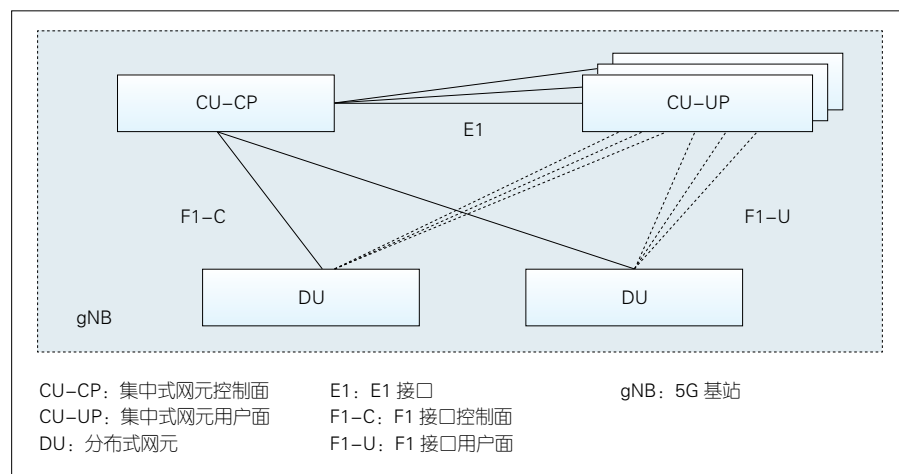
▲ 图 7 NR 内部 gNB-DU 之间的移动性



▲ 图 8 演进型全球陆地无线接入网 (E-UTRAN) 和新空口 (NR) 的双连接下 gNB-DU 之间的移动性



▲图 9 针对上行和下行，5G 基站（gNB）物理层处理链的一种可能实现方式



▲图 10 CU-CP 和 CU-UP 分离情况下的整体无线接入网架构

(1) 方案 6

所有的物理层功能安排在 DU。

(2) 方案 7-1

在上行中，快速傅里叶变换和循环前缀移除功能被安排在 LLS-DU；其他的物理层功能被安排在 LLS-CU。

在下行中，快速傅里叶逆变换和循环前缀添加功能被安排在 LLS-DU；其他的物理层功能被安排在 LLS-CU。

(3) 方案 7-2

在上行中，快速傅里叶变换、循环前缀移除和资源解映射功能被安排

在 LLS-DU；其他的物理层功能被安排在 LLS-CU。在下行中，快速傅里叶逆变换、循环前缀添加以及资源映射和预编码功能被安排在 LLS-DU，其他的物理层功能被安排在 LLS-CU。

(4) 方案 7-3（只针对下行）

编码器被安排在 LLS-CU；其他的物理层功能被安排在 LLS-DU。

除了以上方案外，还存在其他的潜在功能分割方案。针对上行，在离散傅里叶变换和信道估计（均衡）功能之间分割。针对上行和下行，方案 7-1 和方案 7-2 之间的分割可能性是基于波束赋型的^[8]。

5.2 控制面（CP）和用户面（UP）分离

为了根据不同场景和所需的性能来优化不同无线接入网功能的位置分布，gNB-CU 可以基于高层分割方案被进一步分割成 CU-CP 和 CU-UP。gNB-DU 掌控 RLC、MAC 和 PHY 的协议，CU-CP 掌控 PDCP 和 RRC 协议的控制面实例；而 CU-UP 掌控 PDCP 和 SDAP 协议的用户面实例。CU-CP 和 CU-UP 之间的接口被命名为 E1 接口。包含控制面和用户面分离的无线接入网的整体架构如图 10 所示^[9]。

一个 gNB 可能包含一个 CU-CP、多个 CU-UP 和多个 DU。CU-CP 通过 F1 接口的控制面和 DU 相连，并通过 F1 接口的用户面和 DU 相连。CU-CP 和 CU-UP 通过 E1 接口相连。原则上，一个 gNB-DU 只能连接一个 CU-CP，一个 CU-UP 也只能连接一个 CU-CP；但通过恰当的方法，一个 gNB-DU 或者一个 CU-CP 可以连接多个 CU-UP。一个 gNB-DU 可以连接同一个 CU-CP 控制下的多个 CU-UP，而一个 CU-UP 可以连接同一个 CU-CP 控制下的多个 gNB-DU。

