

DOI:10. 20079/j. issn. 1001-893x. 210930002

引用格式:王致远,刘留,樊圆圆,等. 一种基于拥塞等级划分的 LTE-V 资源碰撞避免机制[J]. 电讯技术,2023,63(2):226-232. [WANG Z Y, LIU L,FAN Y Y, et al. A resource collision avoidance mechanism of LTE-V based on congestion level division[J]. Telecommunication Engineering,2023,63(2):226-232.]

一种基于拥塞等级划分的 LTE-V 资源碰撞避免机制*

王致远,刘 留,樊圆圆,庄凌凡,刘美鹭

(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

摘 要:为了降低车联网(Long Term Evolution-Vehicle to Everything,LTE-V)终端间的相互干扰并提升通信的可靠性,提出通过资源分配和拥塞控制来解决资源碰撞的问题。依据信道忙率(Channel Busy Ratio,CBR)划分拥塞等级,融合资源分配与拥塞控制提出相应的方案,形成资源碰撞避免机制。为了减少重选资源时发生的碰撞,提出了资源重选竞争退避机制以降低重选带来的不确定性;针对拥塞导致的碰撞,改变调制编码策略从而优化资源占用。仿真结果表明,与标准中基于感知的半持续调度(Semi-persistent Scheduling,SPS)相比,所提出的机制在传输距离为 300 m 时可以实现 0.85 以上的数据包投递率,有效减少资源碰撞,提升传输可靠性。

关键词:车联网(LTE-V);PC5 接口;资源碰撞;资源调度;拥塞控制

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN929.5;TP393 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2023)02-0226-07

A Resource Collision Avoidance Mechanism of LTE-V Based on Congestion Level Division

WANG Zhiyuan,LIU Liu,FAN Yuanyuan,ZHUANG Lingfan,LIU Meilu

(School of Electronic and Information Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China)

Abstract:In the Long Term Evolution-Vehicle to Everything(LTE-V) system,to reduce mutual interference between terminals and improve the reliability of communication,it is proposed to reduce resource collisions through resource allocation and congestion control. The channel occupancy is divided into different congestion levels according to the channel busy ratio(CBR). The corresponding schemes are proposed by integrating resource allocation and congestion control to form a resource collision avoidance mechanism. To reduce the collisions of reselecting resources and the uncertainty caused by reselection, a resource reselection competition back off mechanism is proposed. For collisions caused by congestion,the modulation and coding scheme is changed to optimize resource occupancy. Simulation results demonstrate that the proposed mechanism can achieve a packet delivery ratio above 0.85 when the transmission distance is 300 m. It can effectively reduce resource collisions and improve transmission reliability in comparison with the sensing-based Semi-persistent Scheduling(SPS) proposed in the specification.

Key words: Long Term Evolution-Vehicle to Everything (LTE-V); PC5 interface; resource collision; resource scheduling; congestion control

* 收稿日期:2021-09-30;修回日期:2022-01-04
基金项目:国家自然科学基金重点项目(61931001)
通信作者:刘留

0 引言

近年来,机动车数量快速增长,日益严重的交通拥堵和不断增加的交通事故逐渐成为制约城市发展和威胁出行安全的重要问题。车联网技术被认为是提升交通效率和驾驶安全的有效手段,但是复杂的道路交通场景、快速变化的网络拓扑和多样的业务需求阻碍着车联网技术的发展。LTE (Long Term Evolution) 由于其高数据速率、全面的服务质量保证和大覆盖率在提供车联网通信方面具有优势, Chen 等^[1]提出 LTE-V2X (Long Term Evolution-Vehicle to Everything) 的概念和关键技术,致力于实现车辆与周围的车、基础设施、网络和行人等全方位连接和高可靠低时延的信息交互^[2-3]。

