

文章编号: 2095-4980(2022)01-0001-07

C-V2X 资源分配方法研究综述

王巨震, 江昊, 陈琪美, 李德识*

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: C-V2X是基于蜂窝网络技术演化而来的车联网(IoV)解决方案,是5G网络中的极可靠低时延通信(uRLLC)中重要的一部分,车联网技术的实现对现代交通具有重要意义。本文对近些年来国内外学者在该研究领域取得的成果进行了系统总结:对车联网的定义做了简要说明,并对C-V2X的标准研究进展进行了总结;对LTE-V2X和NR-V2X下的集中式和分布式资源调度方式分别进行了阐述,并对现有研究方法做了分类;最后,对未来研究可能面临的挑战进行了展望。

关键词: 车联网; C-V2X 方案; 资源调度; 高可靠低延时

中图分类号: TP311

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021145

Summary of research on C-V2X resource allocation method

WANG Juzhen, JIANG Hao, CHEN Qimei, LI Deshi*

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract: The Internet of Vehicles(IoV) is a research hotspot of the fifth generation(5G) mobile communication network. Cellular Vehicle To Everything(C-V2X) is an Internet of Vehicles solution based on cellular network technology and is an important part of ultra-Reliable and Low Latency Communication(uRLLC) in 5G network. The realization of the Internet of Vehicles technology is of great significance to modern transportation. This paper offers a systematic survey of existing research achievements of the domestic and foreign researchers in recent years. Firstly, a brief description of the definition of the Internet of Vehicles is given, and the standard research progress of C-V2X is summarized. Next, the centralized and distributed resource scheduling methods under LTE-V2X and NR-V2X are described respectively, and the existing research methods are classified. Finally, a perspective of the future work in this research area is discussed.

Key words: Internet of Vehicles; Cellular Vehicle To Everything; resource allocation; ultra-Reliable and Low Latency Communication

伴随着全球第五代移动通信系统走向大规模商业应用,5G这项新的技术为各个传统领域带来了新的机遇和挑战,尤其在智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)中发挥着重要作用^[1]。车联网是智能交通系统中非常重要的一部分,广义的车联网(IoV)是指由车辆位置、速度和路线等信息构成的巨大交互网络。当前,普遍采纳的车联网(V2X)的定义为:一个车与万物互联的网络,包括车与车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)、车与人(Vehicle-to-Pedestrian, V2P)、车与基础设施(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、车与网络(Vehicle-to-Network, V2N)。全球用于V2X通信的主流技术包括专用短程通信(Dedicated Short Range Communication, DSRC)技术和基于蜂窝移动通信系统的C-V2X技术。其中C-V2X技术又包括基于LTE的LTE-V2X^[2]和基于5G的NR-V2X^[3]。

本文对车联网进行了概述,对现有3GPP组织下的C-V2X标准研究进展进行了详细说明。介绍了C-V2X的资源池,在此基础上对LTE-V2X和NR-V2X的资源分配方法进行了详细解读,并对LTE-V2X现有研究进行了分类总结,对未来研究方向做出展望。

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U19B2004); 中山市高端科研机构创新专项资金资助项目(181129112748101); 广东省“大专项+任务清单”资助项目(2019sdr002)

*通信作者: 李德识 email:dsl@ntu.edu.cn

1 C-V2X 概述

1.1 C-V2X 标准研究进展

第一个阶段开始于 2015 年 12 月, 主要基于 LTE-V2X 的研究, 包括业务需求、系统架构、空口技术和安全服务四个方面, 该阶段的 3GPP 标准已于 2017 年 3 月在 Release 14 版本中完成定制。陈山枝等^[4]概述了 3GPP 中 V2X 服务中的需求和用例。讨论了在 LTE-V2X 中所面临的挑战和详细的设计方面。同时, 分析了增强的 V2X (eV2X) 服务和可能的 5G 解决方案。

第二个阶段开始于 2017 年 3 月, 主要是针对支持增强 LTE-V2X (LTE-eV2X) 的研究, 面向 V2X 的高级业务场景, 进一步提升 V2X 的侧边链路 (Sidelink, SL) 模式的可靠性、数据速率和时延性能。该阶段的标准化工作于 2018 年 6 月也在 Release 15 版本中完成定制。Gábor Fodor 等^[5]概述了 Rel-15 LTE 系统支持的 V2X 新特性, 包括载波聚合、高阶调制、低延迟支持和新的资源管理解决方案。