E1 接口支持的基本功能包括 E1 接口管理功能、承载文本管理功能等

等。和 F1 接口相似, E1 接口管理功能也包括 E1 接口建立、gNB-CU-UP 配置更新、gNB-CU-CP 配置更新、E1 接口释放、重启、失败指示和 gNB-CU-UP 状态指示功能。其中, E1 接口的建立既可以由 gNB-CU-CP 触发, 又可以由 gNB-CU-UP 触发^[10]。

5.3 E-UTRAN 的 CU-DU 高层分割方案

为了实现演进型基站 (eNB) 和 gNB 的整合, LTE 和 NR 的会聚架构被引入进来。即基于 PDCP 和 RLC 的分离 (方案 2), 在 E-UTRAN 中引入集中式网元 (LTE-CU) 和分布式网元 (LTE-DU)^[11]。该架构可以高效地使用传输网络, 并尽可能减少对 LTE 传输网络的影响。部署 LTE-CU 和 LTE-DU 在运营商网络中, 以便于后续的网络更新。

目前, 3GPP 中 E-UTRAN 的 CU-DU 高层分割方案只支持连接到 5GC 的 eNB 分割, 拥有 NR 中的功能分割架构和接口功能。与 NR 中的 gNB 类似, eNB 被分割成 2 种实体: NB-CU 和 eNB-DU。eNB-CU 和 eNB-DU 之间的接口为 W1 接口。除了一些满足运营商需求的 LTE 特性之外, W1 接口所支持的接口功能与 F1 接口基本一致, 包括 F1 接口管理功能、系统消息管理功能、UE 文本管理功能、RRC 消息传递功能、寻呼功能和告警信息传递功能。其区别表现在以下 3 个方面: 第一, 对于 SIB 的划分, 在 E-UTRAN 中 CU-DU 分离的情况下, SIB1、SIB2、SIB3、SIB8 和 SIB16 由

eNB-DU 进行编码, 而其他的 SIB 则由 eNB-CU 进行编码; 第二, 由于 E-UTRAN 系统中没有按需式的系统信息请求方式, W1 接口上不存在相关的流程; 第三, 由于 EPC 不支持网络切片功能, 切片功能仅限于连接到 5GC 的场景。

6 结束语

在本文中, 我们介绍了 CU-DU 架构的进展, 展示了下一代无线接入网络的基本结构, 讨论了 CU-DU 接口的功能和基本移动性场景, 并提出了应对相应挑战的解决方案和潜在的优化方案。我们对 CU-DU 相关的其他议题的进展也做了相应介绍, 这包括 CU-DU 底层分割、CP 和 UP 分离以及 eNB 的高层分割。

参考文献

- [1] WONG K. CU-DU Split[EB/OL]. (2019-03-19) [2019-11-18]. https://blog.csdn.net/Rong_Toa/article/details/88674488
- [2] 3GPP. Study on New Radio Access Technology: Radio Access Architecture and Interfaces: 3GPP TR38.801[S]. 2017
- [3] 3GPP. NG-RAN; Architecture Description (Rel 15): 3GPP TS 38.401[S]. 2019
- [4] 3GPP. NG-RAN; F1 General Aspects and Principles (Rel 15): 3GPP TS 38.470[S]. 2019
- [5] ZHANG H J, LIU N, CHU X L, et al. Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8): 138-145. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600940
- [6] 3GPP. NG-RAN; NR User Plane Protocol (Rel 15): 3GPP TS38.425[S]. 2019
- [7] ZHANG H J, JIANG C X, CHEN J L, et al. Cooperative Interference Mitigation and Handover Management for Heterogeneous Cloud Small Cell Networks[J]. IEEE Wireless Communica-

tions, 2015, 22(3): 92-99. DOI: 10.1109/MWC.2015.7143331

- [8] 3GPP. Study of CU-DU Low Layer Split for NR (Rel 15): 3GPP TS 38.816[S]. 2018
- [9] Ericsson. New WID on Separation of CP and UP for Split Option 2[Z]. RP-173831
- [10] 3GPP. NG-RAN; E1 General Aspects and Principles (Rel 15): 3GPP TS 38.460[S]. 2019
- [11] China Unicom, Orange, China Telecom, et al. Revised SID: Study on eNB(s) Architecture Evolution for E-UTRAN and NG-RAN[Z]. RP-172707

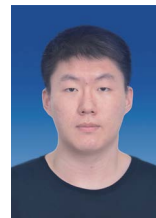
作者简介



高音, 中兴通讯股份有限公司上海算法部标准预研资深专家、3GPP RAN3 工作组副主席; 研究领域为 4G、5G 技术研究和标准推进工作; 已递交数百项 3GPP 会议技术提案, 若干技术被 3GPP 标准采纳; 撰写了百余篇技术专利。