LTE-V2X 中提供蜂窝通信方式和直通通信方式两种通信方式,这两种通信方式的区别主要在于资源分配方式^[4]。在蜂窝通信方式中,采用基于基站控制的集中资源调度方式 (Uu 接口), 基站拥有全局资源占用情况信息,能够避免资源冲突,但是其仅限于在蜂窝覆盖的场景下使用。为了车联网能够在蜂窝覆盖外工作, LTE-V2X 引入了直通通信方式 (PC5 接口), 各终端提前对信道进行感知, 根据感知的结果选择未被占用的资源传输。但由于 PC5 接口采用分布式资源分配方式,可能会出现邻近两个终端选择相同资源的情况,这将造成接收端信噪比急剧下降而无法正常接收。

在 LTE-V2X 中,解决 PC5 接口资源碰撞问题是当前热门的研究方向,该类研究目前主要分为改进资源调度算法和设计拥塞控制方法两种情况。其中,前者的作用是更加合理有序地分配时频资源,后者的作用是在信道拥塞时使得系统恢复到正常的负载水平,保障系统的稳定运行,从而避免资源碰撞。对于改进资源调度算法,文献[5]为了减少资源重选所带来的不确定性,提出在控制信息中加入“lookahead”信息,其中包含了下次使用资源的时频位置与大小,但目前控制信息中未使用的比特位数较少,难以实现。文献[6]提出了使用控制信息中的 1 位来表示是否将进行资源重选,易于实现,但对重选后的资源位置仍存在较大的不确定性。文献[7]提出对资源池进行再划分,针对城区路口将资源池划分为三块,分配给交叉路口、水平街道、垂直街道,处于不同位置的车辆使用不同的资源池,并根据流量密度灵活分配资源。文献[8]提出在高速公路场景下将资源池划分为两个子资源池,以减少相反方向车辆用户之间的潜在干扰。文献[9]对重选

概率、信号接收功率阈值等进行研究,提出 PC5 接口在目前算法上的最佳参数配置。文献[10]提出在传输较大的数据时,不预留子信道以提升资源利用率。对于设计拥塞控制方法,标准中给出了 5 种基本拥塞控制方法,即降低最大发射功率、关闭盲重传、降低占用子信道数量、调整调制编码范围、降低信道占用率上限^[11]。文献[6]提出了一种放弃资源传输时间及次数的拥塞控制策略并进行仿真验证。当前主流研究仅考虑从资源分配或者拥塞控制的单一角度提出固定的算法,所提出的算法降低了资源碰撞概率,但也会带来一些问题,如产生信令开销和增大时延等^[12-14]。因此,不应在所有拥塞情况下使用相同的算法。

本文提出一种基于拥塞等级划分的资源碰撞避免机制,根据信道忙率将信道拥塞程度划分为低、中、高三等级,在信道拥塞程度低的情况下仍使用基于感知的 SPS 算法;在信道拥塞程度中的情况下,本文提出了资源重选竞争退避机制以减少重选资源造成的碰撞;当信道拥塞程度上升到高时,在采取资源重选竞争退避机制的基础上,改变调制编码策略 (Modulation and Coding Scheme, MCS) 以减少信道拥塞造成的碰撞。

1 LTE-V2X 关键技术

1.1 时频资源划分

LTE-V2X 在时域上每 10 ms 划分为一个无线帧,每个无线帧由 10 个长度为 1 ms 的子帧构成,一个子帧包含 2 个长度为 0.5 ms 的时隙;在频域上,子载波间隔为 15 kHz,使用的频段为 5 905~5 925 MHz 共 20 MHz 带宽,车载单元使用前 10 MHz 进行发送,路侧单元使用后 10 MHz 进行发送。时域 1 个时隙和频域 12 个连续子载波构成一个资源块 (Resource Block, RB), 每个 RB 的带宽为 $15\text{ kHz} \times 12 = 180\text{ kHz}$ 。LTE-V2X 的子信道 (Sub-Channel, SC) 为同一个子帧中的若干 RB。图 1 所示为 V2X 时频资源池示意图。