第三阶段开始于 2018 年 6 月, 主要是支持 NR-V2X 的研究。该阶段支持 V2X 的高级业务, 其中引入了组播和广播等多种通信方式, 以及优化感知、调度、重传以及车车间连接质量控制等技术。该阶段的标准化工作于 2020 年 7 月在 Release 16 版本中完成定制。Shehzad Ali Ashraf 等^[6]概述了 NR-V2X 的基于反馈的重传通信、毫米波通信、先进的资源分配和服务质量管理等新功能。

1.2 LTE-V2X 与 NR-V2X 区别

近期, 随着 5G Release 16 标准的冻结, 5G NR-V2X 标准也同时冻结。与 Release 14, Release 15 标准版本中定义的 LTE-V2X 相比, Release 16 版本在帧结构、资源调度模式等方面进行了全新的定义。此外, 在车辆对车辆的通信场景中新增加了点播和组播的通信方式, 具体的差异见表 1。

表 1 LTE-V2X 和 NR-V2X 对比

character	LTE-V2X	NR-V2X
mode	broadcast	broadcast groupcast unicast
MCS	QPSK16-QAM	QPSK16-QAM64-QAM
waveform	50-1 000 ms	OFDM
repeat	blind	HARQ/blind
physical channel	PSCCH/PSSCH	PSCCH/PSSCH/PSFCH
multiplexing	FDM	TDM
reference signal	four/sub-frame	flexible
sub-carrier spacing	15 kHz	sub -6 GHz: 15/30/60 kHz mm wave: 60/120 kHz
scheduling unit	one sub-frame	slot based (≤ 14 symbols)
sidelink mode	Mode 3&4	Mode 1&2

2 C-V2X 资源分配的研究

2.1 资源池

LTE-V2X 中的资源调度是在两个维度上进行: 分别为时间和频率。将无线资源网格按频率分成子信道, 按时间分成子帧。在频率轴上, 资源分配的粒度是一个子通道。资源池的分布方式有两种: 一种是数据资源 (Transport Block, TB) 与 Sidelink 控制信息 (Sidelink Control Information, SCI) 是相邻的, 如图 1(a) 左侧, 此种情况可以有效降低带内辐射。如果要降低用户之间的干扰, 则只需要对用户在频带上所占资源的两侧进行功率回退即可。另外一种 TB 与 SCI 资源不相邻, 如图 1(a) 右侧, 此种资源分布的优势是由于 SCI 所在资源池较小, 有利于 SCI 的盲检测, 进而进一步检测到数据资源。无论哪种分布方式, SCI 与对应的数据资源相比总处于较低的子信道上。