刘壮, 中兴通讯股份有限公司上海算法部 5G 预研高级技术工程师; 从事 5G 无线通信和信号处理研究; 撰写过近百篇技术专利。



韩济任, 中兴通讯股份有限公司上海算法部 5G 预研技术工程师; 从事下一代无线接入网研究, 主要研究方向为接口协议。

《中兴通讯技术》杂志（双月刊）投稿须知

一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术，以展现通信技术最新发展动态，并促进产学研合作，发掘和培养优秀人才，为振兴民族通信产业做贡献。

二、稿件基本要求

1. 投稿约定

- (1) 作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台：tech.zte.com.cn/submission，并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2) 编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿，并根据审稿意见，公平、公正地录用稿件。审稿过程需要 1 个月左右。

2. 内容和格式要求

- (1) 稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2) 稿件需采用 WORD 文档格式。
- (3) 稿件篇幅一般不超过 6 000 字（包括文、图），内容包括：中、英文题名，作者姓名及汉语拼音，作者中、英文单位，中文摘要、关键词（3 ~ 8 个），英文摘要、关键词，正文，参考文献，作者简介。
- (4) 中文题名一般不超过 20 个汉字，中、英文题名含义应一致。
- (5) 摘要尽量写成报道性摘要，包括研究的目的、方法、结果 / 结论，以 150 ~ 200 字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6) 文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚，上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7) 图、表力求少而精（以 8 幅为上限），应随文出现，切忌与文字重复。图、表应保持自明性，图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表，表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8) 所有文献必须在正文中引用，文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为：
 - 期刊 [序号] 作者. 题名 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符
 - 书籍 [序号] 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版者, 出版年: 引文页码. 数字对象唯一标识符
 - 论文集中析出文献 [序号] 作者. 题名 [C]// 论文集编者. 论文集名 (会议名). 出版地: 出版者, 出版年 (开会年): 引文页码. 数字对象唯一标识符
 - 学位论文 [序号] 作者. 题名 [D]. 学位授予单位所在城市名: 学位授予单位, 授予年份. 数字对象唯一标识符
 - 专利 [序号] 专利所有者. 专利题名: 专利号 [P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符
 - 国际、国家标准 [序号] 标准名称: 标准编号 [S]. 出版地: 出版者, 出版年. 数字对象唯一标识符
- (9) 作者超过 3 人时，可以感谢形式在文中提及。作者简介包括：姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10) 提供正面、免冠、彩色标准照片一张，最好采用 JPG 格式（文件大小超过 100 kB）。
- (11) 应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12) 提供联系方式，如：通讯地址、电话（含手机）、Email 等。

3. 其他事项

- (1) 请勿一稿多投。凡在 2 个月（自来稿之日算起）以内未接到录用通知者，可致电编辑部询问。
- (2) 为了促进信息传播，加强学术交流，在论文发表后，本刊享有文章的转摘权（包括英文版、电子版、网络版）。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘，请在投稿时说明。
- (3) 编辑部地址：安徽省合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室，邮政编码：230061。
- (4) 联系电话：0551-65533356，联系邮箱：magazine@zte.com.cn。
- (5) 本刊只接受在线投稿，欢迎访问本刊投稿平台：tech.zte.com.cn/submission。

办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英
迎接挑战, 把握世界通信技术动态
立即行动, 求解通信发展疑难课题
励精图治, 促进民族信息产业崛起

双月刊 1995 年创刊 总第 150 期
2020 年 2 月 第 26 卷 第 1 期

主管: 安徽出版集团有限责任公司
主办: 时代出版传媒股份有限公司
深圳航天广宇工业有限公司
出版: 安徽科学技术出版社
编辑、发行: 中兴通讯技术杂志社

总编辑: 王喜瑜
主编: 蒋贤骏
执行主编: 黄新明
责任编辑: 徐烨
编辑: 杨广西、卢丹、朱莉、任溪溪
设计排版: 徐莹
发行: 王萍萍
外联: 卢丹
编务: 王坤

《中兴通讯技术》编辑部
地址: 合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室
邮编: 230061
网址: tech.zte.com.cn
投稿平台: tech.zte.com.cn/submission
电子信箱: magazine@zte.com.cn
电话: (0551)65533356

传真: (0551)65850139
发行范围: 公开发行
印刷: 合肥添彩包装有限公司
出版日期: 2020 年 2 月 25 日
中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
定价: 每册 20.00 元