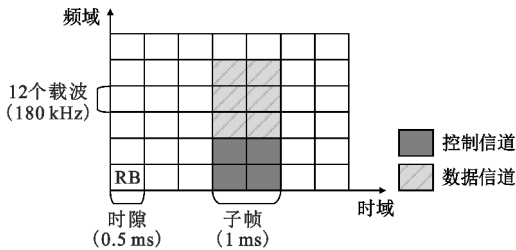


图 1 V2X 时频资源池

1.2 物理信道

在时频资源划分的基础上,LTE-V2X PC5 接口物理信道对应一组携带高层信息的资源元素。这里主要介绍控制信道 (Physical Sidelink Control Channel, PSCCH) 和共享信道 (Physical Sidelink Share Channel, PSSCH)。PSCCH 和 PSSCH 在时域上处于同一个子帧,在频率上采用相邻的频率资源发送,如图 1 所示。PSSCH 用于承载实际的 V2X 消息,其占用的 RB 由 PSCCH 上携带的控制信息 (Sidelink Control Information, SCI) 指示;PSCCH 携带 SCI 信息,指示了包括优先级、调制编码策略以及初、重传占用的 RB 等。SCI 信息对应比特位数如表 1 所示^[15],其中 N_{subCH} 为子信道个数。

表 1 SCI 信息与所占比特位数

SCI 信息	所占比特位数
优先级	3
资源预留间隔	4
初、重传频域位置	$x = \lfloor \lg(N_{\text{subCH}}(N_{\text{subCH}} + 1)/2) \rfloor$
初、重传时域间隔	4
调制编码策略	5
重传参数	1
保留位	$15 - x$

1.3 资源分配方式

在 LTE-V2X PC5 接口下,资源池是 PSCCH/PSSCH 发送和接收的候选物理时频资源集合,其资源分配方式采用基于感知的 SPS 方式^[2]。当终端在选择资源时,首先感知信道,以参考信号接收功率 (Reference Signal Receiving Power, RSRP) 作为信道感知参数。当在资源块上成功解调 PSCCH 时,说明存在其他终端正在使用该资源块,并且该资源块上 RSRP 高于门限,说明使用该资源块的终端在本终端附近。因此,终端应排除同时满足以下条件的资源块:在此资源块上成功解调 PSCCH;数据信道 RSRP 大于设定的门限。

在排除已被占用的资源后,将剩下资源中参考信号强度指示 (Received Signal Strength Indication, RSSI) 最小的 20% 资源块放入候选资源集合。终端在候选资源中随机选择资源块,用以发送信息,并且重选计数器 (Reselection Counter, RC) 将在 5 ~ 15 之间随机选择占用此资源的次数。当达到占用次数

时,将依据重选概率确定是否重选资源。需要注意的是,为了满足时延的要求,从开始资源重选到使用重选的资源发送之间的时间间隔应小于 100 ms。基于感知的 SPS 方式流程图^[16]如图 2 所示。

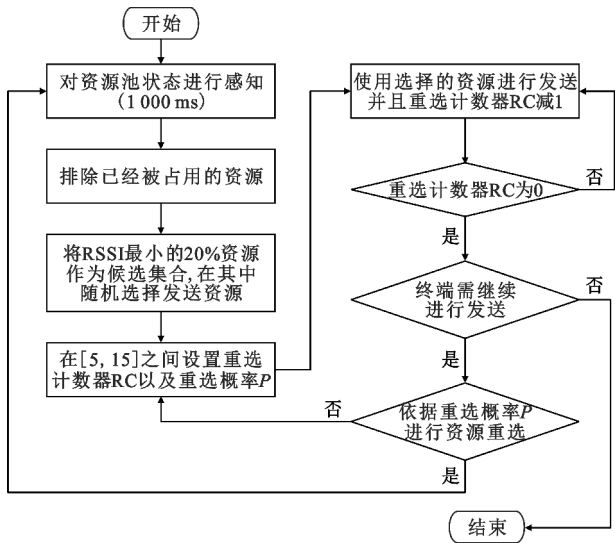


图 2 基于感知的 SPS 资源选择流程图

标准中为了避免发生资源碰撞问题,已在资源分配方式中引入了提前感知过程和随机化设计,但当出现以下情况时仍不可避免地会出现资源碰撞问题,如:发生资源重选时其他节点无法预知本节点下一次使用资源的位置,信道拥塞时大部分资源都被占用等。文献[17]提出了 LTE-V2X 性能分析模型,其中将资源碰撞概率 δ_{COL} 表示为

$$\delta_{\text{COL}}(d_{t,r}) = 1 - \prod_i (1 - \delta_{\text{COL}}^i(d_{t,r}, d_{t,i}, d_{i,r}))。$$
 (1)