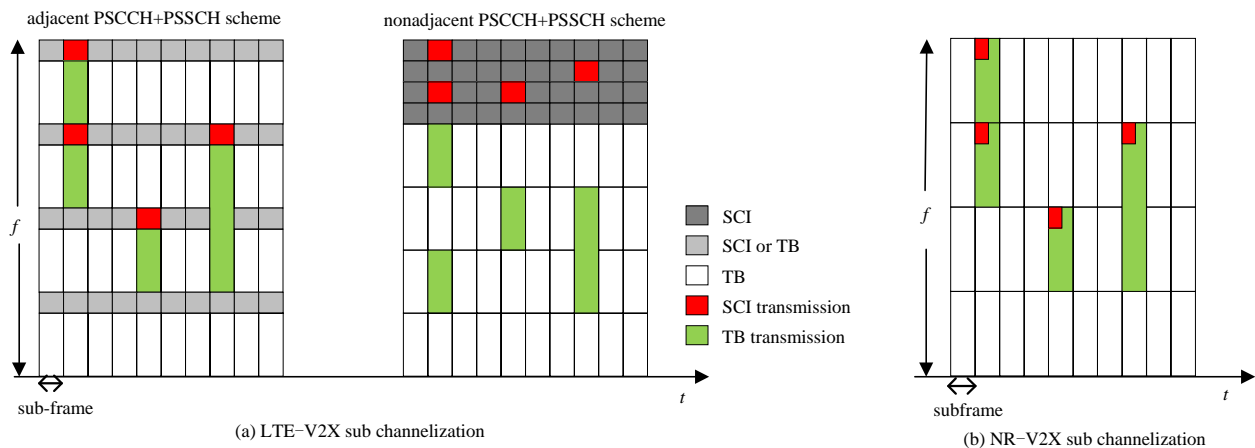


Fig.1 C-V2X resource distribution methods

图 1 C-V2X 资源分布方式

NR-V2X 的资源池和 LTE-V2X 的基本一致,如图 1(b)所示,但为了支持灵活的资源指示,降低解码时延,以及获取感知信息支持资源分配机制。NR-V2X 的控制信道信息 SCI 分两个层级,第一级的 SCI(1st-stage SCI)在物理侧链控制信道(Physical Sidelink Control Channel, PSCCH)资源上发送,包含可被感知的本次业务(以及重传业务)对应的时频资源信息等以及指示第二级 SCI(2nd-stage SCI)的时频资源信息;第二级 SCI 映射在物理侧链共享信道(Physical Sidelink Share Channel, PSSCH)资源上,包含识别和解码对应 PSSCH 的必要信息、混合自动重传请求(Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ)过程信息以及 CSI 反馈的触发信息等。对于不同的通信模式(单播、组播、广播),统一用一种固定的 1st-stage SCI,这样设计主要是为了降低控制信道盲检的复杂度,同时保持较好的可扩展性以及前向兼容性。

2.2 LTE-V2X 的资源分配

针对 LTE-V2X 的标准,终端可以选择两种接口进行 V2X 消息的传递:一种是 PC5 接口,一种是 Uu 接口。Uu 空中接口主要实现用户设备(User Equipment, UE)和无线接入网(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN)的通信,主要基于物理层的 Uplink 和 Downlink 信道设计。PC5 接口主要是实现设备到设备之间的直接通信,主要基于物理层的 Sidelink 信道设计。相对应的,基于 Uu 接口进行的集中式调度称为 Mode 3,即基站调度模式;基于 PC5 接口进行的 UE 自主资源分配称为 Mode 4,即自主选择模式^[7]。也存在另外一种理解,基于 PC5 接口下有 Mode 3 和 Mode 4 两种资源分配方式^[8]。两种逻辑从两个不同的角度来理解,但都正确。标准中给出了可参考的评估方法,主要分为城市场景和高速公路场景^[9]。

C-V2X 中评价系统性能的指标主要有:数据包投递率(Packet Delivery Ratio, PDR):定义为目标节点接收到的数据包与源节点应用层发送的数据包的比值关系,即正确传输数据包的统计度量,主要体现了网络的两个主要特性:网络可靠性、网络拥塞/通信状况;数据包接收率(Packet Reception Ratio, PRR):定义为周围 UE 成功解码信令的数量与周围 UE 的总数之比,主要反映链路质量;延迟(Delay):是数据包从源节点正确传输到目标节点所需要的时间,其平均值为平均延迟。在 V2X 环境下,车辆速度快且车和车间距小,这就要求车辆之间的通信延迟必须保持在极低的范围以内,因此这个指标对于安全关键型应用具有特别重要的意义;碰撞概率:是指一个 UE 在选择资源或重选资源时,所选的资源与其他 UE 冲突的概率;误块率(Block Level Error Rate, BLER):出错的块在所有发送的块中所占的百分比。

1) Mode 3 分配方式

LTE-V2X 引入了半静态调度(Semi-Persistent Scheduling, SPS)方式来适应 V2X 业务中的周期性业务。Mode 3 的 SPS 调度针对传统 LTE 网络 SPS 调度方式进行了增强。同时,Mode 3 也支持跨载波调度,目的是为了通过授权频谱(如 2.6 GHz)发送调度信令用于调度 V2X 专用频谱(如 5.9 GHz)上的资源传输。在 UE 连接状态下,首先向基站(Evolved Node B, eNodeB)发送调度请求(Service Request, SR)信令,eNodeB 会根据 UE 的位置以及现有资源的利用情况通过

DCI format 5A 调度发送端 UE 发送 PSCCH 和 PSSCH,即 Mode 3 必须处在 UE 和无线资源控制的连接态,即 UE 和 eNodeB 之间的通信是基于 Uu 接口。当资源分配好之后,UE 和 UE 之间的通信还是基于 PC5 接口,这也解释了上述两种不同的理解,如图 2(a)所示。Mode 3 模式下资源是完全由 eNodeB 调度的,当 UE 较多,PC5 传输资源紧张时,eNodeB 可以选择为其中某些 UE 优先分配 Sidelink 传输资源,而为其他 UE 少分配甚至不分配 Sidelink 传输资源。

Mode 3 由于 eNodeB 的参与,可以实现对覆盖范围内的车辆进行集中的子信道分配,其优点是资源利用效率较高,缺点是时延较长。此模式下,eNodeB 可以方便地获取 UE 的相关信息,如可以获取每个 UE 的地理位置信息等。因此,有部分研究就是基于地理位置信息进行资源分配,Cecchini G 等^[10]研究了基于车辆位置信息的网络控制资源管理。他们利用了复用距离的概念,在这个概念中,相同的资源可以被不同的发射机使用,而不会影响那些在感知范围内的接收机,结果表明定位的准确性和数据传输的错误率强相关。作者进一步提出最大复用距离的算法^[11],该算法试图将使用相同无线资源的发射机之间的距离最大化,以保持干扰在可控范围内,并将两种方法进行了比较。Fritzsch 等^[12]也提出了基于位置的调度,其中基站调度器可以利用最优的调度距离,通