式中: t 表示发送节点; r 表示接收节点; i 表示干扰节点; $d_{t,r}$ 表示发送节点和接收节点的距离; $d_{t,i}$ 表示发送节点和干扰节点的距离; $d_{i,r}$ 表示干扰节点和接收节点的距离; δ_{COL}^i 为由于干扰节点 i 引起的碰撞丢包概率,可以表示为

$$\delta_{\text{COL}}^i(d_{t,r}, d_{t,i}, d_{i,r}) = p_{\text{INT}}(d_{t,r}, d_{i,r}) p_{\text{SIM}}(d_{t,i})。$$
 (2)

式中: p_{INT} 为干扰节点在接收节点上的干扰高于阈值的概率,与距离、传播有关; p_{SIM} 为发送节点和干扰节点选择相同资源的概率,与资源调度、拥塞控制有关,可以表示为

$$p_{\text{SIM}}(d_{t,i}) = (1 - (1 - 1/\tau) P_{\text{SEN}}(d_{t,i})) \frac{C_c(d_{t,i})}{N_c^2}。$$
 (3)

式中: τ 为传输频率; $P_{\text{SEN}}(d_{t,i})$ 为发送节点和干扰节

点可以互相感知到的概率; $C_c(d_{i,i})$ 为发送节点和干扰节点的公共候选资源数; N_c 为发送节点的候选资源数。

2 资源碰撞避免机制系统模型

为了避免由资源重选和信道拥塞所带来的资源碰撞问题,本文依据信道忙率进行信道拥塞等级划分,针对不同的拥塞等级采取相应的资源碰撞避免方法。其中,设计资源重选竞争退避机制以减少由资源重选所导致的资源碰撞问题,改变调制编码策略以降低信道负载,缓解拥塞问题。

2.1 资源重选竞争退避机制

为了减少资源重选所导致的碰撞问题,可通过在控制信道中添加信息来减少资源重选的不确定性。文献[5]提出在控制信道中添加指示重选资源时频位置和大小的三个数字,但 SCI 信息中比特位数较少,难以实现。文献[6]提出使用 SCI 信息中的 1 位来表示是否将重选资源,但对重选后使用资源的位置未知,仍存在较大的不确定性。

为了以较少的控制信息最大程度地减少资源重选所带来的不确定性,本文提出资源重选竞争退避机制,终端提前确定资源重选的位置,将重选资源与重选前最后一次传输资源的时间间隔添加到重选前最后一次传输的控制信息中,各终端根据重选的先后顺序执行竞争退避机制。由 1.3 节可知,为了满足时延要求,重选资源和重选前最后一次传输资源的时间间隔应在 100 ms 以内,因此以 ms 为单位需要 7 个比特即可指示此时间间隔。同时考虑到子信道划分的差异,SCI 信息中初、重传频率位置指示所占比特在 0~8 之间,因此将有 7~15 b 未被使用^[18]。综上,本文选取 SCI 信息中 7 个尚未使用的比特作为“资源重选位置”(Resource Reselection Location, RRL),用于指示重选资源和重选前最后一次传输的时间间隔,其字段含义如表 2 所示。

表 2 “资源重选位置”字段含义	
“资源重选位置”字段	含义
0000000	非 RC 为 0 的传输
0000001~1100100	本字段十进制表示重选资源与当前资源的时域间隔 (ms)
1111111	采取退避机制,将再次重选资源

竞争退避机制基本思想如下:

(1) 当终端的重选计数器 RC 达到 2 时,此时根据重选概率 P 提前确定是否重选资源;若不重选资源,则在 [5,15] 中随机选择一个数将其加到 RC 中;若重选资源,需在 RC 达到 1 前,对信道感知并确定重选资源的位置。

(2) 确定重选资源后,监测在 RC 达到 0 以前是否有其他终端选择相同资源,若没有,在 RC 为 0 的传输中将重选资源和此次传输资源的时间间隔添加到 SCI 信息“RRL”中,并在之后使用选择的资源进行传输;若有,则在 RC 为 0 的传输中将“RRL”置为全 1,重新对信道进行感知后再次选择资源。

该机制流程中,当重选计数器 RC 为 2 时,终端将进行图 3 所示流程。终端间对资源进行竞争退避的示意图如图 4 所示。

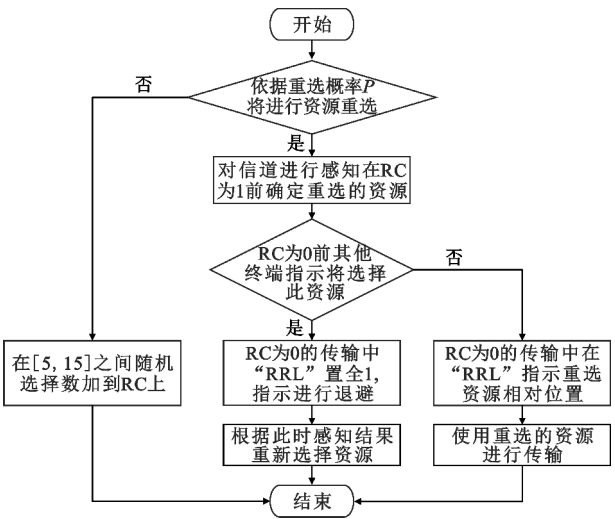


图 3 资源重选竞争退避机制流程图

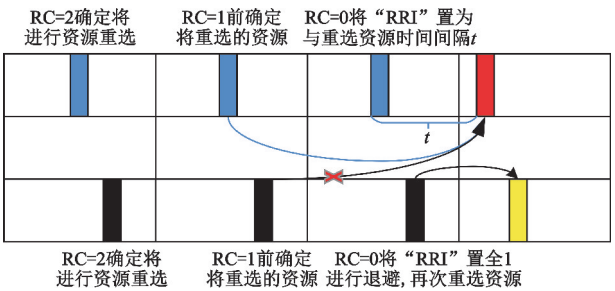


图 4 资源重选竞争退避机制示意图

上述机制将带来以下优势:提前确定重选的资源并将其时域相对位置写入重选前传输的 SCI 信息中,当有多个终端同时选择相同资源,根据先后顺序执行竞争退避机制,采取退避机制的终端再次选择

资源时也能够充分了解到哪些资源将被占用。因此,发送节点和干扰节点选择相同资源的概率 $p_{\text{SIM}}(d_{t,i})$ 表示为

$$p_{\text{SIM}}(d_{t,i}) = (1 - P_{\text{SEN}}(d_{t,i})) \frac{C_c(d_{t,i})}{N_c^2} \quad (4)$$

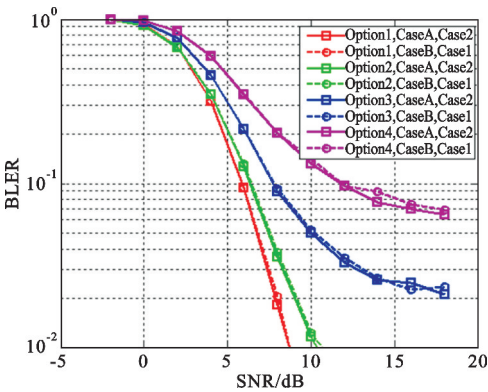
同式(3)相比,本文机制有效减少了资源重选所带来的碰撞问题。并且,该机制利用 SCI 信息中尚未使用的比特,无需变更控制信息格式,易于实现。该机制存在的弊端为由于提前选择资源,感知窗较 SPS 机制有所缩小,将产生一些资源碰撞问题,但相比而言,在信道繁忙的情况下,资源重选所带来的不确定性是产生资源碰撞的主要原因之一。