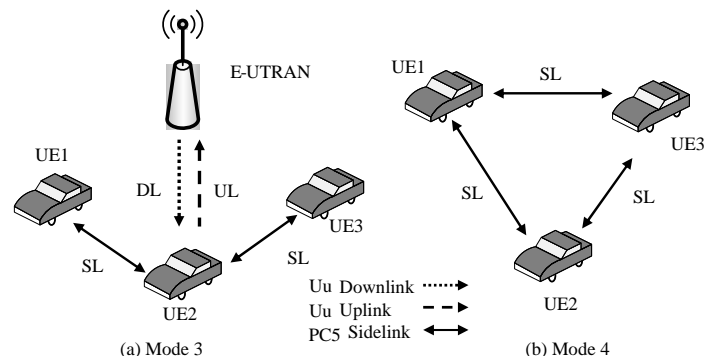


Fig.2 Diagram of Mode 3 and Mode4

图 2 Mode 3 和 Mode 4 示意图

过在不同车辆之间的资源复用来实现最大化小区的吞吐量。为实现这一目标，他们利用小区吞吐量、可靠性和通信范围之间的关系。Kim 等^[13]提出了一种根据车辆的速度、密度、方向和位置分配不同的频率和时间资源的方法。实验结果表明，该方案可以提高分组接收率。

除了对高速公路和城市道路场景的研究外，还有另外一类研究是针对更详细的场景。如 Abanto-Leon 等^[14]研究了当交叉路口、高速公路合流等车辆交叉集群的场景。此场景下存在分配冲突时，部分车辆无法接收到彼此的信息。他们设计了不同复杂度和性能算法来解决这个问题。González A 等^[15]研究了车辆编队场景，在满足队列稳定条件的前提下，提出了一种求解 SPS 周期的半解析方法，并证明了该方法在非均匀队列下是有效的。Sahin 等^[16]提出了当车辆进入 eNodeB 时，就预先为车辆调度资源。接下来，车辆使用分配的资源在覆盖范围之外进行传输。他们假设网络基础设施对车辆的运动做出预测，并相应地为车辆进行预定资源。结果表明，预测的准确性对传输的成功是很重要的。

2) Mode 4 分配方式

Mode 4 分配方式是车辆自主选择资源的方式，主要是采用感知(Sensing)与半静态调度相结合的策略。Mode 4 的工作场景如图 2(b)所示，Mode 4 的调度过程可以分成如下几个步骤，如图 3(a)所示。

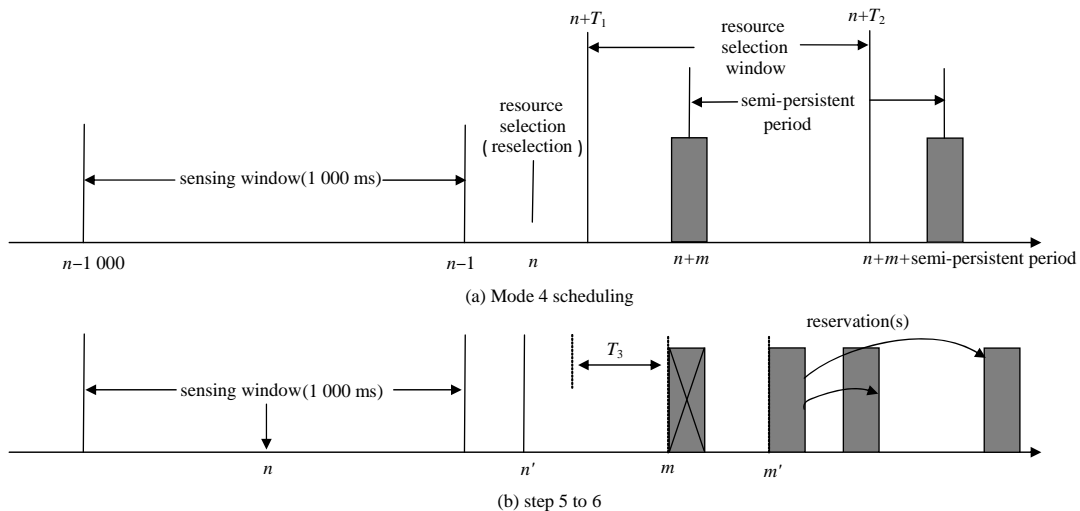


Fig.3 The timeline of Mode 4 and Mode 2 mechanism

图 3 Mode 4 和 Mode 2 机制的时间线

步骤 1: 感知过程。由于在 Mode 4 中没有资源调度的中心协调器，业务数据包随时可能发生，每个 UE 在传输资源之前监视其他 UE 的资源使用情况，称做“感知”。UE 主要感知和解析其他 UE 的 Sidelink 控制信息，已被其他 UE 使用(或预计使用)的资源被标记为“忙”，这些资源不会被选中进行传输，以防止消息冲突。可用的资源被标记为“候选资源”(Candidate Resources, CR)。感知窗口的宽度固定为 1 000 个子帧，即 1 000 ms。