2.2 调制编码策略

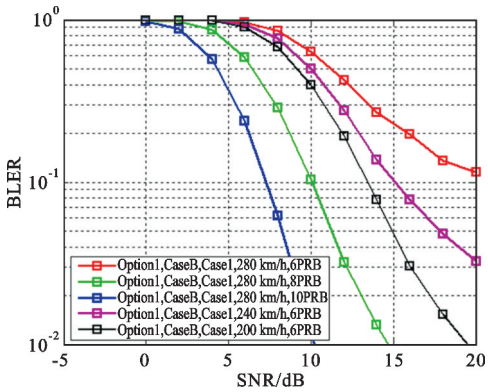
LTE-V2X 中支持 QPSK 和 16QAM 两种调制方式,当不拥塞时,考虑使用 QPSK 方式,提高传输的可靠性;当拥塞时,考虑使用 16QAM 方式,减少传输占用的资源,减轻信道负载。发送节点和干扰节点选择相同资源的概率 $p_{\text{SIM}}^{\text{new}}(d_{t,i})$ 表示为

$$p_{\text{SIM}}^{\text{new}}(d_{t,i}) = (1 - (1 - 1/\tau)P_{\text{SEN}}(d_{t,i})) \frac{C_c^{\text{new}}(d_{t,i})}{(N_c^{\text{new}})^2}, \quad (5)$$

由于采用 16QAM 方式,传输占用更少的资源,公共候选资源数 C_c^{new} 和发送节点候选资源数 N_c^{new} 都得到了提升,降低了发送节点和干扰节点选择相同资源的概率,进而减少了资源碰撞概率。关于具体调制编码策略的选择,文献[19]中仿真了相对速度 280 km/h 的车对车 (Vehicle-to-Vehicle, V2V) 通信,分别采取 QPSK 和 16QAM 方式传输 190 B,结果如图 5 所示。图 5(a)是码率为 0.5 下 QPSK 的仿真结果,当前标准中 V2X 配置对应图中红色虚线,信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 为 6 时误块率 (Block Error Rate, BLER) 达到 0.1 以下,SNR 为 8 时 BLER 达到 0.02,具有较高的可靠性,因此考虑使用 QPSK 时码率设为 0.5。图 5(b)是不同码率下 16QAM 的仿真结果,当码率为 0.5 将占用 6 个 RB,此时在图中为红色曲线,存在差错基底,影响传输质量,而当码率为 0.4 将占用 8 个 RB,此时在图中为绿色曲线,差错基底消失,当 SNR 为 14 时 BLER 达到 0.02 以下,因此考虑使用 16QAM 时码率设为 0.4。



(a) $r=0.5$ QPSK 方式仿真结果



(b) 不同码率 16QAM 方式仿真结果

图 5 相对速度 280 km/h 的 V2V 通信仿真结果

2.3 基于拥塞等级划分的资源碰撞避免机制

本文根据 CBR 划分信道拥塞程度,并采取相应的措施,如表 3 所示。初始配置为基于感知的 SPS 机制,使用的调制编码策略为 QPSK, $r=0.5$;调整后的调制编码策略为 16QAM, $r=0.4$ 。

表 3 拥塞等级划分对应机制

拥塞等级	衡量标准	资源碰撞避免机制
低	$0 \leq \text{CBR} \leq 0.3$	不采用资源碰撞避免机制
中	$0.3 < \text{CBR} \leq 0.6$	采取资源重选竞争退避机制
高	$0.6 < \text{CBR}$	采取资源重选竞争退避机制 + 改变调制编码策略

3 仿真与分析

本节通过 Matlab 仿真所提出的机制,将不同拥塞程度下的仿真结果同标准中基于感知的 SPS 结果进行对比,以此验证算法的性能。基于 Gonzalez-Martin 等^[17]提出的分析模型,交通环境选取双向四

车道高速公路场景,长为 5 km,设置车辆最大行驶速度为 140 km/h,即最大相对速度为 280 km/h;V2V 业务选取基本安全消息^[20](Basic Safety Message,BSM),其为向外部传播车辆基本参数和运行状态的一种消息,具有固定大小和周期广播发送的特点,通信范围应不小于 300 m,仿真参数配置如表 4 所示。

表 4 V2V 仿真参数配置

参数名称	设置
中心频点/GHz	5.91
信道带宽/MHz	10
传输功率/dBm	23
信道模型	WINNER+ B1 ^[21]
信号接收范围/m	500
车载天线高度/m	1.5
车辆最大相对速度/(km/h)	280
业务类型	BSM
数据包发送频率/Hz	10
数据包大小/B	190

为了评估算法的性能,本文选取碰撞率和数据包投递率作为主要评价指标。

(1)碰撞率(Collision Ratio,CR),定义为发生资源碰撞链路数与链路总数的比值,计算公式如下:

$$p_{CR} = \frac{L_{collided}}{L_{total}} \quad (6)$$

式中: $L_{collided}$ 是发生资源碰撞的链路数; L_{total} 是链路的数量。

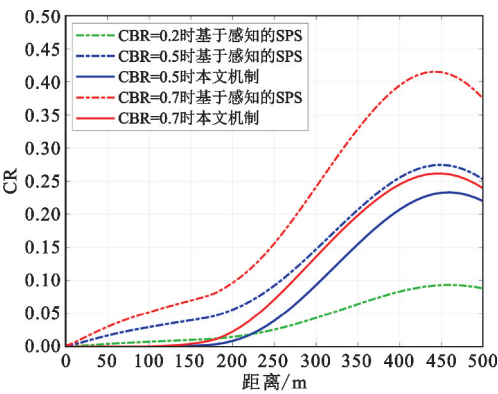
(2)数据包投递率(Packet Delivery Ratio,PDR),定义为所有发送的数据包中成功接收的数据包数量与全部数据包数量的比值,计算公式如下:

$$p_{PDR} = \frac{N_{success}}{N_{total}} \quad (7)$$

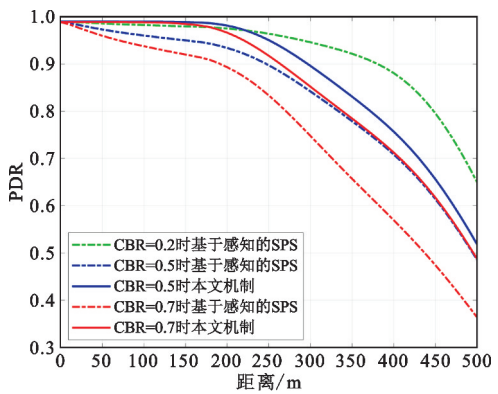
式中: $N_{success}$ 为成功接收的数据包数量; N_{total} 为全部数据包的数量。

当拥塞等级低时,采用基于感知的 SPS 方式。当 CBR=0.2 时,在 500 m 以内,碰撞率均低于 0.1,在 370 m 以内 PDR 高于 0.9,在 450 m 以内 PDR 高于 0.8,具有较好的覆盖。当拥塞等级中时,采用资源重选竞争退避机制,并与基于感知的 SPS 进行对比。当 CBR=0.5 时,采取资源重选竞争退避机制后,碰撞率较 SPS 机制降低了约 5%,并且直通链路的典型传输距离要求为 300 m^[2],本文提出的机制

在 300 m 内 PDR 可达 0.9 以上,在 370 m 以内 PDR 达 0.8 以上。当拥塞等级高时,在采取资源重选竞争退避机制的基础上,改变调制编码策略为 $r=0.4$ 的 16QAM,并与基于感知的 SPS 进行对比。当 CBR=0.7 时,本文提出的机制较 SPS 机制碰撞率降低了约 12%,CBR 降为 0.48,在 260 m 的范围内 PDR 可达到 0.9 以上,在 300 m 的范围内 PDR 可达到 0.85 以上。仿真结果如图 6 所示。



(a)不同拥塞程度下的 CR



(b)不同拥塞程度下的 PDR

图 6 不同拥塞程度下的 CR 和 PDR 仿真结果

综上所述,本文所提出的机制有效减少了资源碰撞,提高了传输的可靠性,提升了通信质量,扩大了覆盖范围。

4 结束语

针对车联网中资源选择冲突导致无法正常接收的问题,本文提出了一种资源碰撞避免机制。该机制融合了资源分配与拥塞控制,从资源分配角度设计资源重选竞争退避机制,在拥塞控制中采取改变调制编码策略,并通过划分信道拥塞等级,对不同拥塞等级的信道采取相应的碰撞避免措施。仿真结果