假设一辆车(UE)需要在 T 时刻预定新的子通道，它可以在 T 和已建立的最大延迟(≤ 100 ms)之间预定子通道，这个时间段被称为“资源选择窗口”。对应于子帧的范围 $[n+T_1, n+T_2]$ ，其中 n 为当前子帧， T_1 取决于 UE 的进程延迟，即系统处理时延($T_1 \leq 4$ ms)， T_2 满足延迟要求(20 ms $\leq T_2 \leq 100$ ms)。在选择窗口内，车辆识别候选单帧资源(Candidate Single-subframe Resources, CSRs)。

步骤 2: 候选资源选择过程。UE 分析它在 T 之前的 1 000 个子帧中接收到的所有信息，并创建一个它可以预定的 CSRs 的清单 L_1 。此列表包括选择窗口中的所有 CSR，但同时满足以下两个条件的除外：

1) 在最后的 1 000 个子帧中 UE 从其他 UE 那里正确地收到了一个 SCI，表明它将利用这个 CSR，同时 UE 需要它来传输下一个重传数据包。

2) UE 测量 RBs 上的平均参考信号接收功率(Reference Signal Received Power, RSRP)高于给定的阈值。阈值取决于数据包的优先级。这个优先级是由更高的层根据应用的相关性和迫切性来确定的。

在执行步骤 2 之后， L_1 必须至少包含选择窗口中所有 CSR 的 20%。如果没有，则迭代执行步骤 2，直到完成大于等于 20% 的目标。RSRP 阈值在每次迭代中增加 3 dB。

步骤 3: 确定候选资源：在排除掉上述不可用资源后，为了避免 RSRP 测量不准确性，且为了排除由于 SCI 没有正确解码的资源，在上述清单 L_1 的基础上再进行接收的信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)的测量，将测得的 RSSI 进行排序，选择功率最低的 20% 资源。进而，UE 将创建一个新的 CSRs 的清单

L_2 ，清单 L_2 中的 CSRs 一定等于选择窗口中可选择资源的 20%。

步骤 4：资源选择或重选。在清单 L_2 中随机选择所需资源。在协议中，UE 在每个资源预定间隔(Resource Reservation Interval, RRI)中传输资源。每次传输后，UE 将一个称为资源重选计数器(Resource Reservation Counter, RC Counter)的值减少 1。当这个计数器达到 0 时，UE 要么用概率 pRK(prob Resource Keep)保留当前资源，要么用概率(1-pRK)触发资源重新选择。在这两种情况下，UE 都在指定的范围 $[C_1;C_2]$ 内为计数器随机选择一个新的整数值，这取决于 RRI 值：当 $RRI=20$ ms 时，取 $[25,75]$ ；当 $RRI=50$ ms 时，取 $[10,30]$ ；当 $RRI \geq 100$ ms 时，取 $[5,15]$ 。

关于 Mode 4 调度方式，现有的研究主要集中在如何最大化地利用有限的频谱，避免资源的碰撞等。如上所述，3GPP 标准协议有很多的参数是可以调整的，如感知窗口的大小、选择窗口的大小、重选概率 pRK 的值、RC Counter 的值等。其中一类研究就是在保证标准算法不变的情况下，调整这些参数以分析它们对系统的影响，进而优化其中的一部分参数达到更好效果。如：Bazzi 等^[17]通过仿真分析了可变参数对其无线资源分配性能的影响，他们改变了 5 个物理层和 3 个媒体接入层参数，并把它们分成三类：影响微不足道的、影响服务质量的和产生权衡关系的；Nabil 等^[18]分析了资源池配置和一些关键 SPS 参数对调度性能的影响，发现 RRI 对 PDR 具有显著影响。此外，在车辆密集的高速公路场景中，资源保持概率的影响很小。原因是，当交通拥堵严重时，可用的资源数量是有限的。由于缺乏足够的资源，UE 最终会再次选择相同的资源，这相当于在不执行 SPS 算法的情况下直接预订资源。结论是需要对拥塞控制机制进行研究，以进一步提高实际用例下的 SPS 性能。

Molina-Masegosa R 等评估了在不同信道负载和流量场景下的配置，并识别出对标准算法影响较大的参数^[19]。作者将 Mode 4 与随机选择的资源在城市道路场景下进行比较，发现在通信过程中会产生很多的传输错误^[20]。进一步，作者建立了 4 种传输错误模型，并进行了验证^[21]。Toghi B 等^[22]研究了 C-V2X 在拥挤车辆情况下的可靠性和延迟。仿真结果和分析表明，在高密度网络中，资源分配机制中的参数调整对于提高网络性能和可靠性具有重要意义。需要注意的是，在不同的场景下，不同的参数对评估指标的影响不一样。

第二类研究对现有 3GPP 标准的 Sensing+SPS 算法进行修改或扩展，但保留其大部分功能。如 Molina-Masegosa R 等^[23]将文献[20]的研究结果拓展到高速公路场景。建议车辆只为更频繁(和更小)的数据包预定资源，而频率较低的(和较大的)数据包在不需要预定资源的情况下直接传输，即较大的数据包只传输一次，这样会提升频谱利用率。Jeon Y 等^[24]建议车辆更早地执行无线资源重新选择过程，这样可以提前通知其他车辆，它们将用于后续传输的资源。Bonjorn N 等^[25]建议在每个数据包的传输过程中携带计数器值，并通过强制更改 UE 的 RC 值来解决那些预期的冲突，即只要其他车辆发现上次 RRI 中接收到的计数器与当前计数器一致，该车就会触发计数器重选。He 等^[26]通过在时间轴上分离控制信息及其相对应的数据包，并让它们相互携带预定信息，可以显著减少冲突。Hirai Takeshi 等^[27]研究了基于非正交多址接入场景下的碰撞预警研究，通过概率协同传输方法使系统性能提升了 50%。

2.3 NR-V2X 的资源分配

与 LTE-V2X 的 Mode 3 和 Mode 4 一样，NR-V2X 的资源分配模式分为基于基站的集中式调度(Mode 1)和基于终端的分自主选择式分配(Mode 2)。

1) Mode 1 分配方式

Mode 1 和 Mode 3 绝大部分功能是相同的，但在动态调度方面，标准定义了新的 DCI(DCI format 3-0)来指示 PSCCH 和 PSSCH 信道资源，支持为一个 TB 的一次或多次传输分配资源。此外，支持基于 HARQ 的重传调度。相关研究同 Mode 3 基本一致，本文不再展开讨论。

2) Mode 2 分配方式

Mode 2 的调度过程可以分成如下几个步骤，步骤 1)~4)如图 3(a)所示，步骤 5)~6)如图 3(b)所示：

步骤 1：感知过程。同 Mode 4 一致。

步骤 2：候选资源选择过程。同 Mode 4 一致。只在执行步骤 2 之后， L_1 必须至少包含选择窗口中所有 CSR 的 20%(这个参数是可以配置的，目前协议中支持 20%,35%,50%)。如果没有，则迭代执行步骤 2，直至完成大于等于 20%的目标。RSRP 阈值在每次迭代中增加 3 dB。

步骤 3：确定候选资源。经过上述步骤后的资源均认为可用，进一步地，UE 将清单 L_1 报告给高层。

步骤 4：资源选择或重选。同 Mode 4 一致。

步骤 5：重评估(re-evaluation)。如果一个来自集合 (r_0, r_1, r_2, \dots) 的资源 r_i 不在清单 L_1 中，则 UE 将会把资源 r_i 汇报至高层进行重评估。需要注意的是，该重评估可能发生，也可能不发生。

步骤 6: 资源预占用(pre-emption)。由于在步骤 2 中通过与接收到的 SCI format 1-A 的 RSRP 值进行比较, 如果一个来自集合 (r_0, r_1, r_2, \dots) 的资源 r_i 不在清单 L_1 中, 则 UE 将会把资源 r_i 汇报至高层进行预占用。需要注意的是, 该重评估可能发生, 也可能不发生。

Youngjoon Yoon 等^[28]证明了所提出的防御传输策略, 可以显著缓解全感知和有限感知设备的包传输性能下降。Yi^[29]提出了一种利用 RSU 感知信息进行智能交叉口 V2X 通信的半持久调度方法, 结果表明, 该方案可以降低数据包冲突率, 提高接收数据包质量, 从而提高数据传输效率。通过 LIEN^[30]的仿真研究可以看到, 虽然错误传播与 Mode 2 的两级的 SCI(1st-stage SCI 和 2nd-stage SCI)有关, 但可以安排两个 SCI 的资源尽可能接近, 从而减少错误。