表明,本文所提出的机制具有更低的资源碰撞率和更高的数据包投递率,优于标准中基于感知的半持续调度方式,为车联网场景下通信高可靠目标的实现提供了一种有效方案,具有一定的工程应用价值。后续将在本文机制的基础上,研究存在隐藏终端时如何避免可能发生的资源碰撞,从而进一步降低终端间的干扰,提升通信的可靠性。

参考文献:

[1] CHEN S Z,HU J L,SHI Y,et al. LTE-V;a TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network [J]. IEEE Internet of Things Journal,2016,3(6):997-1005.

[2] 陈山枝,胡金玲,赵丽,等. 蜂窝车联网(C-V2X) [M]. 北京:人民邮电出版社,2021.

[3] 刘宗巍,匡旭,赵福全. V2X 关键技术应用与发展综述 [J]. 电讯技术,2019,59(1):117-124.

[4] 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):1-11.

[5] 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):4388-4410.

[6] 孙博伦. LTE-V2X 车联网 PC5 接口碰撞避免机制研究 [D]. 北京:北京交通大学,2020.

[7] 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.

[8] 余翔,陈晓东,王政,等. 基于 LTE-V2X 的车联网资源分配算法 [J]. 计算机工程,2021,47(2):188-193.

[9] MOLINA-MASEGOSA R, GOZALVEZ J, SEPULCRE M. Configuration of the C-V2X Mode 4 sidelink PC5 interface for vehicular communications [C]// Proceedings of 2018 14th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Shenyang:IEEE, 2018:43-48.

[10] 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.

[11] 3GPP. Radio resource control: 3GPP TS 36. 331 v14. 7. 0 [S]. Valbonne: 3GPP Support Office, 2018: 595-610.

[12] EL-GAWAD A,MOHAMED A,ELSHARIEF M,et al. A cooperative V2X MAC protocol for vehicular networks

[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking,2019(1):1-24.

[13] 张晨璐,李佳林,姜炜,等. V2X 通信中基于车辆分簇的资源分配机制 [J]. 计算机应用与软件,2021,38(1):128-134.

[14] LIU X, JAEKEL A. Congestion control in V2V safety communication: problem, analysis, approaches [J]. Electronics,2019,8(5):540-563.

[15] 3GPP. Multiplexing and channel coding:3GPP TS 36. 212 v14. 6. 0 [S]. Valbonne: 3GPP Support Office, 2018:187-188.

[16] 陈山枝,时岩,胡金玲. 蜂窝车联网(C-V2X) 综述 [J]. 中国科学基金,2020,34(2):179-185.

[17] 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,2019, 68(2):1155-1166.

[18] BONJORN N, FOUKALAS F, CANELLAS F, et al. Cooperative resource allocation and scheduling for 5G eV2X services [J]. IEEE Access,2019,7:58212-58220.

[19] Huawei,Hisilicon. 3GPP R1-160284:DMRS enhancement of V2V [R]. St Julian ' s, Malta: 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84,2016.

[20] 马佳荣,王润民,张晋崇,等. 典型车联网基本安全消息机制分析 [J]. 汽车工程学报,2021,11(3):205-214.

[21] 3GPP. Study on LTE-based V2X services:3GPP TR 36. 885 v14. 0. 0 [S]. Valbonne: 3GPP Support Office, 2016:66-71.

作者简介:

王致远 男,1998 年生于江苏盐城,2020 年于北京交通大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为车联网无线通信技术。

刘 留 男,1981 年生于云南昆明,2010 年于北京交通大学获博士学位,现为教授,主要研究方向为车联网无线通信技术、无线信道测量与建模、5G 关键技术等。

樊圆圆 女,1997 年生于河南信阳,2019 年于北京交通大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线信道测量与建模、车联网无线通信技术。

庄凌凡 男,1997 年生于福建莆田,2019 年于北京交通大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为车联网无线通信技术。

刘美鹭 女,1998 年生于重庆,2021 年于北京交通大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为车联网无线通信技术。