3 结论及展望

本文结合标准最新进展, 同时对现有的 C-V2X 资源调度方法研究进行了总结。虽然 C-V2X 相关资源调度方法已经取得了阶段性的研究成果, 但仍面临着巨大挑战:

1) 资源碰撞

当一个 UE 和另外一个 UE 在相同的资源(同子信道同子帧)上传送时, 会产生资源的碰撞, 它取决于 C-V2X 的 SPS 方案的配置, 以及传输参数、传播、收发机距离和流量密度。由于信噪比较小, 这种由资源碰撞所产生的干扰会影响接收机正确接收数据包。

2) 隐藏终端

UE1 向 UE2 发送信息, UE3 未侦测到 UE1 的存在, 进而也向 UE2 发送。故 UE1 和 UE3 同时将信号发送至 UE2, 进而引起信号冲突, 最终导致发送至 UE2 的信号都丢失。此类问题一般是由于距离太远而导致一个站点无法检测到竞争对手的存在所引起的, 特别是在终端自主选择模式下, 该问题尤为突出。文献[31]提出一个基于地理位置来分配资源的思路。

3) 拥塞控制

在 UE 密度较大的场景下, 如出行的高峰、发生交通事故的地方, 较多的 UE 会产生非常多的 V2X 消息且有些 V2X 消息的发送频率较高, 会有大量的 V2X 消息需要传输。但资源是有限的, 很大概率会发生拥塞现象。

4) 资源复用

为提高频谱利用率, 同一个无线资源可以同时被安排到一个小区内的多个 UE 上, 但前提是 UE 之间的距离足够合适, 不能产生干扰。此外, 还要考虑服务质量、小区吞吐量等问题, 保证网络公平有序地运行。资源复用目前基本集中在 Mode 3 模式下, 如通过在不同车辆之间的资源复用来实现最大化小区的吞吐量。该类问题目前在 Mode 4 模式下少有人研究, 有较大的研究空间。

参考文献:

- [1] 张驰. 车载网络中的数据分发策略[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(5):85-89. (ZHANG Chi. Data dissemination scheme for Vehicular Ad Hoc Networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(5):85-89.)
- [2] 3GPP. Study on LTE support for Vehicle to Everything(V2X) services:TR 22.885[S]. 2015.
- [3] 3GPP. Architecture enhancements for V2X services:TS 23.285[S]. 2020.
- [4] CHEN S,HU J,SHI Y,et al. Vehicle-to-Everything(V2X) services supported by LTE-based systems and 5G[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017,1(2):70-76. doi:10.1109/MCOMSTD.2017.1700015.
- [5] FODOR G,DO H,ASHRAF S A,et al. Supporting enhanced vehicle-to-everything services by LTE Release 15 systems[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2019,3(1):26-33. doi:10.1109/MCOMSTD.2019.1800049.
- [6] ASHRAF S A,BLASCO R,DO H,et al. Supporting Vehicle-to-Everything services by 5G new radio release 16 systems[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2020,4(1):26-32. doi:10.1109/MCOMSTD.001.1900047.
- [7] 陈山枝,胡金玲,时岩,等. LTE-V2X 车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学, 2018,34(4):7-17. (CHEN Shanzhi,HU Jinling,SHI Yan,et al. Technologies, standards and applications of LTE-V2X for vehicular networks[J]. Telecommunication Science, 2018,34(4):7-17.)
- [8] 李艳芬,朱雪田. 面向 LTE-V 调度方法研究[J]. 电子技术应用, 2019(9):8-12. (LI Yanfen,ZHU Xuetian. Research on LTE-V scheduling method[J]. Application of Electronic Technique, 2019(9):8-12.)
- [9] 3GPP. Study on LTE-based V2X Services:TS 36.885[S]. 2016.

- [10] CECCHINI G,BAZZI A,MASINI B M,et al. Localization-based resource selection schemes for network-controlled LTE-V2V[C]// 2017 International Symposium on Wireless Communication Systems(ISWCS). Bologna,Italy:IEEE,2017:96-401.
- [11] CECCHINI G,BAZZI A,MENARINI M,et al. Maximum reuse distance scheduling for cellular-V2X sidelink mode 3[C]// 2018 IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps). [S.l.]:IEEE, 2018:1-6. doi:10.1109/GLOCOMW.2018.8644360.
- [12] FRITZSCHE R,FESTAG A. Location-based scheduling for cellular V2V systems in highway scenarios[C]// 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference(VTC Spring). Porto,Portugal:IEEE, 2018:1-5.
- [13] KIM J,LEE J,MOON S,et al. A position-based resource allocation scheme for V2V communication[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018,98(1):1569-1586.
- [14] ABANTO-LEON L F,KOPPELAAR A,DE-GROOT S H. Parallel and successive resource allocation for V2V communications in overlapping clusters[C]// 2017 IEEE Vehicular Networking Conference(VNC). [S.l.]:IEEE, 2017:223-230.
- [15] GONZÁLEZ A,VILLAMIL A,FRANCHI N,et al. String stable CACC under LTE-V2V mode 3:scheduling periods and transmission delays[C]// 2019 IEEE 2nd 5G World Forum(5GWF). Dresden,Germany:IEEE, 2019:292-297.
- [16] SAHIN T,BOBAN M. Radio resource allocation for reliable out-of-coverage V2V communications[C]// 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference(VTC Spring). Porto,Portugal:IEEE, 2018. doi:10.1109/VTCSpring.2018.8417747.
- [17] BAZZI A,CECCHINI G,ZANELLA A,et al. Study of the impact of PHY and MAC parameters in 3GPP C-V2V mode 4[J]. *IEEE Access*, 2018(6):71685-71698. doi:10.1109/VTCSpring.2018.8417747.
- [18] NABIL A,KAUR K,DIETRICH C,et al. Performance analysis of sensing-based semi-persistent scheduling in C-V2X networks[C]// 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference(VTC-Fall). Chicago,IL,USA:IEEE, 2018:1-5.
- [19] MOLINA-MASEGOSA R,GOZALVEZ J,SEPULCRE M. Configuration of the C-V2X Mode 4 sidelink PC5 interface for vehicular communication[C]// 2018 14th International Conference on MSN. Shenyang,China:IEEE, 2018:43-48.
- [20] MOLINA-MASEGOSA R,GOZALVEZ J. System level evaluation of LTE-V2V mode 4 communications and its distributed scheduling[C]// 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference(VTC Spring). Sydney,NSW,Australia:IEEE, 2017:1-5.
- [21] GONZALEZ-MARTIN M,SEPULCRE M,MOLINA-MASEGOSA R,et al. Analytical models of the performance of C-V2X mode 4 vehicular communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018,68(2):1155-1166.
- [22] TOGHI B,SAIFUDDIN M,MAHJOUR H N,et al. Multiple access in cellular V2X:performance analysis in highly congested vehicular networks[C]// 2018 IEEE Vehicular Networking Conference(VNC). [S.l.]:IEEE, 2018:1-8.
- [23] MOLINA-MASEGOSA R,GOZALVEZ J. LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications:a new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2017,12(4):30-39.
- [24] JEON Y,KUK S,KIM H. Reducing message collisions in sensing-based semi-persistent scheduling(SPS) by using reselection lookaheads in cellular V2X[J]. *Sensors*, 2018,18(12):4388.
- [25] BONJORN N,FOUKALAS F,CAÑELLAS F,et al. Cooperative resource allocation and scheduling for 5G V2X services[J]. *IEEE Access*, 2019(7):58212-58220. doi:10.1109/ACCESS.2018.2889190.
- [26] HE J,TANG Z,FAN Z,et al. Enhanced collision avoidance for distributed LTE vehicle to vehicle broadcast communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018,22(3):630-633. doi:10.1109/LCOMM.2018.2791399.
- [27] HIRAI T,MURASE T. NOMA-aided probabilistic cooperative transmission for PC5-based cellular V2X mode 4 for crash warning[J]. *IEEE Access*, 2021(9):62602-62615. doi:10.1109/ACCESS.2021.3073731.
- [28] YOON Y,SEON H,KIM H. A defensive scheduling scheme to accommodate random selection devices in 5G NR V2X[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021. doi:10.1109/LCOMM.2021.3057451.
- [29] YI S,SUN G,WANG X. Enhanced resource allocation for 5G V2X in congested smart intersection[C]// 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference(VTC2020-Fall). [S.l.]:IEEE, 2020:1-5.
- [30] LIEN S Y,DENG D J,LIN C C,et al. 3GPP NR sidelink transmissions toward 5G V2X[J]. *IEEE Access*, 2020(8):35368-35382.
- [31] MOLINA-MASEGOSA R,SEPULCRE M,GOZALVEZ J. Geo-based scheduling for C-V2X networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019,68(9):8397-8407. doi:10.1109/TVT.2019.2924698.

作者简介：

王巨震(1990-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为无线通信、车联网关键技术.email:wangjuzhen@whu.edu.cn.

李德识(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为传感器网络、无线通信、智能系统.